UNIVERSIDAD EAFIT

SIATA

Informe Final

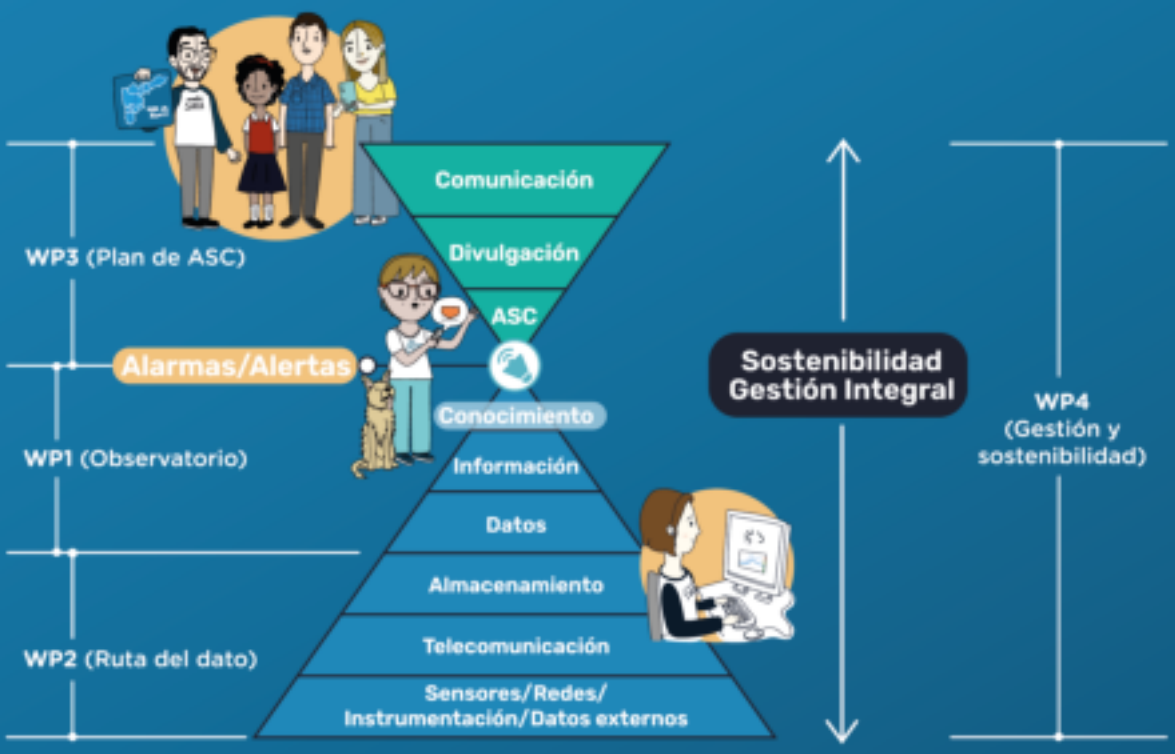
Resúmenes



CCT 016 *de 2024*

Elaborado por: Universidad EAFIT

Desarrollar actividades de **investigación aplicada, desarrollo tecnológico y apropiación social del conocimiento para la acción preventiva, la toma de decisiones oportuna para una gestión efectiva del riesgo** (incluyendo variabilidad y cambio climático), y el seguimiento y análisis integral de variables relacionadas con la calidad del aire en el territorio metropolitano, **apoyando el proceso de formulación de políticas públicas y el fortalecimiento de la gobernanza por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá**, garantizando el estricto cumplimiento de las actividades de carácter obligatorio reguladas por el marco legal vigente.



Contenido

Prefacio 1

Reporte de logros: porcentajes e indicadores 3

Resumen WP1: Observatorio de amenazas y riesgos 10

Resumen WP2: Ruta del dato 14

Resumen WP3: Plan de Apropiación Social del Conocimiento 17

Resumen WP4: Gestión y sostenibilidad de SIATA 18

WP1.1. Observación, pronóstico meteorológico y de calidad de aire, y proyecciones climáticas 21

WP1.1.1. Generación continua de pronósticos meteorológicos . . . 21

Parte I: Soporte al pronóstico operacional . . . 21

Parte II: Desempeño del pronóstico meteorológico operacional . . . 21

Parte III: Nuevas estrategias de pronóstico . . . 23

WP1.1.2. Evaluación de los efectos relacionados con el cambio climático a nivel local . . . 28

Parte I: Evaluación de índices basados en precipitación en el contexto de cambio climático . . . 28

Parte II: Evaluación del Índice Universal de Confort Térmico . . . 45

Parte III: Metodología de reducción de escala dinámica para lograr proyecciones de alta resolución a escala local sobre el Valle de Aburrá . . . 57

Parte IV: Cambios en los periodos de retorno de eventos extremos para el Valle de Aburrá y su región vecina . . . 69

WP1.1.3. Análisis integral de las variables y procesos ambientales que influyen en la calidad del aire . . . 78

Parte I: Modelo de pronóstico estadístico de PM2.5 . . . 78

Parte II: Modelación del transporte de contaminantes y química de la atmósfera usando el modelo WRF-Chem . . . 93

Parte III: Campañas de monitoreo de contaminantes atmosféricos criterio y no criterio . . . 100

WP1.1.4. Generación de pronósticos estadísticos que permitan prever eventos de crecientes extremas en el río Aburrá-Medellín y sus afluentes . . . 136

WP1.2. Estudio/modelación de amenaza/riesgo 159

WP1.2.1. (Amenaza meteorológica) Seguimiento, caracterización y evaluación de fenómenos hidrometeorológicos . . . 159

Parte I: Registros de ocurrencia de eventos . . . 159

Parte II: Pronóstico de la precipitación y la actividad eléctrica en el Valle de Aburrá a partir de información satelital de GOES16, usando una herramienta de inteligencia artificial . . . 162

Parte III: Monitoreo de fuentes de humedad hacia el territorio metropolitano . . . 181

Parte IV: Exploración de la influencia de la oscilación intraestacional de Madden-Julian en las condiciones hidrometeorológicas del Valle de Aburrá y su región vecina . . . 186

Parte V: Identificación y Seguimiento de Ondas Tropicales . . . 197

WP1.2.2. (Inundaciones, Sequías, Av. Torrenciales, Mov. Masa, Incendios) Optimización de los modelos hidrológicos e hidráulicos usados en el SIATA . . . 207

Parte I: Comparación de modelos hidrológicos en el Valle de Aburrá . . . 207

Parte II: Implementación del modelo WRF-Hydro en el Valle de Aburrá . . . 213

Parte III: Determinación de zonas de inundación por medio de simulación hidráulica (manchas de inundación) . . . 236

Parte IV: Monitoreo de niveles fréaticos para la optimización de modelos hidrológicos . . . 239

WP1.2.3. (Inundaciones) Desarrollo e implementación de un piloto para cuantificar y evaluar el riesgo por inundaciones . . . 244

WP1.2.4. (Sequías, Mov. Masa) Monitoreo y evaluación de movimientos en masa y cambios en el paisaje, con herramientas de teledetección . . . 253

WP1.2.5. (Av. Torrenciales) Evaluación de metodologías y modelos para el análisis de avenidas torrenciales 254

WP1.2.6. (Av. Torrenciales, Mov. Masa, Sismos) Implementación de metodologías para la caracterización del ruido sísmico . . . 256

WP1.2.7. (Mov. Masa) Evaluación de umbrales de lluvia como detonantes de movimientos en masa . . . 257

WP1.2.8. (Mov. Masa, Incendios) Evaluación de umbrales de humedad en el terreno como detonantes de eventos . . . 259

WP1.2.9. (Mov. Masa, Sismos) Modelación de la estabilidad de laderas . . . 260

WP1.2.10. (Mov. Masa, Sismos) Actualización y/o generación de insumos para el cálculo del riesgo sísmico . . . 261

WP1.2.11. (Sismos) Actualización y/o generación de insumos para el cálculo de afectaciones en edificios 269

WP1.2.12. (Calidad del aire) Seguimiento, caracterización y evaluación de variables de escala local y global relacionadas con la calidad del aire . . . 270

Aproximación a fuentes de contaminación atmosférica a partir de especies carbonáceas . . . 270

Red de Micrometeorología . . . 275

Rol de la turbulencia atmosférica durante el primer período de gestión de episodio de contaminación atmosférica de 2024 . . . 275

Investigación para CASAP 2025: Mezcla vertical nocturna de Ozono (O_3) en el Valle de Aburrá . . . 278

Investigación de Mecanismos Físicos Atmosféricos a partir de Simulaciones de Alta Resolución con el Modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model) . . . 283

Análisis de la variabilidad espacio-temporal del PM2.5 en las concentraciones del Valle de Aburrá, a partir de las mediciones de la Red de Ciudadanos Científicos en bicicleta . . . 302

Estudio de la formación de PM2.5 secundario en el Valle de Aburrá . . . 308

Revisión en la literatura de los mecanismos de reacción de los Modelos de Transporte Químico de Calidad del Aire . . . 308

Análisis del comportamiento de las concentraciones de los precursores (con registros en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá) y otras especies químicas constituyentes del PM2.5 secundario . . . 310

Análisis de las concentraciones de especies secundarias a partir de una campaña de caracterización química en el Valle de Aburrá . . . 314

Conclusiones . . . 316

Consideraciones para trabajos futuros . . . 317

WP1.2.13. (Inundaciones, Sequías, Av. Torrenciales, Mov. Masa, Sismos, Incendios) Desarrollo de metodologías para la clasificación de coberturas de suelo . . . 319

Parte I: Mapa de coberturas . . . 319

Parte II: Modelos de propagación de incendios forestales . . . 321

Parte III: Procesamiento de imágenes satelitales para monitoreo de condiciones de vegetación relacionadas con condiciones secas . . . 326

Parte IV: Monitoreo del estado de las condiciones meteorológicas relacionadas con incendios forestales y su pronóstico en el Valle de Aburrá . . . 329

Parte V: Análisis de variables hidrometeorológicas y su relación con la ocurrencia de incendios forestales 335

WP1.3. Insumos técnicos para herramientas operacionales/atención de emergencias 338

WP1.3.1. Revisión, análisis y evaluación de las capacidades existentes del proyecto para el acompañamiento en la atención de emergencias . . . 338

WP1.3.2. Desarrollo y mejoramiento continuo de herramientas operativas que permitan la generación de alertas . . . 374

WP2.1. Medición y seguimiento **378**

WP2.1.1. (Calidad del aire) Garantizar el cumplimiento de los requisitos de micro-localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire . . . 378

WP2.1.2. Garantizar el correcto funcionamiento de los sensores de monitoreo que hacen parte de las redes de monitoreo . . . 378

WP2.1.3. Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad de los datos 379

WP2.1.4. Generar información oportuna sobre amenazas . . . 380

WP2.1.5. Identificar e instalar nuevas estaciones de monitoreo en las diversas redes de monitoreo . . . 381

WP2.1.6. Llevar a cabo mantenimiento preventivo y correctivo de las estaciones en las diferentes redes de monitoreo . . . 383

WP2.1.7. Generar información oportuna sobre de los procesos físicos relacionados con la meteorología y climatología de la región. (Calidad del aire) Toda esta información soporta decisiones relacionadas con calidad del aire, especialmente durante los períodos de gestión de episodios, de manera que permitan definir la pertinencia de activar el POECA. . . . 385

WP2.1.8. Brindar apoyo a la Entidad en el monitoreo de puntos críticos . . . 386

WP2.1.9. Monitorear y capturar datos de interés a diferentes escalas temporales haciendo uso de VANTs 387

WP2.1.10. Brindar apoyo a la Entidad para el acompañamiento en la atención de emergencias . . . 387

WP2.2. Fortalecimiento **391**

WP2.2.1. (Calidad del aire) Implementar y fortalecer las estrategias tecnológicas, logísticas y operativas para garantizar el correcto funcionamiento de las redes de Calidad de Aire y Ruido Ambiental, y el programa de Ciudadanos Científicos . . . 391

WP2.2.2. Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad de los datos registrados en las redes hidrometeorológicas . . . 406

WP2.2.3. (Calidad del aire) Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad y validez de los datos registrados en la red de Calidad del Aire . . . 406

WP2.2.4. Gestionar el intercambio de la información registrada por todas las redes de monitoreo del proyecto SIATA a través de la respuesta a las solicitudes de información . . . 406

WP2.2.5. Proveer sostenibilidad a las redes . . . 407

WP2.2.6. Generar información oportuna sobre las consecuencias generadas por sismos . . . 407

WP2.2.7. Garantizar el seguimiento de las redes de monitoreo sísmico . . . 407

WP2.2.8. Fortalecer y desarrollar la infraestructura IT para la gestión del conocimiento y el cumplimiento de las actividades misionales . . . 411

WP2.2.9. Establecer un ecosistema tecnológico para la gestión de datos . . . 411

WP2.2.10. Optimizar los aplicativos de difusión de alertas en tiempo real . . . 415

WP2.2.11. Investigar, evaluar y fortalecer el uso de nuevas tecnologías (sensores para medición y protocolos de intercambio de información Internet de las Cosas - IoT) . . . 415

WP2.2.12. Propender por la actualización tecnológica, el mejoramiento y la densificación de las redes de monitoreo . . . 417

WP2.3. Innovación **421**

WP2.3.1. (Calidad del aire) Generar información complementaria a la Red de Monitoreo de Calidad de Aire, a partir de la implementación de campañas de medición de variables físicoquímicas . . . 421

WP2.3.2. Gestionar el intercambio de la información registrada por todas las redes de monitoreo del proyecto SIATA a través de la respuesta a las solicitudes de información . . . 421

WP2.3.3. Proveer mantenimiento preventivo y correctivo de las estaciones de las diferentes redes de monitoreo . . . 421

WP2.3.4. Generar información oportuna sobre de los procesos físicos relacionados con la meteorología y climatología de la región . . . 422

WP2.3.5. Avanzar en la implementación de técnicas de teledetección para el monitoreo de movimientos en masa . . . 422

WP2.3.6. Implementar sensores de humedad . . . 423

WP2.3.7. Propender por la sostenibilidad de las redes de monitoreo sísmico . . . 424

WP2.3.8. Fortalecer y desarrollar la infraestructura IT para la gestión del conocimiento y el cumplimiento de las actividades misionales . . . 424

WP2.3.9. Establecer un ecosistema tecnológico para la gestión de datos . . . 425

WP2.3.10. Monitorear y capturar datos de interés a diferentes escalas temporales haciendo uso de VANTs 426

WP2.3.11. Acondicionar los subsistemas de un VANT destinado a prevenir el riesgo en las labores de inspección en espacios confinados, estructuras en riesgos de colapso o de difícil acceso . . . 426

WP2.3.12. Identificar potenciales herramientas para la teledetección . . . 427

WP2.3.13. Investigar, evaluar y fortalecer el uso de nuevas tecnologías (sensores para medición y protocolos de intercambio de información IoT) . . . 428

WP2.4. Ciclo de vida del dato **430**

WP2.4.1. Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad de los datos 430

WP2.4.2. Proveer sostenibilidad a las redes . . . 430

WP2.4.3. Propender por el sostenimiento de las redes de monitoreo sísmico . . . 430

WP2.4.5. Monitorear y capturar datos de interés a diferentes escalas temporales haciendo uso de VANTs 431

WP2.4.5. Generar una infraestructura de almacenamiento con la información más relevante . . . 431

WP3.1. Comunicación **433**

WP3.1.1. Construir y ejecutar un Plan de Comunicaciones que incluya plan de medios masivos, pauta en redes y presupuesto . . . 433

Interacción y participación de la comunidad digital . . . 437

WP3.1.2. Gestionar el sitio web, Geoportal y aplicativos del proyecto SIATA . . . 437

WP3.1.3. Conceptualizar, diseñar y generar contenido técnico . . . 438

WP3.1.4. Generar espacios académicos y de intercambio de experiencias e información con otros modelos de CTeI . . . 445

WP3.1.5. Diseñar una estrategia piloto para la creación de un Laboratorio de Innovación Social y Deliberativa . . . 446

WP3.1.6. (Calidad del aire) Realizar campañas de sensibilización y difusión con la ciudadanía y los actores interesados . . . 448

WP3.2. Educación **460**

WP3.2.1. Potenciar los procesos de Apropiación Social del Conocimiento por medio de prácticas experienciales con públicos priorizados . . . 460

WP3.2.2. Fortalecer los procesos educativos de los Semilleros de Ciudadanos Científicos . . . 462

Procesos destacados de la estrategia Semilleros de Ciudadanos Científicos . . . 465

Ciencia para todos y todas: una apuesta desde la accesibilidad . . . 470

Fiesta de Ciencia Local . . . 474

Red de Investigación Escolar (RIE) . . . 476

WP3.2.3. Fortalecer los procesos educativos de la Red de Educadores Científicos . . . 478

WP3.2.4. Fortalecer la estrategia Territorio al Aire: diálogo de saberes . . . 487

WP3.2.5. Diseñar y construir material edu-comunicativo, lúdico y pedagógico con enfoque en inclusión 491

WP3.2.6. (Calidad del aire) Realizar procesos educativos y de transferencia del conocimiento . . . 501

WP3.3. Relacionamiento, articulación y gestión con actores estratégicos **503**

WP3.3.1. Adelantar procesos de articulación con organizaciones de carácter público y/o privado . . . 503

WP3.3.2. Fortalecer los procesos sociales con las comunidades y los públicos de interés . . . 504

WP3.3.3. Participar de diferentes espacios técnicos y de gobernanza . . . 521

WP3.3.4. Gestionar las estrategias y redes con grupos de interés para la identificación de potencialidades y la implementación de acciones . . . 522

WP3.3.5. Fortalecer los procesos con los gestores de riesgo, organismos de socorro, UMGRD y público de interés . . . 523



WP3.3.6. Apoyar al AMVA en los espacios de gobernanza donde se promuevan conversaciones ciudadanas 535

WP3.4. Gestión del conocimiento técnico y científico 537

WP3.4.1. Generar los boletines técnicos e informes especializados de cada uno de los componentes del proyecto . . . 537

WP3.4.2. Documentar, administrar y socializar procedimientos, protocolos y manuales de los diferentes procesos . . . 537

WP3.4.3. Responder a las solicitudes del AMVA, entidades públicas y privadas, ciudadanía y medios de comunicación . . . 539

WP3.4.4. Realizar procesos de investigación en temas relacionados y de interés del proyecto y de la Entidad 539

WP3.4.5. Brindar soporte tecnológico para la gestión documental y de información generada por los diferentes componentes del proyecto . . . 547

WP4.1. Gestionar las labores de instalación, mantenimiento, verificación y calibración (según aplique) de las redes de instrumentación 548

WP4.1.1. Planificar la instalación de nuevas estaciones e instrumentos en las diversas redes del proyecto 548

WP4.1.2. Gestionar y verificar la ejecución de compras necesarias en el proyecto . . . 550

WP4.1.3. Gestionar la logística de transporte para la ejecución de las actividades del proyecto . . . 550

WP4.1.4. Gestionar protocolos de verificación y calibración inicial de los equipos adquiridos . . . 551

WP4.1.5. Planificar el mantenimiento de estaciones e instrumentos de las diversas redes del proyecto . 551

WP4.1.6. Garantizar el adecuado funcionamiento de infraestructura de las estaciones de monitoreo . . . 552

WP4.1.7. (Calidad del aire) Garantizar el cumplimiento del plan de aseguramiento metrológico . . . 553

WP4.1.8. Revisar y formalizar las acometidas de la red del proyecto . . . 553

WP4.1.9. Velar por la gestión del inventario eficaz que garantice el suministro oportuno de insumos, consumibles, materiales, herramientas y repuestos . . . 554

WP4.2. Gestionar los procesos para garantizar continuidad a futuro en las actividades del proyecto, e.g., requerimientos de entes de control y renovación tecnológica para el monitoreo de variables prioritarias 555

WP4.2.1. Gestionar los requerimientos exigidos por los entes de control relacionados con el uso de VANTs 555

WP4.2.2. Formular el plan de adquisiciones y reposición para la renovación tecnológica de variables prioritarias . . . 556

WP4.3. Propender por una gestión eficaz de inventario general y activos fijos, y una evaluación técnica de vida útil y depreciación 557

WP4.4. Gestionar el Sistema de Gestión Integral (Calidad, Talento Humano, Administrativo y Financiero 558

WP4.5. Proponer e implementar estrategias para garantizar la continuidad del proyecto **560**

WP4.5.1. Revisar la estructura organizacional con sus diferentes niveles, roles, responsabilidades y funciones 560

WP4.5.2. Identificar oportunidades de prestación de servicios a actores públicos y/o privados, y otras partes interesadas . . . 561

WP4.5.3. Gestionar convenios de cooperación e intercambio de información técnica . . . 562

WP4.5.4. Articular, en conjunto con el AMVA, una estrategia para que el proyecto SIATA continúe en el tiempo . . . 566

Referencias **568**

Anexos **582**

Campaña de medición de aerosoles secundarios en el Valle de Aburrá **583**

Introducción . . . 583

Objetivos . . . 583

Metodología . . . 584

Resultados . . . 585

Campaña de caracterización química de compuestos tóxicos (HAPs) en el Valle de Aburrá **590**

Introducción . . . 590

Objetivos . . . 590

Metodología . . . 591

Resultados . . . 592

Campaña de monitoreo de fuentes de emisión a partir de cámaras térmicas. **595**

Introducción . . . 595

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de octubre de 2024 . . . 595

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de noviembre de 2024 . . . 597

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de diciembre de 2024 . . . 603

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de enero de 2025 . . . 609

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de febrero de 2025 . . . 614

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de marzo de 2025 . . . 624

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de abril de 2025 . . . 632

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de mayo de 2025 639

Estudio de la formación de PM2.5 secundario en el Valle de Aburrá **646**

Lista de Abreviaturas 646

Introducción 647

Revisión de los mecanismos de reacción de los Modelos de Transporte Químico de Calidad del Aire 647

Análisis de las características de los compuestos químicos intermedios en la formación de aerosoles atmosféricos secundarios 649

Análisis de procesos de oxidación sobre los compuestos intermedios en la formación de aerosoles atmosféricos secundarios 650

Análisis del comportamiento de las concentraciones de los precursores y otras especies químicas constituyentes del PM2.5 secundario con registros en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá 653

Análisis de variables meteorológicas en la formación de aerosoles secundarios 661

Análisis del comportamiento de las concentraciones de ozono en las estaciones de monitoreo del Valle de Aburrá 668

Análisis de las concentraciones de especies secundarias a partir de una campaña de caracterización química en el Valle de Aburrá 672

Conclusiones 686

Consideraciones para trabajos futuros 687

Prefacio

El proyecto Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA), en su vigencia 016-2024, se estructuró en cuatro grandes paquetes de trabajo (Work Packages, WP), que se encuentran conectados entre sí, en sólida interdependencia, siguiendo la aproximación conceptual mostrada en la Figura 1. Nótese que la pirámide en la parte baja del diagrama es una versión extendida o modificada de la pirámide de jerarquía o gestión del conocimiento (DIKW pyramid, por sus siglas en inglés), cuya base inicia en el nivel de los **datos** (D). Los datos se definen como representaciones numéricas, alfabéticas, de atributos o de ciertas características de una entidad dada. En el nivel inmediatamente superior se encuentra la **información** (I), la cual se define como conjuntos organizados de datos que permiten interpretar comportamientos, patrones y tendencias, entre otros aspectos, de determinados fenómenos. En el nivel inmediatamente superior, y punto más alto de la pirámide (en nuestra propuesta no se incluye la *sabiduría*, Wisdom en inglés, tradicionalmente incluida en DIKW), se encuentra el **conocimiento** (K, por sus siglas en inglés; o entendimiento, inteligencia, capacidad de raciocinio), que se define como la capacidad que tenemos para actuar y producir resultados. Los tres niveles mencionados (DIK) constituyen en la presente propuesta el primer paquete de trabajo, o **WP1**, y se articulan bajo la estructura de un observatorio de amenazas y riesgos. Cuando los datos son procesados, agrupados, analizados y filtrados, se pueden utilizar en la realización de cálculos de más alto nivel y en la generación de conocimiento, o pueden servir para informar procesos de toma de decisiones.



Figura 1: Estructura conceptual de la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

El segundo paquete de trabajo, **WP2**, está constituido por los niveles inferiores de la pirámide, relacionados con sensores/redes/instrumentación/datos externos, telecomunicación y almacenamiento. Nótese que estos niveles resumen los pasos 3 a 9 de la ruta del dato (generación, transmisión, almacenamiento y despliegue) tradicionalmente implementada por el proyecto SIATA. La ruta del dato inicia con la generación de información, ya sea a través de la interacción del usuario, sensores o sistemas integrados. Una vez generado, este dato se procesa y se almacena en bases de datos o servidores. Finalmente, cuando un usuario accede a una página o servicio web, se hace una solicitud a estos servidores, permitiendo que la información viaje de vuelta a través de redes y protocolos, culminando su trayecto en el despliegue visual

en la interfaz del usuario. Con este interés, el WP2 propone un plan para garantizar todos los procesos que permiten la generación de los datos requeridos en los diferentes frentes del proyecto.

El tercer paquete de trabajo, **WP3**, que se representa como una pirámide invertida sobre la pirámide de jerarquía o gestión del conocimiento, tiene como punto de nacimiento, intersección o encuentro la activación, emisión permanente y notificación continua de alarmas y alertas tempranas. La pirámide incluye los tres niveles prioritarios de interacción con los públicos objetivo del proyecto SIATA: la apropiación social del conocimiento (ASC), la divulgación y la comunicación a todos los actores del territorio metropolitano. Con este interés, en la presente propuesta se propone un Plan de Apropiación Social del Conocimiento para la gestión del riesgo (incluyendo variabilidad y cambio climático) y la calidad del aire para los diferentes públicos de interés.

Por último, el cuarto paquete de trabajo, **WP4**, el cual es transversal a los paquetes de trabajo WP1, WP2 y WP3, abarca todas y cada una de las actividades relacionadas con la planeación de actividades, el direccionamiento estratégico, la transversalidad de procesos, el fortalecimiento de capacidad instalada, la continuidad y sostenibilidad de procesos, la gestión integral, y el cumplimiento de actividades de carácter obligatorio que son reguladas por el marco legal pertinente.

Las grandes actividades y subactividades que se propusieron para cada uno de los paquetes de trabajo mencionados se presentan en la Figura 2.



Figura 2: Estructura de la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA: cuatro (4) Work Packages – WPs; dieciséis (16) actividades; y ciento cinco (105) sub-actividades o "tareas".

Reporte de logros: porcentajes e indicadores

A continuación se presenta el resumen de los logros (en términos de productos, entregables e indicadores) de las actividades de la vigencia 016-2024, con fecha de cierre el día 6 de julio de 2025. Con el ajuste de las metas del proyecto, debido a las adiciones al contrato 016-2024, al final de la duración total de la vigencia (i.e., 1 de febrero de 2024 al 6 de julio de 2025), el porcentaje ponderado de ejecución alcanzó el **100.6 %**. En la Figura 3 se muestran los porcentajes acumulados individuales para las componentes de riesgo y aire del proyecto. Nótese que se muestra la figura correspondiente al mes de noviembre de 2024, el cual fue el último mes de ejecución antes de la firma de extensiones, modificaciones y otrosís, firmados entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Universidad EAFIT.

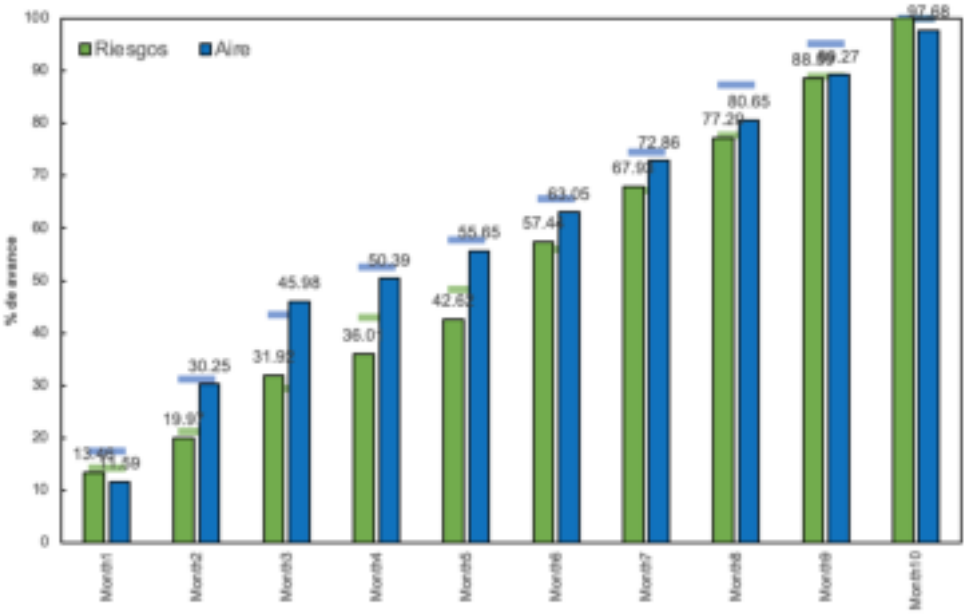


Figura 3: Porcentaje de avance a la fecha de cierre del mes de noviembre de 2024, vigencia 016-2024.

En la Tabla 1 se listan, por su parte, los productos e indicadores de desempeño. El seguimiento mes-a-mes de estos indicadores puede ser consultado en la plataforma SIATA 016-2024 project management, la cual fue compartida por medio electrónico. Los productos e indicadores relacionados en la tabla se incluyen además en las sub-actividades y actividades del proyecto asociados a ellos. Se debe tener presente que la plataforma SIATA 016-2024 de seguimiento del proyecto cierra la última semana de cada mes de reporte, el día sábado de tal semana. En algunos casos, no coincide con el último día de mes calendario del proyecto, razón por la cual los indicadores presentados en la escala mensual en algunas de las sub-actividades

pueden mostrar algunas diferencias mínimas con respecto a los valores aquí consignados.

Tabla 1: Relación de productos e indicadores de logro al día 6 de julio de 2025.

WP y producto	Producto/Indicador	Desempeño
WP1.P1.1	Reportes de pronóstico meteorológico.	1565
WP1.P1.2	Reportes de pronóstico estacional.	10.2
WP1.P2.1	Reportes de pronóstico de las concentraciones de contaminantes -PM2.5-, anticipando los periodos de gestión de episodios.	3.1
WP1.P2.2	Reportes de pronóstico de las concentraciones de contaminantes -PM2.5-, durante episodios.	110
WP1.P3	Reportes de eventos de precipitación (depende del número de eventos que ocurren).	614
WP1.P4	Reportes de susceptibilidad de incendios en cobertura vegetal con el resumen de incendios y columnas de humo reportadas en la última semana.	365
WP1.P5	Reportes de eventos sísmicos (depende del número de eventos que ocurren).	6
WP1.P6	Reportes de respuesta estructural ante eventos sísmicos (depende del número de eventos que ocurren).	0
WP1.P7	Reportes online de herramientas para la gestión de la calidad del aire.	522
WP1.P8	Proporción de avance en el desarrollo del código fuente de herramienta operativa para la generación de alertas.	1.0
WP2.P1	Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATCs) instrumentados.	3
WP2.P2	Reportes de profundidad del agua (lámina de agua) en las secciones transversales de corrientes superficiales monitoreadas.	1819
WP2.P3	Número de imágenes de reflectividad (escala de intensidades de precipitación), según información del radar meteorológico.	3166
WP2.P4	Número de imágenes compuestas GeoColor + IR del satélite GOES-16.	1203
WP2.P5	Reportes diarios de hotspots regionales (para el norte de Colombia y Venezuela en el primer semestre del año; y para la región Amazónica en el segundo semestre del año).	462
WP2.P6	Reportes de descargas eléctricas, según información del sensor GLM.	91
WP2.P7	Reportes de temperatura del aire en superficie (según registros de la red meteorológica), e imágenes de la red de cámaras en tierra de la bóveda celeste (fish-eye) y de cámaras visibles del proyecto.	1506

Continúa en la siguiente página

Tabla 1 – Continuación de la página anterior

WP y producto	Producto/Indicador	Desempeño
WP2.P8	Reportes del Índice de Calidad del Aire-ICA, basado en PM2.5 (promedio de las últimas 24 horas, con cierre a las 05:00 a.m y promedio del día anterior) para las estaciones de monitoreo de calidad del aire del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, tanto para estaciones de representatividad poblacional (primera parte del reporte) como las estaciones de tráfico o industriales (segunda parte del reporte).	483
WP2.P9	Reportes del Índice de Calidad del Aire (ICA, basado en PM2.5) semanal para las estaciones de monitoreo de calidad del aire.	508
WP2.P10	Reportes de condiciones meteorológicas actuales (velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura del aire cerca de la superficie y probabilidad de lluvia) para apoyar el proceso de toma de decisiones durante emergencias, según los datos de la red meteorológica.	18
WP2.P11	Imágenes de la red de cámaras de espectro visible que son utilizadas para el monitoreo del drenaje urbano.	67
WP2.P12	Reportes de imágenes de cámara(s) en espectro visible (dependiendo de la disponibilidad) y cámara(s) térmica(s) (dependiendo de la ocurrencia) de eventos de incendios de cobertura vegetal y zona de interfaz que ocurren en el territorio.	344
WP2.P13	Reportes de acumulados de lluvia de los últimos 10 minutos de eventos que ocurren en el territorio.	55
WP2.P14	Reportes mensuales de análisis de recurrencia de problemas de la red hidrometeorológica y de movimientos en masa.	17
WP2.P15	Porcentaje de avance en la estructuración del código fuente/algoritmo, procesos y técnicas que garanticen la calidad de los datos registrados en las redes del proyecto (hidrometeorológica y de calidad del aire).	1.0
WP2.P16	Planes de ejecución de campañas de monitoreo, con objetivo, cronograma, metodología y propuesta de análisis de resultados, y número de campañas de monitoreo adelantadas.	1.00
WP2.P17	Atención de solicitudes de información que se reciben en el correo (solicitud.datos@siata.gov.co).	653
WP2.P18	Reportes de láminas de precipitación total y precipitación sólida registradas por la red de disdrómetros.	90
WP2.P19	Reportes de acumulado (lámina) semanal de precipitación, según la información del radar meteorológico.	70
WP2.P20	Reportes de viento máximo en los últimos 5 minutos, según los registros de la red meteorológica.	53
WP3.P1	Proporción de avance de la estructuración del Plan de Comunicaciones.	1
WP3.P2	Espacios académicos y de intercambio de experiencias e información con otros modelos de CTeI.	2

Continúa en la siguiente página

Tabla 1 – Continuación de la página anterior

WP y producto	Producto/Indicador	Desempeño
WP3.P3	Campañas de sensibilización y difusión con la ciudadanía y los actores interesados en la problemática de calidad del aire del Valle de Aburrá.	1.5
WP3.P4	Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATCs) activos.	42
WP3.P5	Número de llamados y activaciones de alarmas.	163
WP3.P6	Informes para Procuraduría: resumen de las condiciones promedio y los valores máximo y mínimo del mes previo, así como el número de veces que se supera la norma diaria, para cada parámetro, por estación, y para las redes de Calidad del Aire y Ruido Ambiental.	13
WP3.P7	Informes anuales: consolidados del comportamiento anual de todos los parámetros de calidad del aire y comparación con la norma. Incluyen análisis de tendencias de largo plazo, para por lo menos los últimos cuatro años, así como valoración del comportamiento de las medias móviles diarias y su comparación con la norma anual, con el fin de identificar el porcentaje de excedencias por estación y por contaminante.	2
WP3.P8	Informes de inicio y cierre de cada uno de los periodos de gestión de episodios por contaminación atmosférica.	5.25
WP3.P9	Informes de avance mensual.	16.25
WP3.P10	Informes consolidados anuales.	0
WP3.P11	Reportes diarios operativos (incluye eventos de precipitación, ráfagas de viento y temperaturas máximas, incendios reportados, reportes a organismos de gestión del riesgo, reportes a comunidad, alarmas activadas, aumentos de niveles en quebradas e inundaciones en deprimidos, movimientos en masa, registros de calidad del aire, eventos sísmicos, y apoyo a organismos externos).	83
WP3.P12	Solicitudes (especiales) atendidas.	224
WP4.P1	Acometidas eléctricas de la red del proyecto revisadas y formalizadas.	25
WP4.P2	Procesos intervenidos (SGC).	20

Se resalta que, en la vigencia 016-2024, en relación con la *generación de alertas* y teniendo como fecha de corte el día sábado 6 de julio de 2025, el proyecto SIATA publicó a través de los múltiples canales de difusión del proyecto un número total de **3166** imágenes de reflectividad que permiten la estimación de diferentes categorías de intensidades de precipitación, **91** reportes de descargas eléctricas, **90** reportes de caída de granizo, **53** reportes de ráfagas de viento en los últimos 5 minutos, **1819** reportes de profundidad del agua (lámina de agua) en las secciones transversales de corrientes superficiales monitoreadas, y **344** alertas de eventos de incendios de cobertura vegetal y en zona de interfaz. Se llevó a cabo una caracterización de las problemáticas relacionadas con inundaciones en puntos críticos del drenaje urbano y se logró la consolidación de protocolo interno de alertas por esta amenaza. Como resultado, se alertó

a la comunidad en **67** ocasiones con el uso de imágenes de la red de cámaras de espectro visible que son utilizadas para el monitoreo de estos puntos críticos. La información de alertas fue complementada con la publicación de **614** reportes (parciales y finales en conjunto) de eventos de precipitación, **1506** reportes de temperatura del aire cerca de la superficie, **70** reportes de acumulado (lámina) semanal de precipitación, múltiples reportes horarios (que permitieron la estructuración de 365 diarios) de susceptibilidad de incendios, **seis (6)** reportes de ocurrencia de eventos sísmicos, y **1203** imágenes compuestas GeoColor + IR del satélite GOES-16.

Con el objetivo de *anticiparse a la ocurrencia de eventos*, se publicó un número total de tres (3) reportes de pronóstico meteorológico por día, para un total de **1565** en la vigencia, así como **diez (10)** pronósticos de temporada, **tres (3)** reportes de pronóstico de las concentraciones de contaminantes (específicamente, material particulado PM2.5), anticipando los períodos de gestión de episodios, y **ciento diez (110)** reportes diarios de PM2.5 durante episodios.

Con miras a proveer información oportuna y significativa para la *gestión de la calidad del aire* en el Valle de Aburrá, se publicó un número total de **462** reportes diarios de puntos calientes regionales relacionados con la ocurrencia de incendios de cobertura vegetal en el extremo norte de Suramérica durante el primer semestre del año y para la región Amazónica en el segundo semestre del año, así como **483** reportes del Índice de Calidad del Aire (ICA, basado en PM2.5) del día anterior (24 horas previas, con cierre a las 05:00 a.m.) para las estaciones de monitoreo de calidad del aire, tanto aquellas de representatividad poblacional como estaciones de tráfico o industriales.

Para brindar apoyo en el *proceso de toma de decisiones durante emergencias*, el proyecto SIATA compartió con los organismos de socorro **18** reportes de condiciones meteorológicas prevalentes (incluyendo velocidad y dirección del viento, humedad relativa, temperatura del aire cerca de la superficie y probabilidad de lluvia), y alcanzó un número total de **163** llamados y activaciones de alarmas para alertar a las comunidades en zonas de alto riesgo de la materialización de posibles amenazas naturales.

En la plataforma SIATA 016-2024 project management, mencionada anteriormente, se puede consultar las **series históricas** de todos y cada uno de los productos e indicadores mencionados anteriormente. Como ejemplo, se presenta a continuación (ver Figura 4) el número de solicitudes de información atendidas semanalmente y el número de derechos de petición atendidos semanalmente durante la vigencia 016-2024. El acumulado total de solicitudes de información atendidas ascendió a **653**, mientras que el número total de derechos de petición atendidos alcanzó **224**. Dado que la vigencia tuvo una duración total de 350 días laborales (sin incluir fines de semana y días festivos) entre el 1 de febrero de 2024 y el 7 de julio de 2025, las tasas de atención de solicitudes de información y de derechos de petición alcanzaron *1.86/día* y *0.64/día*.

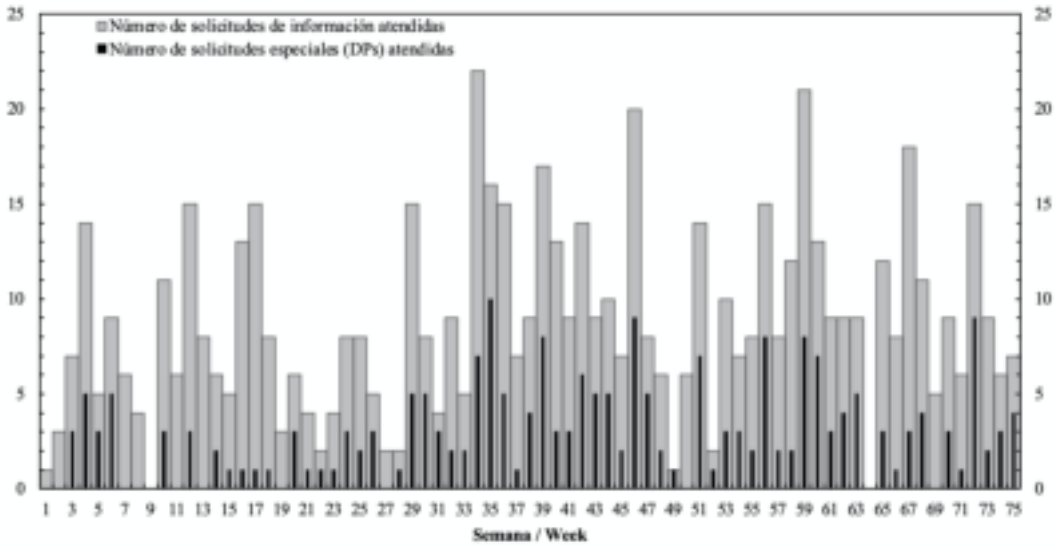


Figura 4: Series temporales a escala semanal de dos (2) indicadores de atención de solicitudes y derechos de petición por parte de actores externos, para la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA. Nótese que la primera semana de ejecución (W01) se extendió desde el 01-28-2024 hasta el 02-03-2024, mientras que la última semana (W75) se extendió desde el 06-29-2025 hasta el 07-06-2025.

Las semanas en las cuales se atendió el mayor número de solicitudes fueron: W34 (09-15-2024 al 09-21-2024) y W35 (09-22-2024 al 09-28-2024), con un número total de solicitudes de información atendidas de **22** y número total de derechos de petición atendidos de **10**, respectivamente.

En caso de requerirse información más detallada de la ejecución, específicamente la relacionada con los logros durante el contrato inicial y sus diferentes adiciones/prórrogas, se sugiere re-visitar las siguientes versiones de la plataforma de project management:

- (i) Contrato 016-2024 inicial, 01-02-2024 - 30-11-2024, 20241201 SIATA 016-2024 Project Management;
- (ii) Adición 1 y prórroga 1, 01-12-2024 - 31-12-2024, 20250105 SIATA 016-2024 Project Management OtroSi;
- (iii) Prórroga 2, 01-01-2025 - 20-01-2025, 20250202 SIATA 016-2024 Project Management OtroSi;
- (iv) Adición 2 y prórroga 3, 21-01-2025 - 14-02-2025, 20250302 SIATA 016-2024 Project Management OtroSi;
- (v) Adición 3 y prórroga 4, 15-02-2025 - 14-04-2025, 20250427 SIATA 016-2024 Project Management OtroSi;
- (vi) Adición 4 y prórroga 5, 15-04-2025 - 31-05-2025, 20250601 SIATA 016-2024 Project Management OtroSi;

- (vii) Adición 5 y prórroga 6, 01-06-2025 - 07-06-2025, 20250707 SIATA 016-2024 Project Management OtroSi.

Resumen WP1: Observatorio de amenazas y riesgos

En este capítulo, se presentan los logros alcanzados durante la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA en torno a pronóstico meteorológico, cambio climático, calidad del aire, modelación hidrológica, meteorológica y geotécnica, actividad sísmica y apoyo de emergencias en el Valle de Aburrá. A continuación, se presenta el resumen de los principales logros obtenidos.

Pronóstico meteorológico y de calidad del aire

- Se garantizó la operación continua (diaria y cada 6 horas) de las diferentes estrategias de pronóstico meteorológico implementadas en el proyecto SIATA; en particular, la relacionada con el pronóstico numérico usando el modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model).
- La evaluación del desempeño de los pronósticos meteorológicos emitidos desde el proyecto en las diferentes ventanas de tiempo, mostró un porcentaje de aciertos promedio cercano al 79 % para el Valle de Aburrá, con máximos de hasta 87 % alcanzados en febrero de 2024. Esto demuestra la solidez de las metodologías combinadas entre modelos numéricos y el juicio experto para la corrección de las salidas de los primeros.
- Se implementó la estrategia de pronóstico numérico COMFS (Colombia Model Forecast System), que mejoró la resolución espacial (9 y 3 km), y permitió realizar pronósticos en un horizonte de hasta 7 días, ofreciendo herramientas e insumos para la anticipación de lluvias y tormentas en el territorio metropolitano.
- Con el fin de tener redundancia y establecer criterios de comparación y evaluación del desempeño de los pronósticos, se incorporaron de manera preliminar ensambles de modelos globales (GEFS - Global Ensemble Forecast System y ECMWF - European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) para su evaluación, los cuales permitirán analizar la probabilidad de lluvias intensas y escenarios de incertidumbre.
- En cuanto a la modelación y el pronóstico de calidad del aire, se fortaleció el pronóstico estadístico de PM2.5 y la modelación experimental con WRF-Chem, permitiendo representar transporte de contaminantes regionales y los períodos de gestión de contaminación atmosférica.

Cambio climático

- Se analizaron los resultados de simulación de modelos globales del CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) que mostraron, de acuerdo a la literatura científica y evaluación propia, una buena representatividad en el territorio metropolitano. Esto implicó el uso de base de datos globales como reanálisis para establecer criterios de comparación y evaluación de la representación de dichos modelos de las condiciones actuales del clima en la escala regional y el contexto del territorio.
- Se evaluaron indicadores hidroclimáticos como el índice AIu (precipitación/evapotranspiración), que permitió clasificar el Valle de Aburrá en regímenes húmedos y secos, mostrando su sensibilidad a fenómenos climáticos globales como el ENSO (El Niño - Oscilación del Sur) en sus fases cálida (El Niño) y fría (La Niña).
- Durante las fases cálidas del fenómeno ENSO, se evidenció mayor recurrencia de sequías y déficit hídrico, mientras que en fases frías (La Niña) se intensificaron los excesos de lluvia y las condiciones de saturación de suelos.
- Las proyecciones climáticas sugieren que hacia finales de siglo XXI aumentará la recurrencia de eventos extremos de precipitación y sequía, lo cual tiene implicaciones directas en la planificación del recurso hídrico y la gestión de riesgos.
- Se aplicaron metodologías de reducción de escala con modelos dinámicos (WRF), logrando proyecciones locales de alta resolución, que permitirán evaluar los impactos del cambio climático en escenarios futuros con mayor resolución en el territorio. Estos resultados establecerán una base de información científica para integrar los efectos del cambio climático en políticas públicas territoriales.

Hidrología e incendios

- Se optimizaron los modelos hidrológicos implementados para el río Aburrá-Medellín y sus principales afluentes, incluyendo la herramienta WRF-Hydro, que permitió simular crecientes extremas en dominio espacial del territorio. Las actividades se concentraron principalmente en definir el uso y aplicabilidad de cada uno de los modelos hidrológicos bajo diferentes regímenes hidrológicos, teniendo en cuenta la temporalidad (régimen lluvioso o más seco) y condiciones geomorfológicas de cada cuenca.
- Se estimaron mapas de manchas de inundación para puntos críticos de la red de drenaje, aportando insumos clave para la instalación de sensores de monitoreo, implementación de SATCs, planeación urbana y la reducción de la exposición.
- Se avanzó en el monitoreo de niveles freáticos en tiempo real, mejorando la calibración de modelos de avenidas torrenciales y movimientos en masa.
- Se construyó un piloto para evaluación de riesgo por inundaciones en el municipio de Sabaneta, que integra exposición, vulnerabilidad y amenaza, ofreciendo una herramienta práctica que podrá ser replicada en el futuro en otros municipios, con las adaptaciones y modificaciones que se requieran.
- Para incendios forestales, se desarrollaron modelos experimentales de propagación y se implementó el monitoreo de variables hidrometeorológicas críticas (humedad del suelo, déficit hídrico y temperatura).

Sismos y estabilidad de laderas

- Se actualizaron insumos para el cálculo del riesgo sísmico, incorporando nuevas metodologías de caracterización del ruido sísmico; se escogió el municipio de Sabaneta como caso de aplicación.
- Se modeló la afectación en edificaciones a partir de escenarios sísmicos, aportando información para la gestión del riesgo urbano.
- Se desarrolló una metodología para la evaluación y selección de edificaciones a instrumentar para monitoreo estructural de edificaciones priorizadas. La aplicación de la metodología dio como resultado la selección del CAM del municipio de Caldas, el cual fue instrumentado con sensores de bajo costo Rapsberry Shakes.
- En movimientos en masa, se evaluaron umbrales de lluvia y humedad como detonantes y se logró la puesta en operación de un modelo probabilístico. Además, se avanzó en modelación de la estabilidad de laderas, considerando escenarios sísmicos y climáticos, y variables como la humedad del suelo.
- Estos avances fortalecen la capacidad del SIATA como referente nacional en estudios multi-amenaza.

Calidad del aire y ruido ambiental

- Se desarrollaron campañas de monitoreo de contaminantes atmosféricos criterio y no criterio en los diferentes municipios y el Distrito Especial de Medellín. Se destacan las jornadas de monitoreo de PM2.5 y PM10 en la vertical, la caracterización del flujo vehicular en vías principales o de interés, la caracterización química del PM2.5 secundario, la medición de las concentraciones de hidrocarburos aromáticos policíclicos, y el seguimiento a fuentes de emisión mediante la detección de puntos calientes con cámaras térmicas.
- Fueron establecidas metodologías para el seguimiento de incendios de cobertura vegetal que tienen origen por fuera del Valle de Aburrá, afectando la calidad del aire. La metodología contó con el análisis de observaciones satelitales de puntos calientes (hotspots) probablemente asociados a incendios de cobertura vegetal, retrotrayectorias calculadas a partir de reanálisis, y la evaluación del comportamiento del índice de calidad del aire para PM2.5 en el Valle de Aburrá.
- Se continuó investigando la turbulencia superficial y la estructura vertical de la capa límite atmosférica durante eventos de alta contaminación inducidos por transporte regional de aerosoles, haciendo uso de los datos proporcionados por la red de micrometeorología, que está compuesta por anemómetros ultrasónicos tridimensional. De la misma manera, también fueron utilizados los datos proporcionados por el radar perfilador de vientos.
- Se mantuvo activa la red de sensores de Ciudadanos Científicos (sensores fijos y móviles), reportando información válida de las rutas significativas y concentraciones dentro de los límites establecidos, que permitieron estimar los rangos horarios y las vías en donde el valor de la concentración de partículas de diámetro menor a 2.5 micras (PM2.5) es alto.
- Se realizó el seguimiento a las concentraciones asociadas a la materia carbonácea expresada como carbono elemental (EC, por sus siglas en inglés) y carbono orgánico (OC, por sus siglas en inglés), teniendo en cuenta que el brown carbon (BrC) es un constituyente importante del OC. Se analizaron, además, los patrones mensuales de las concentraciones del BrC en la estación CEN-TRAF para el año 2022.

- Se inició la línea de investigación para el estudio de la formación de PM2.5 secundario, contemplando el análisis del comportamiento de gases precursores e influencia de otras especies químicas basado en los mecanismos de reacción.
- Se realizaron traslados e instalaciones de equipos asociados a los siguientes sitios: Sede Poblado de la Universidad CES en el Distrito de Medellín (PM2.5, Ozono y meteorología), Sector La Tablaza en el municipio de La Estrella (PM2.5), Institución Educativa Pedro Octavio Amado (MED-ALTA) del corregimiento de Altavista en el Distrito Especial de Medellín (Ozono), estación de ruido ambiental, Biblioteca Jacinto Benavente del municipio de Girardota (GIR BIJA).
- Se mantuvo en operación permanente los diferentes equipos que componen las redes de Calidad de Aire, Ruido Ambiental y Ciudadanos Científicos, realizando mantenimientos preventivos y correctivos a todos los sensores, y se implementaron las acciones tecnológicas y logísticas para garantizar el correcto funcionamiento de las redes, para dar cumplimiento de las frecuencias establecidas en los diferentes métodos de medición de los equipos.
- Se mantuvo en operación los equipos complementarios de las redes de calidad del aire que permiten realizar un análisis integral de los contaminantes y mantener activa las herramientas de análisis para el monitoreo de la calidad del aire, herramienta que está permanentemente a disposición de la supervisión del AMVA y del equipo de análisis de datos del componente de Calidad del Aire de SIATA.

Capacidad de respuesta de apoyo en emergencias

- Se revisaron y evaluaron las capacidades actuales del SIATA para el apoyo a emergencias, identificando desarrollos tecnológicos, amenazas monitoreadas, capacidad instalada, tanto en variables como en sensores instalados, y lo más importante, el capital humano.
- Se mejoraron herramientas de alerta temprana, integrando pronósticos, sensores y canales de comunicación con autoridades y comunidades, mediante herramientas digitales y de difusión de alertas.
- Se fortaleció la inter-operabilidad de la información entre entidades ambientales y de gestión del riesgo, mediante la consolidación de protocolos de atención y acompañamiento en emergencias, lo cual incrementa la confianza institucional en el sistema. Esto surgió como resultado de las emergencias presentadas en el territorio metropolitano durante la temporada de lluvias marzo-abril-mayo de 2025, que llevó a la instauración del primer COE Metropolitano por parte de la Entidad, el cual coordinó los apoyos a los municipios afectados, ratificando así al AMVA y a su proyecto SIATA como una estrategia de vanguardia para la gestión y reducción de riesgo de desastres.



Resumen WP2: Ruta del dato

En torno a medición y seguimiento, en la vigencia del contrato CCT 016-2024 el proyecto SIATA contó con un esquema articulado entre los equipos de Operación, Mantenimiento y Calidad de Datos para garantizar el correcto funcionamiento de los sensores que conforman las redes de monitoreo. Como resultado de esta articulación, se logró mantener una operatividad constante en la red de sensores, reducir los tiempos de respuesta ante fallos críticos y generar insumos valiosos para la planeación técnica del mantenimiento preventivo y correctivo. La red hidrometeorológica in-situ del proyecto SIATA contó con *447* estaciones, distribuidas según: 180 pluviómetros, 156 estaciones de nivel, 47 estaciones meteorológicas, 21 estaciones de velocidad superficial, 19 disdrómetros, 19 sensores de humedad del suelo, y 5 piranómetros. Adicionalmente, se tuvieron quince (15) piezómetros que hacen parte de la red experimental de medición de nivel freático y dos (2) sensores experimentales para la medición de sedimentos en ríos y quebradas. Se logró un gran total de **176 instalaciones** en el Valle de Aburrá y en los municipios cercanos, correspondientes a las redes de: acelerómetros (5), cámaras (45), humedad del suelo (12), meteorológica (8), nivel (37), piezómetro (5), piranómetro (2), pluviométrica (24), sirenas (28) y tensiómetro (10). El municipio con mayor número de instalaciones fue **Medellín**, con un total de **117 intervenciones**, lo que representa el núcleo principal de la operación, seguido de los municipios de **Bello (13 instalaciones)**, **Caldas (12)**, **Sabaneta (10)** e **Itagüí (10)**. Como mínimo, se llevaron a cabo al menos 200 mantenimientos preventivos y 80 mantenimientos correctivos por mes. Como máximo, se adelantaron 670 y 250 mantenimientos preventivos y correctivos, respectivamente, por mes. La mayor parte de los mantenimientos se concentró en el distrito de **Medellín**, seguido por los municipios de **Bello**, **Caldas**, **La Estrella** e **Itagüí**. Se fortaleció el sistema de monitoreo de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, con la implementación de acciones técnicas y estratégicas orientadas a la prevención, evaluación y respuesta ante fenómenos de inestabilidad del terreno. En particular, se mantuvo vigilancia permanente sobre **21 puntos críticos asociados a movimientos en masa**, sin registrarse novedades relevantes durante la extensión de la vigencia, y se inició el proceso de emisión de **reportes de probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa** usando clasificación de lluvia antecedente (baja, media, alta). Se brindó apoyo técnico en la atención de emergencias a través de **PMU (Puestos de Mando Unificado)** y jornadas COEM, con presencia en terreno, análisis técnico y generación de información para la toma de decisiones. Se brindó respuesta a **55 activaciones de emergencia**, abarcando diferentes tipos de amenazas: incendios forestales, incendios forestales subterráneos, avenidas torrenciales, movimientos en masa, avenidas torrenciales con movimientos en masa, obras en riesgo de colapso, infraestructura en riesgo de colapso, caídas de árboles, inundaciones y monitoreo del río. Los apoyos más significativos incluyeron la atención a incendios forestales en los municipios de Bello, Girardota y Envigado, donde se logró identificar focos de calor activos y generar cartografía post-incendio para evaluación de daños. En el caso de movimientos en masa, se prestó apoyo en sectores críticos como Hatoviejo (Bello), El Poblado (Medellín), La Valeria (Caldas) y Santa Cruz (Medellín). Durante el período de calamidad pública decretado por el Distrito y dos municipios del territorio metropolitano en abril y mayo de 2025, se realizó **133 operaciones de emergencia** en coordinación con el Centro de Operaciones de Emergencias Metropolitano (COEM), con mayor concentración en Medellín (56 operaciones), Sabaneta (22) e Itagüí (16). Finalmente, se generaron múltiples reportes a organismos de gestión del riesgo de desastres, lo cual fortaleció el proceso de toma de decisiones.

En las labores de fortalecimiento, en la vigencia 016-2024 se llevó a cabo un constante avance en el desarrollo de herramientas para la evaluación de la calidad de los datos en tiempo real, y la detección y seguimiento de problemas en la red de monitoreo hidrometeorológico. Se realizaron *87 herramientas de*

desarrollo de código y *39 actividades involucradas en los procesos de calidad del dato*, las cuales fueron adelantadas con periodicidades diaria, semanal y mensual. Se llevaron a cabo labores de fortalecimiento de la red de monitoreo sísmico del territorio, a través de la instalación de varios acelerógrafos de referencia, y se garantizó el correcto funcionamiento de los sensores de monitoreo sísmico. Se atendieron solicitudes relacionadas con el funcionamiento de equipos informáticos, tanto de servidores como de estaciones de trabajo, y se resolvieron los requerimientos de los diferentes equipos de trabajo de SIATA en cuanto a la solución de errores y el mejoramiento de herramientas informáticas. Se iniciaron diferentes tareas asociadas a las actividades de la Fase 2 definida la consultoría de Gestión y Gobierno de Datos llevada a cabo en el marco de la vigencia 103-2023 del proyecto, y cuyo informe fue entregado y presentado en febrero del año 2024. A nivel de aplicativos de difusión, se logró el desarrollo y puesta en producción de la aplicación web "Geoportal Ciudadanos", la nueva página web de SIATA, y las pantallas divididas, entre otros. Se fortaleció el proyecto en el uso de nuevas tecnologías para la transmisión de la información de las diferentes estaciones, y en la búsqueda de fortalecer las redes de monitoreo del SIATA, se trabajó en el fortalecimiento de los SATC vía un sistema automatizado de notificación por SMS y correo electrónico, se adelantó el diseño, manufactura y prueba funcional de una tarjeta tipo shield para el módulo de comunicación LoRa-E32, y se realizó una actualización del sistema operativo de las Raspberry Pi utilizadas en las pantallas de las estaciones de los Cuerpos de Bomberos del territorio, entre otras acciones de alto impacto.

En las sub-actividades de innovación, se resalta que se desarrollaron distintas herramientas de carácter interno que permiten procesar y optimizar la descarga de datos históricos, con miras a dar respuesta a aquellas solicitudes que requieran este volumen de información, y se respondió un total de **696 solicitudes** a través del correo *solicitud.datos@siata.gov.co*, donde predominaron **268 requerimientos** dentro de la categoría *Entidad*. Se ejecutó un plan sistemático de mantenimiento preventivo y correctivo a las estaciones que conforman las diferentes redes de monitoreo del proyecto SIATA, incluyendo redes hidrometeorológicas, meteorológicas urbanas, de calidad del aire y de ruido. En total, se llevaron a cabo **1.943 mantenimientos preventivos** y **829 mantenimientos correctivos**, distribuidos a lo largo de los municipios del Valle de Aburrá, con especial énfasis en Medellín, Bello, Caldas, La Estrella e Itagüí. Para profundizar en el entendimiento de procesos físicos, se implementó el modelo WRF-Hydro en el Valle de Aburrá y el pronóstico de precipitación a corto plazo mediante técnicas de *Machine Learning, ML* usando la información de GOES-16. Adicionalmente, se usaron técnicas de ML para estimación cuantitativa de precipitación a partir de datos del radar meteorológico y para la estimación de descargas eléctricas , entre otras tareas innovadoras. Se consolidó e implementó un sistema de monitoreo de movimientos en masa basado en técnicas de teledetección, con enfoque tanto regional como local, orientado al fortalecimiento de la gestión del riesgo en el Valle de Aburrá. Se consolidó el proceso de implementación de sensores de humedad, con una zona de estudio específica en la cuenca La Despensa y otras zonas del corregimiento San Antonio de Prado, Medellín, como insumo para la evaluación del papel de la humedad del suelo como detonante de movimientos en masa. Se avanzó en la implementación del proyecto Repositorio de Datos, habilitando en entorno de pruebas para los componente Tipo 1 y parte de los componentes Tipo 2. El equipo de Teledetección concentró sus esfuerzos en superar las limitaciones de conectividad entre los dispositivos utilizados para sobrevuelos y los equipos de visualización oportuna de datos capturados. Específicamente, se desarrolló una investigación exhaustiva sobre alternativas tecnológicas, analizando diferentes sistemas de transmisión de datos en tiempo real. Se profundizó ademas en el acondicionamiento de los subsistemas para el desarrollo de un Sistema de Aeronave no Tripulada para la exploración de estructuras en riesgo de colapso y espacios confinados o de difícil acceso, analizando elementos clave tales como motores, hélices, controladora de vuelo, controladores electrónicos de velocidad, cámara, transmisor de video, receptor de radio, entre otros. Finalmente, durante la vigencia contractual se adquirió nuevos conocimientos en tecnologías IoT y Edge Computing, lo que permitirá mejorar el funcionamiento de las estaciones del proyecto SIATA.

Por último, en el ciclo de vida del dato, los esfuerzos del proyecto permitieron que la red de monitoreo hidrometeorológico del proyecto SIATA obtuviera una recuperación total de datos del 96.47 %, de los

cuales alrededor del 5.88 % corresponden con datos de calidad dudosa. Se implementó un seguimiento sistemático a los mantenimientos ejecutados y al comportamiento de las estaciones, lo que facilitó la toma de decisiones informadas para la asignación de recursos y el ajuste de procesos internos. En la red de monitoreo sísmico, se realizó la curaduría de los registros acelerográficos asociados a eventos sísmicos reportados por el Servicio Geológico Colombiano y se realizó la actualización de las características principales (fecha, latitud, longitud, magnitud, profundidad, municipio y/o departamento) de los veintiséis (26) eventos más antiguos de la base de datos acelerográfica (1996 - 2000). El equipo de Teledetección, por su parte, realizó **406 sobrevuelos**, generando un volumen significativo de productos cartográficos, audiovisuales y de análisis. Estos sobrevuelos incluyeron monitoreo de movimientos en masa, apoyo a atención de emergencias, monitoreo hidráulico y de infraestructura, y actividades de investigación y desarrollo. Finalmente, se adelantaron numerosas tareas relacionadas con diferentes servicios que se derivan de la infraestructura de TI, la gestión del conocimiento y el cumplimiento de apoyo a actividades misionales, incluyendo: actualización de sistemas operativos, gestión de usuarios y permisos de acceso, migración tecnológica, alistamiento de servidores y servicios para el repositorio Tipo 1, atención a problemas de telecomunicaciones y redes LAN, soporte técnico a PCs por demanda o programación, y gestión general de solicitudes.

Calidad del Aire

Durante la ejecución del contrato 016 de 2024 se realizaron traslados e instalaciones de equipos asociados a los siguientes sitios: Sede Poblado de la Universidad CES en el Distrito de Medellín (PM2.5, Ozono y meteorología), Sector La Tablaza en el municipio de La Estrella (PM2.5), Institución Educativa Pedro Octavio Amado (MED-ALTA) del corregimiento de Altavista en el Distrito Especial de Medellín (Ozono), estación de ruido ambiental Biblioteca Jacinto Benavente del municipio de Girardota (GIR BIJA).

En el caso de las Redes de Calidad de Aire y Ruido Ambiental del Valle de Aburra, se mantuvieron en operación permanente los diferentes equipos que componen las redes de Calidad de Aire, Ruido Ambiental. Se realizaron los mantenimientos preventivos y correctivos a todos los sensores y se implementaron las acciones tecnológicas y logísticas para garantizar el correcto funcionamiento de las redes, para dar cumplimiento de las frecuencias establecidas en los diferentes métodos de medición de los equipos. Lo anterior permitió reportar oportunamente los Índices de Calidad del Aire -ICA-, y demás informes requeridos en el contrato.

Los registros de la Red de Ciudadanos Científicos se obtuvo información de 245 sensores fijos al menos una vez al mes, de los cuales el 86 % reportó datos más de la mitad del tiempo. Se encontró además que los fines de semana son los días en donde se presencian más caídas en la cantidad de nubes activas, justificándose esto tanto en un corte de electricidad voluntario por parte del usuario como a problemas técnicos. Durante el periodo de la vigencia se realizaron 1795 actividades de mantenimiento para las nubes en donde se incluyeron revisiones preventivas, calibración, desinstalación, entre otros.

Adicionalmente, se mantuvieron en operación los equipos complementarios de las redes de calidad del aire que permiten realizar un análisis integral de los contaminantes y mantener activa las herramientas de análisis para el monitoreo de la Calidad del Aire, herramienta que está permanentemente a disposición de la supervisión del AMVA y del equipo de análisis de datos del componente de Calidad del Aire de SIATA.

Resumen WP3: Plan de Apropiación Social del Conocimiento

Durante la vigencia del contrato CCT016-2024, el proyecto SIATA consolidó un robusto componente de Apropiación Social del Conocimiento, logrando articular estrategias de comunicación, educación, relacionamiento territorial y gestión del conocimiento técnico-científico. El enfoque integral de este Work Package (WP3) permitió avanzar en la divulgación científica, el fortalecimiento de capacidades comunitarias e institucionales y la documentación rigurosa de los procesos del proyecto, contribuyendo de manera significativa a la gestión del riesgo en Medellín y el Valle de Aburrá.

En el marco del WP3.1 Comunicación, se ejecutó un Plan de Comunicaciones orientado a la gestión del riesgo y la divulgación científica, acompañado por la administración del sitio web, el Geoportal y el ecosistema digital del proyecto. Se desarrollaron contenidos técnicos, campañas de sensibilización en calidad del aire y espacios académicos de intercambio con otros modelos de CTeI. Estas acciones fortalecieron la interacción con públicos diversos, promoviendo información clara y oportuna para la toma de decisiones y la participación ciudadana.

El WP3.2 Educación consolidó procesos experienciales para la apropiación social del conocimiento con más de setecientas actividades dirigidas a comunidades SATC, UMGRD, organismos de socorro, instituciones educativas y nuevos públicos vinculados a Conexiones Territoriales. Se fortalecieron los Semilleros de Ciudadanos Científicos, la Red de Educadores Científicos, la estrategia Territorio al Aire y la producción de material educomunicativo, incluyendo una apuesta marcada por la accesibilidad, la inclusión y el diálogo de saberes. Estas acciones contribuyeron a mejorar la comprensión de las variables ambientales y a promover una cultura preventiva en todos los municipios del Valle de Aburrá.

En cuanto al WP3.3 Relacionamiento, articulación y gestión con actores estratégicos, el proyecto participó en 136 espacios regionales y locales, impulsando la articulación con organizaciones públicas y privadas, el fortalecimiento del trabajo comunitario y el acompañamiento a gestores de riesgo y organismos de socorro. Estas acciones permitieron consolidar redes colaborativas, mejorar la coordinación institucional y aportar a la gobernanza territorial desde la ciencia y la tecnología.

Finalmente, desde el WP3.4 Gestión del conocimiento técnico y científico, se generaron boletines técnicos, informes especializados y reportes clave sobre calidad del aire, ruido ambiental y episodios de contaminación. Se avanzó en la documentación de procedimientos, protocolos y manuales, así como en la atención de solicitudes de información de entidades públicas, privadas y ciudadanía. El componente también apoyó procesos investigativos y fortaleció el almacenamiento seguro y centralizado de los insumos producidos por los diferentes equipos del proyecto.

En conjunto, las actividades ejecutadas durante toda la vigencia reflejan el compromiso del proyecto SIATA con la apropiación social del conocimiento, la gestión integral del riesgo de desastres y la consolidación de una ciudadanía más informada, participativa y resiliente. Este informe final presenta de manera detallada los logros alcanzados que, en su conjunto, permitieron superar el cien porciento de la ejecución proyectada para el contrato.



Resumen WP4: Gestión y sostenibilidad de SIATA

En la Tabla 2 se relacionan las diferentes actividades llevadas a cabo en el Sistema de Gestión de Calidad y el Sistema de Gestión de Seguridad en el trabajo, durante la vigencia 016 de 2024, enfocadas a la gestión y sostenibilidad de SIATA, y que están relacionadas con la planeación de actividades, el direccionamiento estratégico, la transversalidad de procesos, el fortalecimiento y sostenibilidad de la capacidad instalada, la continuidad, la gestión integral y el cumplimiento de actividades de carácter obligatorio que son reguladas por el marco legal vigente.

Tabla 2: Resumen actividades Sistema de Gestión de Calidad y Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo, vigencia 016 de 2024.

Tema	Actividades	Cantidad
SGC	Documentos revisados, creados y actualizados en el listado de documentos y registros.	163
	Documentos revisados, creados y actualizados en el listado de documentos y registros [Calidad del Aire].	384
	Procesos intervenidos.	20
	Número de reuniones realizadas para la gestión y mejoramiento de procesos.	441
	Número de indicadores de gestión de la matriz de la Unidad de Gestión del Riesgo, medidos y analizados mensualmente.	19
	Ingresos de personal SIATA.	9
	Retiros de personal SIATA.	3
	Ingresos de personal CI AMVA-DAGRD.	7
	Retiros de personal CI AMVA-DAGRD.	2
	Número de eventos aprobados vs. eventos presentados.	8
	Número de cursos de formación aprobados vs. cursos presentados.	5
	Número por cargo de actividades contractuales revisadas.	23
	Número de informes de entrega de cargo en el transcurso del contrato CCT 016-2024.	44
	Número de informes de entrega de cargo simbólico para el cierre del contrato CCT 016-2024.	147
	Número de personas en inducción.	28
	Licencias remuneradas.	14
	Número promedio de permisos de ingreso a estaciones gestionados por mes.	30
SST	Matriz IPEVRIC - control de cambios actualizados.	22
	Gestión de contratistas - visitas.	45
	Citas de seguimiento medicina del trabajo.	71
	Psicología.	69
	Número de equipos - Psicología grupal de emergencia.	7
	Citas de seguimiento medicina del trabajo, vigilancia deporte representativo.	5
	Personas incapacitadas.	72

Tabla 2 (continuación)

Tema	Actividades	Cantidad
	Preempleos.	16
	Citas de medicina general.	71
	Citas de medicina preventiva, prevención del cáncer.	8
	EMO seguimiento osteomuscular.	3
	EMO egreso.	8
	EMO seguimiento.	42
	EMO seguimiento tareas de alto riesgo.	51
	EMO brigada de emergencia.	12
	SVE personas vacunadas tétanos.	22
	Inspección de botiquines.	99
	Dotación de botiquines nuevos.	2
	Inspección de extintores.	861
	Mantenimiento de extintores.	77
	Inspección de camillas.	51
	Reuniones COPASST.	10
	Capacitaciones SST - número de personas.	25 - 693
	Reporte de accidentes de trabajo.	5
	Reporte de enfermedad laboral.	0
	Investigación de alerta de seguridad.	1
	Simulacros de evacuación.	4
	Jornada de vacunación.	2
	Botas de senderismo entregadas.	47
	Botas de seguridad entregadas.	53
	Hallazgos cerrados de auditoría SST.	27/51

UNIVERSIDAD EAFIT

SIATA

Informe Final

Julio 2025



CCT 016 de 2024

Elaborado por: Universidad EAFIT

WP1.1. Observación, pronóstico meteorológico y de calidad de aire, y proyecciones climáticas

WP1.1.1. Generación continua de pronósticos meteorológicos

Esta actividad se concentra en la generación continua de pronósticos meteorológicos mediante el uso de modelos computacionales que resuelvan la dinámica atmosférica regional, para una adecuada prospección y análisis de las condiciones futuras de corto y mediano plazo para diferentes variables meteorológicas.

Parte I: Soporte al pronóstico operacional

Durante la vigencia del CCT016 de 2024 se brindó soporte a los productos de pronóstico y también a todas las configuraciones de pronóstico operacional implementadas en el proyecto SIATA (SYNAPSIS, RDFS y modelo estadístico), tanto en la etapa de ejecución como en la de posprocesamiento; que incluye correcciones en el flujo de procesos, detección de inestabilidades numéricas, problemas de copia de resultados entre servidores, gestión de almacenamiento de espacio en los discos y la migración del proceso de ejecución de RDFS al nuevo cluste de cómputo. Con lo anterior, todas las configuraciones se ejecutan en un servidor de mayor capacidad de cómputo y por lo tanto se logró una mayor estabilidad y optimización de los tiempos de ejecución de la simulación numérica. Se dió soporte a algunos productos por posibles intermitencias de red y fallas relacionadas, dado que la totalidad de procesos asociados a la etapa de posprocesamiento se encuentran en un servidor ubicado en Torre SIATA y los resultados del modelo se generan en el datacenter de la Sede de Investigación y Desarrollo de la Aguacatala. Todas estas medidas permitieron garantizar la generación continua de pronósticos meteorológicos durante la vigencia del contrato, asi como sus productos asociados.

Parte II: Desempeño del pronóstico meteorológico operacional

Una de las actividades principales del proyecto se centra en realizar el pronóstico del estado del tiempo en el Valle de Aburrá para diferentes franjas horarias (06:00-12:00, 12:00-18:00, 18:00-00:00 y 00:00-06:00). Aunque disponemos de datos computacionales avanzados, como los generados por el modelo WRF (Weather Research and Forecasting), que nos permiten predecir condiciones como la ocurrencia de lluvias en los distintos municipios del Valle de Aburrá, el juicio de expertos sigue siendo una parte crucial del proceso. Esto se debe a la complejidad y variabilidad inherente a los fenómenos atmosféricos.

En este contexto, el juicio de expertos aplicado por el equipo Operacional resulta fundamental, ya que permite interpretar los resultados de los modelos, integrar información de diversas fuentes y ajustar los

pronósticos basándose en la experiencia acumulada y el conocimiento del territorio, elementos que los modelos computacionales no siempre pueden captar con precisión.

En ese sentido, durante la vigencia del CCT 016 de 2024, se llevó a cabo una evaluación del porcentaje de aciertos del pronóstico meteorológico compartido a través de los diferentes canales de difusión del proyecto en las distintas franjas horarias, obteniendo los resultados que se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen desempeño del pronóstico meteorológico durante la vigencia CCT 016 de 2025.

Municipio	Acierto (%)
Barbosa	77.06 %
Girardota	78.72 %
Copacabana	79.62 %
Bello	80.10 %
Medellín centro	80.56 %
Medellín occidente	80.50 %
Medellín oriente	79.40 %
Sabaneta	77.76 %
La Estrella	77.89 %
Itagüí	78.73 %
Envigado	79.08 %
Caldas	78.31 %
Promedio	78.98 %

El porcentaje de acierto promedio para el Área Metropolitana fue de 78.98 %. Durante este periodo, la precisión más baja se registró en febrero de 2025, con un 71.58 %, seguido de mayo de 2024, con un 71.77 %. En contraste, el mayor porcentaje de acierto se presentó en febrero de 2024, con un 87.16 %, seguido de julio de 2024, con un 85.62 %.

La evaluación del pronóstico meteorológico es una herramienta esencial para mejorar continuamente el desempeño y la utilidad de los pronósticos, optimizando tanto los recursos como las decisiones basadas en ellos. Con esto se pretende verificar si los eventos meteorológicos pronosticados ocurrieron en los municipios del Valle de Aburrá, así como la evaluación del desempeño de los ajustes realizados por personal experto en comparación con los modelos, para evaluar la contribución del equipo Operacional a la mejora del pronóstico.

Los resultados detallados de esta actividad se pueden ver en el enlace: Evaluación desempeño del pronóstico.

Parte III: Nuevas estrategias de pronóstico

COMFS

Colombia Model Forecast System (*COMFS*) es una estrategia de subescalamiento dinámico para la región y está conformada por una serie de configuraciones y parámetros del modelo WRF que buscan mejorar el desempeño de los pronósticos numéricos operacionales implementados en el proyecto SIATA. Para lograr la ejecución de esta estrategia fue necesario desarrollar e implementar de manera complementaria el módulo *ForecastWRF*, el cual es una serie de estructuras en lenguaje de programación Python que facilitan la correcta ejecución de todas las etapas del proceso de simulación del modelo numérico WRF.

COMFS cuenta con dos dominios espaciales de 9 km y 3 km de resolución (Figura 5) y en caso de ser necesario (conforme a la evaluación del desempeño) pueden añadirse más anidamientos en el futuro. Para esta nueva estrategia se realizaron varias pruebas de simulación que resultaron satisfactorias con horizontes de pronóstico de 3 y 7 días en ambos dominios, y además se consolidó la escritura de la primera versión de un manual de ejecución para esta estrategia, que puede ser consultado en el enlace Manual pronóstico numérico.

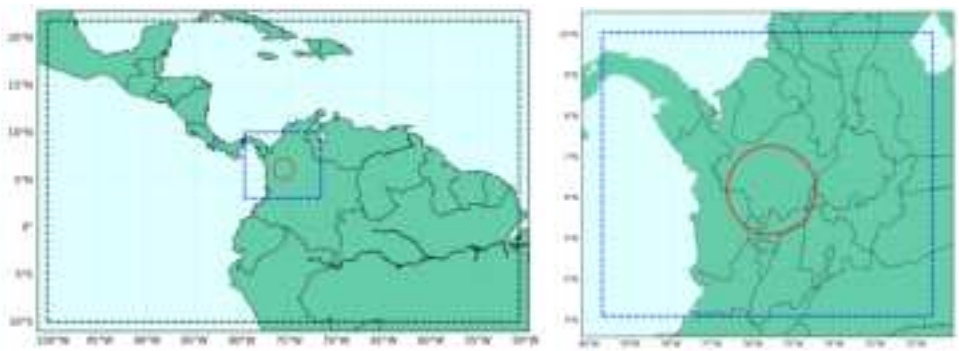


Figura 5: Configuración espacial de dominios *COMFS*. La línea negra puntuada indica los límites del domino COMFS01 y la línea azul puntuada indica los límites del dominio COMFS02. El círculo azul es la cobertura del radar (radio 120 km).

Asimilación de datos

Durante esta vigencia se realizó una revisión de la estrategia de asimilación de datos implementada en la configuración operacional RDFS - RDA en vigencias pasadas (CCT 871 de 2021), con el fin de encontrar y corregir posibles fallos en la ejecución de esta estrategia. Además, se busca también que la nueva estrategia *COMFS* incluya una prueba piloto de esta implementación, que es lo recomendado en dominios de una gran extensión como lo es el dominio continental de 9 km.

El método que se aplicó para las simulaciones es *Analisys Nudging,* el cual busca llegar a valores más cercanos al análisis (en este caso GFS - Global Forecast System). Esto se logra mediante la adición de términos adicionales en las ecuaciones de primeros principios, lo cual evita que durante la integración temporal del modelo, los resultados se alejen gradualmente del forzador en las condiciones de frontera lo cual puede ocurrir con mayor incidencia en la regiones mas internas del dominio y por tanto mas alejadas de los bordes.

Los términos adicionales se pueden aplicar para las variables de viento, temperatura y vapor de agua en el modelo. Desde hace varios años se aplicaba esta estrategia en RDFS-RDA, sin embargo, mediante varias validaciones a lo largo del tiempo se identificó que a pesar de que se lograron algunas mejoras

del desempeño en la región central del Valle de Aburrá, al mismo tiempo se producían condiciones anormalmente secas para el resto del dominio que se alejaban demasiado de las condiciones esperadas para el territorio.

Con la puesta en operación del nuevo cluster fue posible realizar varios experimentos que permitieran la puesta a punto de parámetros fijados en RDFS-RDA y se logró identificar una mejor configuración de estos parámetros, obteniendo así condiciones más cercanas a los valores esperados para la región. Si se observan los valores de radar y las configuraciones de SYNAPSIS y RDFS-CTR (Figura 6) se puede observar que aunque el modelo tiende a sobrestimar los valores de precipitación acumulada, se logran capturar aspectos importantes de los patrones espaciales como aquellos valores más altos que se presentan en las laderas occidental y oriental. Al observar los resultados para RDFS-RDA en el mismo periodo de tiempo (primera fila Figura 7), es evidente que existen acumulados muy bajos o nulos.

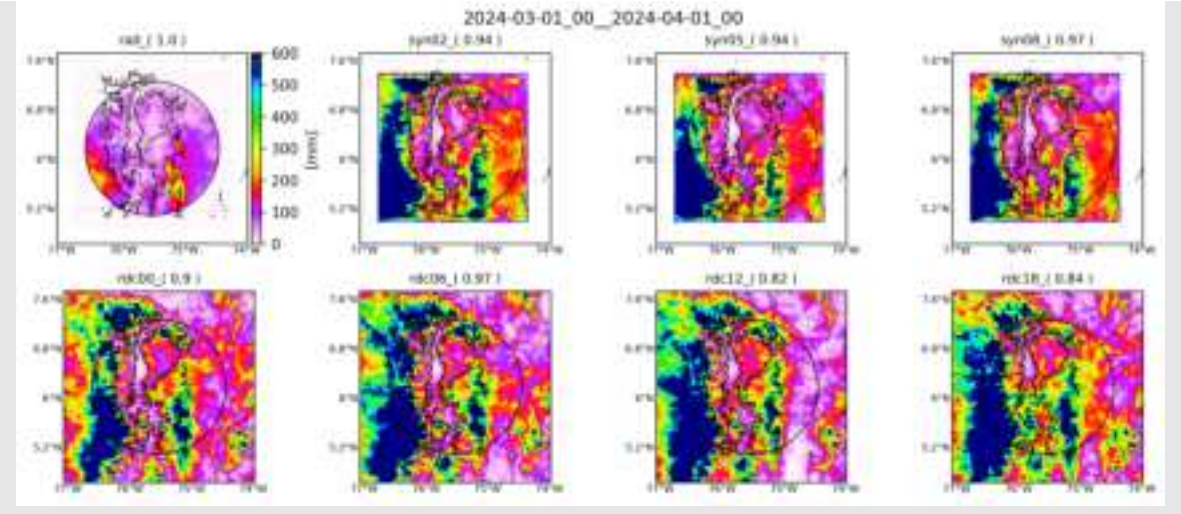


Figura 6: Precipitación acumulada de radar y RDFS-CTR para el mes de marzo 2024.

Entre 2024 y 2025 se realizaron algunos ajustes en la configuración operacional de RDFS-RDA y luego se calculó nuevamente el acumulado de precipitación de marzo para 2025 (segunda fila Figura 7). Con lo anterior se puede ver que la configuración RDFS-RDA conserva los patrones espaciales y no arroja valores anormalmente pequeños en el dominio. A la luz de estos resultados, se realizó la respectiva aplicación de los parámetros encontrados en *COMFS* para el dominio mas externo.

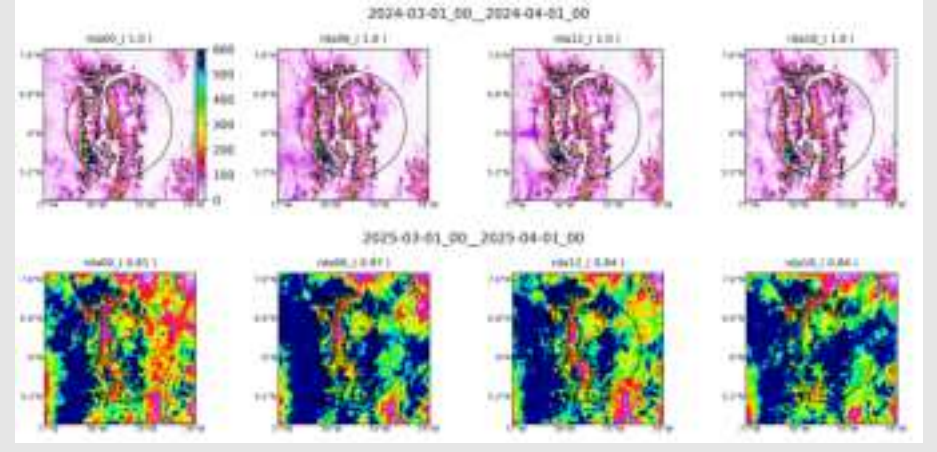


Figura 7: Precipitación acumulada de RDFS-RDA para el mes de marzo 2024 (primera fila) y marzo de 2025 (segunda fila).

Ensambles de modelos globales de pronóstico

Se ha configurado el dominio de procesamiento de datos del producto *pgrb2sp25 Selected Parms* de GEFS - Global Extended Forecast System, el cual cuenta con una simulación de control, y 30 ensambles con una resolución de 0.25 grados y un horizonte de 240 horas. En este producto se pueden encontrar la mayoría de variables en la superficie, incluyendo precipitación, humedad, temperatura y vientos. En la Figura 8 se puede observar los píxeles seleccionados en un dominio que cubre todo el territorio del departamento de Antioquia para la variable orografía, además se puede determinar que el Área Metropolitana queda cubierta por 9 de estos píxeles.

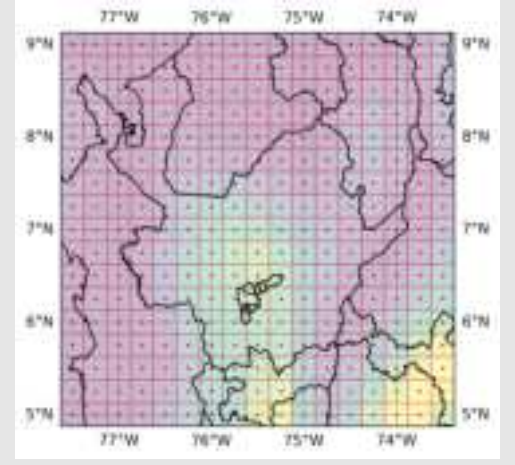


Figura 8: Dominio para procesamiento de datos de GEFS.

Se realizó el diseño de flujo procesos para descarga y procesamiento de datos de ensambles (GEFS), se implementó de manera operativa y se encuentra a disposición para consulta (`https://siata.gov.co/meteorologia/Forecast/GEFS/`). Este link se actualiza aproximadamente cada 6 horas, a las 00, 06, 12,

18 para el horizonte de 12 horas y alrededor de las 03, 09, 15, 21 para el horizonte de 10 días. En el enlace anterior se puede encontrar los siguientes subproductos:

- Serie se dispersión de ensambles de precipitación (horizonte 12 horas).
- Serie se dispersión de ensambles de precipitación (horizonte 10 días).
- Serie se dispersión de ensambles de temperatura (horizonte 10 días).
- Serie se dispersión de ensambles de agua precipitable (horizonte 10. días)
- Mapa de probabilidad de lluvia $>$ 5 mm (horizonte 12 horas).
- Mapa de probabilidad de lluvia $>$ 10 mm (horizonte 12 horas).
- Mapa de probabilidad de lluvia $>$ 20 mm (horizonte 12 horas).
- Histórico de resultados de ensambles de precipitación (hasta 10 días atrás).

De manera similar a lo desarrollado con el GEFS, se realizó la implementación operativa del procesamiento de los datos proporcionados por ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast) para las 51 ejecuciones de la variable de precipitación (1 control + 50 ensambles) del modelo IFS (Integrated Forecast System) a una resolución de 0.1 grados (Figura 9). Está información consiste en 2 ejecuciones al día para un horizonte de 15 días. Como resultado se deja a disposición para consulta el enlace (`https://siata.gov.co/meteorologia/Forecast/ECMWF/`). La figuras contenidas en el enlace se actualizan 2 veces al día (3 a.m. y 3 p.m.) en función de las ejecuciones operativas del ECMWF.

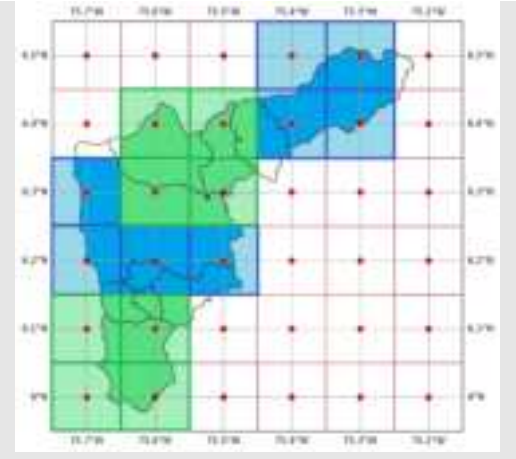


Figura 9: Dominio para procesamiento de datos de IFS-ECMWF 15 dias

En el enlace anterior se pueden encontrar los siguientes subproductos:

- Serie se dispersión de ensambles de precipitación promedio de pixeles centrales (horizonte 15 días).
- Serie se dispersión de ensambles de precipitación en 16 pixeles (horizonte 20 horas).

Es importante mencionar que la información disponible de ECMWF también cuenta con datos que permiten extender el horizonte de pronóstico hasta 45 días a una resolución de 0.5 grados (Figura 10), pero en este caso se cuenta con 1 simulación de control y 100 ensambles (`https://siata.gov.co/meteorologia/Forecast/ECMWF/seas45/`) .



Figura 10: Dominio para procesamiento de datos de IFS-ECMWF 45 días.

En el link anterior se puede encontrar los siguientes subproductos:

- Serie se dispersión de ensambles de precipitación (horizonte 45 días).
- Serie se dispersión de ensambles de temperatura (horizonte 45 días).

WP1.1.2. Evaluación de los efectos relacionados con el cambio climático a nivel local

El objetivo general de esta actividad es evaluar a partir de modelos globales del CMIP6 y bases de datos de modelos subescalados disponibles, los efectos del cambio climático en variables hidrometeorológicas de interés, asi como indices e impulsores de impacto. Esta actividad involucró el uso de datos con buena representatividad para el territorio así como diseñar e implementar una estrategia de subescalamiento dinámico de un modelo global, para mejorar los resultados en la región usando como herramienta modelos numéricos regionales (WRF, siendo una estrategia físico-dinámica).

Parte I: Evaluación de índices basados en precipitación en el contexto de cambio climático

Introducción

La evaluación de los efectos del Cambio Climático sobre el Valle de Aburrá y su región vecina a partir de información de alta resolución se ha adelantado a partir de múltiples enfoques, principalmente en función de los extremos climáticos de precipitación y temperatura, cuyos resultados en el período observado (a partir de 1979 y 1981 en función de la base de datos de referencia, y hasta 2014) y en las proyecciones climáticas sugieren aumentos en la intensidad y ocurrencia de eventos cálidos, junto con aumentos en la intensidad de eventos extremos de precipitación en el territorio.

A partir de estos resultados preliminares, durante la vigencia del contrato 016 de 2024 se adelantó el análisis de indicadores climáticos basados en precipitación, pero evaluando el efecto combinado con otras variables ambientales, que permitan definir los patrones hidroclimatológicos del territorio. Algunos enfoques han relacionado la precipitación con la evapotranspiración para cuantificar el déficit hídrico en escenarios de Cambio Climático (Ortega and Arias, 2018), mientras que otros estudios también han utilizado la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial para clasificar el régimen hidrológico en diferentes categorías, desde húmedos hasta hiper-áridos (Fernandez et al., 2019).

Adicionalmente, en otros estudios se realiza la clasificación del régimen hidrológico a partir de índices basados en la radiación neta anual, la precipitación y el calor latente de vaporización (Fernandez et al., 2019), mientras que otros relacionan la evapotranspiración potencial y real para realizar esta clasificación (una, 2022).

Este nuevo enfoque en el que se basan los resultados presentados a continuación, en el que no se evalúa la variable de manera aislada, y por el contrario, que busca relacionar variaciones de diversas variables en conjunto, complementa adecuadamente los análisis realizados en vigencias anteriores, y permite analizar los cambios en características del régimen hidrológico y la disponibilidad del recurso hídrico en el territorio, el cual no depende únicamente de un proceso, sino que está modulado por la unión de varios fenómenos y patrones ambientales. Asociado a lo anterior, en este informe se presentan los principales resultados que se obtuvieron en el contrato, asociado a la evaluación de los cambios en los atributos hidroclimatológicos en el Valle de Aburrá y su región aledaña a partir de la información de precipitación y su efecto combinado con otras variables ambientales, como la evapotranspiración potencial.

Metodología

La evaluación de los indicadores de precipitación en el contexto de Cambio Climático se adelanta a partir de la estimación del índice AIu propuesto por el Programa Ambiental de las Naciones Unidas (UNEP por sus siglas en inglés, Fernandez et al. (2019)), el cual se define como la relación entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (PET, Ecuación 7.1), y a partir de este balance, clasifica el régimen hidrológico en condiciones desde húmedas hasta híper-áridas.

$$AIu = \frac{P}{PET} \tag{7.1}$$

El cálculo de este indice para el periodo observado se realiza a partir de la información de la base de datos de balance hidrológico Terra Climate (Abatzoglou et al., 2018), la cual cuenta con información mensual de alta resolución espacial de variables relacionadas con el balance hídrico. Por otro lado, también se toma la información de precipitación del proyecto CHIRPS (Shen et al., 2020), y los estimados de evapotranspiración potencial del reanálisis de ERA5 (Hersbach et al., 2020), buscando adelantar el cálculo y la comparación de los estimados del indicador en el periodo observado, y para la región del norte de Suramérica, y para la región de Antioquia. Para este cálculo se toma la precipitación de CHIRPS dadas las limitaciones de ERA5 en la representación de la precipitación en la región, asociado por ejemplo a mayores sesgos en los trópicos (Lavers et al., 2022). Particularmente, y para adelantar la comparación con los modelos climáticos de alta resolución, el periodo histórico comprende el periodo entre 1981-2014, y las proyecciones climáticas para el mediano y largo plazo se basaron en los periodos 2041-2060 y 2081-2100, respectivamente. Adicionalmente, se analizaron dos regiones: una que abarca el norte de Suramérica y centroamérica (8°S-25°N y 110°W-35°W), y una región más localizada en Antioquia y la región aledaña al Valle de Aburrá (5.2°N-9°N y 78°W-73.5°W).

Por otro lado, para adelantar el análisis con los modelos dinámicos de alta resolución en el contexto de Cambio Climático es necesario utilizar metodologías alternas para estimar la variable evapotranspiración potencial, debido al limitado número de modelos que cuentan con la variable. Por lo anterior, se realizó el cálculo de la evapotranspiración potencial a partir de dos métodos: el método de Thornthwaite (Thornthwaite, 1948) y el método de Hargreaves (Hargreaves and Samani, 1985). El método de Thornthwaite se basa en la temperatura media y en el máximo número de horas con incidencia de radiación solar en función de la latitud, la cual se aplica para realizar una corrección al método. Por otro lado, el método de Hargreaves utiliza para el cálculo de la evapotranspiración potencial, valores de la temperatura media, máxima y mínima, junto con la radiación solar en función de la latitud.

Estos dos métodos son los que han sido analizados inicialmente para estimar los datos de evapotranspiración potencial y así adelantar el trabajo con los modelos dinámicos de alta resolución. Por otro lado, el cálculo de la evapotranspiración real a partir de diferentes métodos exhibe altas incertidumbres, y por lo tanto, no se adelantan tanto el cálculo de la evapotranspiración real como los indicadores que relacionan la variable.

A partir de las series del indicador AIu para Antioquia, se seleccionaron los meses con un valor alto y bajo del índice, para evaluar los campos compuestos de las anomalías de diferentes variables ambientales, y relacionar condiciones más secas o más húmedas en el territorio con patrones específicos de temperatura superficial del mar y campos atmosféricos en la tropósfera baja y media. La selección de los eventos húmedos y secos se realizó a partir de la serie de anomalías del índice AIu para Antioquia, y se tomaron aquellos periodos en donde la anomalía del mes supera y era inferior a una desviación estándar de la serie de largo plazo. Por otro lado, el análisis de campos compuestos se realizó a partir de las anomalías temperatura superficial del mar, y de magnitud y dirección del viento, humedad relativa y altura geopotencial a 500 hPa y 950 hPa.

Índice AIu en modelos HighResMIP incluídos en CMIP6

Con el fin de adelantar la evaluación del índice como herramienta para analizar las condiciones hidrológicas del territorio, se utilizaron un conjunto de modelos de alta resolución espacial incluidos en la sexta fase del proyecto de comparación de modelos acoplados (HighResMIP-CMIP6) en las simulaciones históricas entre 1981 y 2014, y las proyecciones climáticas para el mediano (2041-2060) y el largo plazo (2081-2099). Los modelos utilizados para analizar el índice AIu a partir de las simulaciones históricas son el MRI-AGCM3-2-S y MRI-AGCM3-2-H (Mizuta et al., 2012), FGOALS-f3-L (He et al., 2020), NICAM16-7S y NICAM16-8S (Kodama et al., 2021).

Para evaluar el desempeño de los modelos en la simulación de los patrones espaciales y temporales del índice AIu, se utilizó la metodología de la eficiencia Kling-Gupta (KGE por sus siglas en inglés), la cual relaciona la correlación (CORR), la relación de sesgo (BR) y la variabilidad relativa (RV) entre el campo simulado y el observado (Gupta et al., 2009), siguiendo las siguientes formulaciones matemáticas:

$$KGE = 1 - \sqrt{(1 - CORR)^2 + (1 - BR)^2 + (1 - RV)^2} \tag{7.2}$$

$$CORR = \frac{\sum (O_i - \bar{O})(S_i - \bar{S})}{\sqrt{\sum (O_i - \bar{O})^2 \sum (S_i - \bar{S})^2}} \tag{7.3}$$

$$BR = \frac{\bar{S}}{\bar{O}} \tag{7.4}$$

$$RV = \frac{CVs}{CVo} \tag{7.5}$$

$$CV = \frac{\sigma}{\mu} \tag{7.6}$$

A partir de los resultados de la evaluación de las simulaciones históricas de los modelos se seleccionó un modelo para evaluar las proyecciones climáticas del índice para el mediano y largo plazo.

Resultados

La Figura 11 presenta la climatología del índice AIu a partir de la información de TerraClimate para el periodo histórico entre 1979 y 2023, sugiriendo que en el norte de Suramérica las variaciones en las condiciones del régimen hidrológico en la región exhiben una alta estacionalidad, con condiciones más áridas en Venezuela y el noreste de Suramérica en los meses de diciembre-enero-febrero, mientras que entre agosto y octubre las condiciones más áridas se exhiben en el Amazonas y el nordeste de Brasil.

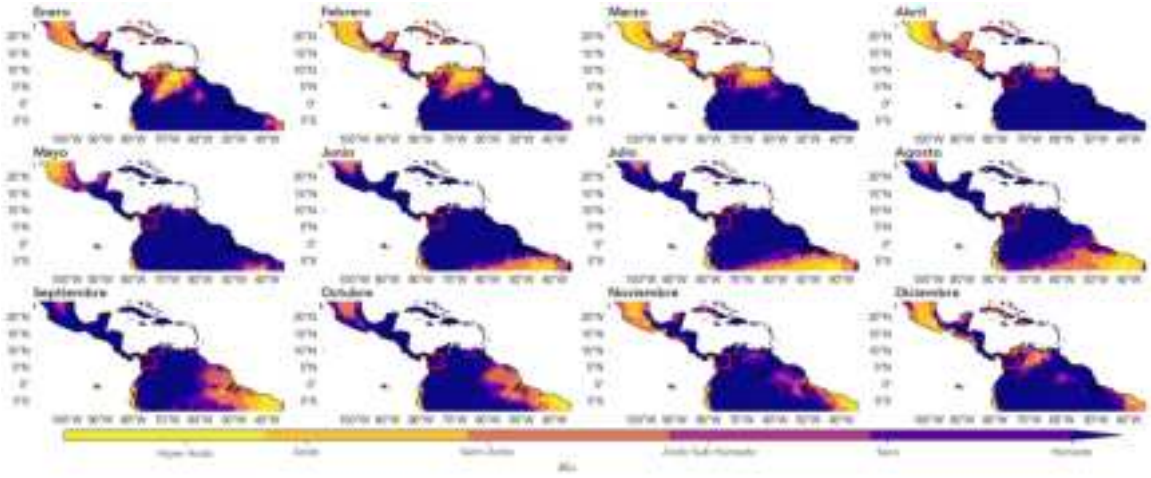


Figura 11: Climatología del índice AIu a partir de la información de TerraClimate durante 1979-2023. El recuadro rojo representa la región de Antioquia.

Las variaciones en la región de Antioquia (recuadro rojo) a lo largo del año no son tan marcadas, indicando la persistencia de regímenes entre secos y húmedos a lo largo del año. Esto puede respaldarse con la Figura 12 que presenta el ciclo anual multianual del índice AIu para Antioquia, en donde se observan fluctuaciones entre un régimen seco durante enero-febrero, y un régimen húmedo en los demás meses del año. Estas fluctuaciones están fuertemente influenciadas por la ocurrencia de las temporadas secas y húmedas en el territorio, es decir, la bimodalidad de la precipitación en la región Andina colombiana.

Por otro lado, la Figura 12 también presenta las series del índice AIu estimadas a partir de la evapotranspiración potencial calculada por los métodos de Hargreaves (línea azul clara) y de Thornthwaite (línea gris). Los resultados sugieren grandes similitudes entre los estimados de ambos métodos, ya que ambos permiten capturar las variaciones mensuales del índice AIu, y de manera adicional, exhiben una subestimación del índice con respecto a los estimados obtenidos a partir de la información original del TerraClimate.

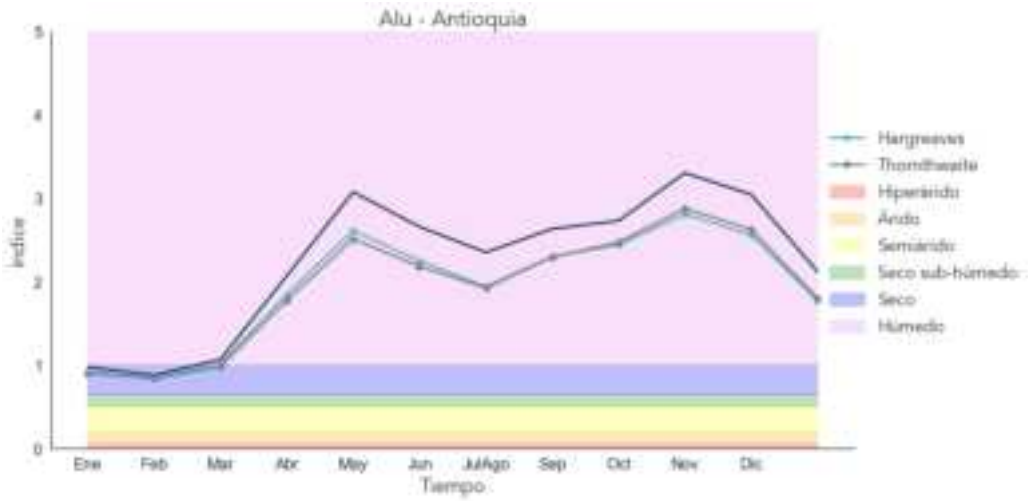


Figura 12: Ciclo anual multianual del índice AIu para la región de Antioquia a partir de los datos de Terra Climate (línea azul oscura), y a partir del cálculo de la evapotranspiración potencial con el método de Hargreaves (línea azul clara) y de Thornthwaite (línea gris). Los sombreados representan la clasificación de los regímenes hidrológicos dados por el índice.

Adicionalmente, se realizó la comparación del índice AIu calculado a partir de la precipitación de CHIRPS y los estimados de evapotranspiración potencial de ERA5 (Figura 13, línea azul clara) junto con el índice estimado a partir de los datos originales de TerraClimate (línea azul oscura). Los resultados indican que el índice AIu calculado a partir de ERA5 y CHIRPS captura adecuadamente el ciclo anual del régimen hidroclimatológico en la región de Antioquia, y de manera adicional no evidencia grandes diferencias en términos de la magnitud del índice con respecto a los estimados de TerraClimate. Estos patrones se evidencian tanto para el índice a partir de la evapotranspiración potencial con el método de Thornthwaite (panel superior), como con el método de Hargreaves (panel inferior).

índice AIu y el fenómeno El Niño Oscilación del Sur (ENSO)

Siguiendo el análisis del índice AIu, y su representación de las variaciones hidroclimatológicas de la región, se adelantó la evaluación de la influencia del fenómeno ENSO sobre el índice AIu en Antioquia. Para esto, se tomó el índice ONI de la NOAA para el monitoreo del ENSO, el cual se basa en el producto de temperatura superficial del mar reconstruida ERSST.v5 (considerando el periodo de 1979-2023, `https://psl.noaa.gov/data/timeseries/month/DS/ONI/`), y de esta manera, clasificar cada mes del periodo histórico con condiciones neutrales, El Niño y La Niña del fenómeno ENSO. Después de esta identificación de los periodos con ocurrencia las fases del fenómeno ENSO, se calculó el ciclo anual multianual del índice para la región de Antioquia.

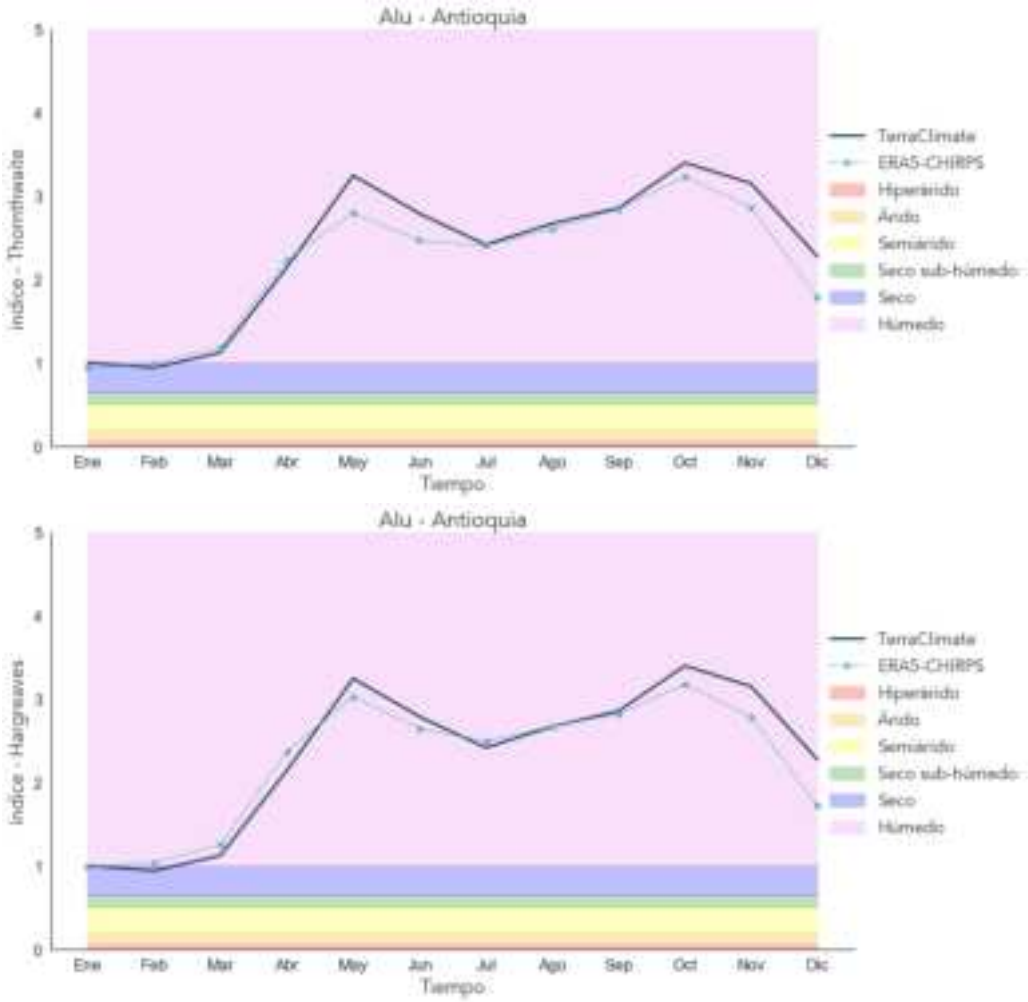


Figura 13: Ciclo anual multianual del índice AIu para la región de Antioquia a partir de los datos de Terra Climate (línea azul oscura), y a partir de CHIRPS y el cálculo de la evapotranspiración potencial con el método de Thornthwaite (panel superior - línea azul clara) y a partir del método de Hargreaves (panel inferior - línea azul clara) a partir de ERA5. Los sombreados representan la clasificación de los regímenes hidrológicos dados por el índice.

La Figura 14 muestra el ciclo anual promedio del índice AIu durante la fase cálida (El Niño, línea roja), la fase fría (La Niña, línea azul) y neutrales (línea gris) del ENSO con la información de TerraClimate (panel superior), de CHIRPS y ERA5 con el método de Thornthwaite (panel del medio) y de CHIRPS y ERA5 con el método de Hargreaves (panel inferior). De manera general, para todas las bases de datos analizadas, se obtienen diferencias en el índice bajo diferentes condiciones del fenómeno ENSO, ya que durante la fase fría, el índice aumenta su valor y se localiza en regímenes húmedos a lo largo del año. Por otro lado, durante la fase cálida disminuyen los valores del índice, y durante diciembre y febrero, se alcanzan regímenes secos y secos sub-húmedos, indicando la ocurrencia de condiciones más secas en el territorio durante eventos El Niño. Estas fluctuaciones, durante diferentes fases del fenómeno ENSO, son capturadas por el índice AIu en todas las bases de datos analizadas.

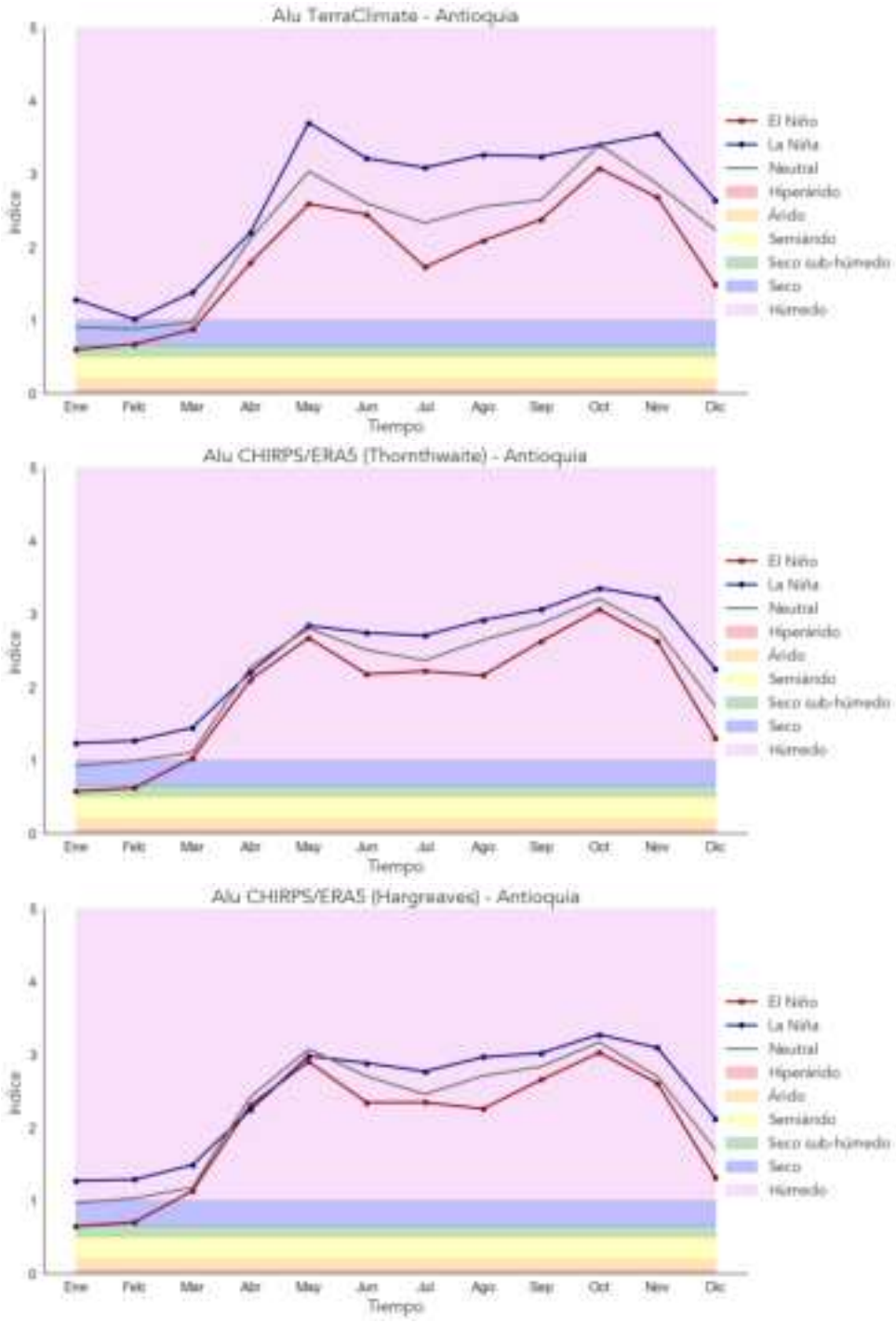


Figura 14: Ciclo anual promedio del índice AIu para la región de Antioquia a partir de los datos de Terra Climate (superior), y de CHIRPS con la evapotranspiración potencial calculada con ERA5 a partir del método de Thornthwaite (medio) y de Hargreaves (inferior) para la fase cálida (El Niño, línea roja), fría (La Niña, línea azul) y neutral (línea gris) del ENSO.

Adicionalmente, y con el fin de complementar el análisis de las fluctuaciones del índice AIu en la región de Antioquia, se realizó el análisis de campos compuestos de variables ambientales durante la ocurrencia de eventos particularmente húmedos y secos. Para esto, identificamos la ocurrencia de eventos húmedos y secos a partir de la serie de anomalías del índice AIu, donde se definió un evento húmedo cuando se supera una desviación estándar de la serie de anomalías, mientras que un evento seco se selecciona cuando el valor de la anomalía es menor a una desviación estándar de la serie. El análisis de campos compuestos se realizó a partir del índice AIu estimados con CHIRPS y ERA5 con el método de Thornthwaite y Hargreaves, y los campos compuestos se calcularon a partir ERA5. Por otro lado, no se incluyen los estimados de TerraClimate debido a la limitación de la información de variables en diferentes niveles de presión en la atmósfera de esta base de datos.

La Figura 15 presenta los campos compuestos de las anomalías de temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) de ERA5 para eventos húmedos y secos en la región de Antioquia. Se observa que durante los eventos húmedos, los campos compuestos sugieren menores SSTs en el este y centro del océano Pacífico tropical, siendo similares a los patrones de eventos La Niña, mientras que para eventos secos, los campos compuestos de anomalías de SST muestran condiciones más cálidas en el Pacífico tropical central y este, que se asemejan a condiciones El Niño.

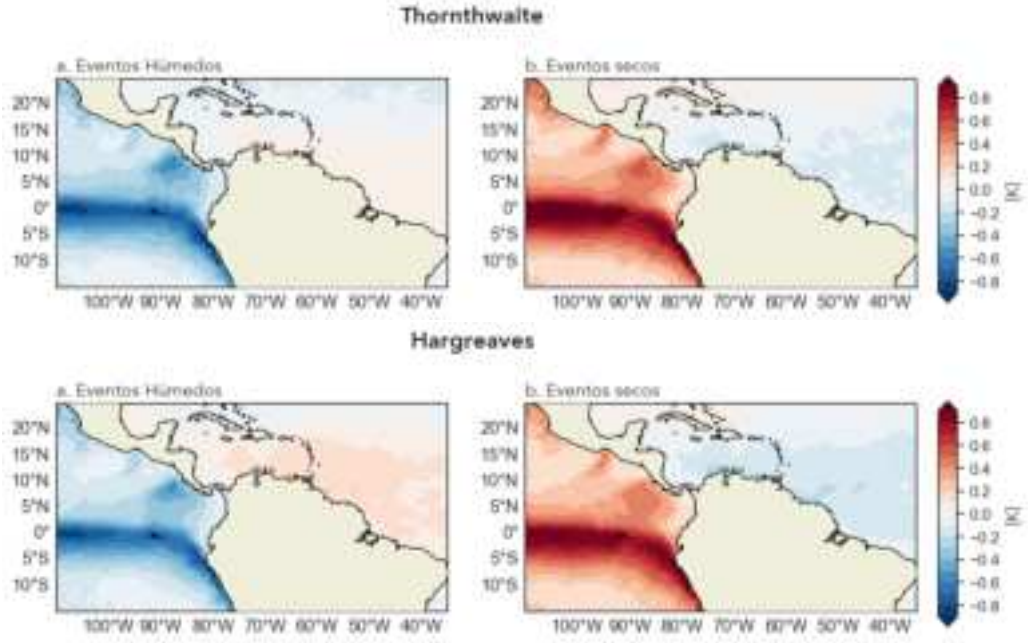


Figura 15: Campos compuestos de las anomalías de temperatura superficial del mar (SST por sus siglas en inglés) durante la ocurrencia de eventos húmedos y secos identificados a partir de las series de anomalías del índice AIu en la región de Antioquia calculados a partir del método de Thornthwaite (superior) y Hargreaves (inferior).

Los patrones anteriores indican que el fenómeno ENSO, en sus fases cálidas y frías, pueden modular la ocurrencia de condiciones más húmedas y secas en el territorio de Antioquia, mientras que en el océano Atlántico durante eventos húmedos se obtienen ligeras anomalías positivas de SST, mientras que durante eventos secos el océano Atlántico tropical exhibe SST más frías, indicando también un patrón dipolo entre los océanos Pacífico y Atlántico.

Por otro lado, la Figura 16 muestra los campos compuestos de las anomalías de altura geopotencial para los niveles de 500 y 950 hPa para los eventos húmedos y secos en el territorio del Valle de Aburrá. Los patrones para la troposfera media sugieren una disminución de la altura geopotencial a lo largo del dominio bajo la ocurrencia de eventos húmedos, lo cuál podría estar relacionado con la disminución de la presión en niveles medios, mientras que durante la ocurrencia de eventos secos, resalta el aumento en la altura geopotencial de 500 hPa en el Atlántico tropical. Por otro lado, en niveles bajos de la tropósfera se obtienen patrones diferentes entre el océano Pacífico y el oeste de Colombia y el océano Atlántico y la mayor parte de la región continental. Mientras que durante eventos secos se localizan menores valores de altura geopotencial sobre el océano Pacífico, durante la ocurrencia de eventos húmedos, las anomalías negativas se localizan sobre el océano Atlántico tropical y la región continental (a excepción del oeste de la región continental).

Estos patrones de altura geopotencial se acompañan adecuadamente con los campos compuestos de las anomalías de la magnitud y dirección del viento (Figura 17), ya que en niveles medios y bajos la ocurrencia de eventos húmedos donde se evidenciaba una disminución de la altura geopotencial, se acompañan de circulaciones ciclónicas, lo cual podría favorecer la convergencia de humedad en niveles medios. Lo contrario ocurre en la ocurrencia de eventos secos, ya que en niveles medios de la tropósfera (500 hPa) se exhiben circulaciones anticiclónicas con mayor magnitud del viento, lo que podría favorecer condiciones más secas en la columna atmosférica. Por otro lado, en niveles bajos de la troposfera, durante la ocurrencia de eventos húmedos prevalece la convergencia de vientos desde el Pacífico sur y el oeste del mar Caribe en el centro-norte de Colombia, lo cual puede modular el transporte de humedad hacia la región. De manera opuesta, durante la ocurrencia de eventos secos la circulación de vientos en superficie se caracteriza por flujos hacia el sur en el este del Pacífico tropical, lo cual puede inhibir la convergencia de humedad en niveles bajos en la región central de Colombia.

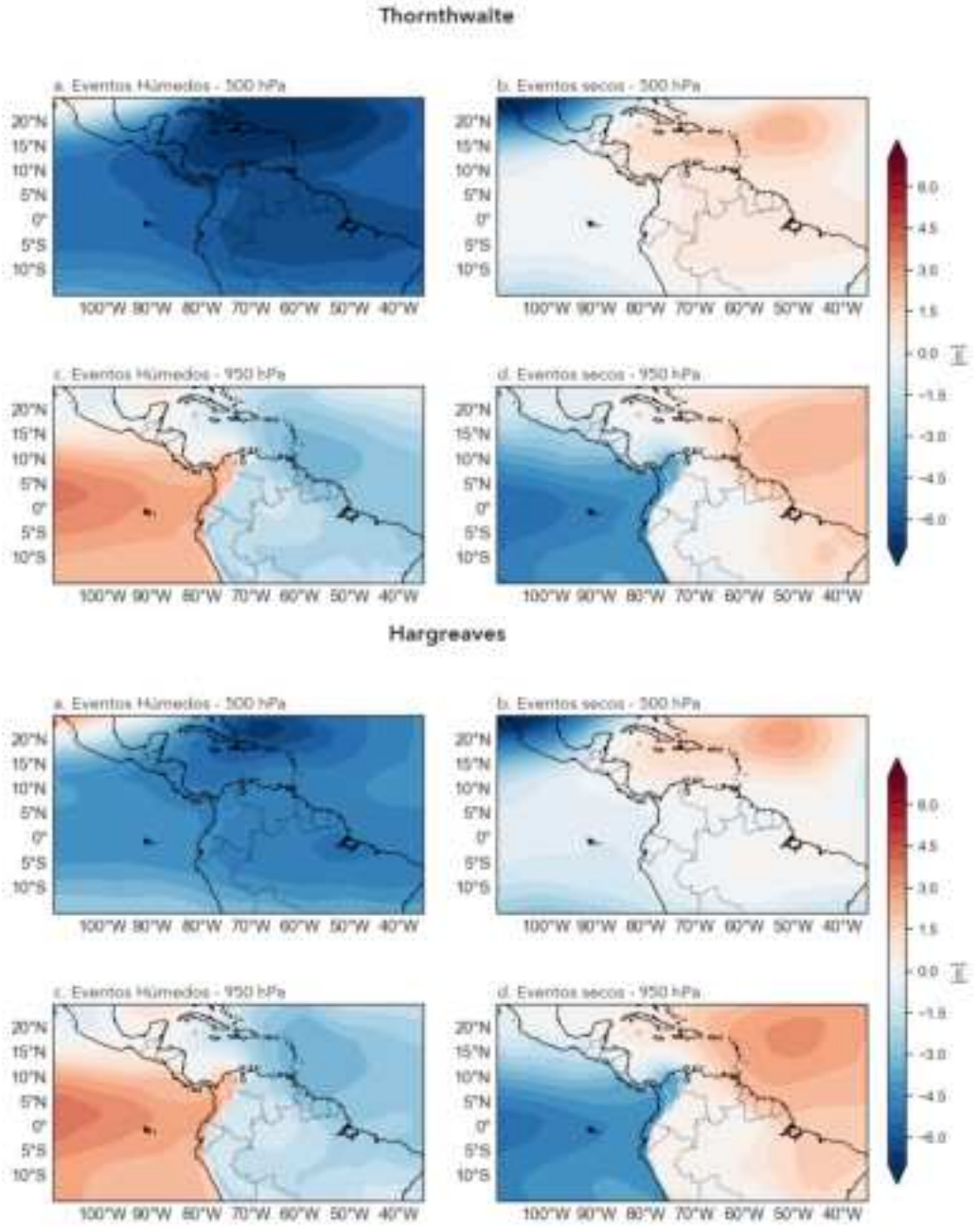


Figura 16: Campos compuestos de las anomalías de altura geopotencial de 500 hPa y 950 hPa durante la ocurrencia de eventos húmedos y secos identificados a partir de las series de anomalías del índice AIu en la región de Antioquia calculados a partir del método de Thornthwaite (superior) y Hargreaves (inferior).

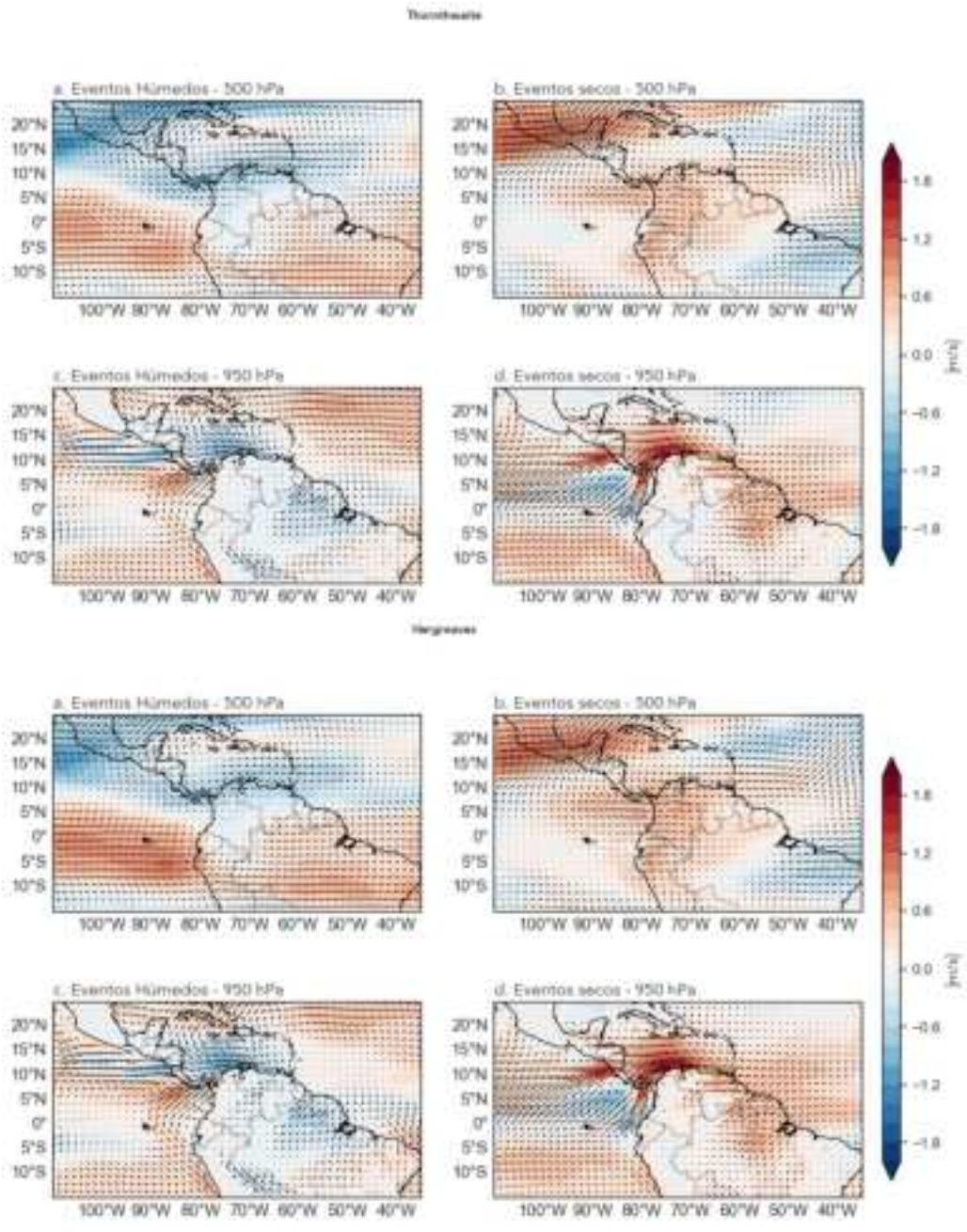


Figura 17: Campos compuestos de las anomalías de la magnitud y dirección del viento a 500 hPa y 950 hPa durante la ocurrencia de eventos húmedos y secos identificados a partir de las series de anomalías del índice AIu en la región de Antioquia calculados a partir del método de Thornthwaite (superior) y Hargreaves (inferior).

Los campos compuestos de las anomalías de humedad relativa (no mostrado) muestran diferencias marcadas durante eventos húmedos y secos en respuesta a los campos presentados anteriormente. Durante eventos cálidos se obtiene una disminución de la humedad relativa tanto en superficie como en niveles medios de la tropósfera, mientras que la humedad relativa tiende a aumentar durante eventos húmedos en el territorio y a lo largo de la columna atmosférica, para el norte de Suramérica. Las magnitudes de las anomalías de humedad relativa son mayores en el nivel de 500 hPa, lo cual puede estar relacionado por las variaciones en la altura geopotencial y el fortalecimiento de centros de alta y baja presión en dichos niveles, favoreciendo o no, la convergencia de humedad en la región.

Índice AIu en modelos climáticos de alta resolución

Con respecto a la representación del índice a partir de un conjunto de modelos HighResMIP-CMIP6 (simulaciones climáticas con alta resolución espacial) en las simulaciones históricas, se evaluó el desempeño de 5 modelos a partir de la eficiencia de Kling-Gupta (KGE, ver sección de metodología). La Figura 18 presenta los resultados del KGE para los campos mensuales del índice AIu, los cuales se compararon con respecto a los estimados de ERA5 y CHIRPS para el periodo 1981-2014.

Los resultados de la evaluación sugieren que los modelos MRI-AGCM3-2-S y MRI-AGCM3-2-H tienden a exhibir la mejor representación de los campos del AIu a lo largo del año (valores cercanos a 1), mientras que el modelo FGOALS-f3-L exhibe los menores valores del KGE, y por lo tanto, tiene una limitada representación de los campos del indicador AIU. Por otro lado, el desempeño de los modelos NICAM16-7S y NICAM16-8S varía dependiendo del mes y del método para calcular la evapotranspiración potencial, teniendo una mejor simulación entre noviembre y diciembre, y a partir del método de Hargreaves. De acuerdo a lo anterior, para la evaluación de los campos compuestos durante la ocurrencia de eventos extremos húmedos y secos, y para el análisis de las proyecciones climáticas, se tomará el modelo MRI-AGCM3-2-S.

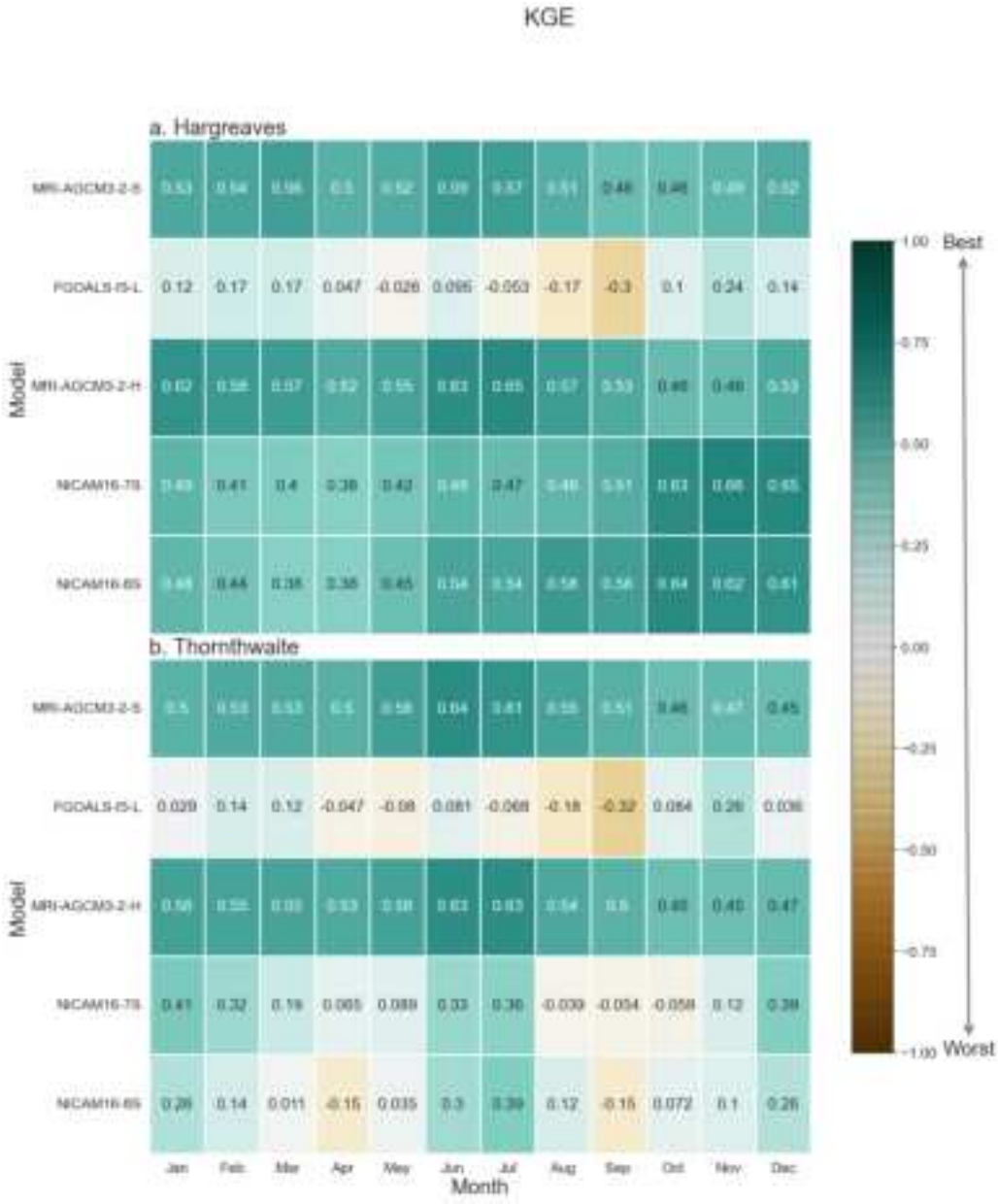


Figura 18: Resultados de la evaluación del desempeño de los modelos HighResMIP-CMIP6 en la simulación de los patrones históricos del índice AIu para el periodo 1981-2014. El desempeño de los modelos se adelantó con respecto a los estimados de ERA5 y CHIRPS y, se basó en el método de la eficiencia Kling-Gupta (KGE) que toma el valor de 1 como indicativo de un mejor desempeño del modelo.

Con respecto a las simulaciones del índice AIu, la Figura 19 presenta el ciclo anual del índice AIu para la región de Antioquia a partir de la referencia (ERA5 y CHIRPS, línea azul oscura) y de las simulaciones históricas del modelo MRI-AGCM3-2-S (línea azul clara). Los resultados sugieren la sobrestimación por parte del modelo de los valores del índice a lo largo del año, aunque dicha sobrestimación no influencia la

clasificación mensual del régimen hídrico en la región, ya que tanto la referencia como el modelo indican que en la región de Antioquia se experimentan condiciones húmedas en gran parte del año, aunque durante enero el modelo no captura la clasificación en un régimen más seco. Lo anterior indica que, aunque el modelo puede exhibir sesgos relevantes en términos de la magnitud del índice, aún captura de manera adecuada las variaciones mensuales del régimen hídrico del territorio en la mayoría de los meses del año.

Los campos compuestos durante la ocurrencia de eventos extremos húmedos y secos a partir de las simulaciones históricas del modelo HighResMIP-CMIP6 siguen la metodología presentada para la referencia, y particularmente, se evaluaron los campos compuestos de los campos de viento horizontal y altura geopotencial a 925 y 500 hPa. Los resultados del modelo muestran consistencia con los patrones obtenidos a partir de ERA5, donde eventos extremos húmedos ocurren bajo menores alturas geopotenciales en estos niveles de presión y circulaciones de viento desde el sur en niveles bajos y con circulaciones ciclónicas en niveles medios; mientras que patrones opuestos fueron obtenidos durante la ocurrencia de eventos extremos secos (Informe de Octubre 2024, no mostrado).

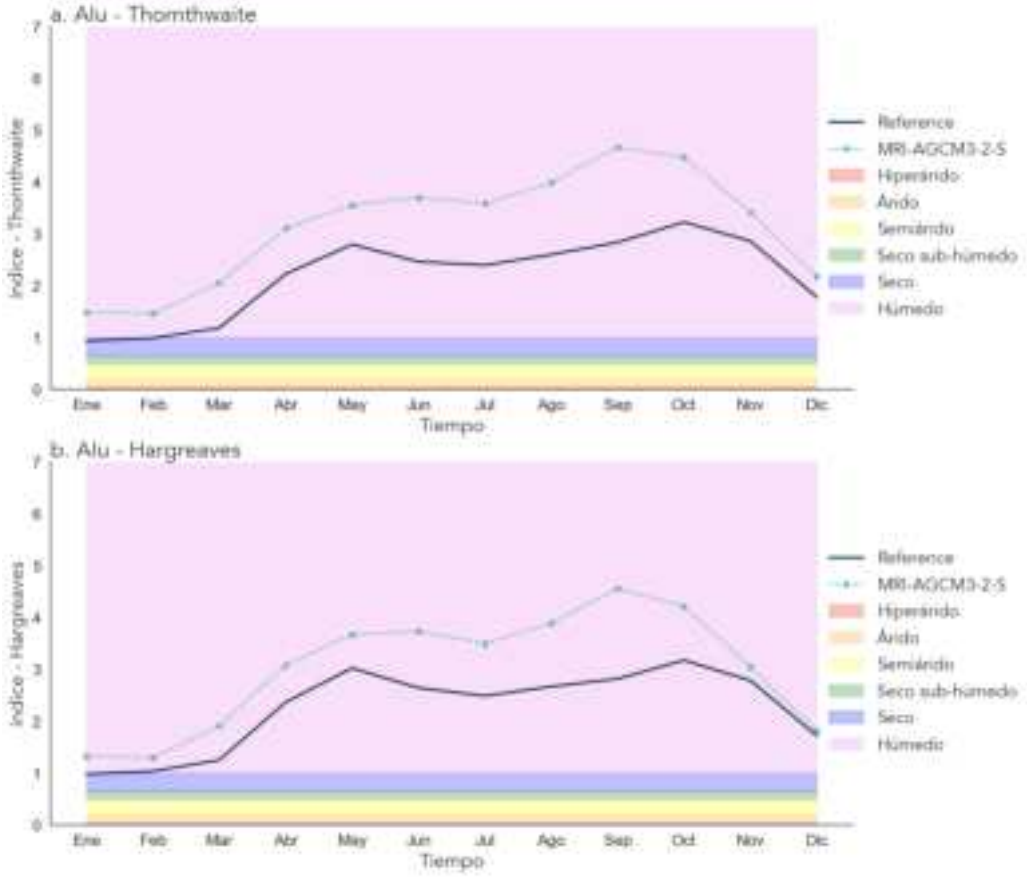


Figura 19: Ciclo anual multianual del índice AIu para la región de Antioquia a partir de las simulaciones históricas del modelo MRI-AGCM3-2-S con el método de Thornthwaite (a, panel superior) y de Hargreaves (b, panel inferior).

Por otro lado, las proyecciones climáticas (Figuras 20 y 21) presentan diferencias de acuerdo al método del cálculo de la evapotranspiración potencial que se considere: mientras que con el método de Thornthwaite el modelo indica la disminución proyectada del índice a lo largo del siglo XXI, es decir, sugiriendo el cambio hacia condiciones más secas en el territorio, con el método de Hargreaves no se observan variaciones marcadas con respecto a las condiciones históricas.

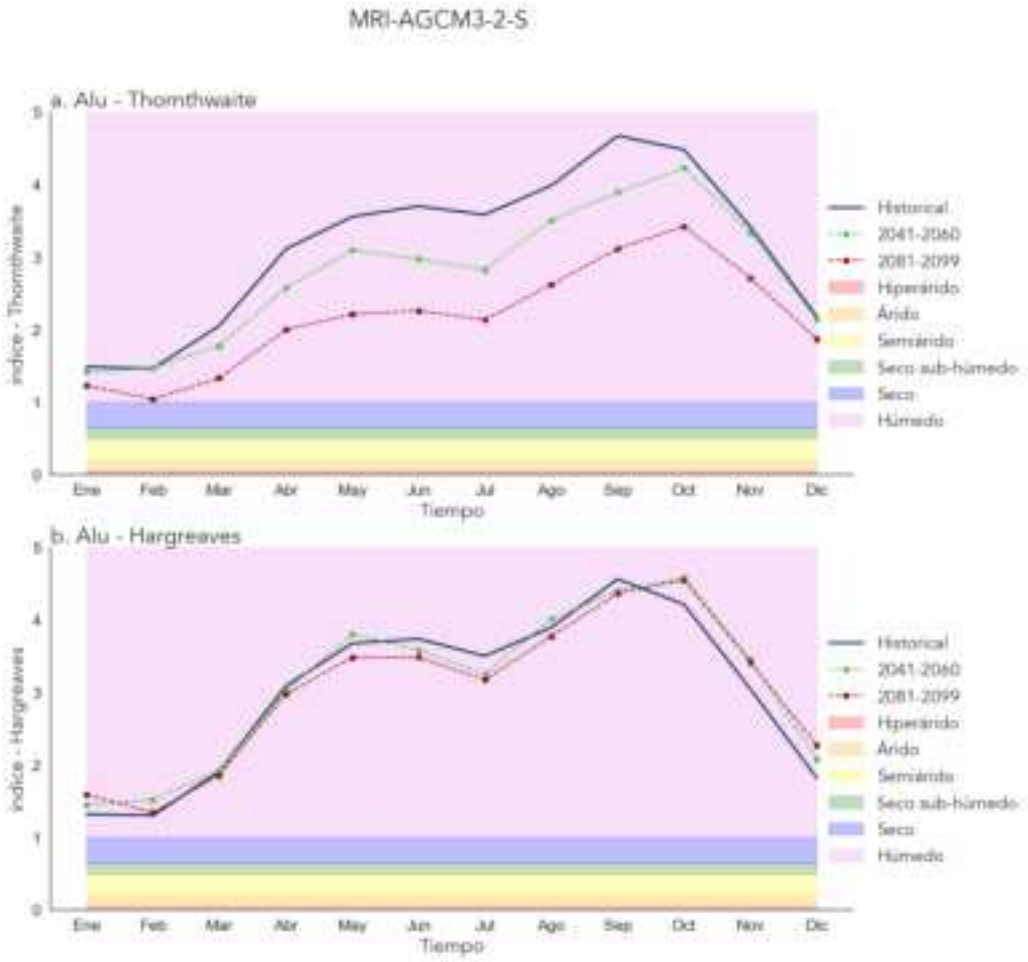


Figura 20: Cambios proyectados del ciclo anual multianual del índice AIu para la región de Antioquia a partir del modelo MRI-AGCM3-2-S para el mediano (línea verde) y largo plazo (línea roja) con el método de Thornthwaite (a, panel superior) y de Hargreaves (b, panel inferior).

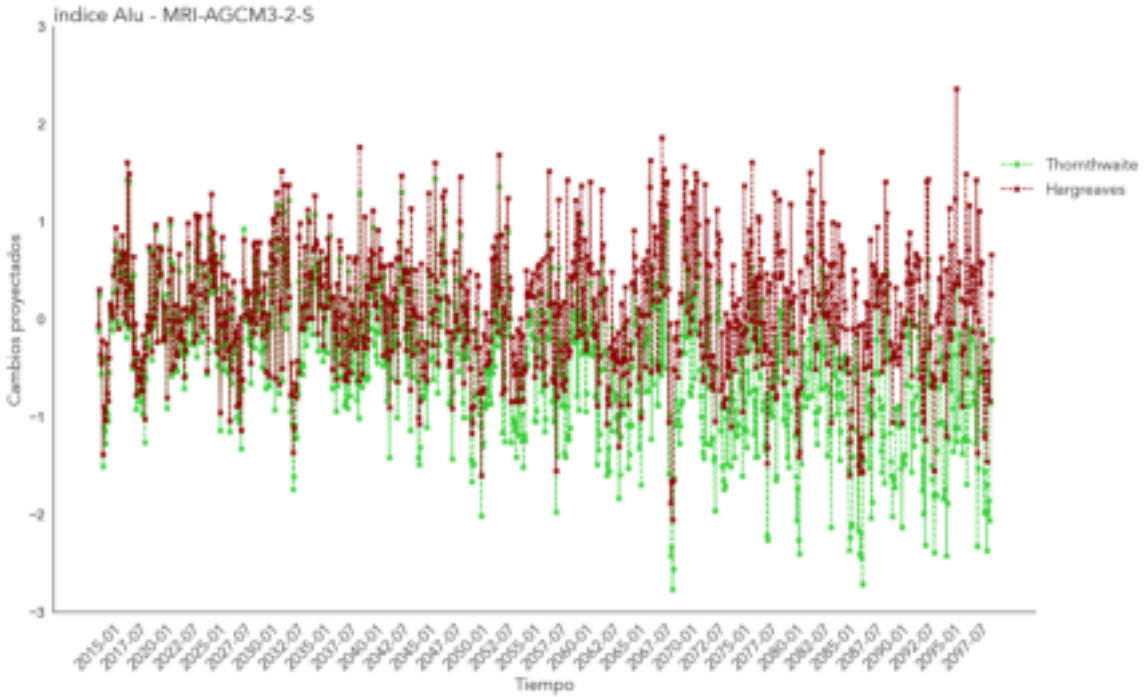


Figura 21: Series de los cambios proyectados del índice AIu para Antioquia a lo largo de siglo XXI (2015-2099) con la evapotranspiración potencial calculada a partir del método de Thornthwaite (línea verde) y de Hargreaves (línea roja). Los cambios proyectados se calculan como la diferencia entre las proyecciones mensuales y el valor mensual correspondiente de la simulación histórica del modelo.

Estas diferencias de las proyecciones entre los diferentes métodos puede deberse a que el método de Hargreaves considera la diferencia entre la temperatura máxima y la mínima, cuyas proyecciones no exhiben cambios hacia aumentos o disminuciones con respecto al periodo histórico, lo que puede influenciar las proyecciones a partir de este método. Por el contrario, el método de Thornthwaite depende particularmente de la temperatura media, lo que puede modular los cambios proyectados del índice a partir de este método. Estos resultados indican alta sensibilidad de los cambios proyectados al método del cálculo de la evapotranspiración potencial.

Ahora, buscando analizar los patrones atmosféricos que pueden modular los cambios proyectados del índice AIu para el territorio, se evaluaron los cambios proyectados de la altura geopotencial y viento horizontal a 925 y 500 hPa para el mediano (2041-2060) y largo plazo (2081-2099). Los resultados para la altura geopotencial en ambos niveles de presión sugieren su aumento proyectado en ambos horizontes temporales a lo largo del dominio del norte de Suramérica y el Caribe, los cuales son los patrones que se encontraron durante la ocurrencia de eventos extremos secos en el territorio. Por otro lado, los cambios proyectados para los campos de viento son más variables, y están fuertemente influenciados por el periodo del año que se considere (informe de noviembre 2024).

Conclusiones

Asociado al análisis de los indicadores basados en precipitación, se seleccionó el indicador AIu, que se define como la relación entre la precipitación y la evapotranspiración potencial, para clasificar las condiciones del territorio en diferentes regímenes hídricos, buscando relacionar dichas características con eventos extremos húmedos y áridos en el territorio, y posibles variaciones proyectadas en escenarios de cambio climático.

Dada que la disponibilidad de información de evapotranspiración potencial es limitada en los modelos dinámicos de alta resolución espacial, es necesario estimar la variable a partir de métodos basados en otras cantidades, como la temperatura. Por lo tanto, se ha calculado la evapotranspiración potencial a partir de dos métodos: el de Thornthwaite y el de Hargreaves, los cuales han exhibido representaciones similares entre sí. Sin embargo, es necesario evaluar otros métodos de estimación de la evapotranspiración potencial para seleccionar el mejor método a ser aplicado a los modelos.

Los resultados indican que el cálculo del índice AIu tomando la información de precipitación de CHIRPS, y estimando la evapotranspiración potencial con ERA5 a partir de métodos basados en temperatura, exhibe una adecuada representación de las variaciones de regímenes hídricos en el territorio, y por lo tanto, pueden utilizarse como base de datos de referencia para adelantar los análisis de Cambio Climático a partir de los modelos dinámicos de alta resolución del proyecto HighResMIP CMIP6.

Por otro lado, los resultados del análisis de campos compuestos durante la ocurrencia de eventos húmedos y secos en el territorio a partir de las series del índice AIu para Antioquia, muestran patrones atmosféricos distintivos que modulan dichos eventos en el territorio, como variaciones en las temperaturas superficiales del mar, específicamente en el Pacífico, cambios en la presión atmosférica tanto en superficie como en niveles medios, los cuales generan cambios en los patrones de circulación en el norte de Suramérica, y a su vez, pueden favorecer una mayor o menor disponibilidad de humedad en la región. Los patrones de campos compuestos se comparten para las fechas seleccionadas a partir de ambos métodos del cálculo de la evapotranspiración potencial, indicando la consistencia en los resultados obtenidos de los patrones atmosféricos y ambientales que acompañan la ocurrencia de eventos húmedos y secos en el territorio.

A partir de la evaluación del desempeño de los modelos HighResMIP-CMIP6 analizados, se obtiene que los modelos MRI-AGCM3-2-S y MRI-AGCM3-2-H exhiben un mejor desempeño al momento de simular los patrones observados del índice AIu, mientras que el modelo FGOALS-f3-L es el modelo con el peor desempeño. Al tomar los resultados obtenidos a partir del modelo MRI-AGCM3-2-S, estos indican que el modelo tiende a sobrestimar los valores del índice en la región de Antioquia, aunque dicha sobrestimación no afecta la clasificación del régimen hídrico en el territorio en la mayoría de los meses del año. Adicionalmente, al analizar los campos compuestos de las anomalías de algunas variables durante eventos extremos húmedos y secos del modelo se encuentra consistencia con los patrones de ERA5, indicando la correcta simulación por parte del modelo de los patrones físicos que pueden acompañar la ocurrencia de dichos eventos en el territorio.

Las proyecciones climáticas del índice AIu para Antioquia sugieren patrones diferentes dependiendo del método del cálculo de la evapotranspiración potencial que se considere: con el método de Hargreaves el modelo no sugieren cambios proyectados marcados para el indicador AIu, pero con el método de Thornthwaite el modelo sugiere la disminución proyectada del índice, lo que podría relacionarse con cambios hacia condiciones hídricas más secas en el territorio. El método de Hargreaves incluye la diferencia entre la temperatura máxima y mínima, cuyo valor podría experimentar un menor cambio (ya que se espera que ambas temperaturas aumenten a lo largo del siglo XXI,y por lo tanto su diferencia no se vería modificada significativamente en las proyecciones climáticas), lo cual podría modular los cambios proyectados del índice al utilizar este método.

Parte II: Evaluación del Índice Universal de Confort Térmico

Introducción

El confort térmico se define como "*la condición de la mente, que expresa satisfacción con el entorno térmico*" (Kurmi and Gupta, 2006). El cuerpo humano experimenta comodidad cuando el ambiente permite que se alcance fácilmente un equilibrio térmico con su entorno (Das and Subudhi, 2021). Dado que el ambiente térmico humano no puede representarse adecuadamente con un solo parámetro, se han desarrollado varios índices, uno de ellos es el Índice Universal de Confort Térmico (UTCI). El UTCI describe los intercambios de calor entre el entorno térmico y el cuerpo humano (Jendritzky et al., 2012), además, este índice es válido en todas las escalas espaciales y temporales, desde la micro hasta la macro y ha sido ampliamente analizado en diferentes estudios (p.e., Blazejczyk et al. (2012); Guzmán Echavarría (2018); Miranda et al. (2024)).

El estrés térmico se divide en 10 categorías (Figura 22) que van desde estrés térmico extremo (por encima de 46°C) hasta estrés por frío extremo (por debajo de -40°C).

RANGOS DE UTCI (°C)	CATEGORÍA DE ESTRÉS
sobre +46	ESTRÉS TÉRMICO EXTREMO
+38 a +46	ESTRÉS TÉRMICO MUY SEVERO
+32 a +38	ESTRÉS TÉRMICO SEVERO
+26 a +32	ESTRÉS TÉRMICO MODERADO
+9 a +26	SIN ESTRÉS TÉRMICO
+9 a 0	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO LEVE
0 a -13	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO MODERADO
-13 a -27	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO FUERTE
-27 a -40	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO MUY FUERTE
Debajo de -40	ESTRÉS TÉRMICO POR FRÍO EXTREMO

Figura 22: Escala de valoración del índice UTCI. Tomada de Kurbán et al. (2023).

Metodología

Índice Universal de Confort Térmico (UTCI)

Para el cálculo del UTCI se requieren variables como la temperatura del aire a 2 metros, la humedad relativa, la velocidad del viento a 10 m sobre el nivel del suelo y la temperatura radiante media (MRT). La MRT es el factor meteorológico más crucial que influye en la biometeorología humana en zonas urbanas (Holst and Mayer, 2011), sin embargo, su estimación no es sencilla (Kántor and Unger, 2011). Matzarakis et al. (2010) define la MRT como "la temperatura uniforme de una superficie esférica hipotética (emisividad = 1) que rodea un humano, de la cual resultaría un mismo intercambio neto de energía radiativa con el sujeto como si la esfera estuviese bajo las condiciones radiativas reales del ambiente".

Para el cálculo de este índice se deben tener en cuenta diferentes aproximaciones para los valores de los parámetros de entrada (Di Napoli et al., 2021):

- **Temperatura del aire a 2 metros (Tas):** $-50\,^{\circ}\mathrm{C} \leq Tas \leq 50\,^{\circ}\mathrm{C}$
- **Temperatura radiante media (MRT):** $-30\,^{\circ}\mathrm{C} \leq \mathrm{MRT} - T \leq 70\,^{\circ}\mathrm{C}$
- **Humedad relativa (HR):** $\mathrm{HR} \leq 100\,\%$
- **Velocidad del viento (v):** $0{,}5\,\mathrm{m/s} \leq v \leq 17{,}0\,\mathrm{m/s}$

Si los parámetros de entrada no cumplen con estas condiciones, los valores de UTCI se consideran indefinidos o no representativos. Un ejemplo de ello es la velocidad del viento, pues que se limita entre 0.5 m/s y 17 m/s, ya que se ha observado que velocidades superiores generan valores extremadamente bajos de UTCI (Di Napoli et al., 2021). Esto provoca que en condiciones que favorecen el estrés por calor, con altas temperaturas y bajas velocidades de viento, no sea posible realizar una evaluación adecuada (Matzarakis et al., 2017).

Con el objetivo de calcular el UTCI usando los datos de los modelos del CMIP6 tanto para el período histórico como para evidenciar cambios a partir de escenarios de cambio climático, se desarrolló un algoritmo en python que calcula el Índice Universal de Confort Térmico utilizando la librería **pythermalcomfort** y teniendo en cuenta las diferentes aproximaciones de los parámetros. Para ello, se recopilaron datos del reanálisis ERA5 y de los modelos CMIP6, incluyendo variables como la temperatura del aire a 2 metros, las componentes del viento (zonal y meridional) a 10 metros, y la humedad relativa en superficie. En el caso de ERA5, también se utilizó la temperatura radiante media (MRT), disponible en el conjunto de datos ERA5-HEAT (`https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/derived-utci-historical?tab=overview`). Con el propósito de evaluar el desempeño de la librería, se descargó el índice UTCI del conjunto de datos ERA5-HEAT y se comparó con los valores calculados para ERA5 utilizando dicha librería.

Ajuste lineal para el cálculo de la MRT

Se calcularon los parámetros de intersección (b) y pendiente (m) del ajuste lineal para cada píxel y cada mes (Figura 25). Esto se debe a que el ajuste lineal puede variar entre meses debido a los cambios estacionales en la temperatura, como las diferencias entre las temporadas secas o de menos precipitaciones y las temporadas de precipitaciones.

A partir de estos parámetros, se estimó el valor de la Temperatura Radiante Media (MRT) utilizando la ecuación:

$$\mathrm{MRT} = m \cdot \mathrm{Tas} + b$$

Donde:

- MRT es la Temperatura Radiante Media,
- m es la pendiente del ajuste lineal,
- Tas es la temperatura del aire a dos metros, y
- b es el término de intersección.

Este enfoque permite capturar las variaciones estacionales en la relación entre la temperatura del aire y la Temperatura Radiante Media.

Temperatura Radiante Media (MRT)

Debido a que la estimación de la MRT no es sencilla, y los modelos no tienen disponible esta variable, se trabajó en identificar una metodología para aproximar los valores de esta variable para las diferentes bases de datos. Para este fin, se implementó una metodología para el cálculo de la Temperatura Media Radiante (MRT) utilizando el modelo MRI-AGCM3-2-S. El objetivo de esta metodología es establecer una relación entre los valores de temperatura del aire y sus correspondientes valores de MRT para la región de Antioquia. Primero, la resolución original de la variable temperatura del aire del modelo MRI-AGCM3-2-S (0.18° x 0.18°) se ajustó a la resolución de ERA5 (0.25° x 0.25°). Posteriormente, se aplicó una corrección delta de mapeo cuantil a los valores de la temperatura con respecto a de ERA5 en cada píxel y para cada mes, esto con el objetivo de garantizar un ajuste adecuado en la magnitud del ciclo anual. Finalmente, esta temperatura corregida se utilizó para obtener los valores de MRT del modelo, aplicando las ecuaciones del ajuste lineal para cada píxel derivadas de los datos de temperatura del aire y MRT de ERA5 que se obtuvieron durante este mismo mes (Figura 23). Para las proyecciones, se hizo la corrección de la temperatura a partir de la base de datos de ERA5 y con esta se calculó la MRT a partir de las ecuaciones del ajuste lineal que se hizo para el periodo histórico (Figura 24).

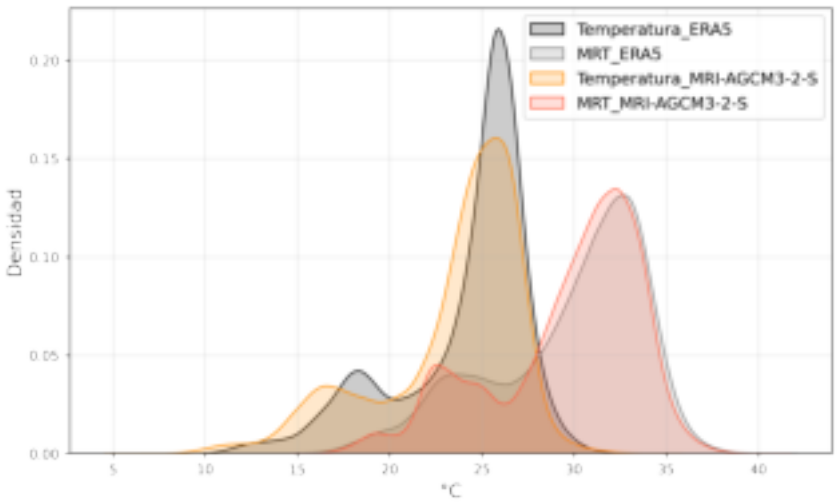


Figura 23: Distribución de densidad de la temperatura del aire y la temperaturas radiante media (MRT) estimadas a partir de ERA5 y el modelo MRI-AGCM3-2-S para el periodo histórico 1979 - 2014.

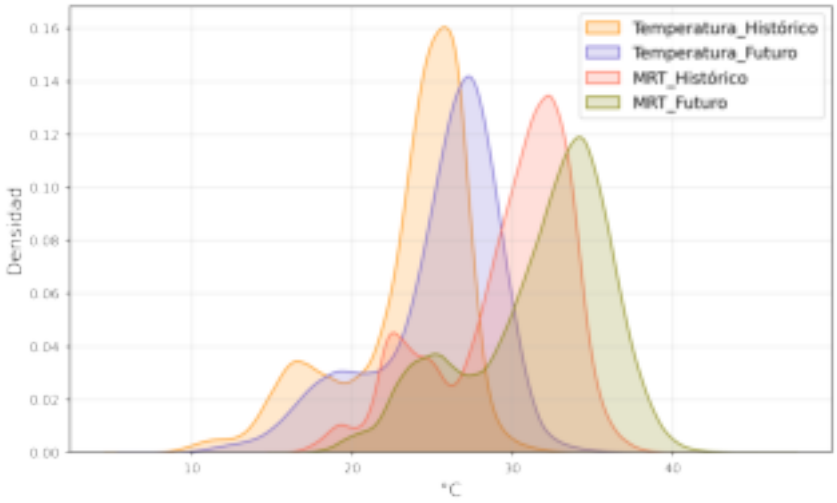


Figura 24: Distribución de densidad de la temperatura del aire y la temperaturas radiante media (MRT) estimadas a partir del modelo MRI-AGCM3-2-S para las proyecciones (RCP 8.5) 2015 - 2099.

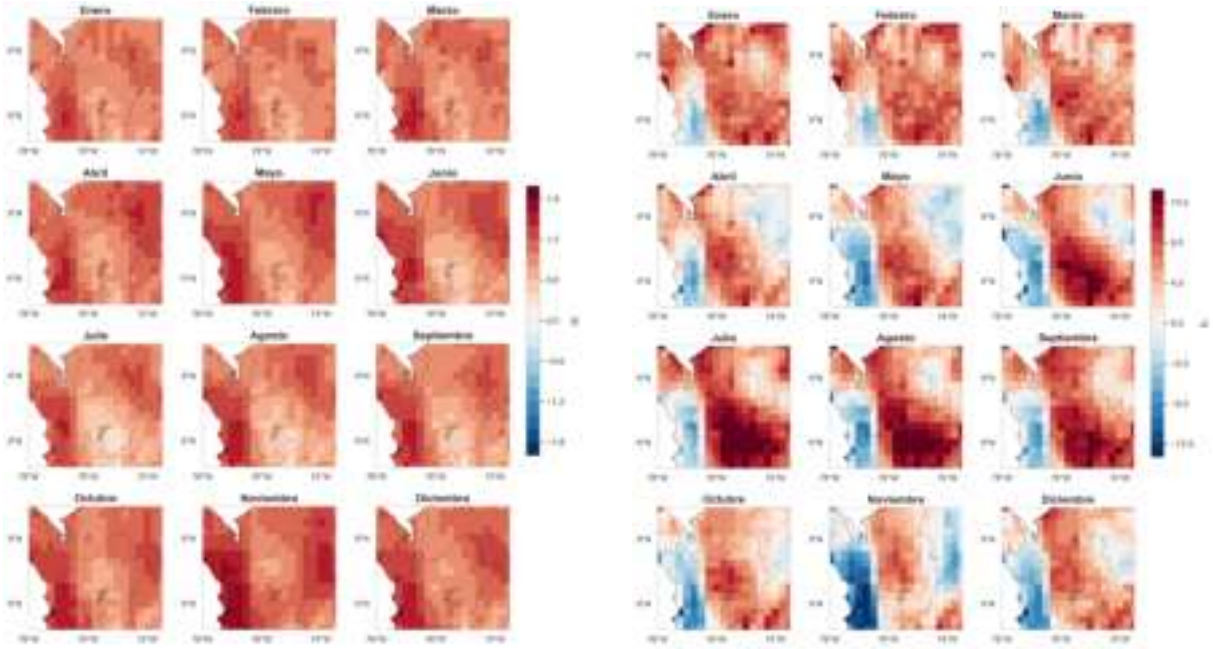


Figura 25: Parámetros mensuales de la pendiente (panel izquierdo) y el intercepto (panel derecho) para la región de Antioquia.

Resultados

Periodo histórico (1979 - 2014)

La Figura 26 compara el ciclo anual del índice en ERA5 y MRI-AGCM3-2-S para la región de Antioquia, se encontró que el modelo reproduce de manera similar el comportamiento del índice en el reanálisis ERA5. En promedio, se observan condiciones de estrés por calor moderado entre febrero y mayo, con valores cercanos a 26.5°C, mientras que en el resto del año predominan condiciones sin estrés térmico. Sin embargo, entre agosto y septiembre, el modelo presenta un sesgo que genera condiciones de estrés por calor moderado. El análisis espacial del ciclo anual en Antioquia (Figura 27), muestra que el modelo puede subestimar o sobrestimar el índice según el mes. Sin embargo, en las subregiones de Urabá y Magdalena Medio, el modelo tiende a sobrestimar los valores del índice, mientras que en el Valle de Aburrá prevalece una subestimación, con respecto a las magnitudes de ERA5 como referencia.

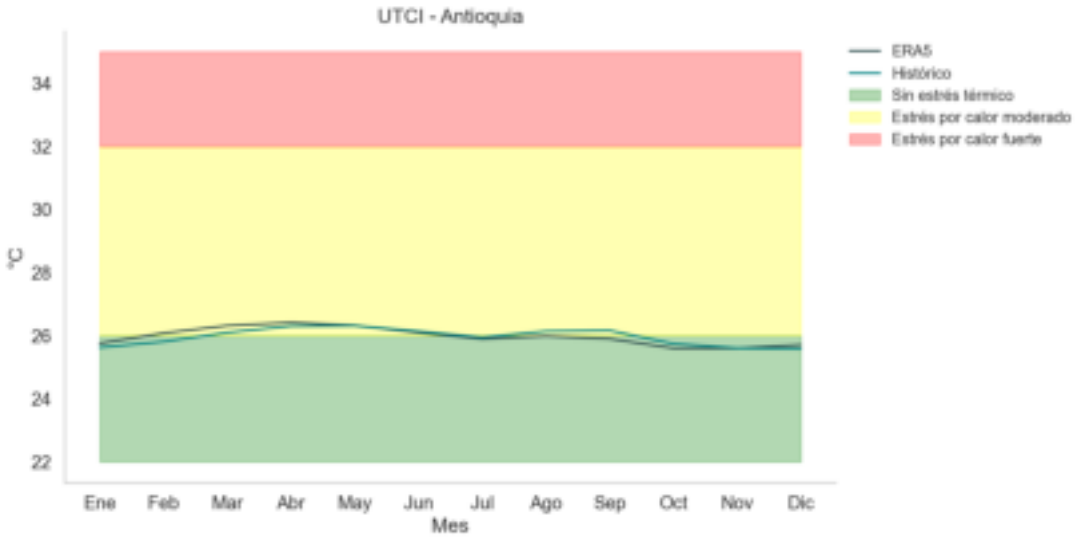


Figura 26: Ciclo anual multianual del índice UTCI para la región de Antioquia a partir de información del reanálisis ERA5 y la simulación histórica del modelo MRI-AGCM3-2-S (1979 - 2014).

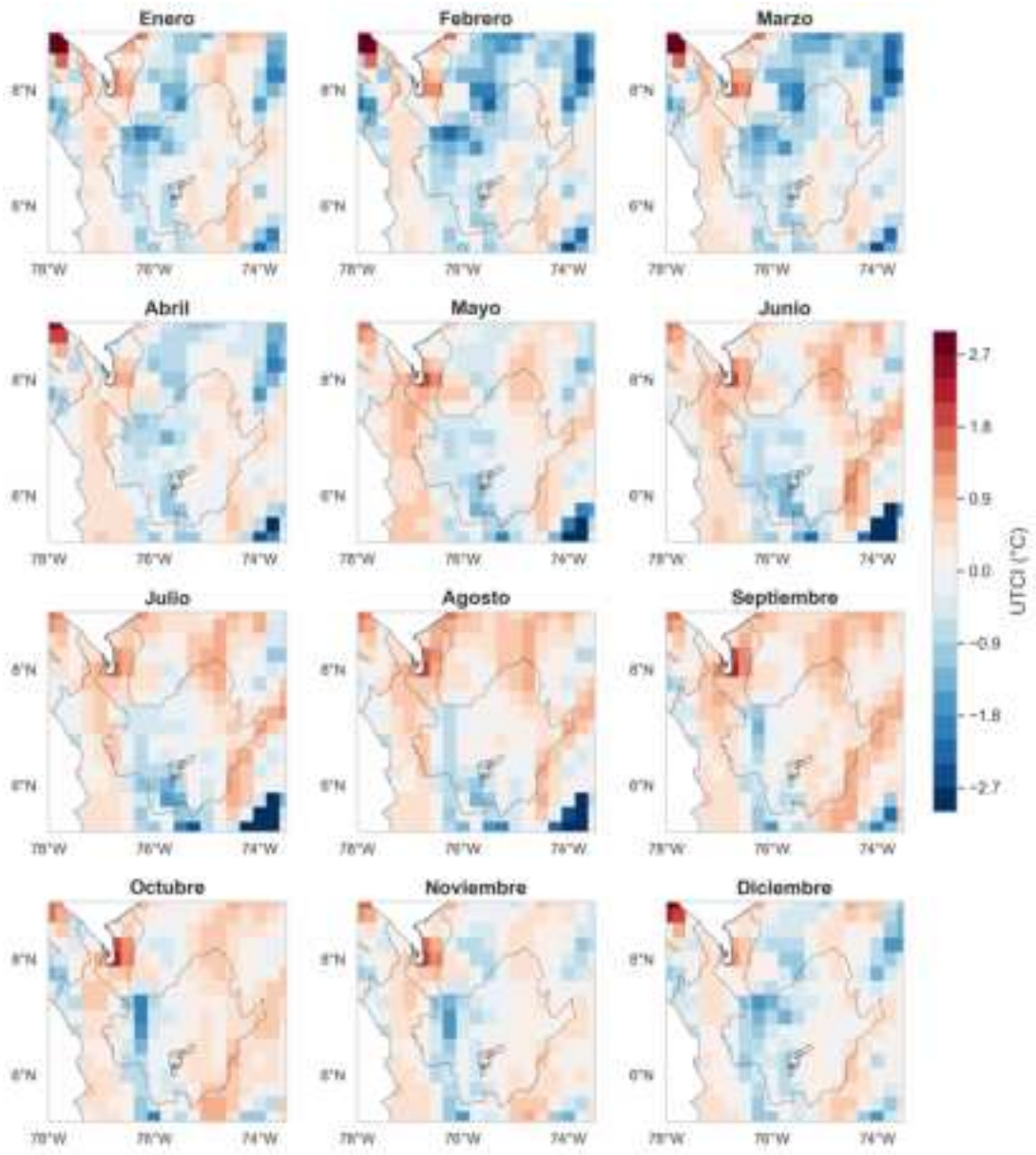


Figura 27: Diferencia del ciclo anual multianual del índice UTCI para la región de Antioquia entre el modelo MRI-AGCM3-2-S y el reanálisis ERA5 para el periodo 1979 - 2014.

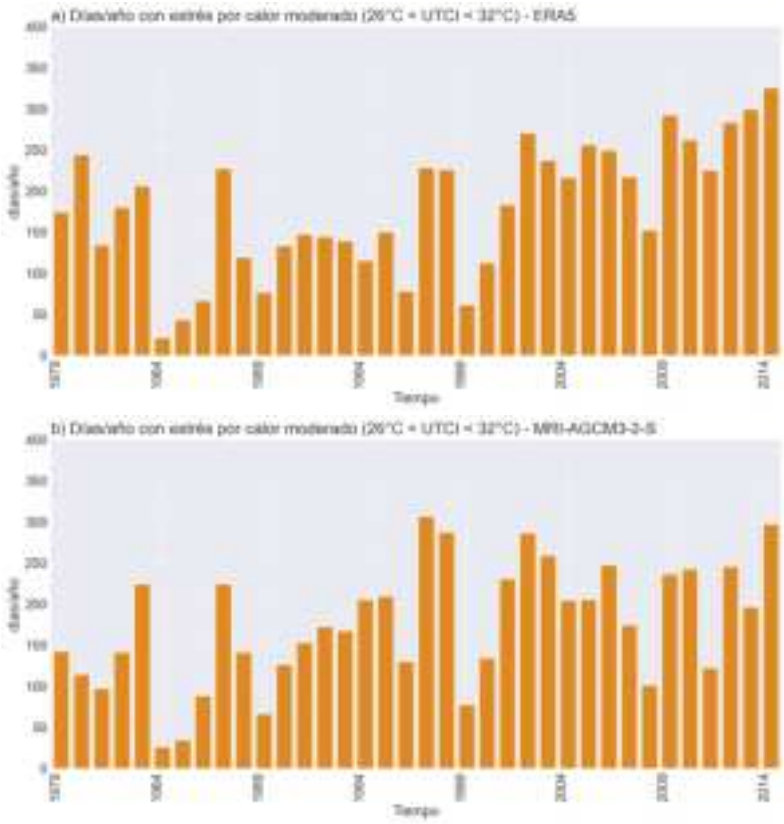


Figura 28: Conteo de días/año donde se tuvieron condiciones con estrés por calor moderado ($26\,^{\circ}\mathrm{C} < UTCI < 32\,^{\circ}\mathrm{C}$) a partir del reanálisis ERA5 (panel superior) y el modelo MRI-AGCM3-2-S (panel inferior).

Al analizar el conteo de días al año donde se tuvieron condiciones por estrés térmico moderado en el periodo histórico ($26 < \mathrm{UTCI}\,(^{\circ}\mathrm{C}) < 32$), ERA5 muestra días con estas condiciones en todos los años (Figura 28, panel superior). El número de días aumenta a partir del 2000, observando en 2014 más de 300 días bajo estas condiciones, lo que puede generar afectaciones en la salud, reducción de la capacidad para realizar algunas actividades físicas, algunos cultivos o ecosistemas pueden ser sensibles a estas condiciones, entre otras. Por otra parte, los resultados para el modelo MRI-AGCM3-2-S tienden a mostrar este aumento pero en un menor número de días (Figura 28, panel inferior), evidenciando el mayor número en los años 1997, 1998 y 2014. Ninguna de las dos bases de datos muestra condiciones de estrés por calor fuerte ($32 < \mathrm{UTCI}\,(^{\circ}\mathrm{C}) < 38$) durante el periodo histórico para Antioquia.

Proyecciones (2015 - 2099)

La Figura 29 muestra los cambios proyectados en el futuro del ciclo anual del índice UTCI para Antioquia, encontrando que el modelo MRI-AGCM3-2-S sugiere para los periodos 2041 - 2060 y 2081 - 2099 condiciones de estrés por calor moderado en todos los meses, siendo mayores los valores del índice para finales de siglo (2081 - 2099).

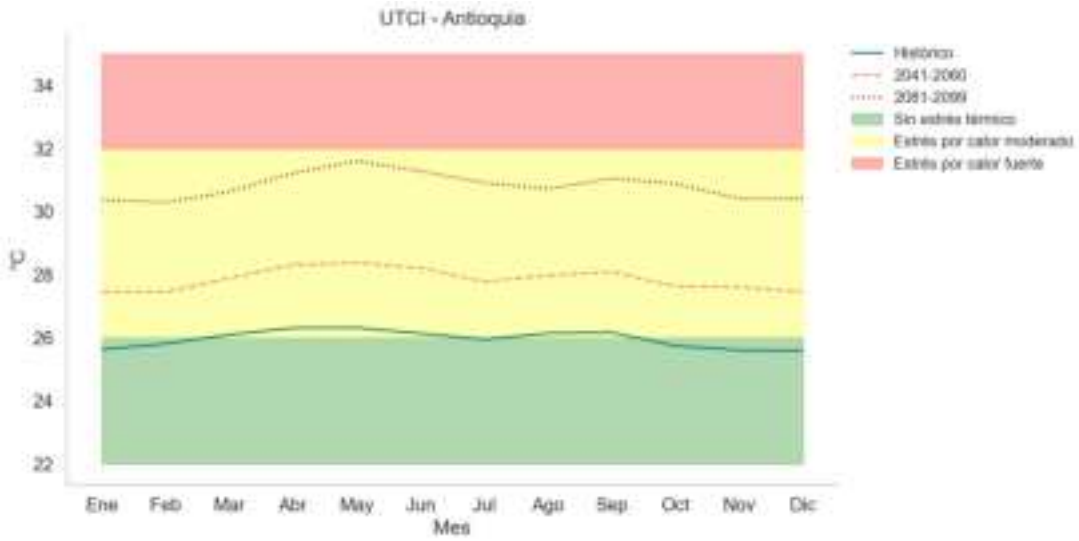


Figura 29: Cambios proyectados del ciclo anual multianual del índice UTCI para la región de Antioquia a partir del modelo MRI-AGCM3-2-S para el mediano (línea salmón) y largo plazo (línea roja).

Los mayores cambios en la climatología del índice en las proyecciones del modelo MRI-AGCM3-2 se observaron en las subregiones del Magdalena Medio, Bajo Cauca y Urabá (Figura 30). En el periodo histórico (1979-2014), estas regiones presentaban principalmente condiciones de estrés por calor moderado (UTCI entre 26 °C y 32 °C). Sin embargo, bajo las proyecciones de este modelo, estas áreas muestran un incremento hacia condiciones de estrés por calor fuerte, con valores entre 32 °C y 38 °C. En el caso del Valle de Aburrá, el modelo no muestra variaciones en la categoría del índice, manteniéndose en condiciones sin estrés térmico.

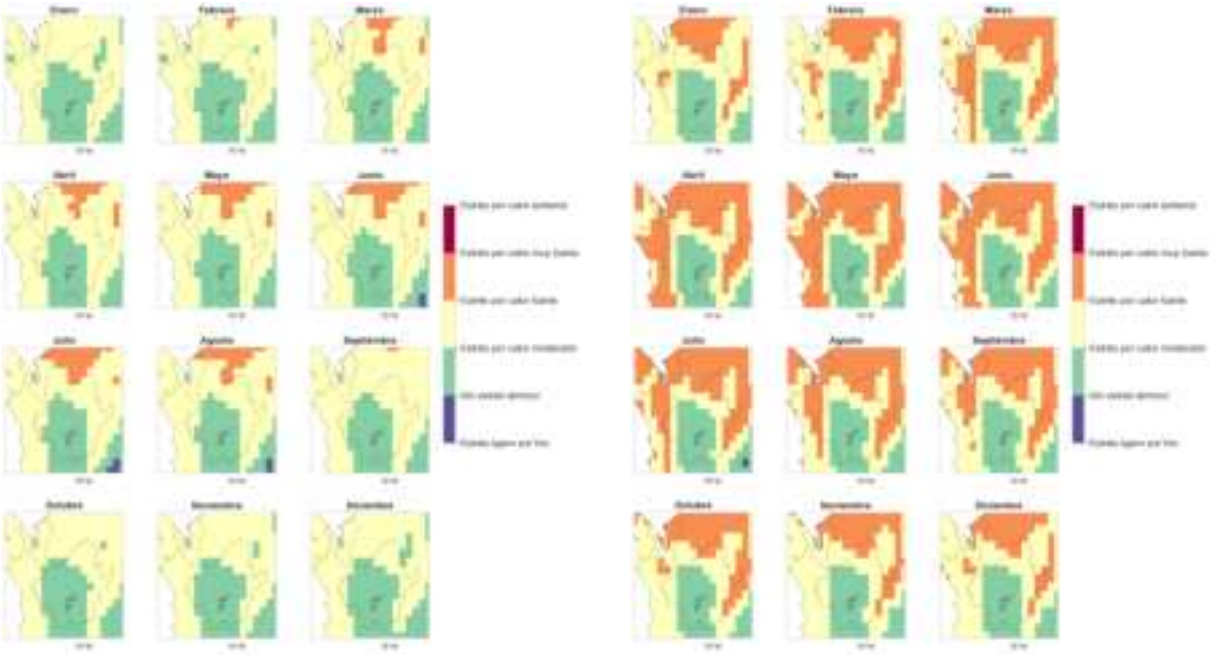


Figura 30: Ciclo anual del índice UTCI en Antioquia para el histórico (1979 - 2014) y las proyecciones (2015 - 2099) del modelo MRI-AGCM3-2-S. Los colores indican las condiciones de estrés térmico (Kurbán et al. (2023)).

Se calcularon los campos de los valores medios del índice UTCI para cada trimestre a partir de la base de datos de referencia ERA5 y del modelo MRI-AGCM3-2-S (Figura 31). Durante el periodo histórico (1979-2014), tanto el reanálisis como el modelo muestran los valores más bajos del índice en el centro de la región, incluyendo el Valle de Aburrá, lo cual está asociado con condiciones de ausencia de estrés térmico. Por otro lado, los valores más altos del índice se registran en el resto del departamento, lo que, de acuerdo con la clasificación de las categorías, se relaciona con condiciones de estrés por calor moderado. El modelo proyecta un aumento en los valores medios del índice para dicha región durante todos los trimestres, siendo más pronunciado en el periodo 2081-2099. Lo anterior es consistente con lo evidenciado en el ciclo anual para las proyecciones.

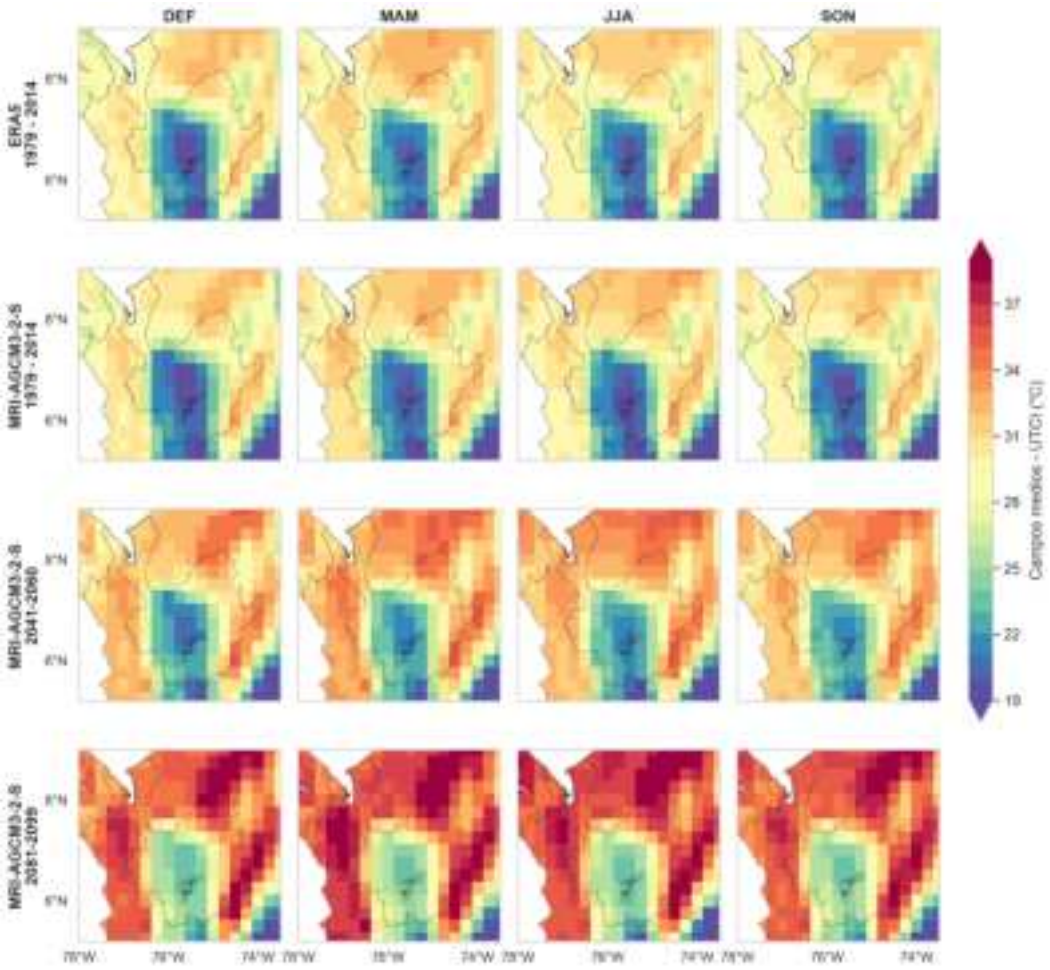


Figura 31: Campos de los valores medios trimestrales del índice UTCI para el periodo histórico (1979-2014) a partir de ERA5 y el modelo modelo MRI-AGCM3-2-S y para los periodos de mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2099) de las proyecciones de MRI-AGCM3-2-S.

A partir de la información de los campos medios, se analizaron los cambios proyectados del índice UTCI para el mediano y largo plazo (Figura 32). Se observa un incremento del valor del índice, siendo mayor en el periodo 2081-2099 (largo plazo), en comparación con el periodo de referencia del histórico 1981-201. Lo anterior sugiere condiciones con un mayor estrés por calor. Para el mediano plazo (panel superior), los meses entre marzo y noviembre muestran un aumento alrededor de 1.5°C del índice en las subregiones Bajo Cauca, Urabá y Magdalena Medio. En el largo plazo, Las anteriores subregiones siguen mostrando los mayores aumentos del índice durante todos los trimestres, entre tanto, para el Valle de Aburrá, se observa un incremento de 3.0°C aproximadamente.

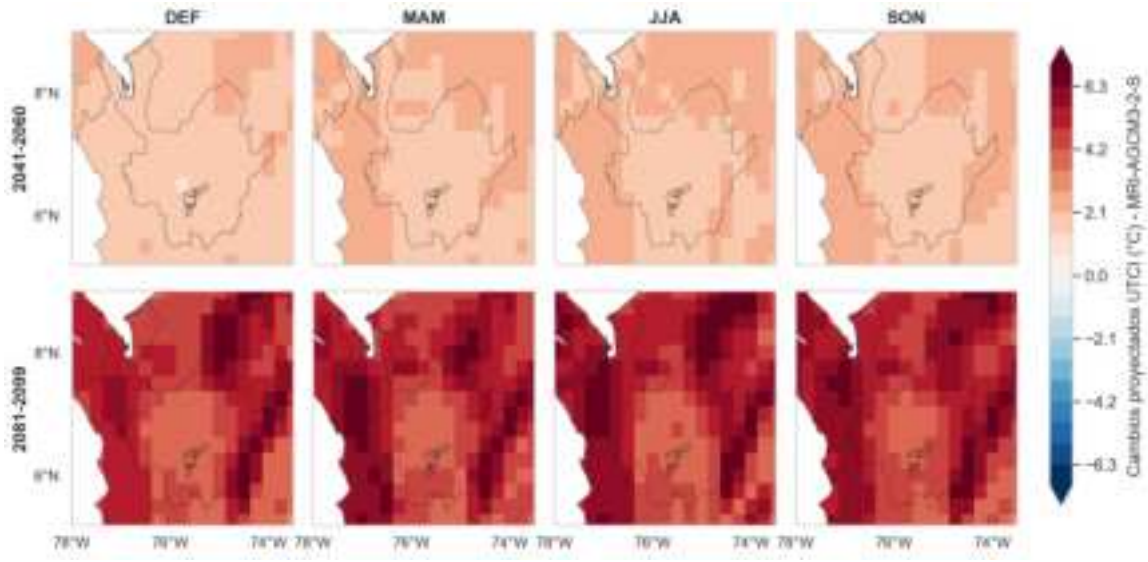


Figura 32: Cambios proyectados trimestrales del índice UTCI a partir del modelo MRI-AGCM3-2-S para los periodos de mediano plazo (2041-2060) y largo plazo (2081-2099). El periodo de referencia del histórico es de 1981-2010.

El reanálisis ERA5 muestra una leve tendencia al aumento en el valor promedio anual del índice UTCI durante el periodo histórico (1979-2014) (Figura 33). El modelo MRI-AGCM3-2-S refleja fluctuaciones similares, aunque de menor magnitud. Bajo el escenario RCP8.5, las proyecciones indican que esta tendencia se incrementará, superando los 32°C hacia finales de siglo. Esto sugiere que el promedio anual del UTCI alcanzará niveles de estrés por calor fuerte ($32 < \text{UTCI}\,(°\text{C}) < 38$), lo que podría generar impactos más severos en la salud humana, la producción agrícola y los ecosistemas, en comparación con el periodo histórico.

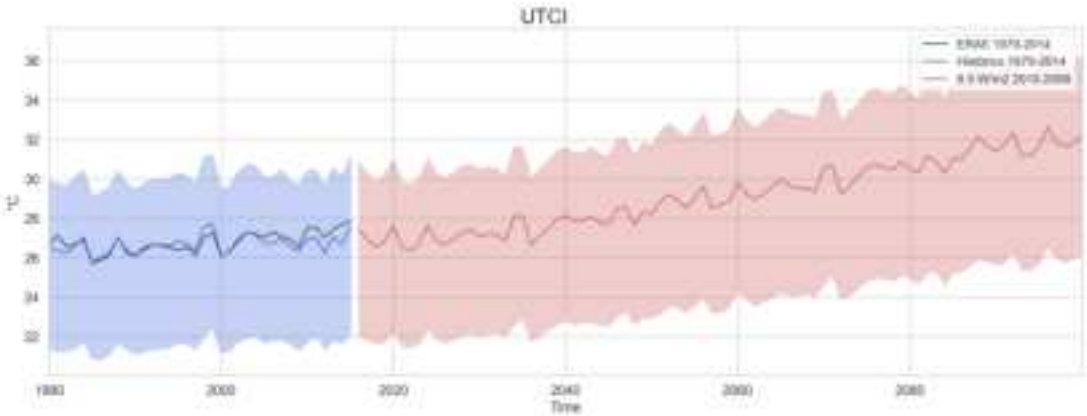


Figura 33: Serie de tiempo del índice UTCI durante el período de estudio (1979-2099). La línea azul representa el promedio anual del índice para 1979-2014, la línea roja para 2015-2099 del modelo MRI-AGCM3-2-S, y la línea negra corresponde al índice calculado con los datos de referencia (ERA5). Las áreas sombreadas indican la dispersión en las simulaciones históricas y el escenario RCP8.5.

La Figura 34 muestra el conteo de días por año bajo condiciones de estrés por calor moderado (panel superior) y por calor fuerte (panel inferior). Según el escenario de mayores emisiones de gases de efecto invernadero (RCP5.8) proyectado por el modelo MRI-AGCM3-2-S, entre 2015 y 2050 se registran entre 100 y 300 días/año con estrés por calor moderado, los cuales son valores mayores si se comparan con los observados durante el periodo 1979 - 2014 (Figura 28). Posterior al 2050, la mayoría de los días del año se caracterizan por tener dichas condiciones de estrés, e incluso algunos años presentan todos los días bajo estas condiciones. Sin embargo, para final de siglo, se observa una disminución en el número de días al año con condiciones por estrés moderado, asociado con un aumento en el número de días con condiciones de estrés por calor fuerte (Figura 34, panel inferior).

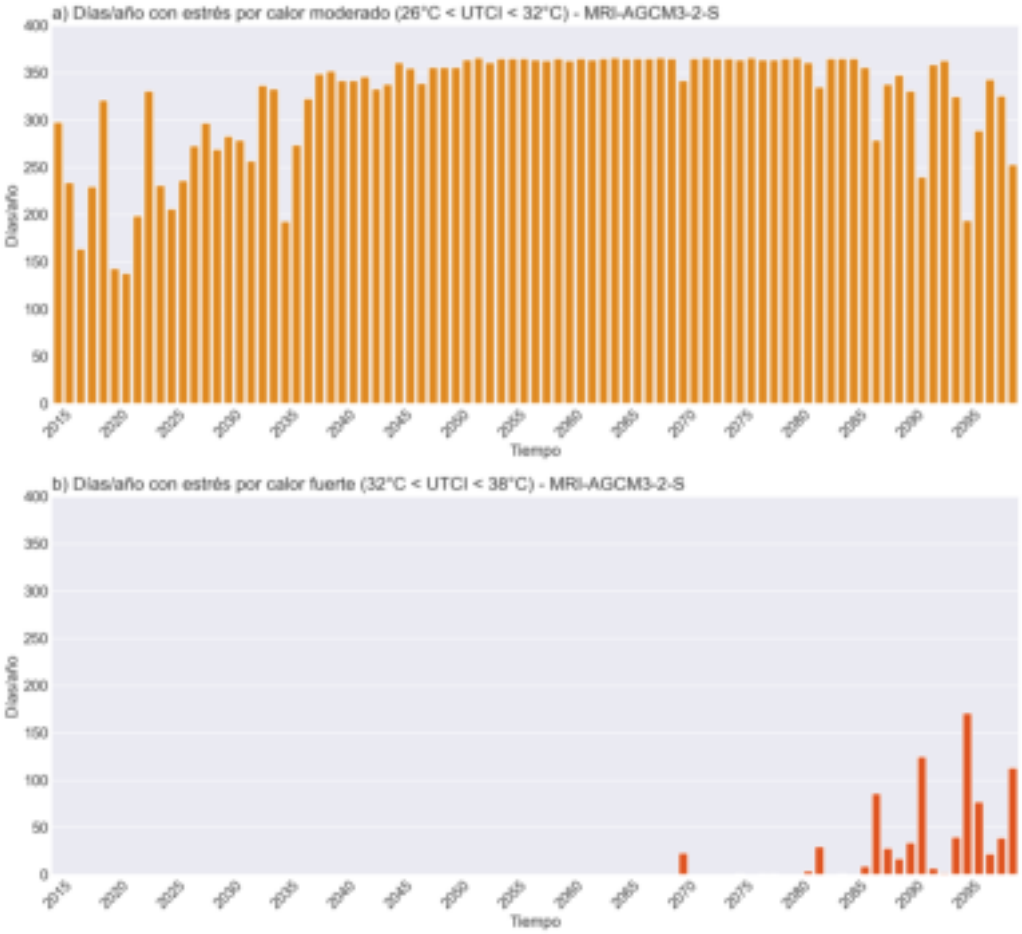


Figura 34: Conteo de días/año donde se tuvieron condiciones con estrés por calor moderado ($26\,^{\circ}\mathrm{C} < UTCI < 32\,^{\circ}\mathrm{C}$) (Panel superior) y con estrés por calor fuerte ($32\,^{\circ}\mathrm{C} < UTCI < 38\,^{\circ}\mathrm{C}$) (Panel inferior) a partir de las proyecciones del modelo MRI-AGCM3-2-S para el escenario RCP5.8.

Conclusiones

Para el análisis de confort térmico se seleccionó el índice UTCI, ampliamente utilizado en investigaciones por considerar más parámetros además de la temperatura del aire. El análisis del ciclo anual del índice para la región del Valle de Aburrá y la región vecina, obtenido a partir de información del reanálisis ERA5,

mostró que durante febrero y mayo se presentan condiciones de estrés por calor moderado, mientras que en los demás meses predominan condiciones sin estrés térmico. El modelo HighResMip MRI-AGCM3-2-S mostró valores muy similares a los observados con ERA5; sin embargo, el análisis espacial evidenció que, en las subregiones del Urabá y el Bajo Cauca, el modelo presentó valores mayores en contraste con los observados en ERA5.

La serie de tiempo del conteo anual de días con condiciones de estrés por calor moderado mostró un aumento importante en el número de días bajo estas condiciones en el reanálisis ERA5 y en el modelo MRI-AGCM3-2-S. Lo anterior puede generar afectaciones en la salud, reducción de la capacidad para realizar algunas actividades físicas, algunos cultivos o ecosistemas pueden ser sensibles a estas condiciones, entre otras. Por otro lado, al realizar el mismo análisis para condiciones de estrés por calor fuerte, donde se espera que los impactos sean mas severos, se observó que, durante el periodo histórico (1979 - 2014), ninguna de las bases de datos registró días con estas condiciones.

Para las proyecciones futuras, los resultados del modelo MRI-AGCM3-2-S sugieren para los periodos 2041 - 2060 y 2081 - 2099 condiciones de estrés por calor moderado en todos los meses, siendo mayores los valores del índice para finales de siglo (2081 - 2099). Al analizar los campos medios para cada trimestre y los cambios proyectados, la región de Antioquia presentó mayores valores del índice en comparación con el periodo histórico, siendo mayores para final de siglo. Este aumento, podría tener implicaciones importantes en los ecosistemas y en la percepción térmica y en el bienestar de las personas. Finalmente, la serie del conteo anual de días con condiciones por estrés por calor moderado mostró un incremento de casi todos los días del año bajo estas condiciones a partir de 2050. Para final de siglo, la proporción de días con dichas condiciones disminuye, asociado con un aumento en el número de días con condiciones de estrés por calor fuerte.

Es fundamental continuar avanzando en el análisis utilizando una resolución más fina. Aunque los modelos de alta resolución (HighResMIP) permiten observar mayor detalle, su capacidad es limitada para representar procesos a escalas más pequeñas y en regiones con topografía compleja como es el caso del Valle de Aburrá. Por esta razón, no es posible determinar con precisión si dentro del Valle se presentan días con condiciones de estrés moderado y/o fuerte, y bajo proyecciones como puede cambiar. Este tipo de análisis es esencial para apoyar la toma de decisiones informadas.

Parte III: Metodología de reducción de escala dinámica para lograr proyecciones de alta resolución a escala local sobre el Valle de Aburrá

Introducción

Con el propósito de alcanzar proyecciones climáticas de mayor resolución para variables hidroclimatológicas en el Valle de Aburrá y su región vecina; y considerando que los modelos climáticos globales suelen tener resoluciones gruesas que oscilan alrededor de los 100 km, se propone una estrategia metodológica basada en una reducción de escala dinámica o también llamado subescalamiento - haciendo uso del modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model). Esta propuesta técnica busca superar las restricciones espaciales inherentes a los modelos globales convencionales, permitiendo una representación más precisa de las variables hidrológicas y climatológicas en el Valle de Aburrá, así como los factores dinámicos y configuración del terreno, y por ende, contribuyendo significativamente a la comprensión de los cambios a futuro en la región. En la Figura 35, se muestra de manera esquemática el objetivo de la metodología de subescalamiento propuesta.

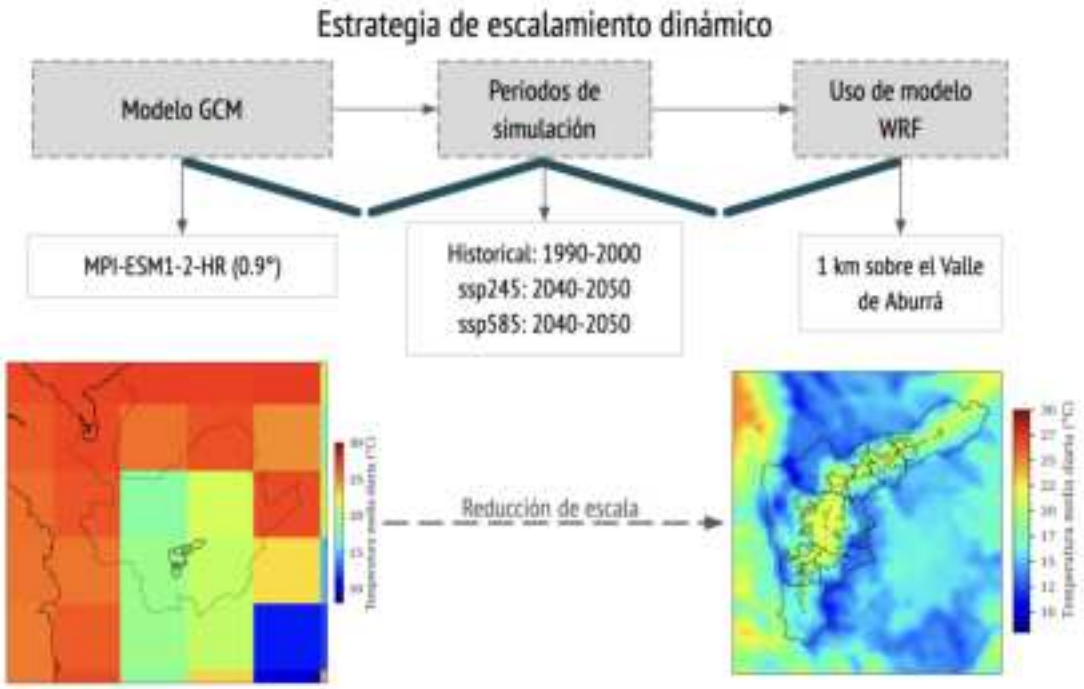


Figura 35: Representación esquemática de la reducción de escala de un modelo climático global.

El modelo climático global empleado en el subescalamiento dinámico es el MPI-ESM1-2-HR de la versión CMIP6, este modelo cuenta con información de 0.9 grados de resolución espacial. Este modelo fue analizado en vigencias pasadas, y se encontró que tuvo buen rendimiento en los análisis de retrotrayectorias de humedad hacia nuestro territorio, además de esto, el modelo ha sido evaluado por otros estudios (Arias Gómez et al., 2021; Ortega et al., 2021) y está dentro del grupo de modelos adecuados para analizar en términos de precipitación y temperatura media sobre Colombia. El subescalamiento dinámico planteado busca obtener información en el mediano plazo y bajo escenarios de cambio climático; basado en esto, se plantea un subescalamiento para el período histórico de 1990-2000 y para dos períodos futuros para el periodo 2040-2050 bajo los escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5. De forma general, este subescalamiento permitirá tener información sobre Valle de Aburrá a una escala de 1 km de varias variables, tales como precipitación y temperatura, a escala diaria y horaria.

La metodología contempla una serie de pasos los cuales se detallan a continuación:

- Diseño de dominios de estudio para alcanzar una resolución de 1 km sobre el Valle de Aburrá.
- Construcción de las condiciones iniciales y de borde: procesamiento de los datos meteorológicos utilizando la información del modelo climático global, el cual incluye un ajuste de la climatología del modelo con respecto al reanálisis ERA5.
- Desarrollo de una metodología para actualizar las coberturas de suelo en el modelo WRF.

Los pasos mencionados anteriormente pueden representarse desde el punto de vista de la modelación (ver Figura 36), es decir, el paso a paso realizado en el modelo WRF. En esta Figura se pueden observar las etapas de preprocesamiento requeridas para una simulación típica. En primer lugar, se encuentra el componente geogrid, encargado de generar el dominio de simulación y de interpolar la información

geográfica estática (como elevación, uso del suelo o coberturas del suelo) a la malla del modelo. En esta etapa, se incorporan modificaciones como los cambios en las coberturas del suelo. Luego se ejecuta el componente ungrib, cuya función es leer y convertir los datos meteorológicos de entrada (en este caso, provenientes de modelos como CMIP) desde su formato original (GRIB) al formato intermedio que utiliza WRF. Este paso es fundamental para asegurar que los datos de forzamiento estén disponibles para la simulación. Posteriormente, el proceso continúa con la etapa metgrid, que interpola los datos meteorológicos procesados a la malla definida por geogrid, combinando la información estática y dinámica. Este proceso es básicamente lo que implica una simulación en WRF para cada escenario.

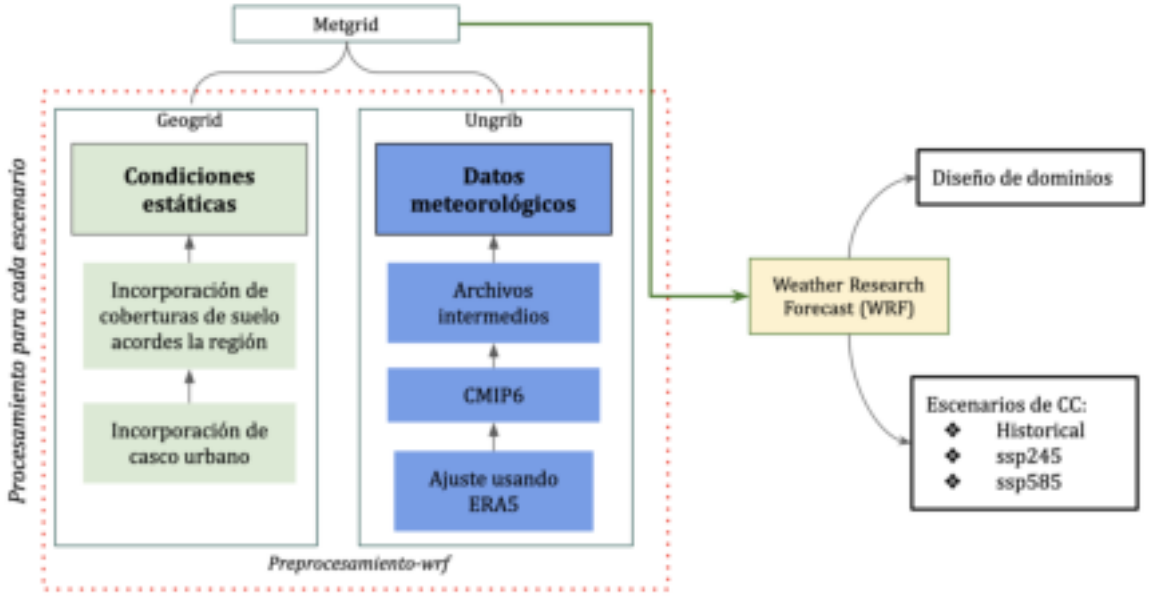


Figura 36: Esquema de simulación del WRF adaptado para la reducción de escala dinámica dinámico.

Metodología: pre-procesamiento para WRF

i. Diseño de los dominios

Para alcanzar una resolución espacial de 1 km sobre el Valle de Aburrá, se emplea una configuración de dominios telescópica que consta de 3 dominios en total (Ver Figura 37), con resoluciones de 12, 3 y 1 km, respectivamente. El primer dominio cubre todo el territorio de Colombia, parte del océano Pacífico y el mar Caribe. El segundo dominio abarca el departamento de Antioquia pero se encuentra centrado en el Valle de Aburrá, así como el tercer dominio. Para cada dominio, se contará con información a una resolución temporal de 6, 3 y 1 hora respectivamente para cada dominio.

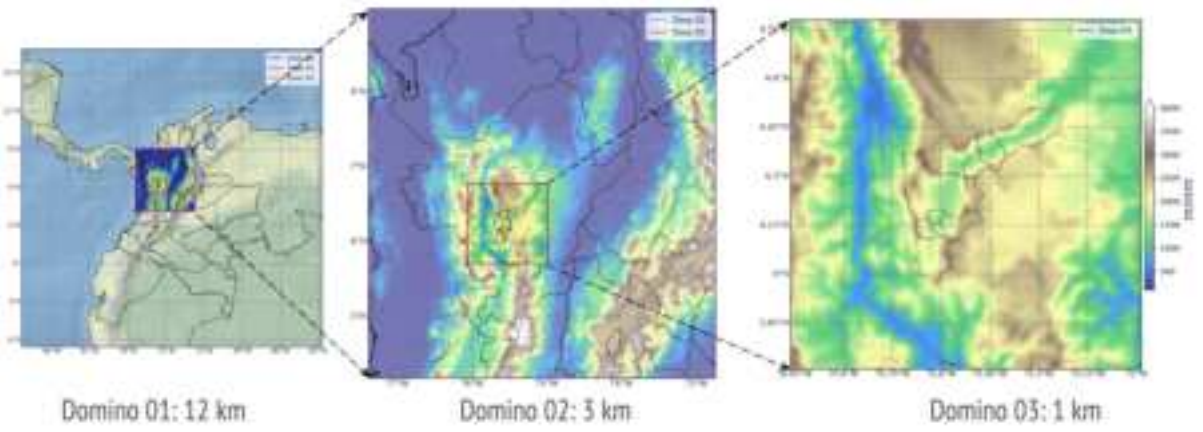


Figura 37: Diseño de dominios para llegar a 1 km sobre el Valle de Aburrá.

ii. Datos meteorológicos del modelo CMIP

Una vez definidos los pasos principales de la metodología de escalamiento, se procede a la construcción de las condiciones de borde e iniciales del modelo CMIP6, usando específicamente los resultados del modelo MPI-ESM1-2-HR. Estas condiciones incluyen información de variables atmosféricas y de superficie, así como variables estáticas como la altura del terreno y la máscara tierra-océano. Toda esta información se guarda en archivos en formato *grib*, que de ahora en adelante se conocerán como archivos intermedios. Normalmente, estos archivos se generan utilizando el programa *ungrib* como parte del pre-procesamiento WPS de WRF. Sin embargo, para las simulaciones de cambio climático, es crucial construir estos archivos con base en la información disponible del modelo climático global seleccionado, a estos archivos se les conoce como archivos intermedios o interfiles.

En la Figura 38, se muestra la metodología de construcción de los archivos intermedios, donde se resaltan las diferentes etapas como el procesamiento y descarga de la información, y el proceso de ajuste o corrección del sesgo de los datos del modelo, las cuales serán descritas a continuación.

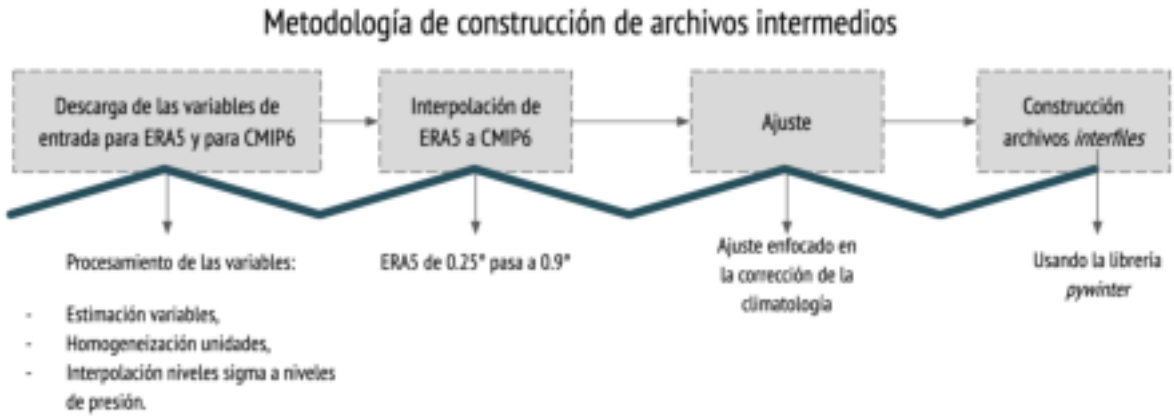


Figura 38: Esquema general para el ajuste y contrucción de los archivos intermedios.

Para evaluar el impacto en la simulación al utilizar condiciones diarias ó horarias se realizaron algunas

pruebas donde se concluyó que para simulaciones a largo plazo de cambio climático, no se presentan grandes diferencias en los acumulados y en la variabilidad de la precipitación y la temperatura, con base en esto, se decide utilizar condiciones diarias. En la Tabla 4 se presenta el listado de variables requeridas para la construcción de las condiciones iniciales y de borde, y se presenta además el nombre y nomenclatura con la que se identifica cada variable en el modelo WRF y en los datos originales del CMIP. Cabe mencionar que los datos del modelo se descargaron desde el portal `https://esgf-data.dkrz.de/search/cmip6-dkrz/`. Las variables que no estaban disponibles a escala diaria se descargaron a escala horaria, y para el caso de las variables del suelo, se descargaron en escala mensual, dado que no se encontraron a escala diaria en el momento de realizar la descarga.

Los resultados históricos de los Modelos Climáticos Globales (GCM) presentan errores con respecto a las observaciones en términos de de magnitud y variabilidad que varían según la variable y la región de estudio, lo cual puede influir en los resultados y proyecciones futuras de simulaciones dinámicas. Para abordar los sesgos específicos de los Modelos del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) en nuestra región, se procedio a realizar el ajuste de los mismos.

Algunos estudios han implementado métodos de ajuste a partir de un reanálisis climático más una perturbación del cambio climático del modelo global, donde se corrige la climatología y la varianza de los datos Bruyère et al. (2014); Xu et al. (2021), sin embargo, en este estudio, con el objetivo de preservar la fidelidad al ciclo anual de la región de estudio y evitar posibles distorsiones dadas por la información original del modelo climático global, se implementa un ajuste sencillo del sesgo del ciclo anual diario (climatología de 366 días). Para ello, se utiliza información del reanálisis ERA5. Este ajuste implica la modificación de la media mensual diaria del modelo CMIP para que se alinee con los valores correspondientes al reanálisis, las ecuaciones para el ajuste son tomadas del estudio Baño-Medina et al. (2021), y se muestran a continuación:

$$X'^{i}_{j,GCM_h} = X^{i}_{j,GCM_h} - \widetilde{X}^{i}_{GCM_h} + \widetilde{X}^{i}_{REA} \tag{7.7}$$

$$X'^{i}_{j,GCM_f} = X^{i}_{j,GCM_f} - \widetilde{X}^{i}_{GCM_h} + \widetilde{X}^{i}_{REA} \tag{7.8}$$

donde:

- j corresponde a cada variable,
- i corresponde a cada día del año,
- $\widetilde{X}$ corresponde a una climatología media móvil de 7 días,
- h y f corresponde a los periodos histórico y futuro, respectivamente.

Donde j corresponde a cada variable, i corresponde a cada día del año, $\widetilde{X}$ corresponde a una climatología media móvil de 7 días, h y f corresponde a los periodos histórico y futuro, respectivamente.

Cada una de las variables procesadas y ajustadas son mostradas en la Tabla 4).

Tabla 4: Variables utilizadas para la construcción de las condiciones iniciales. Se presenta la nomenclatura para identificar las variables en WRF y cómo se encuentran en el modelo CMIP.

No	WRF	Descripción	CMIP	Descripción
1	SKINTEMP	Skin temperature	ts	Surface temperature
2	PMSL	Mean sea-level pressure	psl	Air pressure at sea level
3	SST	Sea surface temperature	tos	Sea surface temperature
4	TT2M	2-meter air temperature	tas	Air temperature
5	RH2M	2-meter relative humidity	hurs	Relative humidity
6	SPECHUMD2M 2-m	2-meter specific humidity	huss	Specific humidity
7	UU10M	10-meter wind u-component	uas	Eastward wind
8	VV10M	10-meter wind v-component	vas	Northward wind
9	PSFC	Surface pressure	ps	Surface air pressure
10	SPECHUMD	3-d specific humidity	hus	Relative humidity
11	RH	3-d relative humidity	hur	Relative humidity
12	UU	3-d wind u-component	ua	Eastward wind
13	TT	3-d air temperature	ta	Air temperature
14	VV	3-d wind v-component	va	Northward wind
15	GHT	3-d geopotential height	zg	Geopotential height
16	ST	Soil temperature	ts	Surface temperature
17	SM	Soil moisture	mrsos	Moisture content of soil layer

iii. Condiciones estáticas

Con el interés de alcanzar una resolución de 1 km sobre el Valle de Aburrá, se considera importante actualizar la información de usos del suelo que viene por defecto en el modelo WRF. Esto es vital porque algunas coberturas predeterminadas en el modelo WRF no corresponden a las que existen físicamente en nuestro territorio. Además, el detalle del casco urbano sobre el área metropolitana no está correctamente representado en la información original del modelo WRF.

La simulación diseñada utiliza como información de cobertura del suelo la categoría MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer), un producto satelital que proporciona datos globales de uso y cobertura del suelo a resoluciones espaciales de hasta 500 m. Esta categoría puede seleccionarse como opción de cobertura en el modelo WRF (Weather Research and Forecasting). Cabe mencionar que se realizaron pruebas utilizando también la cobertura del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS); sin embargo, en las salidas del dominio de 1 km, se evidenció que la simulación de cuerpos de agua y lagos requiere una parametrización específica que solo es compatible con la categoría MODIS.

El hecho de actualizar las coberturas en los dominios se debe a que el patrón general de las coberturas no coincide con las coberturas del territorio, es por esto que, se establece una metodología (ver Figura 39) que permita actualizar estas coberturas de forma que sean más coherentes a la realidad del territorio, para esto, se revisa las coberturas disponibles de fuentes públicas como el IGAC. En el portal `https://www.colombiaenmapas.gov.co/#`, se descarga el archivo shapefile Cobertura Tierra 2010-2012, correspondiente a la cobertura de la tierra de la categoría Corine Land Cover a escala 1:100.000 y el periodo 2010-2012.

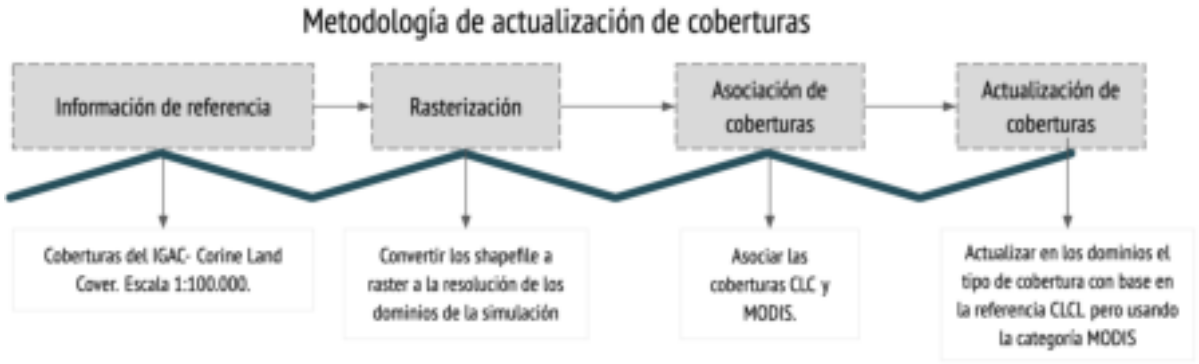


Figura 39: Proceso de actualización de usos en los archivos del modelo WRF.

En la Figura 40, se presenta el esquema general de la actualización de las coberturas de suelo: 21-category MODIS landuse para el dominio externo de 12 km con base en información de coberturas Corine Land Cover, se pueden observar cuatro mapas que contienen, las coberturas de suelo bajo la categoria CLC para Colombia, el segundo mapa muestra el resultado de rasterizar esta información a 12 km, el tercer mapa muestra la representación de las coberturas en la catergoria MODIS por parte del modelo WRF, y el cuarto mapa, el resultado actualizar las coberturas de MODIS con base en la información de las coberturas CLC sobre Colombia. Este procedimiento se aplico para los tres dominios de la simulación, y en la Figura 41 se muestra el resultado para el dominio de 1 km.

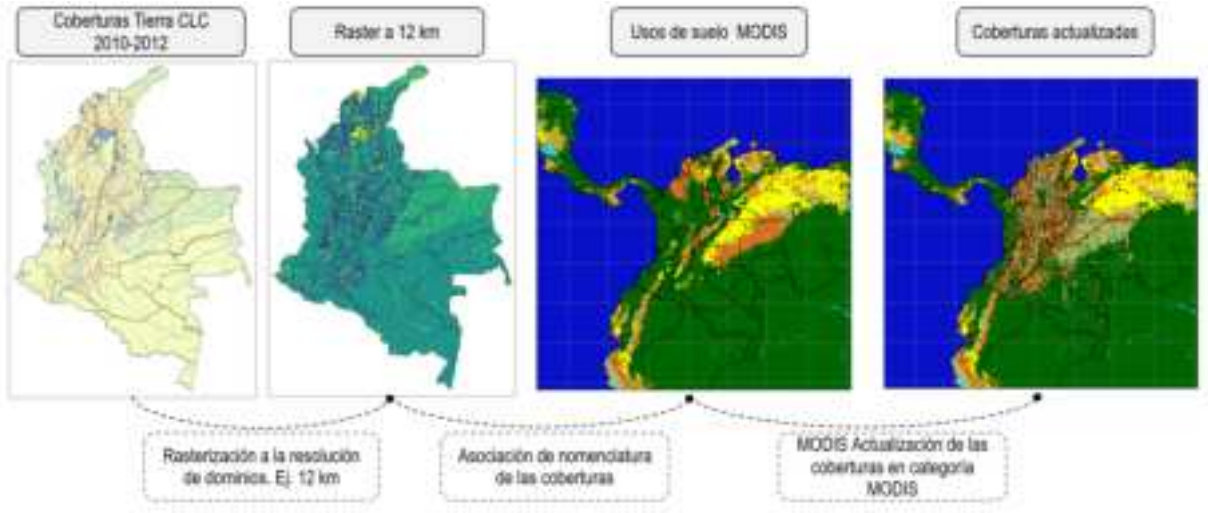


Figura 40: Esquema general de la actualización de las coberturas de suelo: 21-category MODIS landuse para el dominio externo de 12 km con base en información de coberturas Corine Land Cover. Cobertura de suelo original del modelo WRF (*izquierda.*) cobertura actualizada *derecha.*

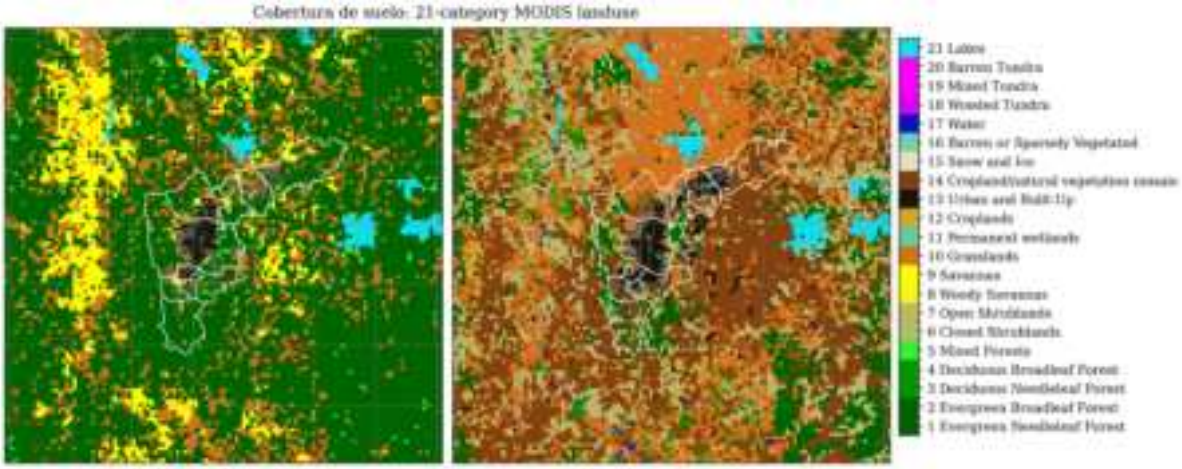


Figura 41: Resultado de la actualización de las coberturas de suelo: 21-category MODIS landuse para el dominio interno de 1 km. Cobertura original (*izquierda*) y cobertura actualizada incluyendo el perímetro urbano (*derecha*).

Resultados

Una vez definida la estrategia de subescalamiento y después de las diversas pruebas de la configuración planteada, la simulación dinámica entró en operación en julio de 2024 y finalizo en febrero de 2025. La simulación se caracterizo por ejecutarse de manera continua y estable. Con base en esto, la simulación comprende la siguiente información:

- **Histórico (1990-2000):** Simulación finalizada.
- **Escenario SSP2-4.5 (2040-2050):** Simulación finalizada.
- **Escenario SSP5-8.5 (2040-2050):** Simulación finalizada.

Adicionalmente, la simulación cuenta con la siguiente información temporal:

- **Dominio 01:** Información disponible cada 6 horas.
- **Dominio 02:** Información disponible cada 3 horas.
- **Dominio 03:** Información disponible cada hora.

Con base en la información disponible de la simulación, se procesaron las variables de precipitación y temperatura para los tres dominios, con el objetivo de obtener una visión preliminar de los resultados derivados del subescalamiento. Es importante aclarar que la simulación no se limita únicamente a estas variables, ya que también incluye datos relacionados con el viento, la humedad y otras variables meteorológicas, proporcionando un conjunto integral de información para el análisis climático.

Precipitación subescalada

Las Figuras 42 y 43 muestran los campos medios de precipitación para los escenarios Historical, SSP2-4.5 y SSP5-8.5, con los cambios proyectados en la precipitación diaria en el dominio 3. Estos resultados proporcionan una visión preliminar de los patrones climáticos proyectados.

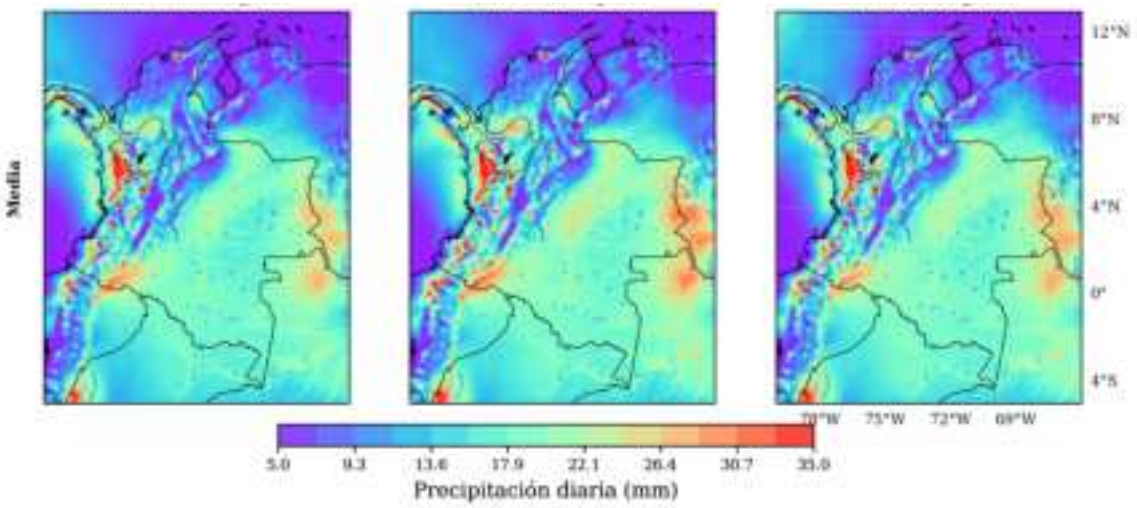


Figura 42: Dominio 1. Resolución espacial 12 km y centrado en Colombia, los mapas muestran de izquierda a derecha, periodo Histórico (1990-2000), SSP245 y SSP585 en el periodo 2040-2050.

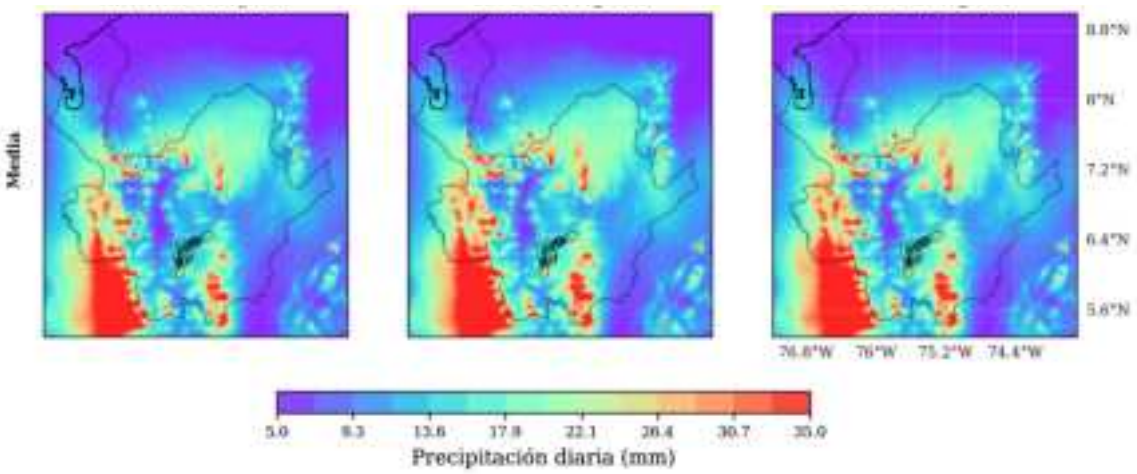


Figura 43: Dominio 2. Resolución espacial 3 km y centrado el departamento de Antioquia, los mapas muestran de izquierda a derecha, periodo Histórico (1990-2000), SSP245 y SSP585 en el periodo 2040-2050.

Aunque el modelo WRF presenta mejoras en la representación de la precipitación en comparación con los modelos globales, dado que se captura los patrones particulares de la región, es esencial validar los resultados utilizando datos de observaciones sobre la región, para esto se considera el radar meteorológico, las estaciones meteorológicas en el Valle de Aburrá, y bases de datos satelitales con información de precipitación, tales cómo IMERG (Huffman et al., 2015) y CHIRPS (Funk et al., 2015). Con este fin, se realizó una comparación de los patrones medios de precipitación mensual en el dominio 03 de la simulación dinámica (ver Figura 44), utilizando las bases de datos satelitales IMERG (con resolución espacial de 0.1° e información de 2001-2024) y CHIRPS (con resolución espacial de 0.05°, con información de 2001-2024). Los resultados muestran que, tanto en la señal de IMERG como en la de CHIRPS, existen diferencias en

magnitud al representar la precipitación sobre el Valle de Aburrá, sin embargo en comparación de la red de estaciones, esta varia en los rangos de la base de datos de CHIRPS. Al comparar con los datos del radar y la simulación dinámica, se observa que a pesar de la sobreestimación de la precipitación mostrada por la simulación WRF, el patrón de variabilidad se asemeja bastante, mostrando características como mayores precipitaciones hacia la región vecina del suroriente del valle.

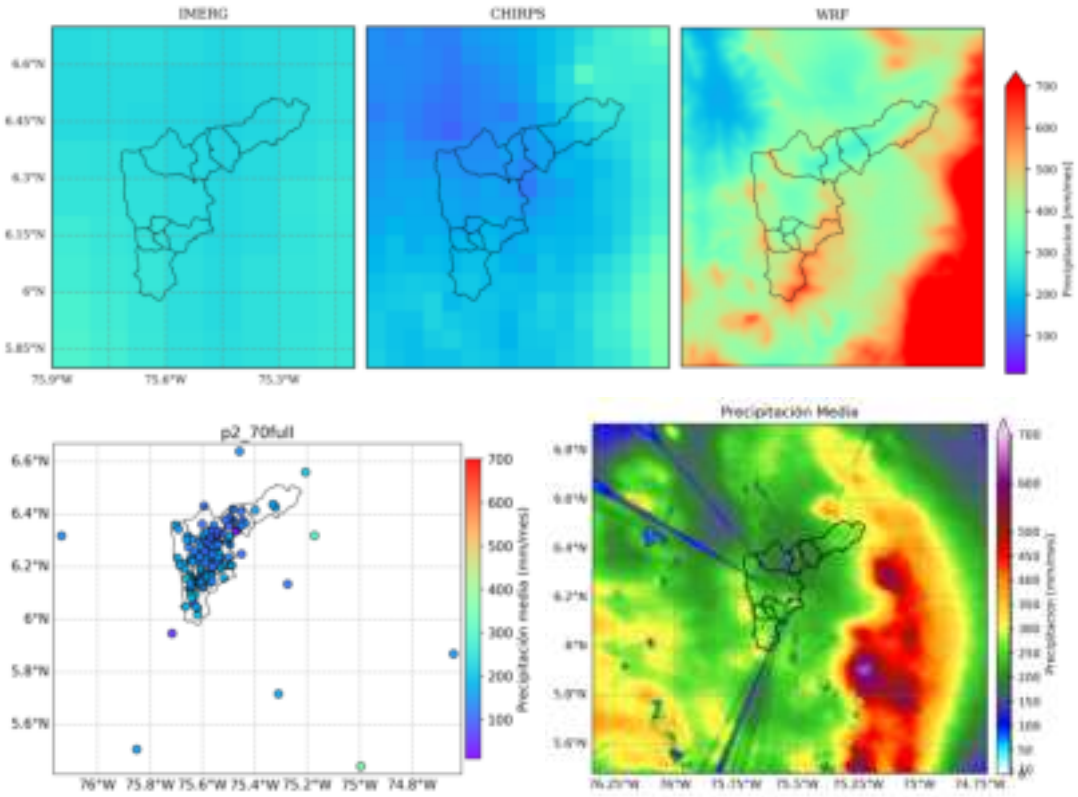


Figura 44: Comparación del patrón de precipitación media mensual sobre el Valle de Aburrá para la simulación dinámica en el dominio 03 (*panel superior*), con respecto a la red de estaciones pluviométricas de SIATA y el radar (*panel inferior*).

Proyecciones de precipitación y temperatura

En el panel inferior de la Figura 45 se muestran los cambios de precipitación sobre el Valle de Aburrá, estimados como la relación entre los escenarios futuros y el histórico (SSP/Historical). Valores cercanos a 1 indican ausencia de cambios, mientras que valores menores reflejan disminuciones, y valores mayores incrementos. La señal obtenida sugiere aumentos en la precipitación en áreas cercanas al valle bajo el escenario SSP2-4.5, mientras que dentro del valle los cambios son mínimos. En contraste, bajo el escenario SSP5-8.5, la señal indica una tendencia general a la disminución de la precipitación. Es importante resaltar, que estos cambios deben ser revisados en detalle una vez se validen los resultados de la simulación con respecto a las observaciones, identificando las fortalezas y debilidades la simulación, con el fin de tener certeza en las conclusiones proyectadas a futuro sobre la región.

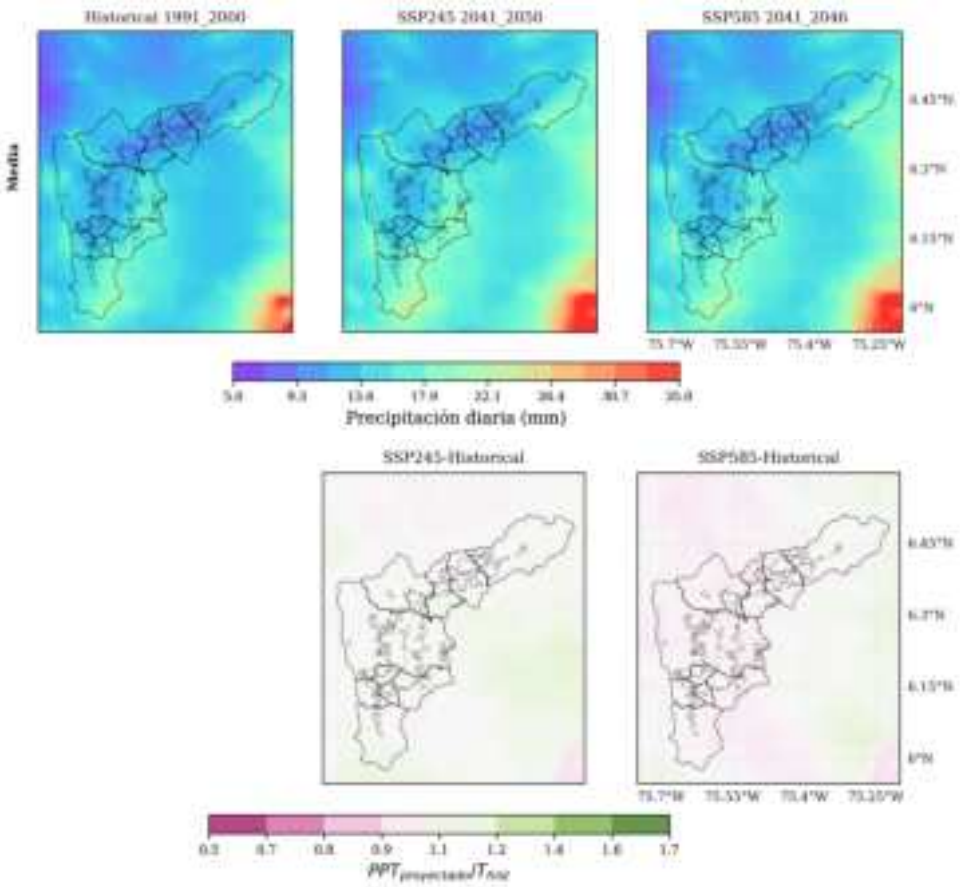


Figura 45: Campos de precipitación media diaria para los escenarios Historical, SSP245 y SSP585 para el dominio que cubre el Valle de Aburrá. En la parte inferior se presenta el cambio proyectado, estimado como la razón entre SSP/Historical, donde mayor a 1 es incremento y menor a 1 disminución, de la precipitación media diaria.

En la Figura 46, se presentan los cambios proyectados en la temperatura para ambos escenarios de cambio climático en el Valle de Aburrá, estos cambios se estiman como la diferencia entre el escenario futuro y el historical. Los resultados muestran una adecuada representación de la temperatura en el valle, con valores más altos en el área urbana que en las zonas rurales o montañosas circundantes, lo que refleja el fenómeno de ïsla de calor urbana", donde las superficies urbanizadas retienen más calor. En cuanto a proyecciones, se estiman incrementos de aproximadamente 0.9°C para el escenario SSP2-4.5 y de 1.2°C para el SSP5-8.5, lo que subraya el impacto de las emisiones en las temperaturas futuras y las diferencias espaciales dentro del valle. Además, estos resultados destacan la capacidad del modelo WRF para capturar la distribución espacial de la temperatura, especialmente en regiones con topografía compleja.

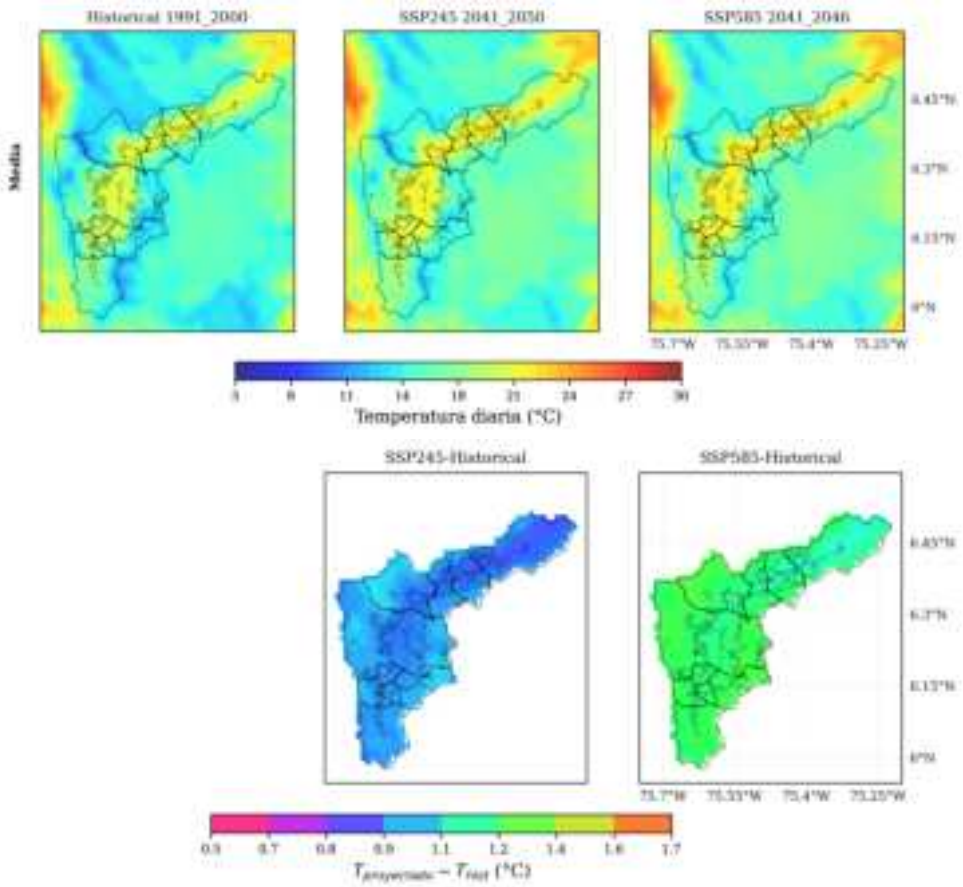


Figura 46: Campos de temperatura media diaria para el periodo Historical y el escenario SSP245 para el dominio que cubre el Valle de Aburrá, y los cambios proyectados en magnitud (SSP-Historical).

Parte IV: Cambios en los periodos de retorno de eventos extremos para el Valle de Aburrá y su región vecina

Introducción

El cambio climático presenta desafíos significativos en muchas regiones del mundo, con impactos variables según la ubicación. En nuestra región de estudio, caracterizada por una gran diversidad climática y de ecosistemas, es crucial comprender los posibles cambios en los fenómenos meteorológicos extremos para implementar estrategias eficaces de adaptación y mitigación.

Durante el pasado Contrato Ciencia y Tecnología 103 de 2023, se evaluaron los efectos del cambio climático en el Valle de Aburrá y su región vecina, utilizando datos de alta resolución de modelos de circulación general. Este análisis se centró en los extremos climáticos de precipitación y temperatura. Los resultados mostraron un aumento en la intensidad y frecuencia de eventos cálidos, así como en la intensidad de eventos extremos de precipitación, proyectados para mediados y finales del siglo XXI.

El presente estudio tiene como objetivo complementar los resultados anteriores mediante el Análisis de Valores Extremos (EVA), un método estadístico utilizado para evaluar el riesgo y predecir la frecuencia de fenómenos extremos. Este método se emplea en este estudio para identificar posibles cambios en la precipitación y temperatura extremas en Antioquia, proporcionando información crucial sobre futuros riesgos climáticos.

Metodología

Datos y región de estudio

Para este estudio, se utilizaron diversas fuentes de información, entre las que se incluyen los experimentos del HighResMIP del sexto proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (High resolution model intercomparison project - CMIP6; Haarsma et al., 2016), así como el subescalamiento estadístico de los modelos del CMIP6 del proyecto NEX-GDDP-CMIP6 (NASA Earth Exchange Global Daily Downscaled Projections; Thrasher et al., 2022).

Además, para analizar las proyecciones climáticas, se emplearon escenarios SSP2-4.5 y SSP5-8.5 para los modelos del proyecto NEX-GDDP-CMIP6, y RCP 8.5 W/m^2 para los modelos del proyecto HighResMIP. Estos análisis abarcaron todo el siglo XXI, con un enfoque especial en dos horizontes temporales: el mediano plazo (2041-2060) y el largo plazo (2081-2100).

Por otro lado, en el Contrato Ciencia y Tecnología 103 de 2023, se evaluaron las simulaciones históricas de los modelos en comparación con los datos de referencia, utilizando ERA5 para la temperatura mínima y máxima, y CHIRPS para la precipitación. Esta metodología permitió identificar los modelos más adecuados para ofrecer simulaciones precisas del comportamiento climático en el siglo XXI. Adicionalmente, se derivaron índices de eventos extremos a partir de datos diarios de temperaturas máximas (TX), mínimas (TN) y precipitaciones (PR).

Finalmente, los resultados de los análisis se obtuvieron para la región de estudio denominada *Antioquia*, correspondiente a un polígono en el noroeste de Colombia que incluye el departamento homónimo y la región de interés del Valle de Aburrá (Figura 47).

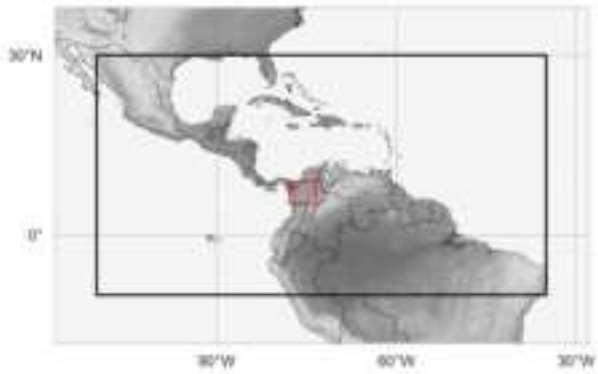


Figura 47: Representación gráfica de la zona de estudio denominada *Antioquia* (78W-73.5W, 9.0N-5.20S), en rojo y una zona más amplia denominada *América* (110W-35W, 10N-10S).

Análisis del valor extremo (Extreme Value Analysis, EVA)

El Análisis de Valores Extremos (EVA) se centra en modelar el comportamiento de la cola de una distribución para predecir la aparición y magnitud de sucesos poco frecuentes. En este estudio, se utilizó la distribución del Valor Extremo Generalizado (Generalized Extreme Value, GEV) para analizar los fenómenos extremos de precipitación y temperatura. La metodología incluye los siguientes pasos:

- Método de máximos por bloques: Se empleó el método de máximos por bloques, en el que el conjunto de datos se dividió en bloques no superpuestos (por ejemplo, anuales o mensuales). Se extrajo el valor máximo de cada bloque para formar una nueva serie de valores extremos.
- Distribución de valores extremos generalizada (GEV): La distribución GEV, que combina tres tipos de distribuciones (Gumbel, Fréchet y Weibull), se ajustó a las series de valores máximos de los bloques. La distribución GEV se caracteriza por tres parámetros: localización, escala y forma, que describen la tendencia central, la variabilidad y el comportamiento de la cola de la distribución, respectivamente.
- Estimación de los parámetros: Los parámetros de la distribución GEV se estimaron utilizando la Estimación de Máxima Verosimilitud (MLE). Este método proporciona estimaciones sólidas de los parámetros de localización, escala y forma, lo que permite modelizar con precisión los fenómenos extremos.
- Cálculo del nivel de retorno: Se calcularon los niveles de retorno, que representan la magnitud de un suceso que se espera que se supere de media una vez cada periodo especificado (por ejemplo, 10, 50, 100 años). Estos niveles de retorno son cruciales para comprender el impacto potencial y la frecuencia de los fenómenos extremos.

Resultados

Utilizando la teoría de los valores extremos que deriva en la distribución GEV, se ajusta una muestra de extremos a esta distribución para obtener los parámetros que mejor expliquen la probabilidad de estos eventos. En el presente trabajo, se calcularon inicialmente la temperatura máxima diaria, la intensidad de precipitación máxima diaria, la frecuencia de episodios de precipitaciones intensas y la frecuencia de días secos consecutivos para la región de estudio, considerando cada una de las proyecciones y horizontes

temporales analizados. Estas cantidades extremas se ajustaron a la distribución GEV, lo que permitió estimar la frecuencia con la que ocurren ciertos cuantiles extremos a niveles de retorno específicos.

Cambios en la magnitud de la temperatura máxima diaria

Los cambios proyectados por los modelos en la distribución de la temperatura máxima diaria muestran un consenso entre los distintos modelos evaluados. En general, la ubicación de las curvas de probabilidad (Figura 48) se desplaza hacia valores cada vez más altos para los horizontes temporales analizados, tanto a mediano como a largo plazo, así como para las proyecciones consideradas.

De esta manera, para el caso de un periodo de retorno de 10 años (Tabla 5) se proyecta un incremento en la magnitud del máximo diario, el cual se acentúa en el tiempo y con los escenarios de emisiones.

Tabla 5: Cambios proyectados en la distribución de los cuantiles extremos de la temperatura máxima diaria para un periodo de retorno de 10 años, en comparación con el periodo histórico específico de cada modelo.

Proyecto	Modelo	SSP2-4.5 (2041-2060)	SSP2-4.5 (2081-2100)	SSP5-8.5 (2041-2060)	SSP5-8.5 (2081-2100)	RCP-8.5 (2041-2060)	RCP-8.5 (2081-2100)
HighResMIP	MRI-AGCM3-2-S					+1.62°C	+3.68°C
	MPI-ESM1-2-LR	+1.14°C	+1.55°C	+1.42°C	+3.74°C		
NEX-GDDP-CMIP6	MIROC6	+0.56°C	+0.71°C	+1.01°C	+2.83°C		
	NorESM2-LM	+1.84°C	+2.95°C	+2.75°C	+5.75°C		
	Mean	**+1.18°C**	**+1.74°C**	**+1.73°C**	**+4.11°C**	**+1.62°C**	**+3.68°C**

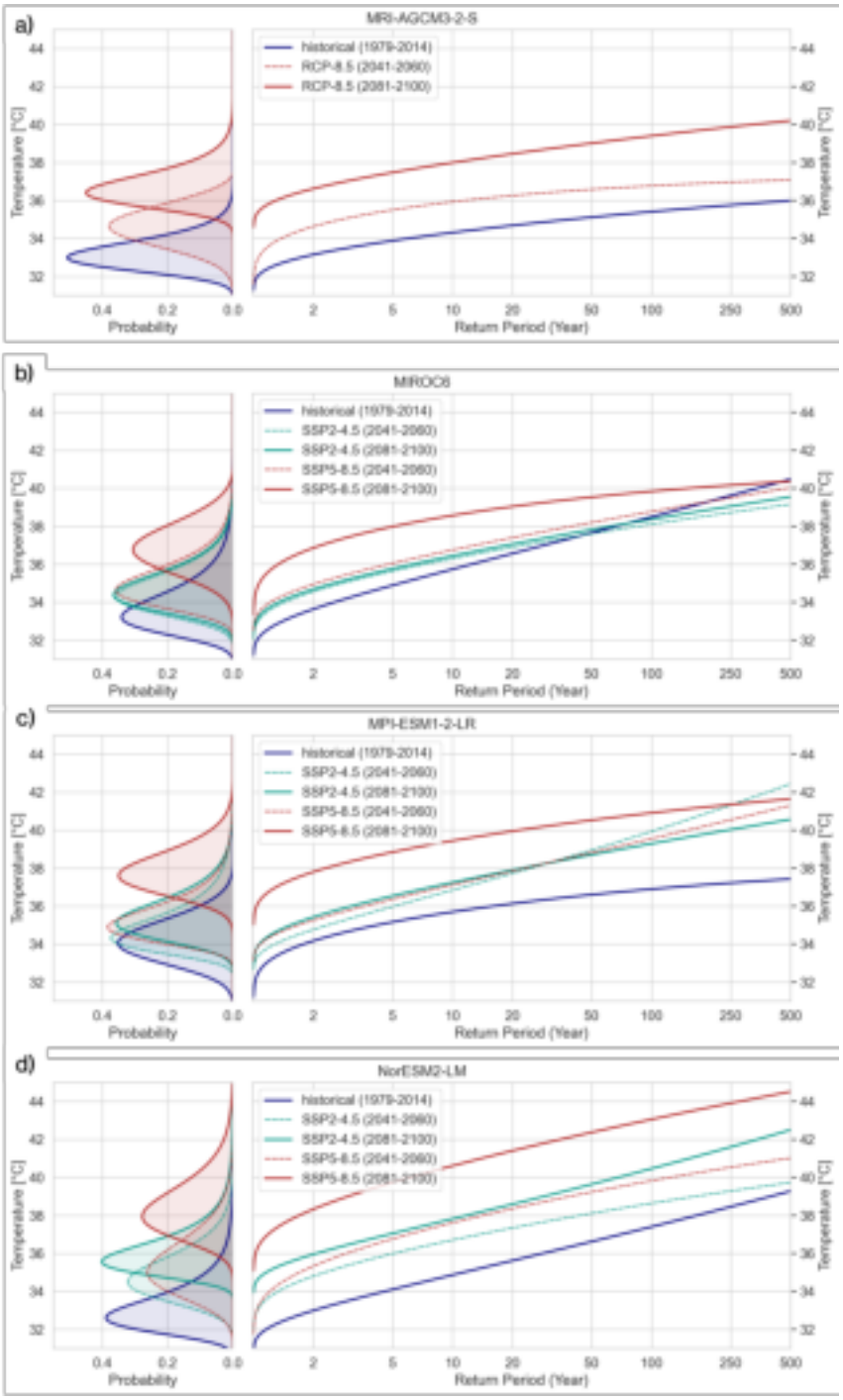


Figura 48: Comparación de la distribución de los cuantiles extremos de temperatura máxima diaria (°C) correspondientes a una probabilidad específica (paneles de la izquierda) y a periodos de retorno específicos (paneles de la derecha) para distintos escenarios y periodos de estudio. La Figura a) corresponde al modelo MRI-AGCM3-2-S del proyecto HighResMIP, y las figuras b), c) y d) corresponden a los modelos MIROC6, MPI-ESM1-2-LR y NorESM2-LM del proyecto NEX-GDDP-CMIP6, respectivamente.

Cambios proyectados en la magnitud de las lluvias intensas

Los resultados sobre eventos extremos de precipitación descritos en el Contrato Ciencia y Tecnología 103 de 2023 revelaron un bajo rendimiento de los modelos analizados para simular lluvias extremas, en comparación con las bases de referencia utilizadas. Además, los modelos mostraron un bajo grado de concordancia en sus proyecciones para los eventos extremos de lluvia en el siglo XXI.

Del mismo modo, en el estudio de los cambios proyectados en la magnitud de lluvias intensas utilizando la metodología de Análisis de Valores Extremos (EVA), se observó un consenso limitado entre los modelos. La Figura 49 muestra las distintas variaciones de las curvas de distribución de valores extremos proyectadas para los modelos. Se puede apreciar que algunos modelos muestran una distribución similar al periodo histórico para el horizonte cercano de 2041-2060 en sus proyecciones SSP2-4.5 y SSP5-8.5, con una ligera desviación hacia valores de mayor intensidad. Sin embargo, para la proyección SSP5-8.5 en el horizonte de 2081-2100, los tres modelos analizados presentan un marcado desplazamiento para sus curvas hacia valores más altos. Para el caso de un periodo de retorno de 10 años (Tabla 6) se proyecta un incremento en la magnitud de las más intensas entre 1.11 y 1.13 para el periodo 2041-2060; y de entre 1.18 y 1.31 para el 2081-2100.

Tabla 6: Cambios proyectados en la distribución de los cuantiles extremos de la magnitud de las lluvias intensas para un periodo de retorno de 10 años, en comparación con el periodo histórico específico de cada modelo.

Proyecto	Modelo	SSP2-4.5 (2041-2060)	SSP2-4.5 (2081-2100)	SSP5-8.5 (2041-2060)	SSP5-8.5 (2081-2100)
NEX-GDDP-CMIP6	BCC-CSM2-MR	1.00 veces más intensas	1.06 x	1.08 x	1.19 x
	MIROC6	1.22 veces más intensas	1.26 x	1.22 x	1.44 x
	MRI-ESM2-0	1.11 veces más intensas	1.21 x	1.08 x	1.32 x
	Mean	**1.11 veces más intensas**	**1.18 x**	**1.13 x**	**1.31 x**

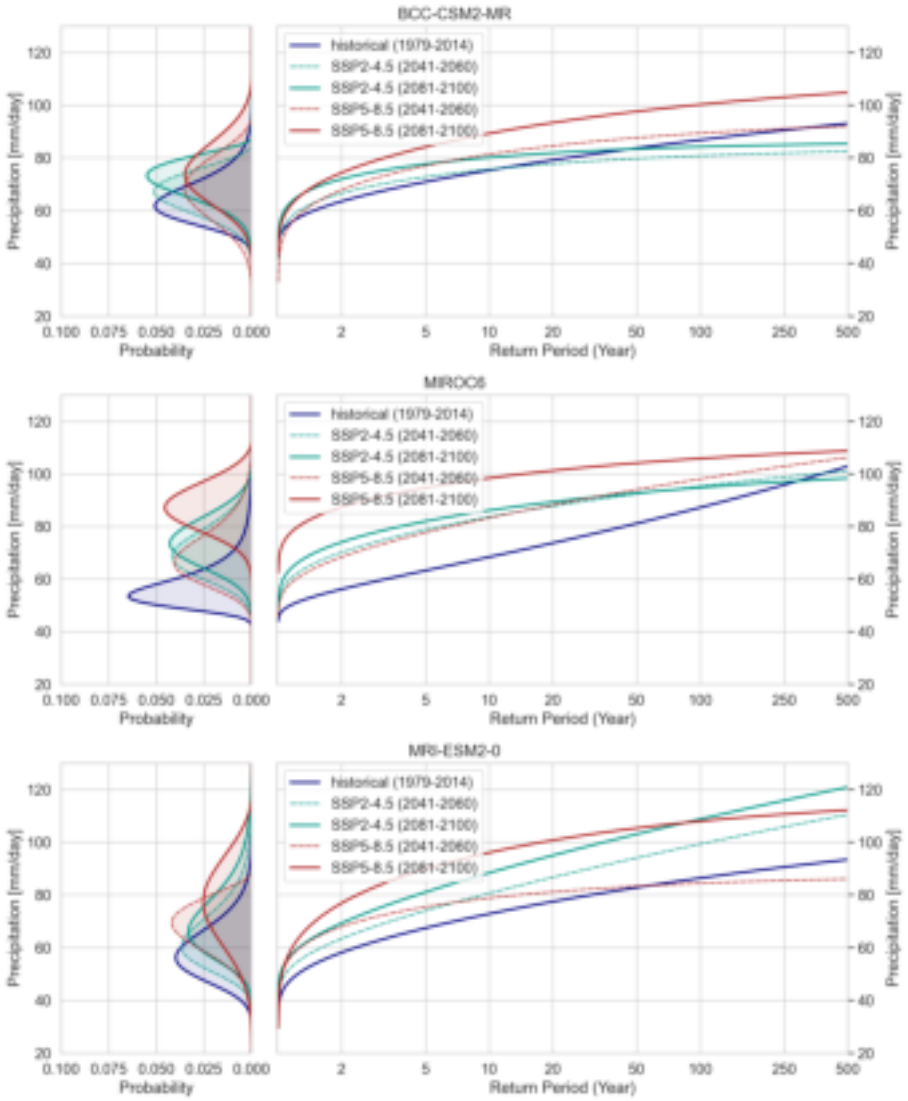


Figura 49: Comparación de la distribución de los cuantiles extremos de la magnitud de las lluvias intensas [mm/día] correspondientes a una probabilidad específica (paneles de la izquierda) y a periodos de retorno específicos (paneles de la derecha) para distintos escenarios y periodos de estudio. Las figuras (A), (B) y (C) corresponden a los modelos BCC-CSM2-MR, MIROC6, y MRI-ESM2-0 del proyecto NEX-GDDP-CMIP6, respectivamente.

Cambios proyectados en la frecuencia de lluvias intensas

Dos de los tres modelos analizados (Figura 50) indican un aumento en la frecuencia de lluvias extremas durante el siglo XXI. En contraste, el modelo BCC-CSM2-MR proyecta una disminución en la frecuencia de estos eventos. Para un período de retorno de 10 años (Tabla 7), el promedio de los modelos sugiere que el escenario SSP2-4.5 resultará en una mayor frecuencia de lluvias extremas en comparación con el escenario SSP5-8.5. Así, según las proyecciones, se anticipa que las lluvias intensas serán entre 1.07 y 1.12 veces más frecuentes en el horizonte temporal de 2041-2060, y entre 1.21 y 1.25 veces más frecuentes para el período de 2081-2100.

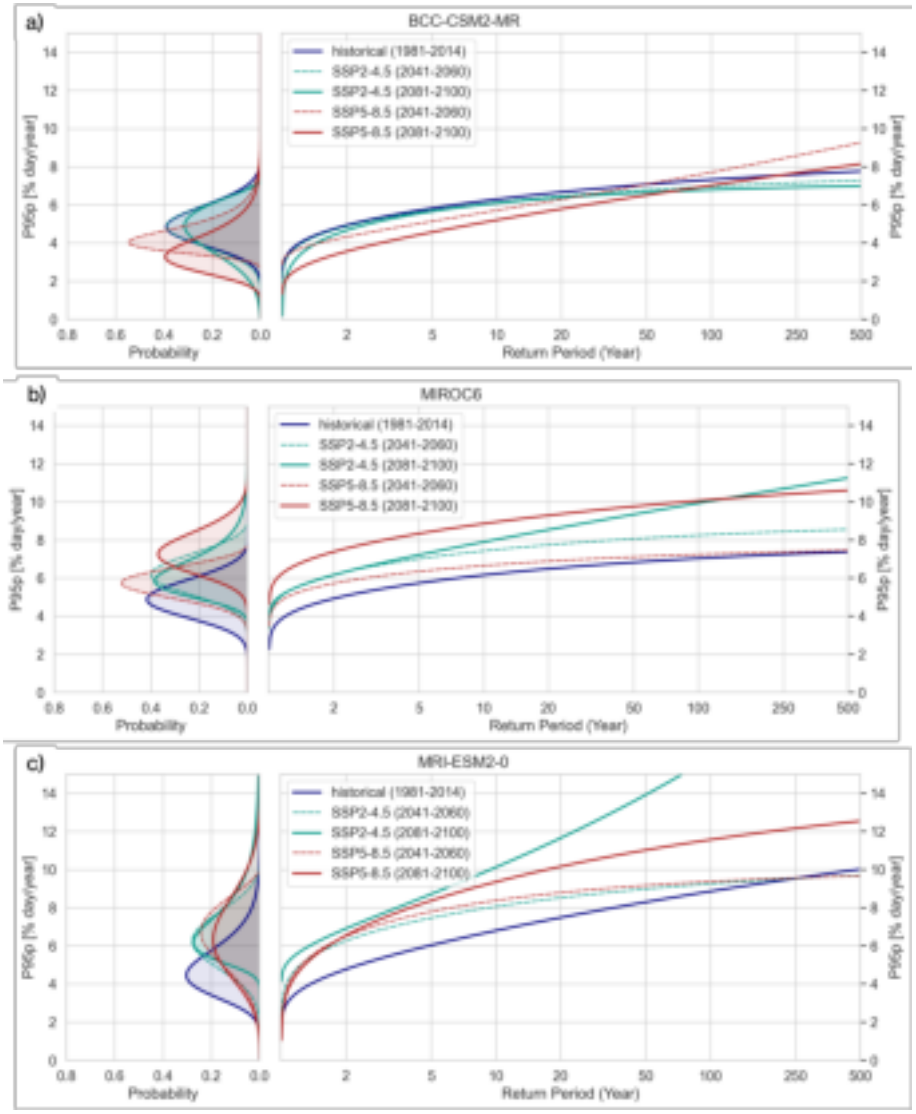


Figura 50: Comparación de la distribución de los cuantiles extremos de la frecuencia de las lluvias intensas [porcentaje de días por año] correspondientes a una probabilidad específica (paneles de la izquierda) y a periodos de retorno específicos (paneles de la derecha) para distintos escenarios y periodos de estudio. Las figuras a), b) y c) corresponden a los modelos BCC-CSM2-MR, MIROC6, y MRI-ESM2-0 del proyecto NEX-GDDP-CMIP6, respectivamente.

Tabla 7: Cambios proyectados en la distribución de los cuantiles extremos de la frecuencia de las lluvias intensas para un periodo de retorno de 10 años, en comparación con el periodo histórico específico de cada modelo.

Proyecto	Modelo	SSP2-4.5 (2041-2060)	SSP2-4.5 (2081-2100)	SSP5-8.5 (2041-2060)	SSP5-8.5 (2081-2100)
NEX-GDDP-CMIP6	BCC-CSM2-MR	0.98 veces más frecuente	0.97 x	0.91 x	0.83 x
	MIROC6	1.21 veces más frecuente	1.28 x	1.08 x	1.44 x
	MRI-ESM2-0	1.19 veces más frecuente	1.49 x	1.23 x	1.38 x
	Mean	**1.12 veces más frecuente**	**1.25 x**	**1.07 x**	**1.21 x**

Cambios proyectados en la frecuencia de las sequías

Dos de los tres modelos analizados (Figura 51) proyectan distribuciones de cuantiles extremos de la frecuencia de eventos de sequía que son similares al período histórico en los distintos escenarios y períodos evaluados. En contraste, el modelo MRI-ESM2-0 muestra un marcado incremento en estas distribuciones, indicando una mayor frecuencia de eventos extremos de sequía, especialmente en el escenario SSP5-8.5.

Para un período de retorno de 10 años (Tabla 8), el promedio de los modelos sugiere un incremento en la frecuencia de las sequías de entre 1.05 y 1.09 veces para el periodo de 2041-2060 y entre 1.03 y 1.06 veces para finales de siglo (2081-2100).

Tabla 8: Cambios proyectados en la distribución de los cuantiles extremos de la frecuencia de las sequías para un periodo de retorno de 10 años, en comparación con el periodo histórico específico de cada modelo.

Proyecto	Modelo	SSP2-4.5 (2041-2060)	SSP2-4.5 (2081-2100)	SSP5-8.5 (2041-2060)	SSP5-8.5 (2081-2100)
NEX-GDDP-CMIP6	BCC-CSM2-MR	0.97 veces más frecuente	0.97 x	0.87 x	0.91 x
	MIROC6	1.02 veces más frecuente	0.90 x	0.85 x	0.92 x
	MRI-ESM2-0	1.28 veces más frecuente	1.23 x	1.42 x	1.33 x
	Mean	**1.09 veces más frecuente**	**1.03 x**	**1.05 x**	**1.06 x**

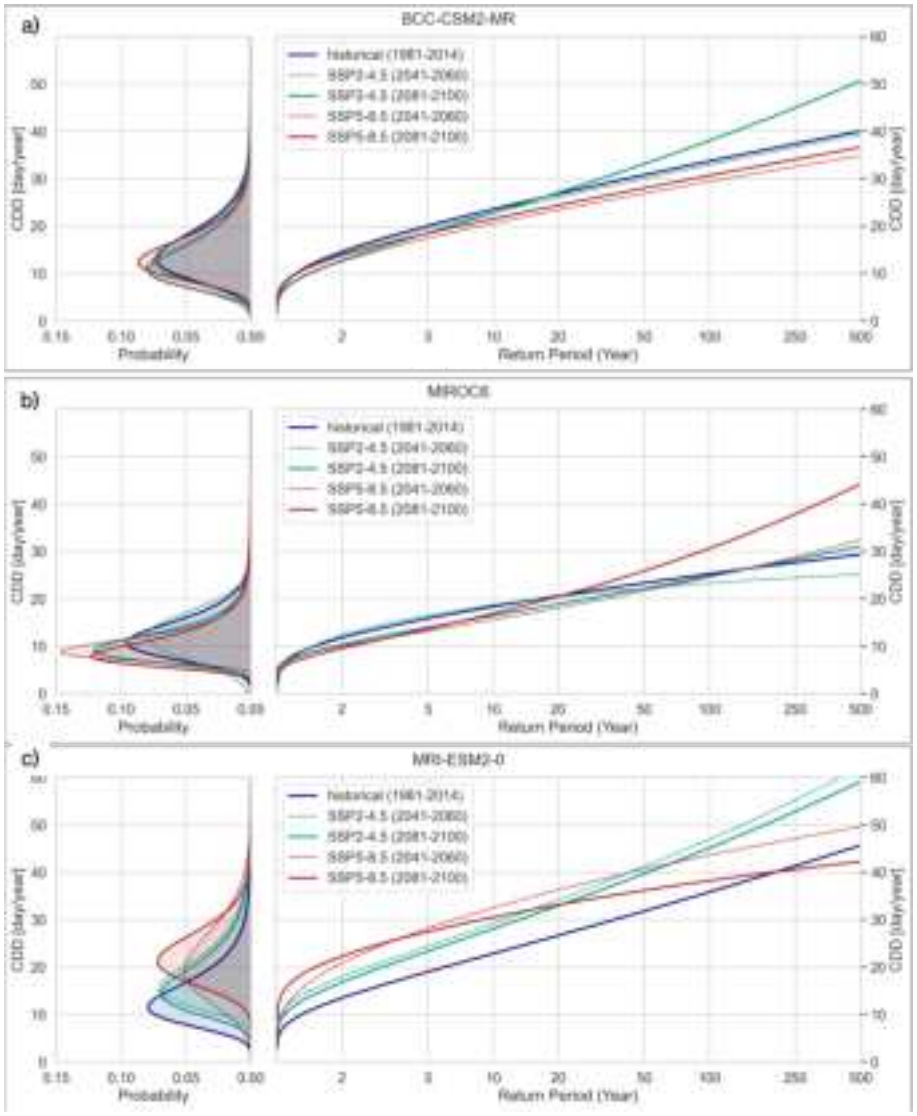


Figura 51: Comparación de la distribución de los cuantiles extremos de la frecuencia de las sequías [días por año] correspondientes a una probabilidad específica (paneles de la izquierda) y a periodos de retorno específicos (paneles de la derecha) para distintos escenarios y periodos de estudio. Las figuras de los paneles a), b) y c) corresponden a los modelos BCC-CSM2-MR, MIROC6, y MRI-ESM2-0 del proyecto NEX-GDDP-CMIP6, respectivamente.

WP1.1.3. Análisis integral de las variables y procesos ambientales que influyen en la calidad del aire

Parte I: Modelo de pronóstico estadístico de PM2.5

Introducción

La calidad del aire es uno de los problemas más importantes en los grandes centros urbanos, por lo que es necesario utilizar herramientas para anticipar la ocurrencia de eventos de contaminación atmosférica. Las técnicas de Machine Learning han sido usadas para múltiples aplicaciones ambientales, incluido el estudio y el pronóstico de la calidad del aire con un costo computacional relativamente bajo respecto al que presentan los modelos numéricos. Desde el proyecto SIATA se viene trabajando desde el 2021 en un modelo de pronóstico estadístico a corto plazo para PM2.5 en el Valle de Aburrá.

Este modelo estadístico ha sido entrenado usando múltiples fuentes de información meteorológica, incluyendo campos del sistema de pronóstico global GFS (Global Forecast System), simulaciones del modelo regional WRF (Weather Research and Forecasting) implementado operacionalmente por SIATA con resolución de 2 km, y campos del modelo global ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) con resolución de 9 km. Adicionalmente, incorpora pronosticos de calidad del aire del servicio de monitoreo atmosférico Copernicus (CAMS), datos de puntos calientes proporcionados por FIRMS (Fire Information for Resource Management System), observaciones de PM2.5 de la Red de Calidad de Aire del Valle de Aburrá, información de los sensores de ciudadanos científicos y variables temporales correspondientes a la hora del día y el día de la semana a pronosticar.

El modelo de pronóstico estadístico de PM2.5 implementado operacionalmente en el proyecto SIATA utiliza algoritmos de Machine Learning para predecir concentraciones con un horizonte de 72 horas. La configuración base del sistema, denominada experimento 5 o modelo operativo, se desarrolló durante el Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 103 de 2023. Durante la vigencia del CCT 016 de 2024, se ejecutaron desarrollos para mejorar la precisión, eficiencia computacional y robustez operativa mediante la integración de nuevas fuentes de datos y la optimización de estrategias de entrenamiento.

Metodología

Optimización computacional y operativa

Los primeros esfuerzos se centraron en resolver el cuello de botella computacional que representaba la ejecución secuencial del modelo, la cual podía tardar hasta 6 horas. Mediante la implementación de técnicas computacionales de paralelización utilizando la librería Multiprocessing de Python, se logró una reducción del 58.3 % en el tiempo de ejecución (Figura 52). Esta optimización fue crucial para permitir múltiples corridas diarias, facilitar la experimentación que caracterizó el resto del contrato y garantizar la operatividad durante los períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica. Actualmente el modelo se corre 3 veces al día con un tiempo cercanos a los 15 minutos, aunque con un alto costo computacional.

```
#%% MANEJO DE PROCESAMIENTO - HILOS
default_n_threads = 60
environ['OPENBLAS_NUM_THREADS'] = f"{default_n_threads}"
environ['MKL_NUM_THREADS'] = f"{default_n_threads}"
environ['OMP_NUM_THREADS'] = f"{default_n_threads}"

#%% SKLEARN
Names_models = ['RF', 'SVR', 'KNN', 'GB']

#%% ESTACIONES PM2.5
Estaciones_select = Est[Est['PM2.5']==1]

#%% CREANDO PRONOSTICOS
def process_station(row):

if __name__ == "__main__":
    simplefilter(action='ignore', category=FutureWarning)

    with Pool(default_n_threads) as pool:
        pool.map(process_station, [row for _, row in Estaciones_select.iterrows()])

    # Generar gráficos de pronóstico de ICA
    AQStats = ["BAR-TORR", "BEL-FEVE", "CAL-JOAR", "CEN-TRAF", "COP-CVID", "ENV-HOSP",
               "EST-HOSP", "ITA-CJUS", "SAB-RAME", "ITA-CONC", "MED-ALTA", "MED-ARAN",
               "MED-BEME", "MED-FISC", "MED-LAYE", "MED-PBLQ", "MED-SCRI", "MED-SELE",
               "MED-TESO", "MED-VILL", "GIR-EPM"]
    model_names = ['RF', 'SVR', 'KNN', 'GB', 'CAMS']
    name_fig = 'ForecastICA24h_SummaryAll_current.jpg'
    print("Graficaré pronóstico de ICA cuadritos")
    icapf.plot_ForeICA24h_4old(to_datetime(datetime.now().strftime('%Y-%m-%d %H')),
                               path_fig + name_fig, AQStats, model_names, ytext=0.88)
    system(f'scp -r {path_fig + name_fig} calidadaire@siata.gov.co:/var/www/CalidadAire/Pronostico_PM25_V2/Figures/Stations')
    print("DONE!!!")
```

Figura 52: Extracto de código optimizado de ejecución del modelo de predicción estadístico.

Se desarrolló documentación técnica que describe la arquitectura del modelo, los procesos de extracción de datos desde fuentes como WRF, CAMS y estaciones de monitoreo, las estrategias de entrenamiento y la implementación operativa. Esta documentación (disponible en línea) facilita la operatividad del modelo y permite modificaciones e implementaciones futuras.

Integración de redes de sensores de bajo costo

Una de las líneas de trabajo propuestas durante la vigencia del CCT 016 de 2024 fue la incorporación de datos de la Red de Ciudadanos Científicos al modelo de pronóstico.Esta incorporación busca mejorar la representación espacial de las concentraciones de PM2.5 mediante el incremento de la densidad de observaciones, particularmente para estaciones con mayores sesgos encontrados, lo que permite capturar mejor la variabilidad de los contaminantes y obtener mejores predicciones. Inicialmente se evaluó una aproximación basada en promedios regionales dividiendo el Valle de Aburrá en cinco zonas (Figura 53), sin embargo, los resultados mostraron mejoras marginales, llevando al desarrollo de una estrategia más robusta.

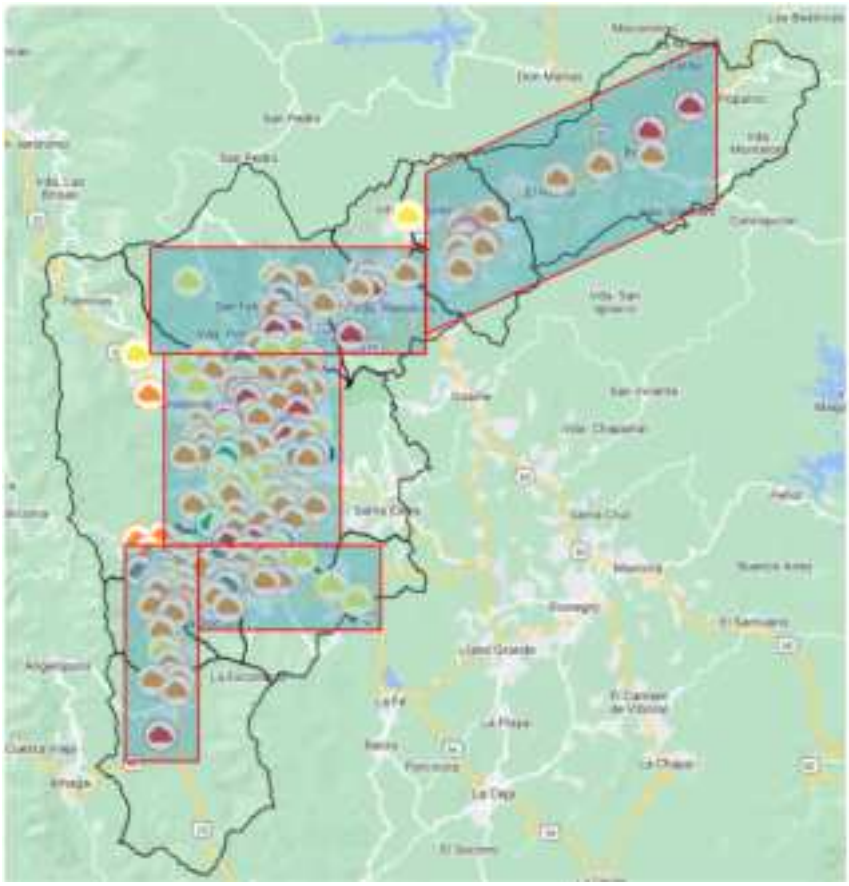


Figura 53: Regiones consideradas para obtener la información de Ciudadanos Científicos.

La metodología planteada selecciona las seis nubes más cercanas a cada estación oficial, capturando la variabilidad espacial local de las concentraciones. El análisis de ciclos diurnos (Figura 54) reveló patrones coherentes entre estaciones oficiales y los sensores cercanos, mientras que las correlaciones rezagadas (Figura 55) confirmaron la capacidad predictiva de estas variables, con valores superiores a 0.55 en correlación 1:1 y picos significativos en rezagos de 24, 48, 72 y 96 horas.

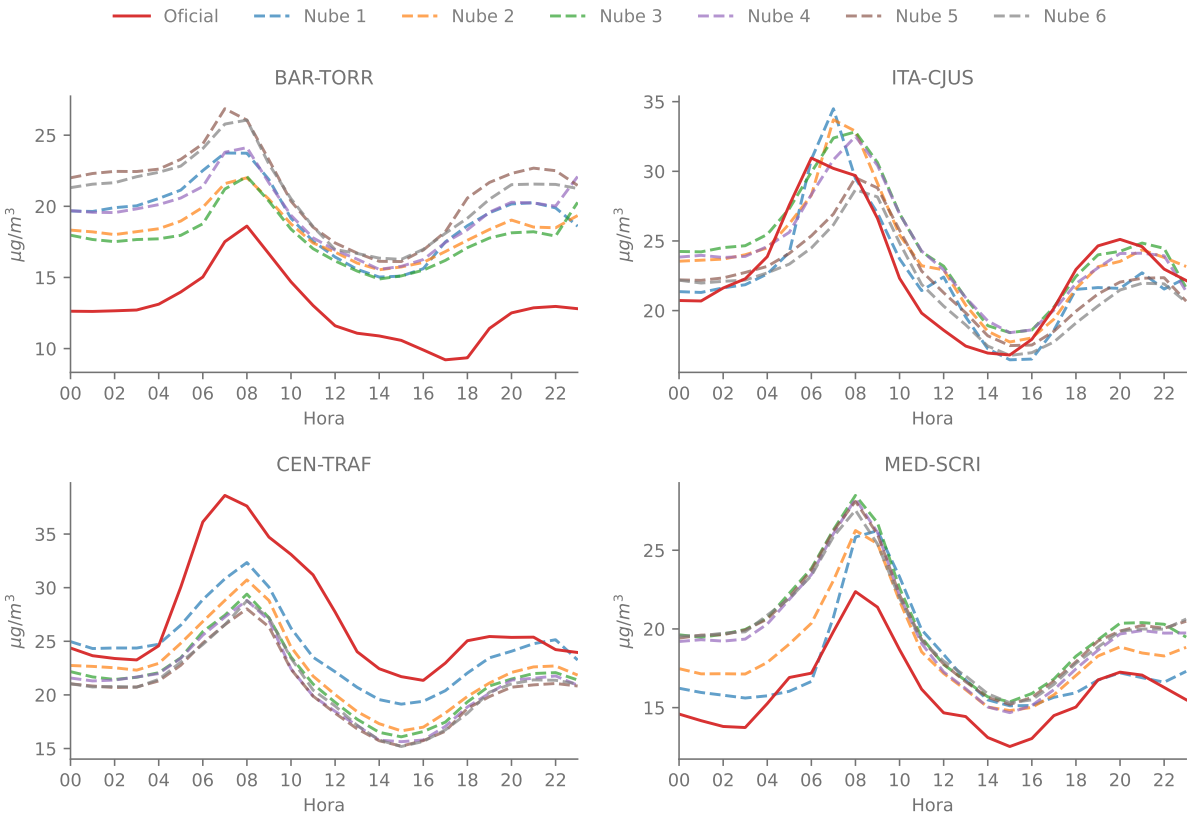


Figura 54: Ciclo diurno de las concentraciones de PM2.5 obtenidas para las estaciones oficiales de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá y las nubes de la Red de Ciudadanos Científicos más cercanas. Los resultados presentados corresponden al período 2017-2023.

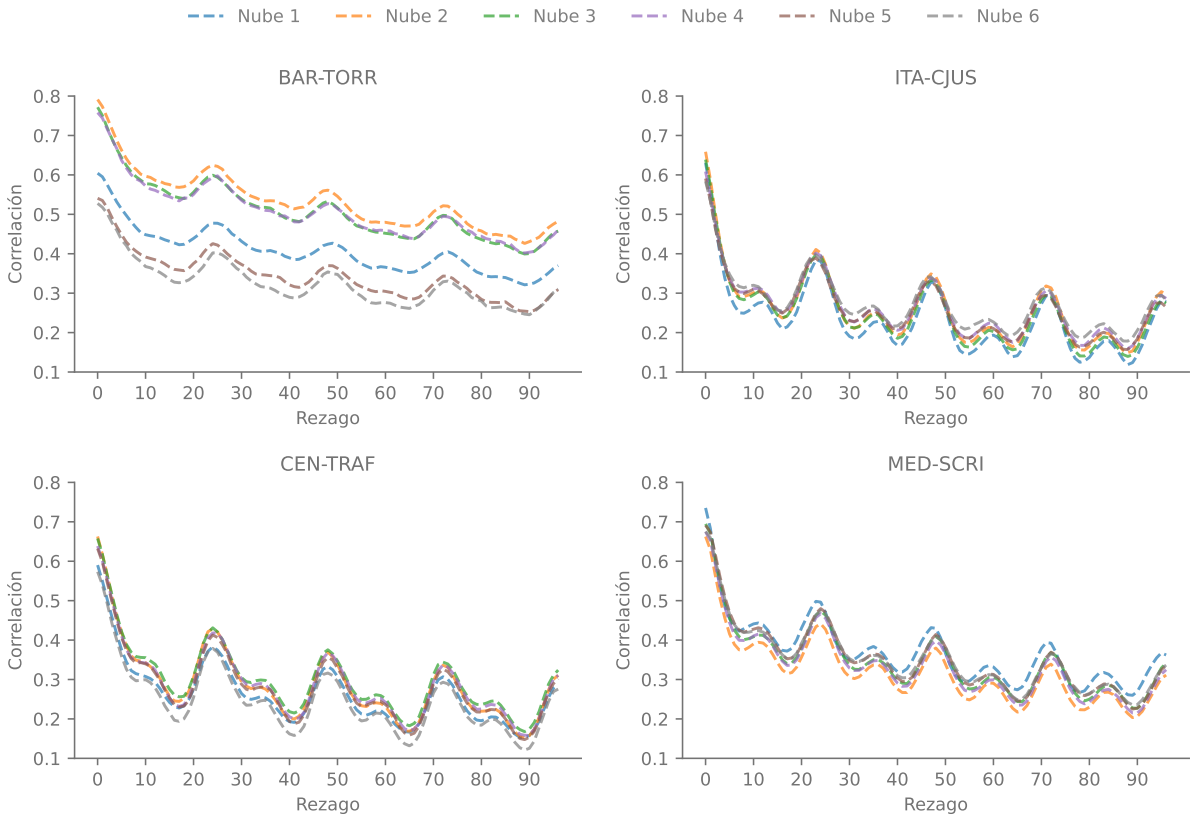


Figura 55: Correlación rezagada en horas de las concentraciones de PM2.5 registradas en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire y las 6 nubes de la Red de Ciudadanos Científicos más cercanas.

Los experimentos comparativos entre el modelo operativo (experimento 5) y la versión con Ciudadanos Científicos (experimento 6) demostraron mejoras cuantificables en múltiples métricas. La reducción del sesgo fue de 0.4 $\mu g/m^3$, acompañada de una disminución del RMSE en 0.3 $\mu g/m^3$ y del MAE en 0.2 $\mu g/m^3$. Las mejoras fueron más pronunciadas durante horizontes de pronóstico de 24-48 horas, con correlaciones incrementándose de 0.58 a 0.61. Las estaciones ITA-CJUS y CEN-TRAF mostraron las mayores mejoras en probabilidad de detección de eventos que superan concentraciones promedio, con incrementos del 8 % y 6 % respectivamente (Figuras 56 y 57).

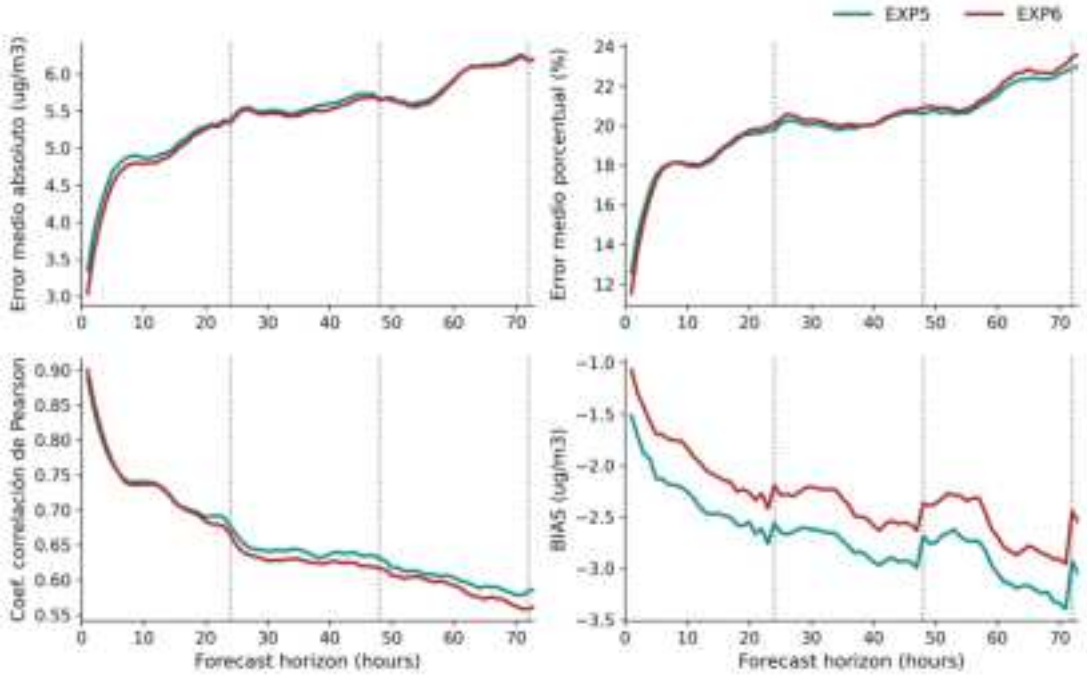


Figura 56: Métricas de desempeño promedio del pronóstico estadístico de PM2.5 para los experimentos 5 (operativo) y 6 (operativo y Ciudadanos Científicos). Los paneles muestran resultados para distintas métricas, incluyendo el error medio absoluto (MAE), el sesgo promedio (BIAS), el error medio porcentual (MAPE), y el coeficiente de correlación de Pearson.

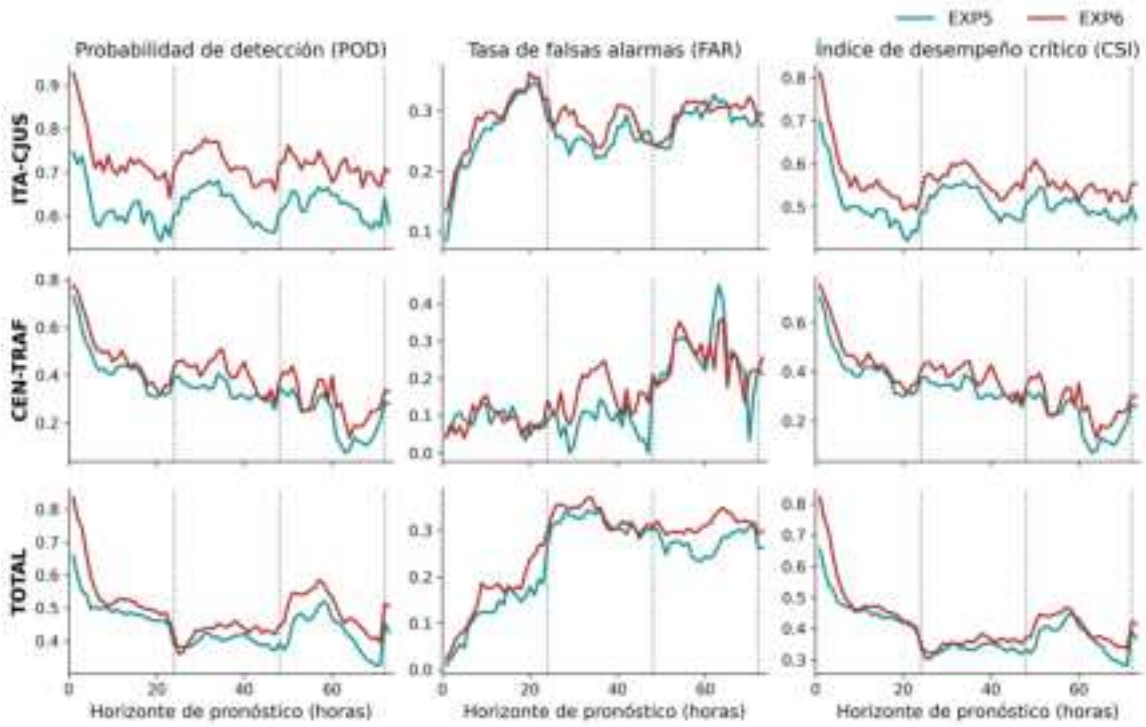


Figura 57: Métricas de desempeño de los pronósticos estadísticos derivadas de tablas de contingencia para los experimentos 5 (operativo) y 6 (operativo y ciudadanos) en las estaciones ITA-CJUS (arriba), CEN-TRAF (medio) y el promedio de las estaciones de PM2.5 pertenecientes a la Red de Monitoreo de Calidad del Aire (abajo). De izquierda a derecha se muestran resultados para distintas métricas, incluyendo la probabilidad de detección (POD), las tasas de falsas alarmas (FAR), y el índice de desempeño crítico (CSI).

Resultados

Evaluación del desempeño

Se implementó una metodología de evaluación continua que incluye métricas tradicionales (MAE, RMSE, BIAS, correlación de Pearson) y evaluación en términos del Índice de Calidad del Aire (ICA) para PM2.5. Este sistema genera análisis mes a mes del desempeño operativo. Los resultados generales indican que el modelo mantiene precisiones superiores al 80 % en la mayoría de estaciones para todos los horizontes de pronóstico. Como ejemplos representativos de esta evaluación, se presentan los análisis correspondientes a agosto y septiembre de 2024 (Figuras 58 y **??**).

Durante el período de gestión de episodios de contaminación atmosférica de marzo de 2025, el modelo demostró su capacidad operacional con un error medio absoluto (MAE) de 6.37 $\mu g/m^3$ para el ensamble y correlaciones de 0.63, superando al pronóstico global CAMS (Tabla 9). Estaciones como las ubicadas en la I.E. Joaquín Aristizabal en el municipio de Caldas (estación CAL-JOAR), la Casa de Justicia del municipio de Itagüí (estación ITA-CJUS) y la I.E. Pedro Octavio Amado en el Distrito de Medellín (estación MED-ALTA), alcanzaron 100 % de aciertos en la predicción de las categorías de ICA para este mismo periodo.

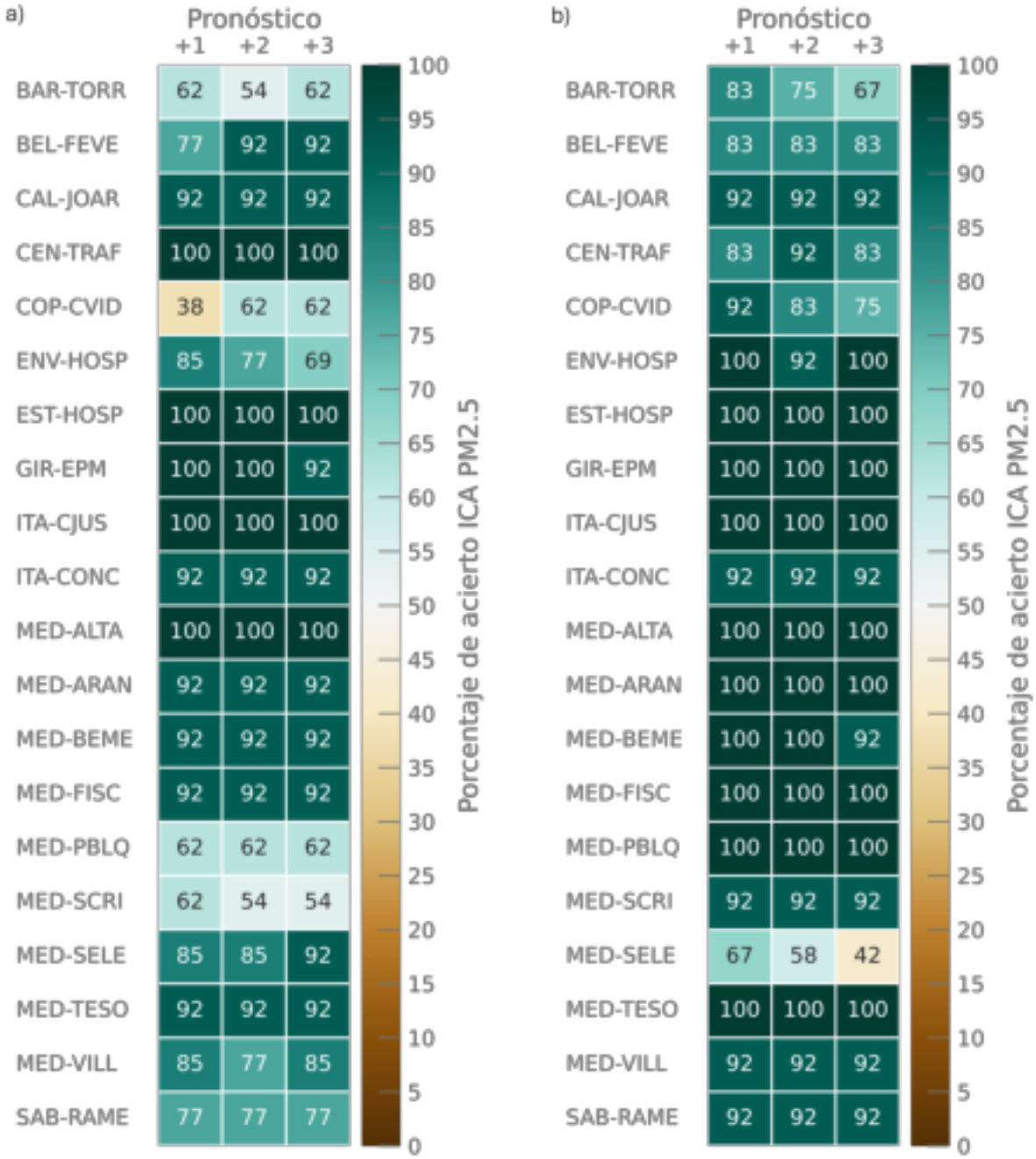


Figura 58: a) Evaluación porcentual en términos de ICA del modelo de pronóstico estadístico para el mes de a) agosto de 2024 y b) septiembre de 2024. La evaluación fue realizada a partir de pronósticos realizados a las 23:00 horas de cada día del mes correspondiente. De izquierda a derecha, las columnas muestran los resultados para horizontes de pronóstico de 1, 2 y 3 días.

Tabla 9: Métricas de desempeño para los diferentes algoritmos del modelo de pronóstico (valores para todos los horizonte de pronóstico).

Métrica	Ensamble	RF	SVR	GB	CAMS
Correlación	0.63	0.58	0.59	0.61	0.19
Bias ($\mu g/m^3$)	2.42	3.36	3.37	2.83	-6.50
RMSE ($\mu g/m^3$)	8.13	8.96	8.91	8.52	12.87
MAE ($\mu g/m^3$)	6.37	7.02	7.10	6.66	9.93

Exploración de nuevas fuentes meteorológicas

La búsqueda de mejores insumos meteorológicos para el modelo de pronóstico estadístico de PM2.5 llevó a la evaluación de tres fuentes principales de información. Además de las simulaciones del pronóstico operativo WRF ejecutado por el equipo de Meteorología de SIATA, se incorporaron variables del modelo global ECMWF con resolución de 9 km, incluyendo 15 variables meteorológicas en superficie y componentes del viento en múltiples niveles de presión (Tabla 10). También se exploraron nuevas variables derivadas del WRF como la razón de Bowen, cortantes de viento e índices de estabilidad atmosférica. La comparación entre configuraciones ECMWF, ECMWF con Ciudadanos Científicos (ECMWF-SC), WRF y WRF-SC reveló que las simulaciones del modelo regional WRF proporcionan mejores resultados, especialmente para horizontes mayores a 24 horas, confirmando la importancia de la alta resolución espacial en regiones de topografía compleja (Figura 59). La configuración WRF-SC mantuvo el mejor desempeño general con MAE de 7.99 $\mu g/m^3$ y correlación de 0.85.

Tabla 10: Variables meteorológicas ECMWF.

Variable	Unidad
Flujo de calor sensible	W/m^2
Flujo de calor latente	W/m^2
Altura de la capa límite atmosférica	m
Componente zonal del viento a 10 metros	m/s
Componente meridional del viento a 10 metros	m/s
Componente zonal del viento a 100 metros	m/s
Componente meridional del viento a 100 metros	m/s
Temperatura del aire a 2 metros	°C o K
Temperatura de rocío a 2 metros	°C o K
Radiación solar en superficie	W/m^2
Radiación de onda larga neta	W/m^2
Cobertura de nubes bajas	%
Precipitación total	mm
Energía potencial convectiva (CAPE)	J/kg
Energía de inhibición de la convección (CIN)	J/kg

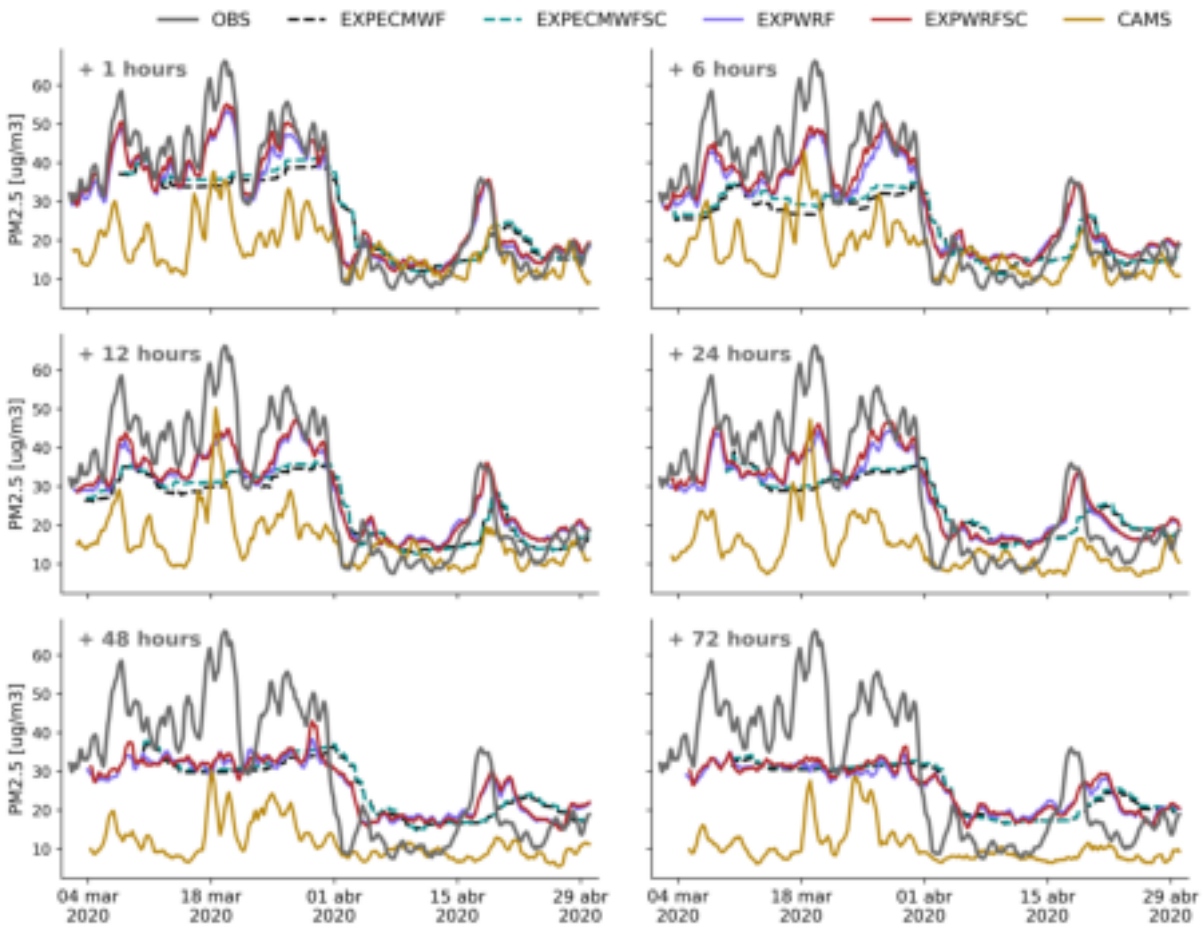


Figura 59: Series temporales de las concentraciones de PM2.5 observadas (OBS, línea gris) y pronosticadas por los diferentes modelos experimentales (EXPECMWF, EXPECMWFSC, EXPWRF, EXPWRFSC) y el modelo global CAMS para diferentes horizontes de pronóstico (+1, +6, +12, +24, +48 y +72 horas). Los modelos desarrollados capturan adecuadamente la variabilidad temporal de las concentraciones incluso en horizontes de pronóstico extensos, mientras que CAMS subestima consistentemente las concentraciones durante el período de evaluación (marzo-abril 2020).

Análisis de importancia de variables

El análisis se realizó mediante la técnica Mean Decrease Impurity (MDI) del algoritmo Random Forest, desarrollada por Breiman (2001). El MDI cuantifica la importancia de cada variable predictora calculando la reducción promedio de impureza generada por dicha variable a través de todos los nodos de decisión donde es utilizada para dividir los datos. Para problemas de regresión, la impureza se mide usando la varianza, y la importancia final se obtiene promediando sobre todos los árboles de decisión y normalizando para obtener importancias relativas. Este enfoque permite identificar cuáles variables contribuyen más significativamente a la precisión predictiva del modelo. Este análisis reveló patrones sobre la contribución de variables al modelo (Para mayor detalle remítase al Informe Abril 2025 CCT016). A nivel global, las concentraciones previas de PM2.5 dominan en horizontes cortos, mientras que la variable bcaod550 (profundidad óptica del aerosol de carbono negro) mantiene importancia constante en todos los horizontes, reflejando la influencia del transporte regional de contaminantes por quema de biomasa (Figura 60).

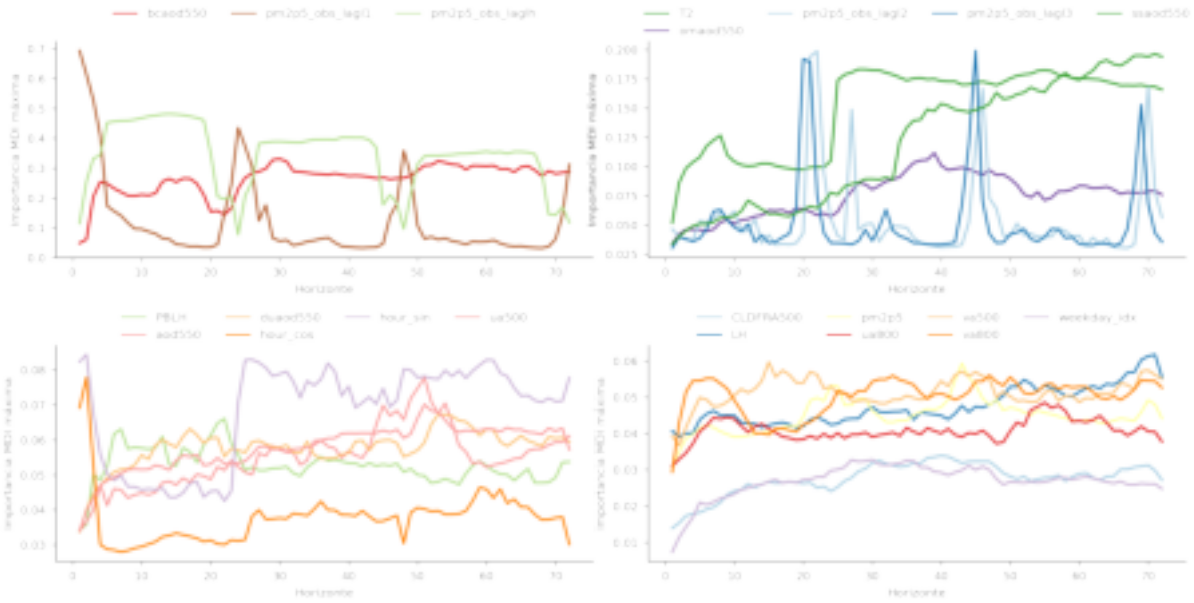


Figura 60: Importancia relativa máxima de variables según el algoritmo Random Forest (expresada como Mean Decrease Impurity, MDI) para el modelo operativo en función del horizonte de pronóstico. Se muestra la importancia máxima entre todas las estaciones para cada horizonte de pronóstico.

El análisis por estación reveló heterogeneidad espacial significativa. Las estaciones en zonas ubicadas en la periferia del Valle de Aburrá, como MED-SELE (Figura 61), muestran dominancia de variables meteorológicas debido a la mayor ventilación, mientras que estaciones centrales como CEN-TRAF (Figura 62) mantienen alta importancia de observaciones históricas por la persistencia de fuentes locales. Las estaciones periféricas evidencian mayor influencia de variables de transporte regional, coherente con su rol como receptoras de contaminación.

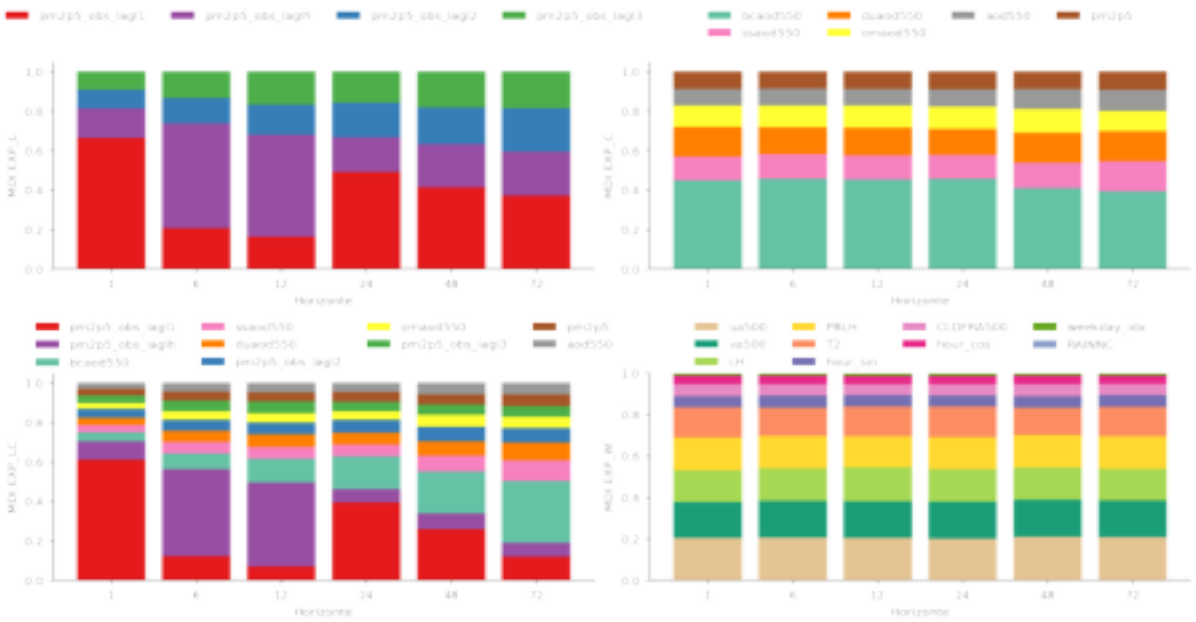


Figura 61: Importancia relativa de variables según el algoritmo Random Forest MDI para la estación MED-SELE en función del horizonte de pronóstico. Se muestran los experimentos EXP_L, EXP_C, EXP_LC, y EXP_WRF.

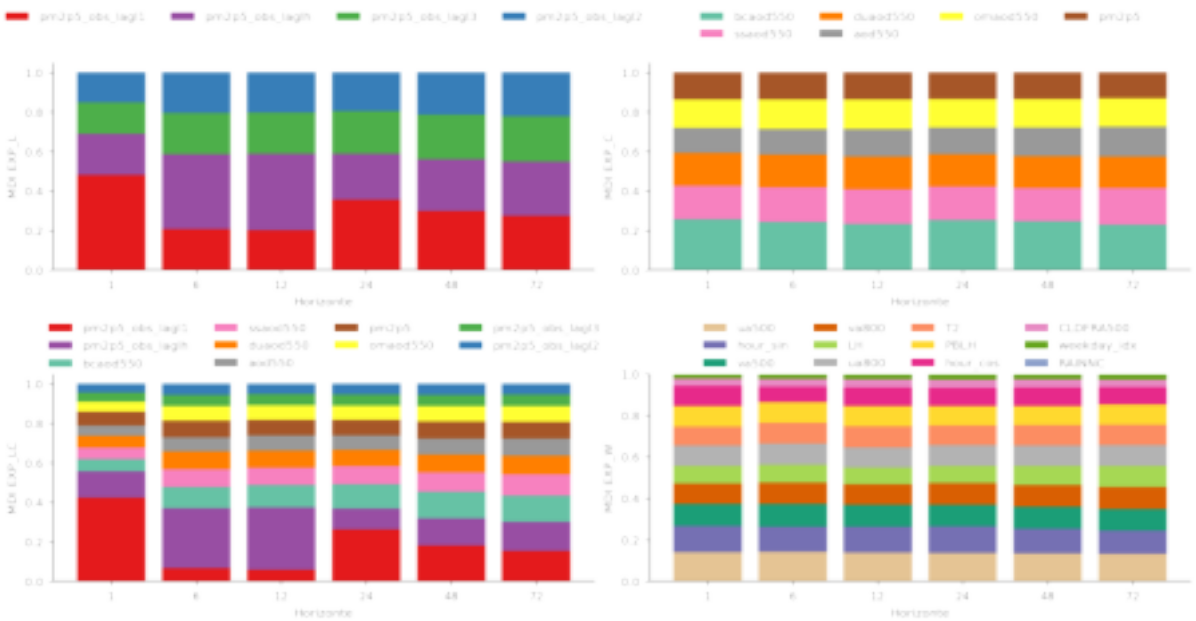


Figura 62: Importancia relativa de variables según el algoritmo Random Forest MDI para la estación CEN-TRAF en función del horizonte de pronóstico. Se muestran los experimentos EXP_L, EXP_C, EXP_LC, y EXP_WRF.

Nuevas estrategias de entrenamiento

Además de experimentos relacionados con nuevas variables de fuentes meteorológicas e inclusión de la red de Ciudadanos Científicos, se realizaron experimentos específicos para determinadas temporadas del año. El experimento 7 incorporó nuevas variables derivadas de las simulaciones operativas de WRF mostrando mejoras marginales. El experimento 9 optimizó hiperparámetros sin cambios significativos. Por otra parte, el experimento 10, entrenado exclusivamente con datos de períodos de gestión (febrero-abril), demostró mejoras sustanciales con reducción del MAE y aumento en la probabilidad de detección de eventos críticos (Figuras 56 y 63). Sin embargo, se observó un incremento en la tasa de falsas alarmas durante las primeras 24 horas de pronóstico, sugiriendo mayor sensibilidad del modelo a eventos de concentraciones elevadas.



Figura 63: Métricas de desempeño de los pronósticos estadísticos derivadas de tablas de contingencia para los experimentos 5 (operacional), 9 (mejores hiperparámetros) y 10 (entrenando con información de los períodos de gestión). De izquierda a derecha se muestran resultados para distintas métricas, incluyendo la probabilidad de detección (POD), las tasas de falsas alarmas (FAR), y el índice de desempeño crítico (CSI).

Tabla 11: Variables incluidas en cada experimento de pronóstico de $PM_{2.5}$

Experimento	Variables incluidas
EXP_L	'pm2p5_obs_lagl1', 'pm2p5_obs_lagl2', 'pm2p5_obs_lagl3', 'pm2p5_obs_laglh'
EXP_C	'duaod550', 'omaod550', 'pm2p5', 'ssaod550', 'aod550', 'bcaod550'
EXP_LC	'pm2p5_obs_lagl1', 'pm2p5_obs_lagl2', 'pm2p5_obs_lagl3', 'pm2p5_obs_laglh', 'duaod550', 'omaod550', 'pm2p5', 'ssaod550', 'aod550', 'bcaod550'
EXP_WF	'T2', 'RAINNC', 'CLDFRA500', 'LH', 'PBLH', 'ua500', 'ua800', 'va500', 'va800', 'hour_sin', 'hour_cos', 'weekday_idx'
Operativo	Todas las variables anteriores

La evaluación de configuraciones por tipo de variables especificadas en la Tabla 11 (EXP_L con observaciones históricas, EXP_C con CAMS, EXP_LC combinado, EXP_W con WRF) confirmó que la combinación de múltiples fuentes proporciona los mejores resultados. Notablemente, EXP_W mostró mejoras en correlación después de 24 horas, evidenciando el valor de variables meteorológicas para horizontes extendidos (Figuras 64 y 65).

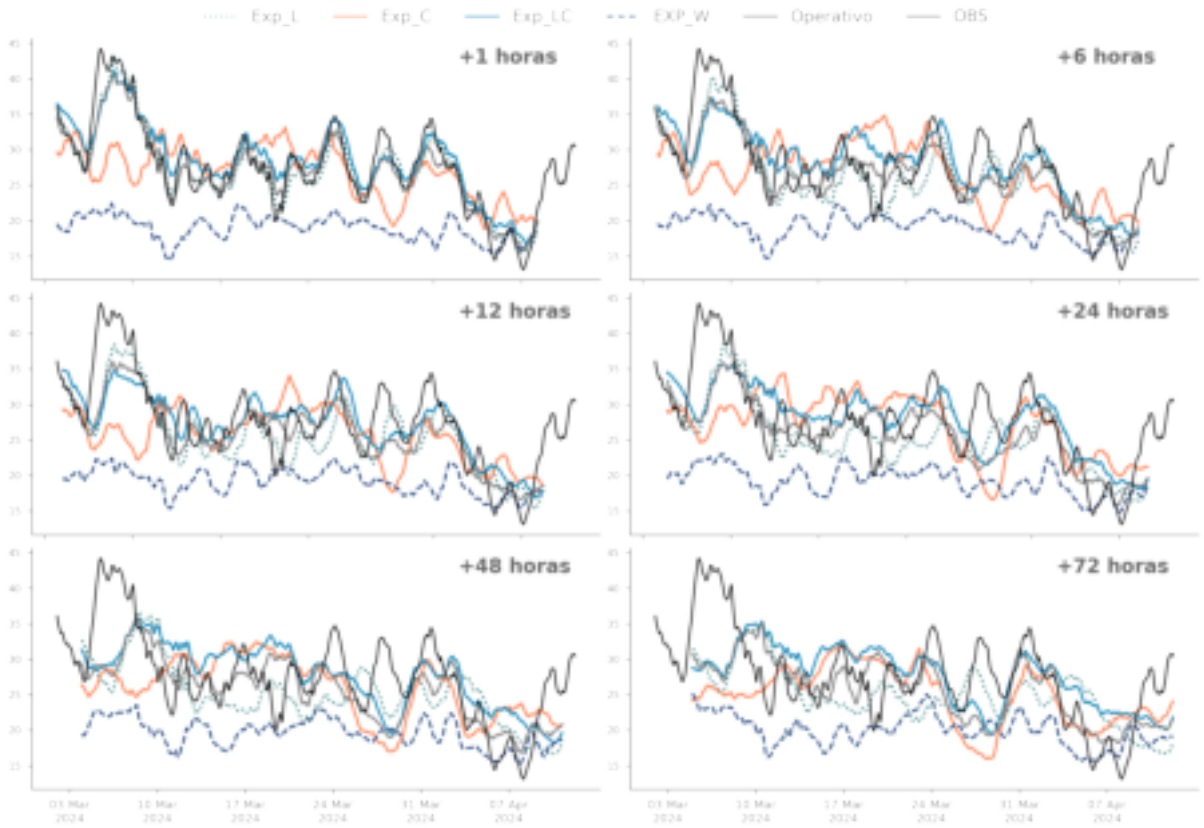


Figura 64: Series temporales de concentraciones de PM2.5 observadas (OBS, línea negra) y pronosticadas por los diferentes modelos experimentales (EXP_L, EXP_C, EXP_LC, EXP_W) y el modelo operativo para distintos horizontes de pronóstico (+1, +6, +12, +24, +48 y +72 horas). Los modelos fueron evaluados para el período marzo-abril de 2024.

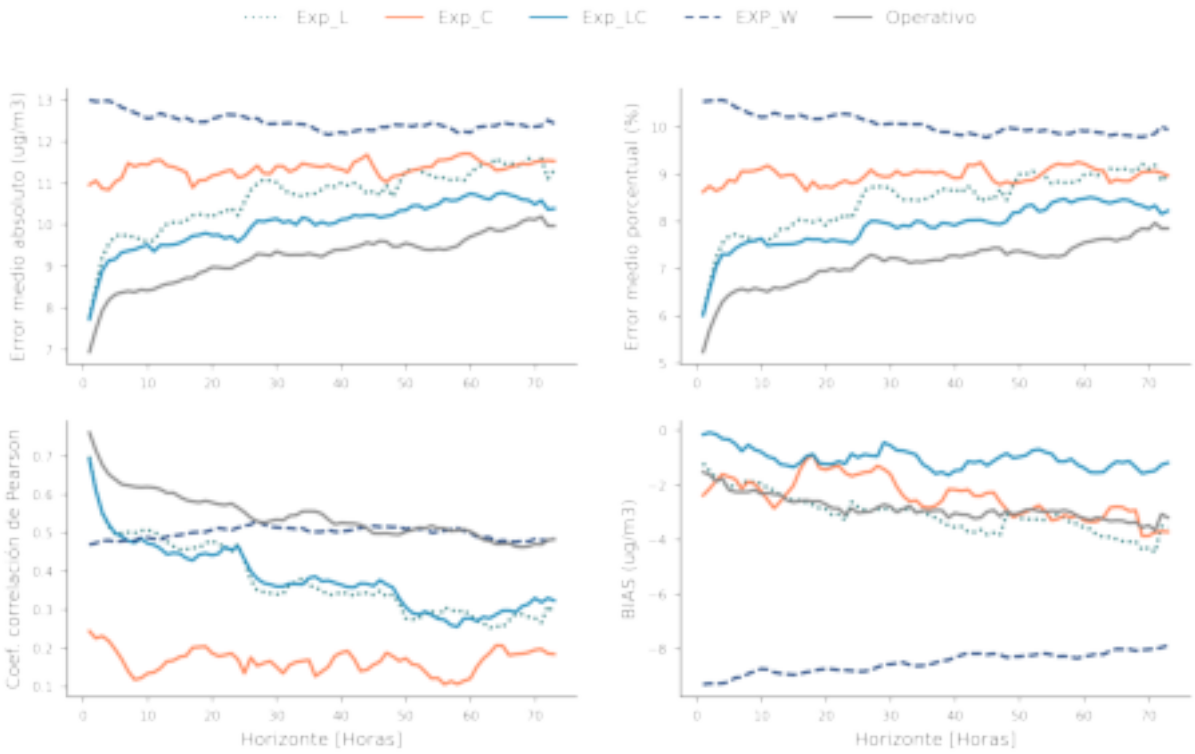


Figura 65: Métricas de desempeño en función del horizonte de pronóstico para los experimentos EXP_L, EXP_C, EXP_LC, EXP_W y el modelo operativo. Los paneles muestran resultados para distintas métricas, incluyendo el error medio absoluto (MAE), el error medio porcentual (MAPE), el coeficiente de correlación de Pearson y el sesgo medio (BIAS). Se observa la mejora en correlación del experimento EXP_W después de 24 horas, demostrando su capacidad para capturar la variabilidad en horizontes extendidos.

Divulgación científica

Los desarrollos realizados se presentaron en eventos científicos internacionales. En el EGU General Assembly 2024 se expusieron virtualmente los primeros resultados sobre la integración de sensores de bajo costo (ver Informe Marzo 2024 CCT016, pág. 119). Durante el AMS Annual Meeting 2025 en Nueva Orleans, Estados Unidos, se presentó la comparación entre ECMWF y WRF en el contexto del modelo de pronóstico (ver Informe Enero 2025 CCT016, pág. 141). En el Décimo Congreso Colombiano y Conferencia internacional en calidad del aire, cambio climático y salud pública CASAPX se compartieron los avances generales del fortalecimiento de la modelación de calidad del aire en el Valle de Aburrá desde el proyecto SIATA (ver Informe Mayo 2025 CCT016, pág. 141).

Conclusiones y desarrollos futuros

Los desarrollos implementados durante la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024 mejoraron el modelo de pronóstico de PM2.5 implementado desde el equipo de Calidad del Aire del proyecto SIATA. La optimización computacional redujo el tiempo de ejecución en 58.3 %, permitiendo múltiples corridas diarias que fueron críticas durante los episodios de gestión de marzo 2025. Así mismo, la

integración de la Red de Ciudadanos Científicos mediante selección de las seis nubes más cercanas redujo el sesgo en 0.4 $\mu g/m^3$ y mejoró la probabilidad de detección de eventos. El modelo alcanzó un MAE de 6.37 $\mu g/m^3$ y correlación de 0.63, superando al modelo global CAMS en 35 %. Durante el período de gestión, las estaciones CAL-JOAR, ITA-CJUS y MED-ALTA alcanzaron 100 % de aciertos en categorías ICA.

El análisis de la importancia de variables reveló patrones espaciales diferenciados: estaciones altas dominadas por variables meteorológicas, centrales por observaciones históricas, y periféricas por transporte regional. Los experimentos confirmaron que el modelo WRF supera a ECMWF para horizontes mayores a 24 horas en topografía compleja. El entrenamiento con datos de períodos de gestión (febrero-abril) mejoró significativamente la detección de eventos críticos.

Como desarrollos futuros se proponen: implementación del índice BT-IFRP (Integrated Fire Radiative Power within Back Trajectories), que combina trayectorias atmosféricas inversas con información de potencia radiativa de incendios detectados por MODIS para cuantificar el transporte regional de contaminantes por quema de biomasa, optimización de hiperparámetros con Optuna, y modelos basados en los patrones de importancia identificados. Los avances logrados mejoran la capacidad predictiva durante episodios de alta contaminación.

Parte II: Modelación del transporte de contaminantes y química de la atmósfera usando el modelo WRF-Chem

Introducción

Los modelos de calidad del aire permiten simular el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera con base en la física y la química de los fenómenos que influyen en la calidad del aire. Procesos fundamentales como la emisión, dispersión y transformación química de los contaminantes son simulados por este tipo de modelos. Particularmente, el modelo WRF-Chem (modelo para la investigación y pronóstico del tiempo atmosférico acoplado con la química) permite simular la meteorología junto con las dinámicas de los contaminantes en la atmósfera. WRF-Chem es un modelo gratuito, de código abierto y de comunidad, lo que quiere decir que los usuarios se encargan de la mejora del modelo, nuevos desarrollos, y de soportar el uso del mismo. Este modelo es ampliamente utilizado en todo el mundo con fines de investigación y pronóstico de la calidad del aire, permitiendo evaluar diferentes escenarios de emisiones. Desde el proyecto SIATA se inició en una primera determinación de la información requerida para la implementación del modelo WRF-Chem durante la vigencia del Contrato CCT 799 de 2021.

Metodología

El modelo con el objetivo de calcular las concentraciones de los contaminantes (Wang et al., 2007), requiere de un procesamiento de información como datos de entrada que incluye la configuración del dominio, topografía, usos del suelo, meteorología e inventarios de emisiones, así como la selección de los mecanismos químicos, entre otros.

Durante la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024, desde el equipo de Calidad del Aire se trabajó en la configuración del modelo WRF-Chem para el Valle de Aburrá. Este esfuerzo tuvo como objetivo mejorar la representación de los procesos meteorológicos y químicos que afectan la calidad del aire en esta región de topografía compleja. En el marco de esta actividad se desarrollaron múltiples experimentos, integrando inventarios globales de emisiones y avanzando en la integración del inventario local, implementando perfiles temporales detallados de fuentes móviles y fijas, refinando los

archivos de entrada para la topografía y la cobertura de suelo y fueron estudiados mecanismos químicos incorporados dentro del modelo. El trabajo incluyó la validación del modelo mediante métricas estadísticas (RMSE, BIAS y correlación de Pearson) comparadas con observaciones de estaciones de superficie y datos verticales (perfiladores de viento y radiómetros), con el fin de identificar configuraciones que permitan reducir las brechas actuales en la simulación de contaminantes como PM_{10}, $PM_{2,5}$, NOx, CO y ozono.

Se evaluaron diferentes configuraciones de dominios anidados con el fin de mejorar la representación de los procesos meteorológicos a escala local y regional. La configuración de dominios usada tradicionalmente desde el equipo de Meteorología del proyecto SIATA se consolidó como simulación de control (CTRL, de acá en adelante). Se recuerda que esta constaba de tres dominios con resoluciones horizontales de 18–6–2 km y una relación se apsecto de anidamiento de 1:3 (ver Figura 66). A partir de esta configuración base se diseñaron los siguientes experimentos: la configuración 3dom:1:5 con dominios de 25–5–1 km, la configuración 4dom:1:3 con dominios de 27–9–3–1 km, y una versión reducida 2dom:1:5 con dominios de 5–1 km, donde la primera parte del nombre indica la cantidad de dominios anidados (e.g. 3dom para 3 dominios anidados), y la segunda parte del nombre indica la relación de aspecto (e.g. 1:5 para una relación de 1 a 5). Adicionalmente, se planteó una versión extendida de la configuración 3dom:1:5 (denominada 3dom:1:5_ext) en la que se amplió el dominio más interno de 1 km de resolución para cubrir un área mayor y representar mejor la interacción de los campos meteorológicos con las cordilleras Occidental y Central. Esta extensión permitió una mejor captura de las influencias regionales sobre la dispersión de contaminantes, aunque incrementó notablemente el costo computacional. Las diferentes configuraciones se presentan en la la Figura 67, con un énfasis en la representación del dominio interno D03 sobre el Valle de Aburrá.

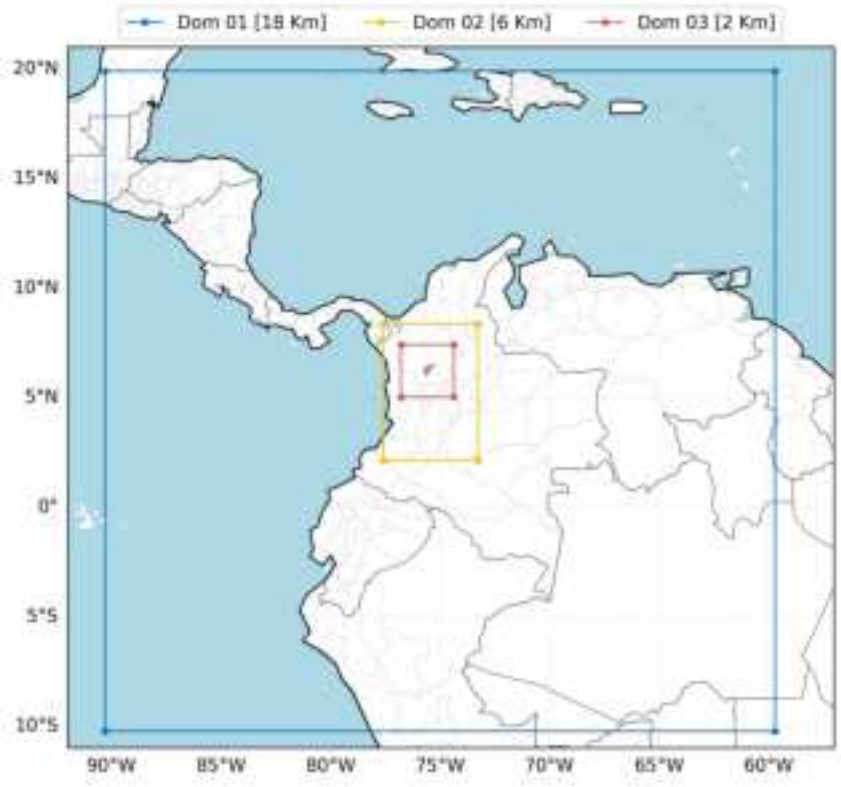
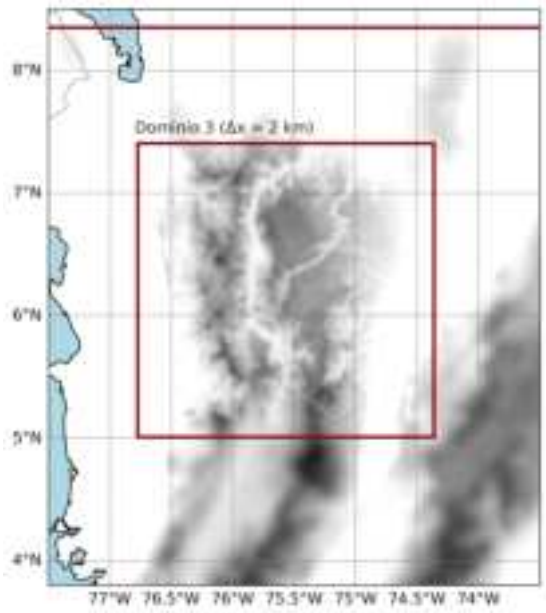
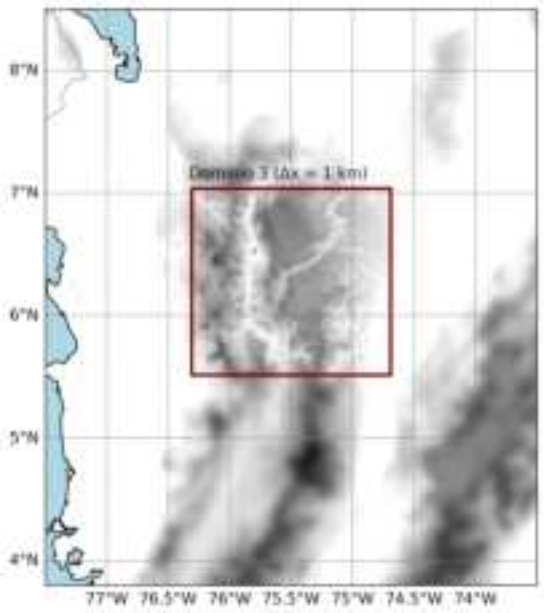


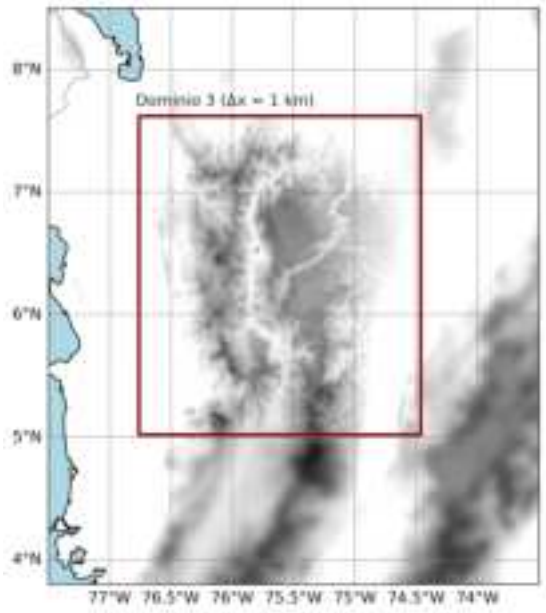
Figura 66: Configuración de los dominios d01, d02 y d03 en simulación de CTRL.



(a) Dominios de simulación para la corrida de control (CTRL).



(b) Dominios de simulación para la corrida con 3 dominios y una relación de 5 a 1 (3dom:1:5).



(c) Dominios de simulación para la corrida con 3 dominios y una relación de 5 a 1, con un dominio interno extendido (3dom:1:5_ext).

Figura 67: Dominios de simulación para cada uno de los experimentos realizados con el modelo WRF-Chem.

La calidad de los datos estáticos fue uno de los aspectos priorizados. La topografía se ajustó a una resolución de 1 km, lo que permitió alcanzar correlaciones superiores a 0.9 con las alturas reales de las estaciones de monitoreo de SIATA. Por su parte, la cobertura urbana se actualizó utilizando bases de datos de mayor resolución (15 segundos de arco), corrigiendo la subestimación del área urbanizada que presentaba la base de datos por defecto del modelo WRF. Esto fue especialmente importante para mejorar la representación de la distribución de calor superficial y el efecto isla de calor urbano, variables que influyen en la dispersión de contaminantes.

En cuanto a los inventarios de emisiones, se integró el inventario local (AMVA (2020)) actualizado por la Universidad Pontificia Bolivariana (UPB) con los inventarios globales EDGAR v4.3.1 y v5 (Commission (2016)). La versión v4.3.1 ofreció mayor detalle espacial y mejor correspondencia con la red vial en el dominio más interno, mientras que la versión v5 mostró concentraciones más altas en el área de Medellín y más bajas para las zonas periféricas. Estas diferencias se evaluaron cuidadosamente ya que afectan la distribución espacial de los contaminantes en el valle. Adicionalmente, se incluyeron emisiones biogénicas globales disponibles generadas con el modelo MEGAN (Guenther et al., 2006), complementando las emisiones antropogénicas para obtener una representación más integral.

Para capturar el ciclo diurno de las emisiones, se desarrollaron perfiles horarios diferenciados para fuentes móviles (días hábiles, sábados, domingos y festivos) y fuentes fijas (días hábiles). Estos perfiles se aplicaron para redistribuir las emisiones en los dominios D01, D02 y D03, logrando reflejar mejor las dinámicas diarias de emisión en la región metropolitana. La Figura 68 muestra el comportamiento horario promedio de las emisiones de CO en una celda representativa de cada dominio, mientras que la Figura 69 presenta la desagregación por tipo de día. Se realiza la desagregación para este contaminante puesto que es más sencilla de realizar su validación.

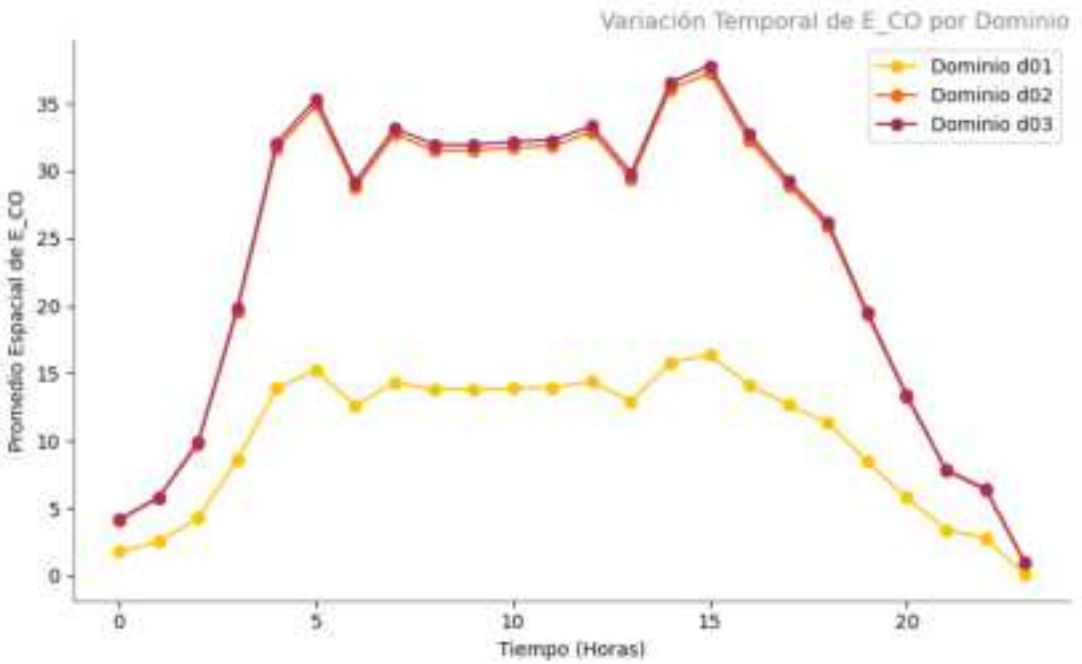


Figura 68: Distribución temporal promedio de las emisiones de CO (E_CO) en una celda representativa de los dominios D01, D02 y D03. Se observa la variación horaria a lo largo del día, destacando los picos asociados a la actividad vehicular en los horarios de la mañana y la tarde.

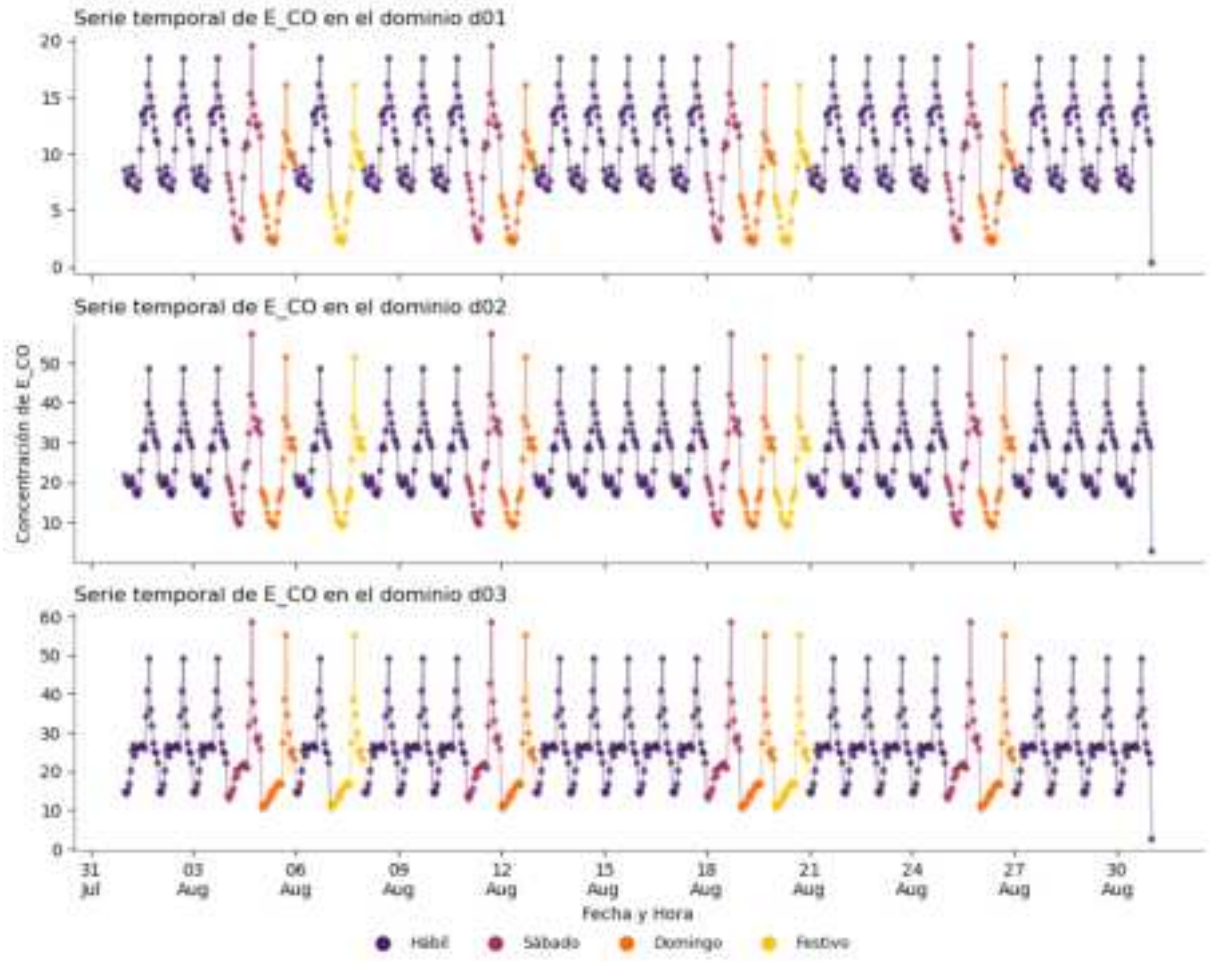


Figura 69: Distribución temporal de las emisiones de CO diferenciadas por tipo de día (hábiles, sábados, domingos y festivos) en los dominios D01, D02 y D03. La inclusión de perfiles específicos permite capturar las diferencias en la actividad emisora entre días de semana y fines de semana.

En paralelo, se trabajó en la integración detallada de las emisiones locales en el marco de WRF-Chem mediante scripts desarrollados en Python que ponderan espacialmente las emisiones por área de intersección con las celdas del modelo. Durante este proceso se identificaron errores en la suma de campos de los archivos NetCDF que inicialmente impedían la correcta lectura de datos por el modelo. Una vez corregidos estos errores, se pudieron generar los archivos wrf-chemi finales con la estructura adecuada para ser leídos por WRF-Chem, incluyendo la variabilidad temporal y espacial de las emisiones.

En el componente químico, se implementó el mecanismo RCAM (Stockwell et al., 1997), que incluye 77 especies, 214 reacciones gaseosas y 23 fotoquímicas. Este mecanismo mejoró la representación de compuestos oxidantes tales como compuestos orgánicos volátiles (VOCs), nitratos, sulfatos y radicales peroxi, especies clave para la formación de ozono y material particulado secundario. Para lograr una correspondencia adecuada entre el inventario local y el RCAM, se desagregaron especies como $PM_{2,5}$ en fracciones finas y gruesas y se fraccionaron los NO_x en 90 % NO y 10 % NO_2, entre otros ajustes. Lo que permitiría una simulación más realista de las reacciones fotoquímicas complejas que ocurren en la atmósfera del valle.

Resultados

Los resultados de las evaluaciones mostraron que alcanzar una resolución fina de 1 km en el dominio interno no garantiza una mejora global en todas las métricas, pero sí ofrece beneficios significativos en la representación de patrones locales de contaminación y en la estructura vertical del viento. La Figura 70 presenta las métricas de error obtenidas para temperatura, velocidad y dirección del viento en las distintas configuraciones evaluadas. Para la temperatura, el RMSE osciló entre 1 y 2 °C, con correlaciones superiores a 0.94 en la mayoría de estaciones. La configuración 2dom:1:5 mostró las mejores métricas en superficie para esta variable. Por su parte, la configuración 3dom:1:5 mejoró la representación de la velocidad y dirección del viento, mostrando menores sesgos y errores promedio.

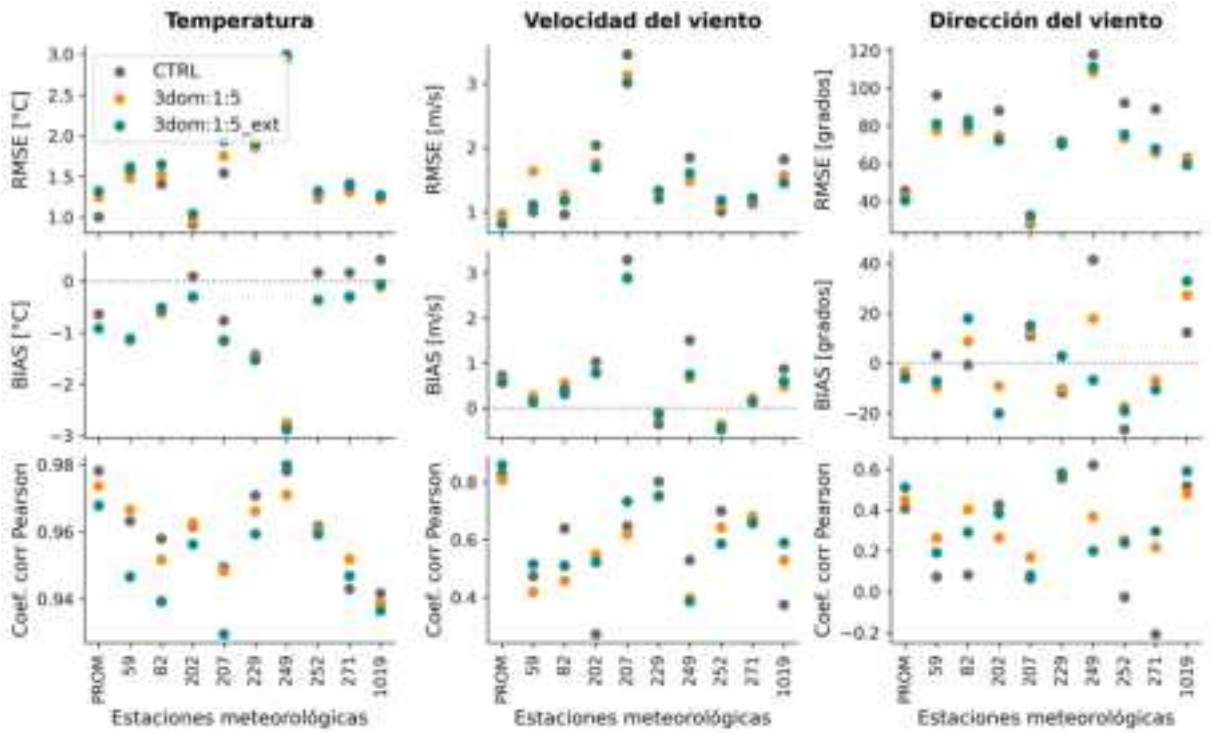


Figura 70: Métricas de desempeño para temperatura, velocidad y dirección del viento usando las configuraciones CTRL, 3dom:1:5 y 3dom:1:5_ext. Panel superior: error cuadrático medio (RMSE). Panel central: sesgo (BIAS). Panel inferior: coeficiente de correlación de Pearson. Las estaciones se muestran en el eje X.

Además, la extensión del dominio interno en la configuración 3dom:1:5_ext permitió capturar mejor los puntos calientes con alta probabilidad de estar asociados a incendios de cobertura vegetal en el norte de Colombia y las dinámicas de transporte regional, lo cual es fundamental para evaluar la influencia de fuentes externas en el Valle de Aburrá. Sin embargo, este beneficio tuvo un costo computacional considerable, incrementando el tiempo de simulación en aproximadamente un 57 % respecto a la configuración 3dom:1:5. Esto plantea un desafío para ejecutar simulaciones más largas en el tiempo.

En cuanto a las concentraciones simuladas, con los resultados obtenidos durante la vigencia del contrato de ciencia y tecnología CCT 103 de 2023, el modelo reprodujo adecuadamente el ozono al compararlo con datos de la estación GIR-SOSN durante el período del 6 al 13 de agosto de 2018. No obstante, se

identificaron subestimaciones para PM_{10}, $PM_{2,5}$, NOx y CO, especialmente en la variabilidad diurna del material particulado, como se puede ver en la figura 71. La integración del inventario local, junto con los perfiles temporales y el uso del RCAM es algo que no se realizó al momento de correr las simulaciones acá presentadas pero es un procedimiento clave para reducir estas brechas en simulaciones futuras.

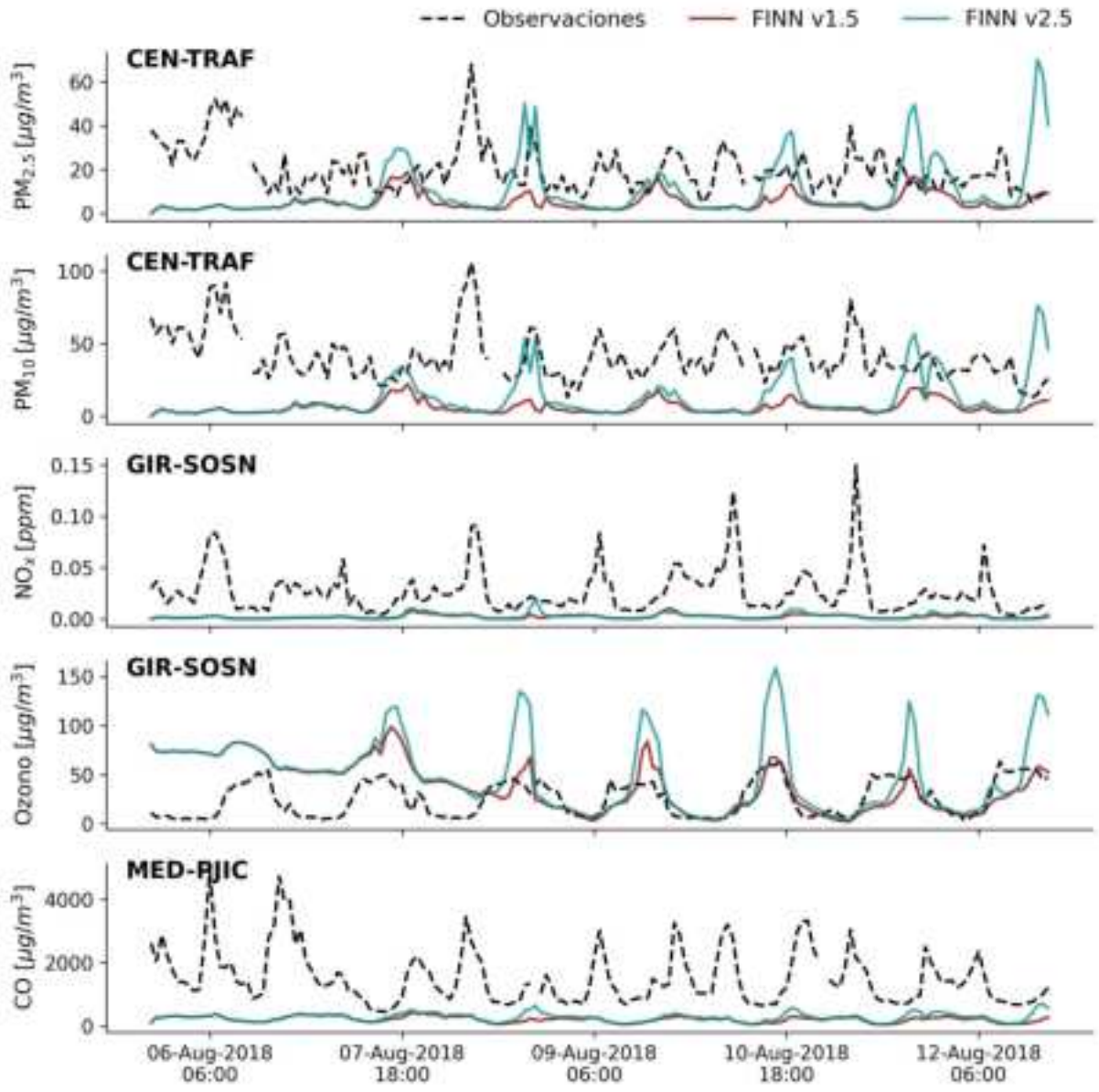


Figura 71: Series de tiempo de PM2.5, PM10, NOx, O3 y CO observadas por distintas estaciones de la red de monitoreo de calidad del aire (líneas negras discontinuas) y simuladas con las emisiones derivadas de distintas versiones de FINN (líneas azules y rojas). Las series simuladas en cada caso se obtuvieron a partir de la celda más cercana a la estación en el dominio 3 (dominio interno del modelo).

Trabajo futuro

Es necesario tener en cuenta que las actividades relacionadas con el desarrollo del modelo WRF-Chem fueron suspendidas desde el mes de febrero de 2025, por lo cual no fue posible seguir avanzando en la integración de los inventarios global y local, constituyendo una actividad primordial para darle continuidad en una próxima vigencia, dada la importancia de tener un modelo dinámico que facilite la simulación de escenarios de calidad del aire en la región que constituyan información base para la toma de decisiones por parte de la autoridad ambiental.

Parte III: Campañas de monitoreo de contaminantes atmosféricos criterio y no criterio

Campaña de medición del flujo vehicular en los municipios de Girardota y Medellín

Durante la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024, se continuó con la campaña de caracterización del flujo vehicular en el municipio de Girardota y el Distrito de Medellín, utilizando el sensor tipo radar Armadillo Tracker. Caracterizar el tráfico vehicular en relación con el número, tipo y velocidad de circulación permite un acercamiento al entendimiento de las diferencias de comportamiento de contaminantes criterio que son aportados principalmente por los vehículos, como son los NO_X y el PM2.5. En el norte del Valle de Aburrá, en la estación Puente de Girardota se ubicó el sensor Armadillo en la entrada principal de la zona urbana del municipio, realizando mediciones en ambos sentidos de la vía, el cual estuvo activo durante toda el período de la vigencia del contrato CCT 016 de 2024. Por su parte, en la estación Velódromo en el Distrito de Medellín, localizada en dirección oriente-occidente del viaducto del Sistema Metro, entre el Centro Comercial Obelisco y la estación Floresta, operó el sensor Armadillo entre febrero y junio de 2024, registrando flujo vehicular en un solo sentido. Este sensor fue trasladado a la estación Fiscalía General de la Nación – Sede Caribe, en el Distrito Especial de Medellín, donde midió el flujo vehicular en sentido sur-norte desde octubre de 2024 hasta el final de la vigencia del contrato CCT 016 de 2024, es decir hasta el 7 de julio de 2025.

La información recopilada por los sensores Armadillo incluye, además de la velocidad de los vehículos, su clasificación en tres categorías: pequeño, mediano y grande. Estos datos son de utilidad para el diseño de planes y políticas de movilidad, así como para la elaboración de inventarios de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes móviles.

Es importante resaltar que el principal tipo de vehículos que cuenta el sensor Armadillo es el tipo mediano mientras que el menor registro de número de vehículos son aquellos de tamaño pequeño, los cuales según las especificaciones técnicas del equipo, corresponden a motocicletas. Lo anterior, no es consistente con la dinámica vehicular en el Valle de Aburrá, en el que el número de motocicletas representa mas del 50 % del número de vehículos registrados en esta región. En este sentido, en este informe no se incluyen los resultados para los vehículos pequeños, ya que los datos obtenidos no se consideran una muestra significativa.

Estación Puente Girardota

La Figura 72 presenta los promedios horarios mes a mes de vehículos registrados en la estación Puente de Girardota, diferenciando los sentidos de circulación: entrada (panel izquierdo) y salida (panel derecho) del municipio. En general, los datos muestran comportamientos relativamente estables durante el período analizado, con promedios mensuales iguales a los 416 vehículos para entrada al municipio y 330 en dirección de salida. Además, se puede evidenciar que los meses de diciembre y septiembre de 2024 fueron

los meses en los que se alcanzaron los mayores registros, con valores por encima de 430 vehículos por hora en promedio, para los vehículos que ingresan y de valores cercanos a los 340 vehículos que circulan en dirección de salida para los meses de agosto y diciembre.

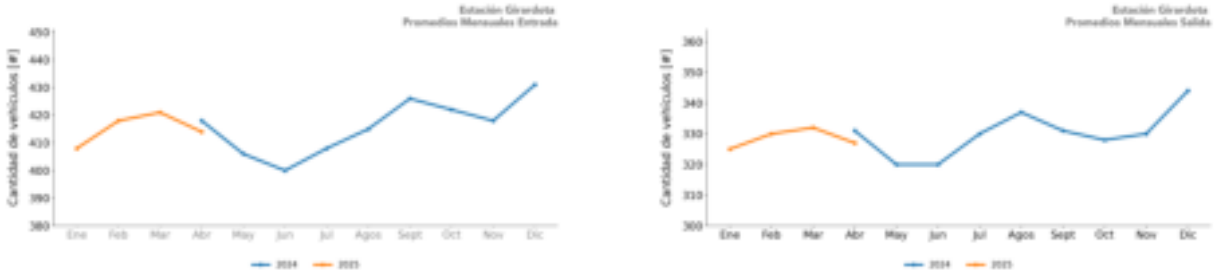
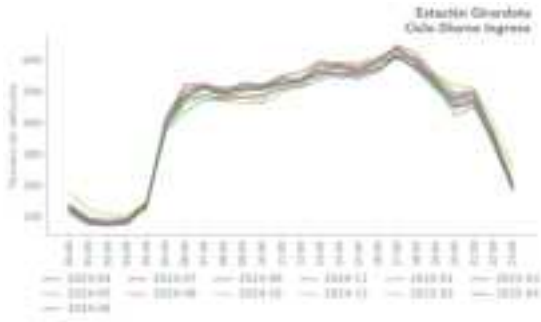


Figura 72: Promedios horarios durante cada mes del período abril 2024 - abril 2025 de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Puente Girardota entrando (panel izquierdo) y saliendo (panel derecho).

La Figura 73 presenta los ciclos diurnos promedio de ingreso (panel izquierdo) y salida (panel derecho) de vehículos en la estación Puente de Girardota, considerando los datos horarios registrados entre abril de 2024 y abril de 2025. En ambos sentidos se observa un comportamiento cuasi-constante en el número de vehículos que circulan por este punto de medición. La magnitud del flujo vehicular es mayor en el sentido de ingreso, especialmente entre las 06:00 y 19:00, superando en varios meses los 600 vehículos/hora. Contrario a esto, el sentido de salida mantiene valores más moderados, aunque también presenta picos matutinos pronunciados. Es notable que en el mes de junio de 2024 presentan valores más bajos para los vehículos de salida en comparación con otros meses, lo cual puede asociarse a la reducción de actividades escolares, los demás meses tienen comportamientos muy similares a lo largo del año.

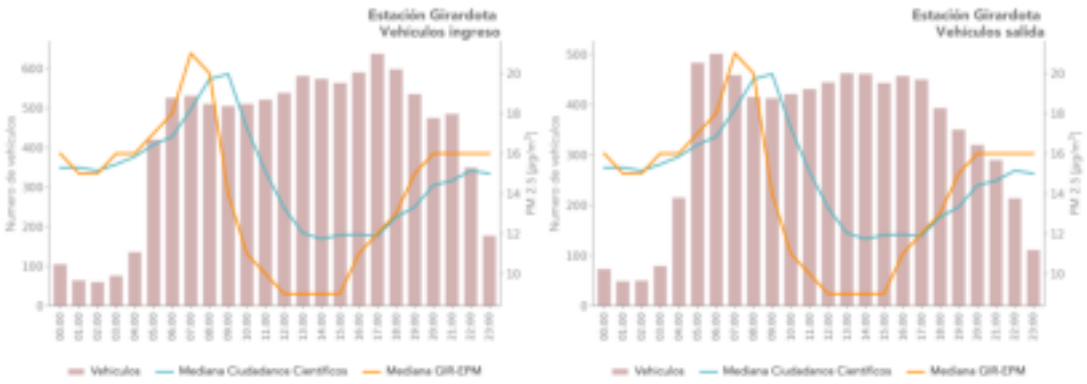


(a)

Figura 73: Ciclos diurnos durante cada mes de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Puente Girardota entrando (izquierda) y saliendo(derecha).

La Figura 74 muestra el ciclo diurno del número de vehículos monitoreados en el puente de ingreso al municipio de Girardota y las concentraciones de PM2.5 medidas en la estación de calidad del aire de este municipio, ubicada en los Tanques de EPM en la vía hacia el sector de Juan Cojo, además de las Nubes de Ciudadanos Científicos. Los resultados se presentan diferenciando el flujo vehicular de ingreso (panel izquierdo) y de salida (panel derecho). En ambos casos, se observa un incremento significativo en la cantidad de vehículos entre las 04:00 y las 06:00 aunque más marcado para los vehículos que salen, coincidiendo además con los valores más altos de PM2.5, que alcanzan su pico alrededor de las 07:00-08:00. A partir de este punto, mientras el flujo vehicular se mantiene relativamente constante durante el

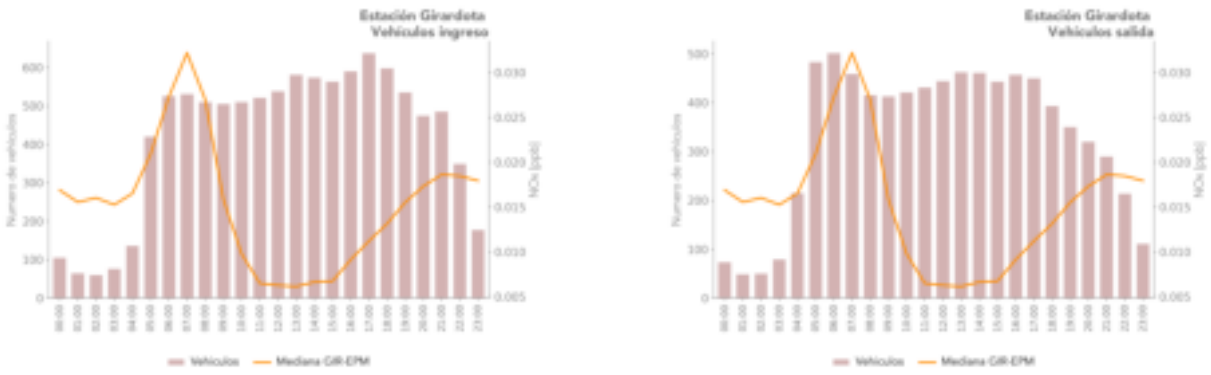
día, las concentraciones de PM2.5 disminuyen progresivamente, alcanzando sus valores más bajos entre las 12:00 y las 15:00. Esta reducción se asocia principalmente a la expansión de la capa límite atmosférica y a una mayor radiación solar durante el mediodía, lo cual favorece la dispersión de contaminantes. Cabe destacar, que estos valores mínimos son considerablemente menores a los registrados en horas de la noche y la madrugada. Posteriormente, se observa un aumento en las concentraciones de PM2.5 entre las 18:00 y 21:00, lo que sugiere que los patrones de tráfico, sumados a la estabilización de la atmósfera, tienen una fuerte influencia en los niveles de contaminación, particularmente en las horas pico de la mañana, cuando se concentra la mayor movilidad y se registran los niveles más altos de material particulado.



(a) (b)

Figura 74: Ciclos diurnos de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Puente Girardota y concentraciones de PM2.5 de la estación GIR-EPM y de ciudadanos científicos entrando (izquierda) y saliendo(derecha).

En comparación con las concentraciones de PM2.5 analizadas anteriormente, la Figura 75 correspondiente a óxidos de nitrógeno (NO_x) muestra un comportamiento horario muy similar en términos de los períodos de máximas concentraciones. Es importante destacar que el NO_x es un contaminante asociado principalmente a fuentes móviles, especialmente a motores de combustión interna, por lo que sus mediciones suelen utilizarse como un indicador directo de emisiones vehiculares. En este sentido, se observa una clara correspondencia entre el incremento en el número de vehículos, especialmente durante las horas pico de la mañana (05:00–08:00), y el aumento de las concentraciones de NO_x, seguido de una disminución progresiva a lo largo del día, debido no solo a la disminución de las emisiones sino a las transformaciones químicas, dado que el NOx es precursor en la formación de ozono y de PM2.5 secundario. En la tarde y noche, aunque el tráfico vuelve a aumentar, las concentraciones del contaminante presentan un aumento más moderado, lo cual también fue evidente en el comportamiento del PM2.5. Esta coherencia sugiere que el tráfico vehicular es un factor importante en la generación de ambos contaminantes, reforzando la hipótesis de que las emisiones asociadas al transporte tienen un papel significativo en las afectaciones por calidad del aire ocurridas en el Valle de Aburra.



(a) (b)

Figura 75: Ciclos diurnos de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Puente Girardota y concentraciones de NOx entrando (izquierda) y saliendo(derecha).

Estación Fiscalía

La Figura 76 presenta los promedios mensuales de cantidad de vehículos registrados en la estación Fiscalía General de la Nación – Sede Caribe, diferenciando los datos correspondientes a los años 2024 y 2025. En el año 2025, se observa un comportamiento decreciente en el flujo vehicular desde enero (con un valor superior a 510 vehículos) hasta junio (cercano a 390 vehículos), lo cual puede estar asociado a cambios en las condiciones de movilidad del sector. En el mes de febrero de 2025 las concentraciones de PM2.5 aumentan mientras que el número de vehículos en circulación disminuye, lo que podría explicarse por el aporte adicional a las concentraciones de PM2.5, asociado a fuentes externas, mas allá de lo aportado por las emisiones vehiculares. Por otro lado, los datos de 2024, disponibles en la sede de la Fiscalía únicamente para los meses de octubre a diciembre de 2024, muestran valores más estables, con una leve disminución en noviembre seguida de un aumento en diciembre. Cabe recordar que los datos presentados corresponden al seguimiento del flujo vehicular en sentido Sur-Norte.

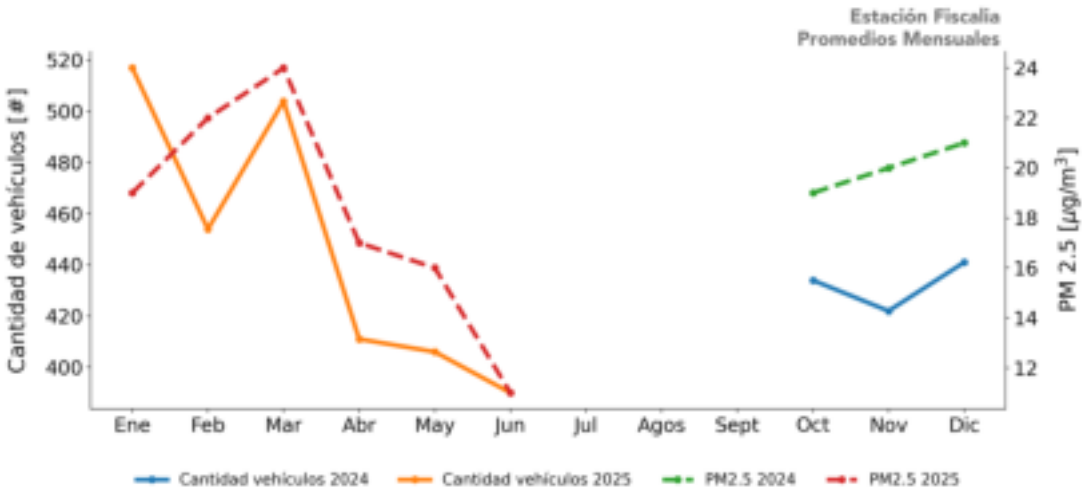


Figura 76: Promedios horarios mensuales de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Fiscalía y las concentraciones de PM2.5.

La Figura 77 presenta el ciclo diurno del número de vehículos registrados en la estación Fiscalía General de la Nación – Sede Caribe, durante los meses comprendidos entre octubre de 2024 y junio de 2025. Se evidencia una clara tendencia bimodal en el flujo vehicular, con picos marcados entre las 06:00 y las 09:00, y nuevamente entre las 16:00 y 19:00, correspondientes a las horas de mayor demanda asociadas a las dinámicas laborales y académicas. El mes de enero de 2025 presenta los valores más altos en la mayoría de las horas del día, superando los 750 vehículos entre las 11:00 y 13:00. Por el contrario, los meses de junio de 2025 y noviembre de 2024 muestran los promedios horarios más bajos, especialmente en la tarde.

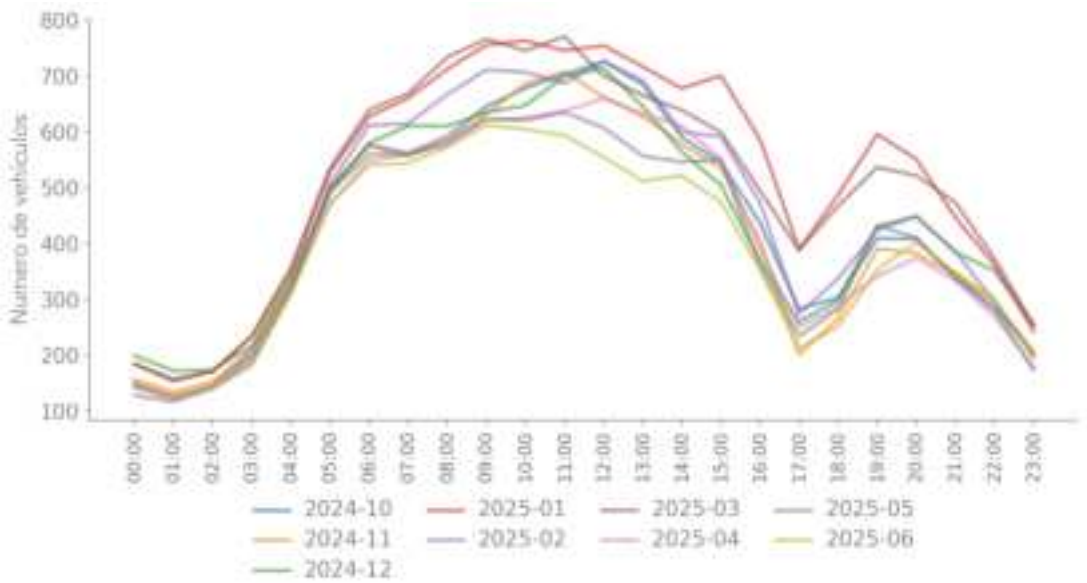
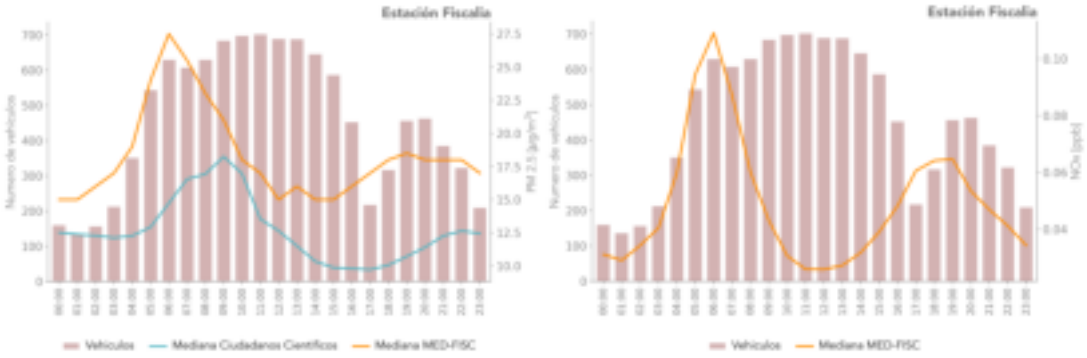


Figura 77: Ciclos diurnos durante cada mes de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Fiscalía General de la Nación - Sede Caribe, Distrito de Medellín.

En la Figura 78 se presenta el ciclo diurno entre el número de vehículos y las concentraciones de PM2.5 (izquierda) y NO_x (derecha) en la estación Fiscalía General de La Nación. En éstas, se observa una marcada coherencia entre las concentraciones horarias de PM2.5 y NO_x, en relación con el patrón del flujo vehicular, especialmente en las horas de la mañana cuando aumenta el número de vehículos en circulación. Ambos contaminantes presentan un pico pronunciado entre las 06:00 y las 10:00 horas, período en el que se alcanza el mayor número de vehículos. Por otra parte, aunque el flujo de vehículos se mantiene casi constante durante el día, las concentraciones de PM2.5 y NO_x se reducen como resultado de los diferentes procesos físicos y químicos que ocurren durante el día, incluyendo la transformación de los óxidos de nitrógeno en ozono y la inestabilización de la atmósfera, lo cual favorece la dispersión de los contaminantes presentes en la superficie. Esta consistencia en las tendencias de ambos contaminantes (ambos comúnmente asociados a fuentes móviles) refuerza la idea de que el tráfico vehicular es una fuente de alta importancia en la calidad del aire de esta zona.



(a) (b)

Figura 78: Ciclos diurnos de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Fiscalía y concentraciones de PM2.5 de la estación MED-FISC y ciudadanos científicos (izquierda) y NOx(derecha).

Estación Velódromo

Al inicio del contrato CCT 016 de 2024, el sensor Armadillo que actualmente opera en la estación de la Fiscalía General de la Nación, estuvo ubicado en el sector del Velódromo en el Distrito de Medellín, localizada en dirección oriente-occidente del viaducto del Sistema Metro, entre el Centro Comercial Obelisco y la estación Floresta. Sin embargo, en el mes de junio de 2024 este fue trasladado a la estación Fiscalía General de La Nación. Es importante mencionar que en informes de anteriores vigencias se presentaron análisis más completos de esta estación (Informe monitoreo vehicular CCT 103).

La Figura 79 muestra el promedio mensual del flujo vehicular registrado en la estación Velódromo durante el primer semestre de 2024. Se observa una tendencia general en la disminución de la cantidad de vehículos en circulación, con un valor máximo en enero y un descenso sostenido desde abril hasta junio. Esta disminución progresiva en el tránsito vehicular obedece en parte a la implementación de medidas de control vehicular o variaciones en la demanda de transporte.

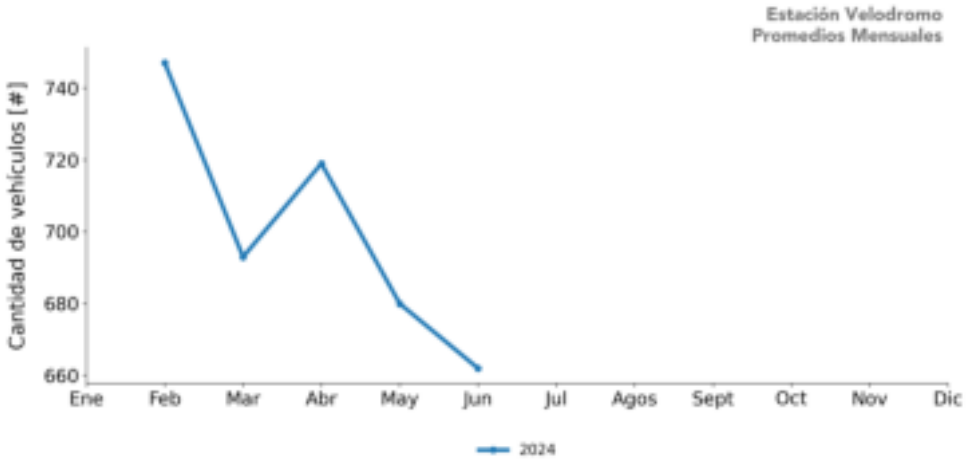


Figura 79: Promedios horarios durante cada mes de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Velódromo. Se presentan resultados solamente hasta el mes de junio dado la reubicación del sensor.

La Figura 80 complementa el análisis presentado anteriormente al mostrar el comportamiento horario del flujo vehicular promedio para los meses de febrero a junio de 2024 en la estación Velódromo. Se evidencia un patrón claro, con un incremento pronunciado en las horas de la mañana (entre las 04:00 y las 08:00 horas) y una meseta extendida hasta finalizar la tarde. Al comparar con la Figura anterior, se confirma la disminución progresiva en el volumen total de vehículos de febrero a junio, ya que los ciclos diurnos, aunque similares en forma, muestran un descenso en la magnitud del flujo vehicular en sus últimos meses de operación del sensor en ese sitio. Este descenso sostenido en la actividad vehicular puede tener un efecto positivo en los niveles de contaminantes atmosféricos, especialmente durante los picos horarios de mayor congestión, donde tradicionalmente se presentan las concentraciones más elevadas de contaminantes asociados al tráfico vehicular.

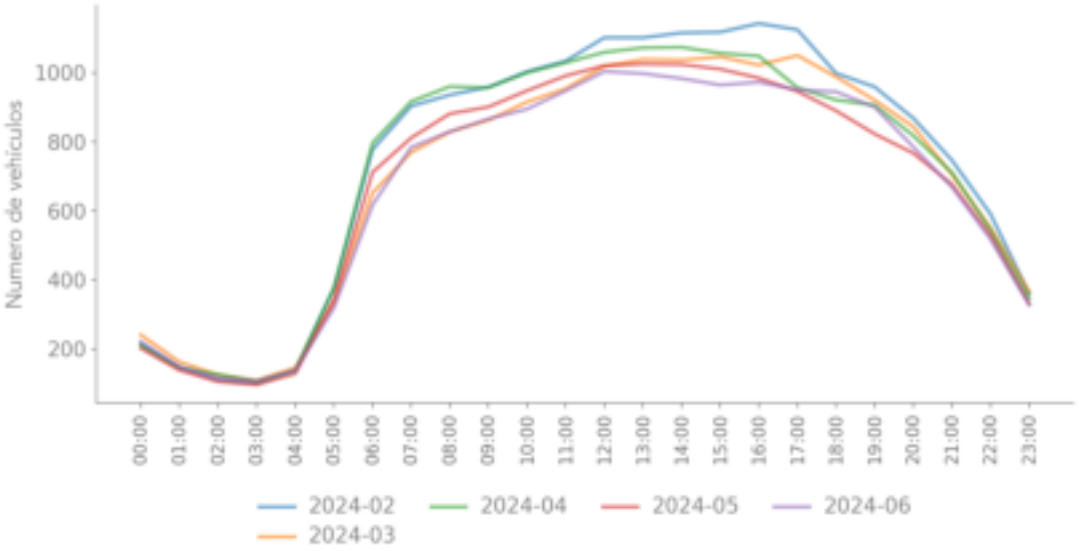
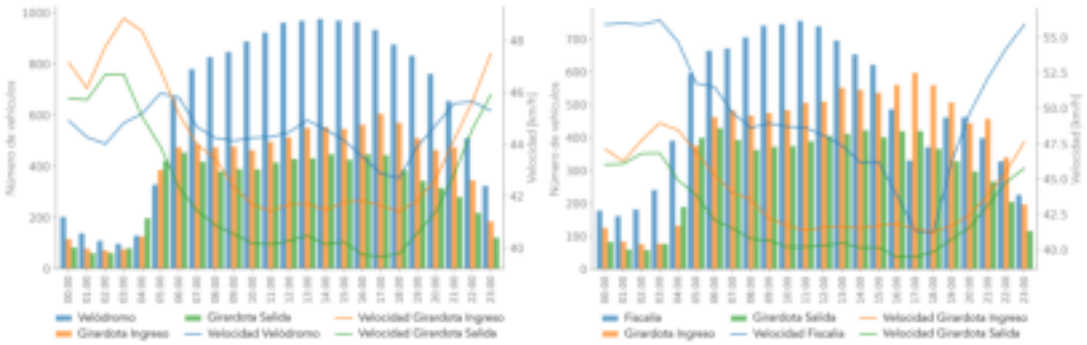


Figura 80: Ciclos diurnos mensuales de la cantidad de vehículos que transitan por la estación Velodromo del Distrito de Medellín.

Finalmente, en la Figura 81 se presentan los ciclos diurnos del número de vehículos y la velocidad promedio registrados por los sensores en dos puntos del Valle de Aburrá: a la izquierda, la estación ubicada en el sector Velódromo, y a la derecha, la estación situada en la sede de la Fiscalía. Ambas ubicaciones muestran una dinámica horaria marcada por dos picos de tráfico: uno en la mañana (05:00–09:00) y otro en la tarde-noche (17:00–20:00), lo cual es consistente con los patrones típicos de movilidad del Valle de Aburra. Sin embargo, se aprecian diferencias en la magnitud del flujo vehicular: el punto del Velódromo presenta un volumen más elevado y sostenido durante el día, lo que sugiere una mayor concentración de actividades en esas zona. Por el contrario, la Fiscalía muestra una caída más pronunciada en el flujo vehicular en horas de la tarde (entre las 11:00 y 15:00), con menor volumen total. También es notorio que en los sentidos de ingreso y salida en Girardota presentan comportamientos con mayor tráfico de salida en la mañana e ingreso en la tarde, reflejando los desplazamientos típicos asociados a necesidades académicas y laborales principalmente.

En cuanto a las velocidades promedio, se observa un comportamiento inversamente proporcional al flujo vehicular en ambas estaciones: durante las horas de mayor flujo vehicular, la velocidad de circulación disminuye, registrando sus valores mínimos entre las 07:00 y 08:00. Esta relación es más evidente en el Velódromo, donde el mayor volumen de tráfico se traduce en velocidades más bajas de manera más

sostenida. Por el contrario, en la Fiscalía, aunque también hay disminuciones de velocidad asociados a mayor número de circulación de vehículos, las velocidades tienden a recuperarse más rápidamente durante el día. Estas diferencias sugieren que, además del volumen de tráfico, factores como la infraestructura vial y los accesos a zonas residenciales o comerciales pueden influir en la severidad de la congestión experimentada en cada punto.



(a) (b)

Figura 81: Ciclos diurnos del número de vehículos y velocidad promedio en las estaciones de monitoreo del Velódromo (izquierda) y Fiscalía (derecha), y en el municipio de Girardota, obtenidos a partir de los períodos de operación simultánea de los sensores tipo radar Armadillo.

Campaña de monitoreo de PM2.5 en la vertical con globos cautivos

Los eventos de contaminación atmosférica en distintas ciudades del mundo típicamente se han asociado con cambios en las dinámicas locales de emisión. No obstante, los factores meteorológicos son también fundamentales para determinar el estado de la calidad del aire en una región. Particularmente en el Valle de Aburrá, se han identificado múltiples factores meteorológicos que pueden explicar la ocurrencia de eventos de contaminación atmosférica. Por ejemplo: la estabilidad atmosférica condiciona la dispersión vertical de los contaminantes; la ocurrencia de eventos de precipitación genera un lavado de contaminantes, pero también puede ocasionar una estabilización de la atmósfera; la presencia de nubosidad de baja altura limita la radiación solar, impidiendo la expansión de la capa límite atmosférica; y la actividad de los vientos al interior del valle favorece los fenómenos de transporte y dispersión de contaminantes.

El monitoreo de contaminantes en la vertical de la atmósfera es esencial para comprender las dinámicas de la calidad del aire, especialmente durante eventos de alta contaminación atmosférica. A diferencia de las mediciones a nivel de superficie, las observaciones en la vertical permiten analizar la distribución y transporte de contaminantes en diferentes capas de la atmósfera, lo que proporciona información clave sobre procesos como la dispersión, el transporte y la formación secundaria de aerosoles. Este tipo de monitoreo es además fundamental para evaluar los efectos de la meteorología en la concentración de contaminantes, lo que permite avanzar en el entendimiento de la calidad del aire y soportar la toma de decisiones efectivas para mitigar la contaminación en regiones afectadas por fuentes naturales y antropogénicas.

En años recientes se ha avanzado en el entendimiento del impacto que tienen las fuentes externas de contaminación en la calidad del aire del Valle de Aburrá, tales como incendios de cobertura vegetal regionales. Particularmente, múltiples análisis realizados a partir del proyecto SIATA han mostrado la influencia que este tipo de eventos tiene en el deterioro de la calidad del aire durante períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica. Además, a partir de la operación de la red de micrometeorología,

se han realizado análisis que sugieren la presencia de condiciones atmosféricas particulares cuando se tiene la influencia de fuentes externas de contaminación. Los análisis realizados hasta el momento sugieren además una estructura vertical particular de la atmósfera, que podría favorecer el ingreso de masas de aire contaminadas al Valle de Aburrá.

En este sentido, y teniendo en cuenta la importancia que se ha identificado frente al aporte de fuentes externas a la calidad del aire del territorio metropolitano, en el marco del contrato CCT 016 de 2024, se llevó a cabo una campaña de monitoreo con globos cautivos para realizar mediciones de PM2.5, temperatura y humedad relativa a diferentes alturas, en dos sitios de medición y durante dos períodos de tiempo diferentes. Las experiencias internacionales asociadas a campañas de monitoreo en la atmósfera vertical fueron tomadas como referencia para la realización de la campaña en el Valle de Aburrá.

Con el fin de hacer evaluaciones durante el primer período de gestión de episodios de contaminación atmosférica del año 2024, se realizaron distintas pruebas necesarias para llevar a cabo las campañas de monitoreo de PM2.5 usando globos cautivos. Las pruebas fueron realizadas los días 20 y 21 de marzo, en la cancha principal de la Universidad de Antioquia en el Distrito de Medellín. Esta ubicación se seleccionó de manera estratégica, teniendo en cuenta que en esta zona se tiene un buen espacio para la manipulación del montaje, y además, es un punto ubicado más al norte del Distrito de Medellín, desde donde se ha identificado que ingresan las de masas de aire contaminadas a Medellín y el sur del Valle de Aburrá. Además, las mediciones se realizaron entre las 19:00 y las 00:00 horas, ya que durante estas horas típicamente se identifica el ingreso de material particulado externo, de acuerdo con los resultados proporcionados por el sensor de Black Carbon en la estación Tráfico Centro.

Para realizar el montaje de la campaña de globos cautivos, se realizaron modificaciones a tres sensores de bajo costo diseñados para el programa de Ciudadanos Científicos en Bicicleta. Estas modificaciones permitieron una reducción notable en el peso del sensor, pasando de tener un peso inicial de 450 gramos, a un peso final de aproximadamente 170 gramos, luego de remover distintos elementos que no afectan la precisión de los sensores, pero que sí son claves para que los globos meteorológicos puedan elevar estos sensores en la vertical. Se utilizaron globos de látex de 350 gramos, los cuales eran los más grandes disponibles por el proyecto. Para inflar los globos se utilizó helio industrial con una pureza de 99.6 %, similar al que se ha utilizado en otras campañas de radiosondeo. El globo fue sujetado con un carrete de 300 metros de hilo kevlar de 4 mm de diámetro, al cual se le adhirió el sensor de PM2.5. En la Figura 82 se pueden observar algunas fotos tomadas durante la campaña.



(a) (b)

Figura 82: Pruebas realizadas para la campaña de monitoreo con globos cautivos en la Universidad de Antioquia.

Por su parte, es importante resaltar que durante el período de medición el globo subió hasta una altura máxima aproximada de 150 metros desde la superficie. No obstante, al adherir un segundo sensor al hilo kevlar, el globo no tuvo la capacidad para levantarlo, lo que imposibilitó la medición en simultáneo de varios puntos en la vertical.

La Figura 83 muestra el comportamiento del PM2.5, el PM10, la temperatura y la humedad relativa durante las pruebas realizadas. Se puede apreciar que los sensores realizaron mediciones desde los 1500 metros sobre el nivel del mar (msnm) hasta 1650 msnm, aproximadamente 150 metros sobre el nivel del suelo (msns) durante los lanzamientos. Las variaciones en altura de los globos fueron ocasionadas por fenómenos turbulentos durante estas horas. Para el 20 de marzo, las concentraciones de PM2.5 y PM10 se mantuvieron relativamente bajas entre las 19:00 y las 21:00 horas. No obstante, entre las 21:00 y las 22:00, se presentó un incremento notable en las concentraciones de PM2.5 y PM10 a una altura entre 50 y 100 msns. Estos incrementos coinciden además con disminuciones en la temperatura e incrementos notables en la humedad relativa. Por su parte, después de las 22:00 se observó una reducción en las concentraciones de ambos contaminantes, con incrementos momentáneos hacia el final de la campaña que pueden ser explicados por emisiones puntuales asociadas con quemas de llantas, de acuerdo con lo que se constató en campo.

Para el segundo día de prueba correspondiente al 21 de marzo de 2024 (Figura 83 panel derecho) se observaron nuevamente concentraciones relativamente bajas de PM2.5 y PM10 durante las primeras horas de la noche. Sin embargo, después de las 22:00 horas se evidenciaron incrementos en las concentraciones de PM2.5, los cuales se mantuvieron hasta el final de las mediciones (00:00 horas). Es interesante notar que, de manera análoga a las mediciones del 20 de marzo, estos incrementos en el material particulado PM10 y PM2.5 también estuvieron asociados con disminuciones en la temperatura e incrementos en la humedad relativa. Aunque el comportamiento de la temperatura y la humedad relativa coinciden con el ciclo diurno típico, también es importante resaltar que durante el 20 de marzo, se presentaron inicialmente incrementos en los valores de la humedad relativa, y posteriormente, se observaron nuevamente disminuciones; durante el 21 de marzo, se alcanzaron valores de humedad relativa superiores a 85 % una hora más tarde que el día anterior, y coincidieron con los incrementos marcados en las concentraciones de PM2.5. Lo anterior

sugiere que las variaciones en la temperatura y la humedad relativa no están exclusivamente ligadas al ciclo diurno de estas variables, sino que podrían estar relacionadas con el comportamiento observado en el material particulado. Específicamente, es probable que estas variaciones estén relacionadas con el transporte turbulento de masas de aire desde regiones más altas (donde la temperatura es menor y la humedad relativa es mayor) hacia la superficie del valle.

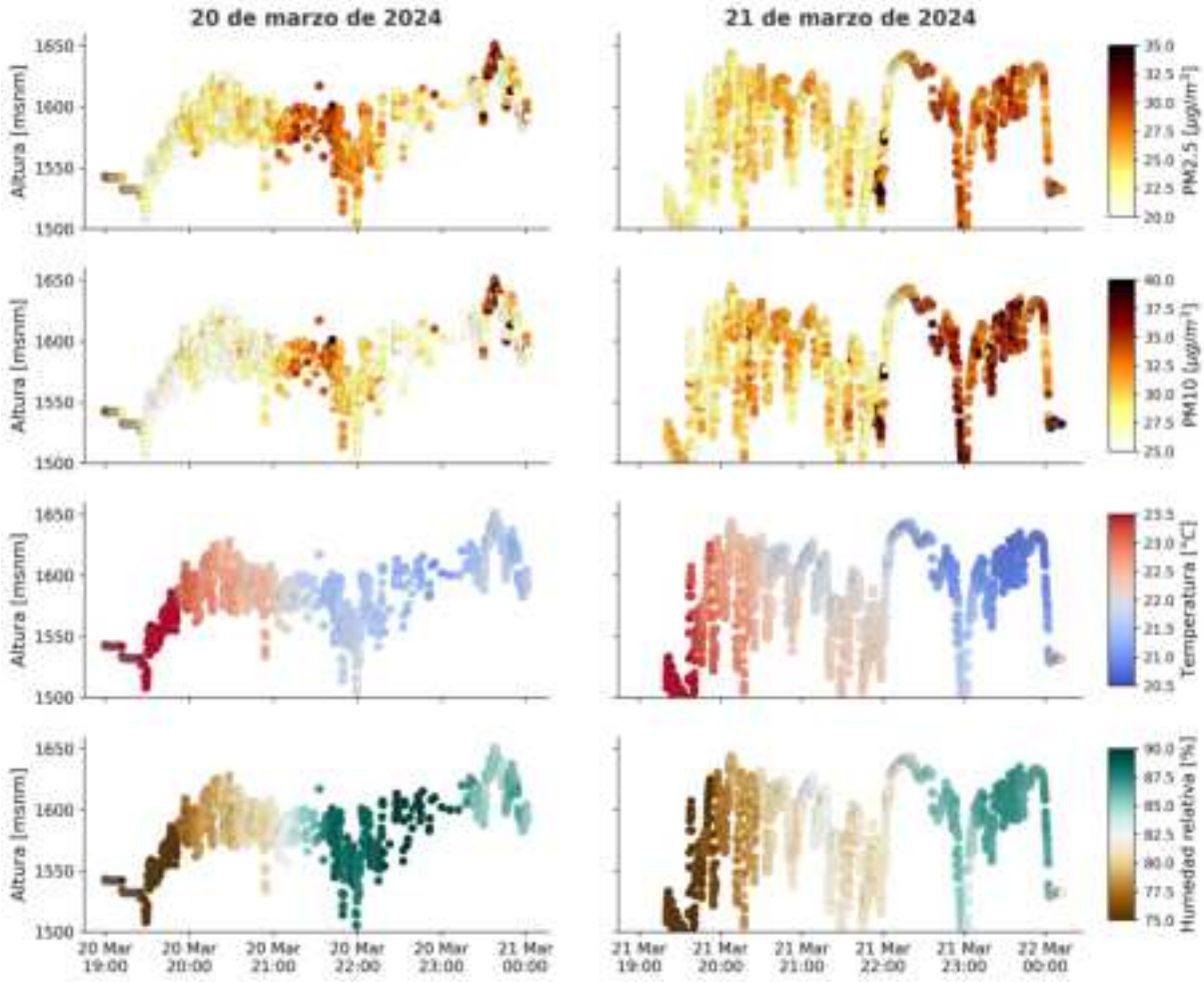


Figura 83: Comportamiento vertical (eje Y) y temporal (eje X) de PM2.5, PM10, temperatura y humedad relativa para las pruebas realizadas el 20 de marzo (paneles de la izquierda) y el 21 de marzo (paneles de la derecha) en la Universidad de Antioquia.

Por otra parte, la Figura 84 muestra el perfil promedio del PM2.5, el PM10, la temperatura y la humedad relativa durante el período que comprendió las pruebas realizadas. Se observan incrementos de las variables en los primeros 40 metros desde la superficie (hasta 1540 msnm), una disminución leve entre 1540 y 1560 msnm, e incrementos con la altura en el resto del perfil, alcanzando los valores máximos entre 120 y 140 m sobre el suelo. Adicionalmente, el comportamiento vertical de los perfiles de temperatura y humedad, sugiere que las variaciones observadas en los perfiles de material particulado están asociadas con las distintas capas de la atmósfera baja, donde los primeros metros (hasta 40-50 m) se asocian con la capa

superficial, y valores superiores a los 60 m exhiben variaciones relacionadas con el comportamiento de la capa límite atmosférica.

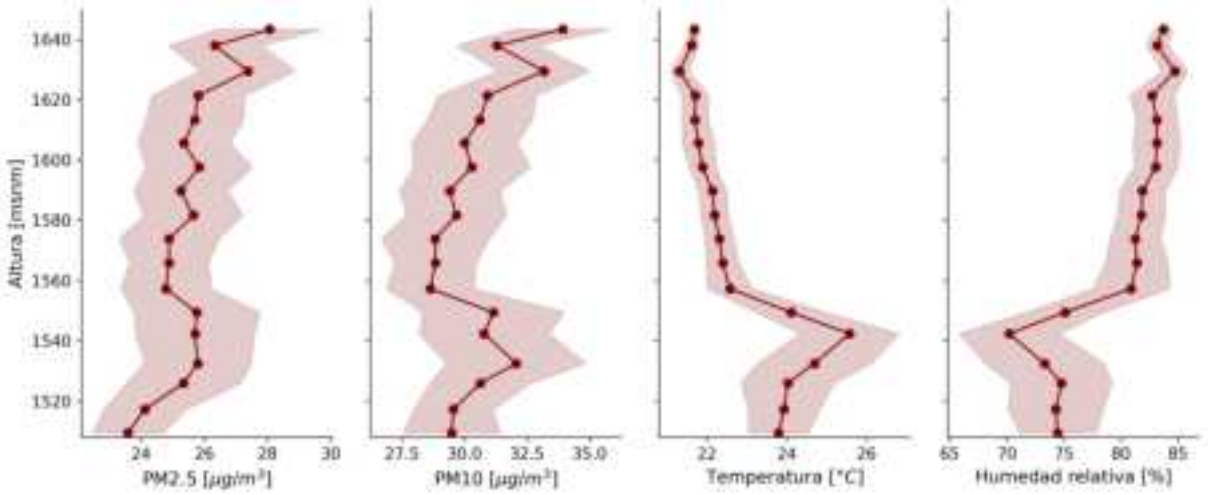


Figura 84: Perfiles verticales promedio para PM2.5, PM10, temperatura y humedad relativa, obtenidos durante los dos días de prueba de la campaña de monitoreo con globos cautivos en la cancha de la sede principal de la Universidad de Antioquia.

En general, estos resultados muestran comportamientos interesantes entre las distintas variables monitoreadas, los cuales son consistentes con relaciones descritas previamente a partir del monitoreo de variables micrometeorológicas y de otros estudios en el mundo. No obstante, con el fin de obtener un diagnóstico más completo, se requiere realizar un monitoreo del perfil vertical de PM2.5 a una altura mayor. En este sentido, y a partir de estas primeras mediciones, se identificaron al menos dos posibilidades para mejorar el montaje de la primera campaña:

- Utilizar un hilo kevlar más delgado, lo cual implicaría un menor peso del montaje. Específicamente, se planteó el uso de un hilo con un diámetro de alrededor de 1.5 mm, lo que representó una reducción notable en el grosor en comparación con el hilo de 4 mm utilizado inicialmente.
- Se consideró el uso de globos más grandes, de entre 600 y 1000 gramos, con el fin de que permitiera elevar el hilo kevlar y la instalación de varios sensores para tomar información en simultáneo.

Ajuste de las mediciones - noviembre 2024: cancha Universidad EAFIT

Para probar las mejoras planteadas en el montaje, se realizó la planeación de una nueva campaña de monitoreo de globos cautivos en la vertical. En este caso, se definió la cancha deportiva de la Universidad EAFIT, cerca al puente de la 4 Sur, como sitio de realización de la campaña. Esta ubicación cumple con condiciones que favorecen el lanzamiento de los globos cautivos en conjunto con los sensores de PM2.5. Las mediciones se realizaron las noches del 6 y 7 de noviembre de 2024. A diferencia del montaje del mes de marzo, el globo meteorológico utilizado durante las mediciones de noviembre permitió una capacidad de carga tres veces superior. A pesar de este incremento, el tamaño del globo fue similar (ver Figura 85), lo que facilitó su manejo en campo. Además, se utilizó un hilo kevlar más delgado. Las mejoras evidenciadas durante las mediciones de noviembre se mencionan a continuación:

- Reducción de la catenaria: como se observa en la Figura 86, el globo lanzado en noviembre mostró una menor catenaria (curvatura en el hilo kevlar) en comparación con el globo lanzado en el mes de marzo. Esto se debe tanto a las mejoras en el diseño y materiales, incluyendo el globo de mayor capacidad y el hilo kevlar más delgado.
- Capacidad de levantamiento: el globo lanzado en noviembre logró levantar dos sensores simultáneamente, lo que representa una mejora significativa frente a la campaña de marzo. Este logro se atribuye a la mayor capacidad del globo y al menor peso del hilo utilizado.
- Altura alcanzada: durante los lanzamientos de noviembre, el globo alcanzó alturas superiores (Figura 87) y se mantuvo sostenido de manera estable. Lo anterior también sugiere que estos globos ofrecen una mayor resistencia frente a posibles fluctuaciones en las condiciones del viento.

Estas mejoras permitieron resaltar la efectividad de las modificaciones realizadas en el montaje de los globos, y exhibieron el potencial de uso de globos cautivos como herramienta para el monitoreo y entendimiento de la calidad del aire, especialmente durante períodos de gestión de episodios.

Por otra parte, es importante resaltar que se utilizaron globos de distinto tamaño en ambos días de la campaña con el fin de evaluar la importancia del tamaño de éste en la estabilidad de los sensores y la altura máxima alcanzada. En este sentido, las mediciones realizadas el 6 de noviembre se llevaron a cabo con un globo con capacidad de levantar un peso de hasta 600 gr, mientras que el día 7 de noviembre se utilizó un globo con capacidad para levantar 1000 gr. Además de disminuir notablemente la catenaria (es decir, la curvatura en el hilo kevlar), los montajes mejorados tuvieron la capacidad de elevar dos sensores que miden PM2.5, PM10, temperatura, humedad relativa y posición geoespacial. En total, se realizaron mediciones con tres sensores en simultáneo, donde los sensores 34 y 40 fueron elevados en el montaje y el sensor 60 se mantuvo en la superficie. No obstante, el sensor 34 presentó errores para guardar la información durante ambos días. Este problema se ajustará para las mediciones a realizar durante futuras campañas.



(a) (b)

Figura 85: Comparación de los globos utilizados durante los lanzamientos realizados en el mes de marzo (izquierda) y en el mes de noviembre (derecha).



(a) (b)

Figura 86: Comparación de la catenaria (curvatura en el hilo kevlar) durante los lanzamientos realizados en el mes de marzo (izquierda) y en el mes de noviembre (derecha).



(a) (b)

Figura 87: Altura del globo durante los lanzamientos realizados en el mes de noviembre.

La Figura 88 muestra el comportamiento del PM2.5, el PM10, la temperatura y la humedad relativa en la atmósfera vertical durante los dos días de monitoreo del mes de noviembre. Se puede apreciar que, a pesar de contar con un sensor adicional, los nuevos montajes (globos de mayor capacidad y un hilo kevlar más delgado) pudieron alcanzar una mayor altura respecto a la alcanzada durante las mediciones realizadas en el mes de marzo de 2024. De hecho, durante las mediciones realizadas el 7 de noviembre con el globo de 1000 gr, el sensor 40 (el sensor más alto del montaje) alcanzó alturas superiores a los 350 metros sobre el nivel del suelo, las cuales fueron superiores al límite de 300 metros inicialmente establecido para superar las influencias de las características urbanas en los campos de circulación. En el caso del 6 de noviembre, es posible que las bajas concentraciones registradas en la altura, en comparación con las obtenidas en superficie, estén relacionadas con el posible lavado atmosférico producto de las lluvias que se registraron en la tarde y que pudieron favorecer la acumulación de contaminantes cerca de la superficie. Las magnitudes de las variables monitoreadas son consistentes con los valores esperados durante las horas de las campañas, con disminuciones en la temperatura e incrementos en la humedad relativa a medida que avanza la noche, y concentraciones horarias de PM2.5 que fluctúan entre valores horarios típicos para este contaminante.

Es importante notar que las concentraciones de PM2.5 en superficie se mantuvieron relativamente bajas durante los días de las mediciones (paneles superiores de la Figura 88). Sin embargo, se pueden apreciar diferencias interesantes entre los dos días analizados, con concentraciones notablemente más bajas tanto en superficie como en altura durante el 6 de noviembre (notar rango de la barra de colores), y concentraciones más altas para el 7 de noviembre. De hecho, contrario al comportamiento del 6 de noviembre, durante el 7 de noviembre las concentraciones de material particulado en el sensor elevado en altura (sensor 40) fueron más altas que el sensor que tomó datos en superficie (sensor 60). Además, se puede apreciar un incremento en las concentraciones de PM2.5 en el sensor elevado en altura a las 23:10 horas, y posteriormente incrementos en las concentraciones del sensor en superficie alrededor de 40 minutos después. Este comportamiento es característico durante noches en las que se presenta un transporte

descendente de aerosoles desde capas más altas de la atmósfera hacia la superficie, lo cual en este caso podría asociarse con procesos de recirculación de contaminantes, ya que no se identificaron afectaciones por quema de biomasa durante estas noches. No obstante, para corroborar esta teoría se requerirían los datos del sensor 34 (ubicado entre el sensor elevado en altura y el sensor en superficie), el cual, como se mencionó anteriormente, no guardó los datos durante estas noches.

En general, el comportamiento de los montajes durante estas mediciones alienta el desarrollo de nuevas mediciones durante los períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica, y especialmente, durante noches en las que se puedan presentar afectaciones a la calidad del aire local por incendios de cobertura vegetal regionales.

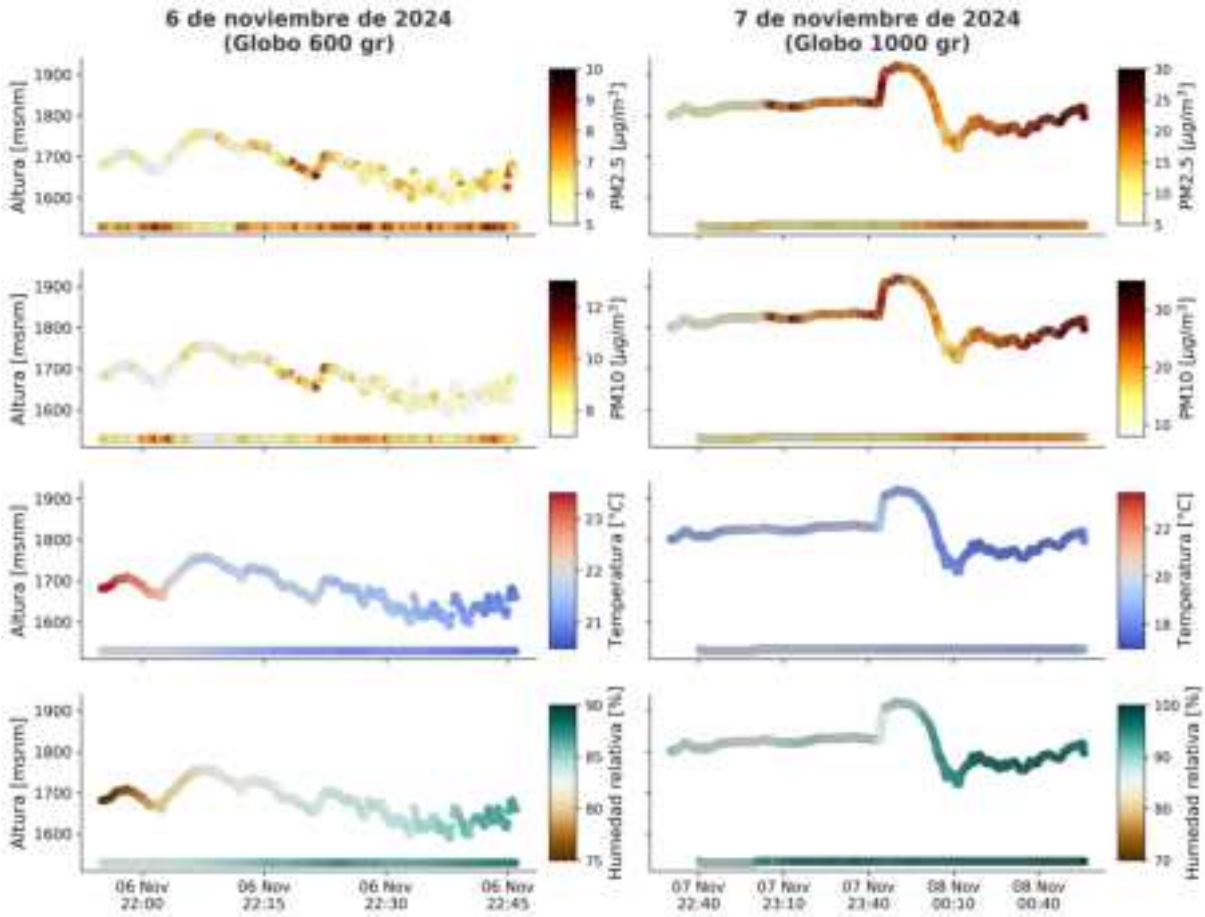


Figura 88: Comportamiento vertical (eje Y) y temporal (eje X) de PM2.5, PM10, temperatura y humedad relativa para las pruebas realizadas los días 6 de noviembre (paneles de la izquierda) y 7 de noviembre (paneles de la derecha) en la cancha principal de la Universidad EAFIT.

Campaña de caracterización química del PM2.5 secundario

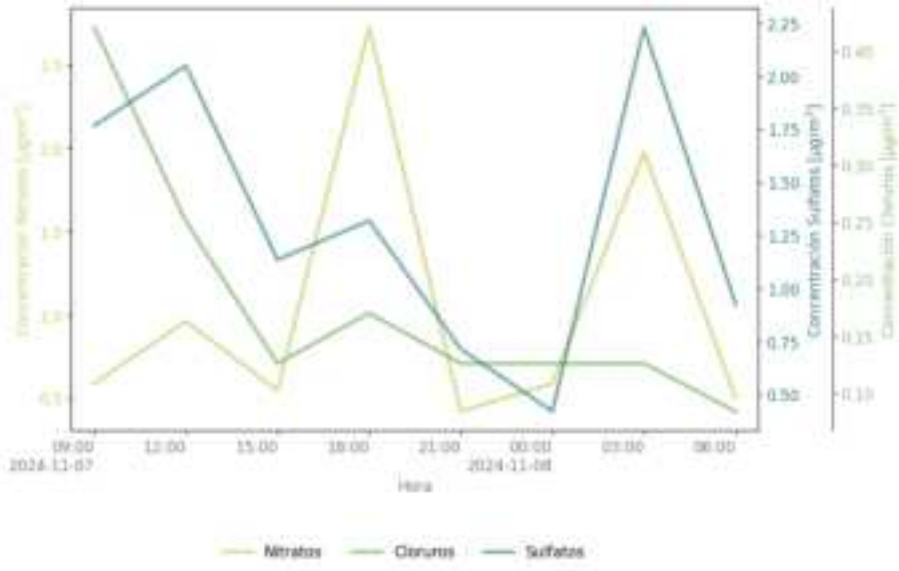
En el Valle de Aburrá históricamente se han realizado campañas de caracterización química a cargo del Politécnico Jaime Isaza Cadavid, las cuales han cuantificado las fracciones orgánica y elemental

del material particulado PM2.5. Estas campañas se hicieron en estaciones tanto poblacionales (MED-BEME, ITA-CJUS, MED-LAYE y GIR-SOSN), de fondo (MED-SELE) y de tráfico (MED-PJIC) (AMVA (2019)). Estos estudios han permitido identificar los elementos que componen las fracciones mayoritaria, minoritaria, trazas y ultratrazas, así como también los cationes y aniones tales como fluoruros, cloruros, nitratos y sulfatos.

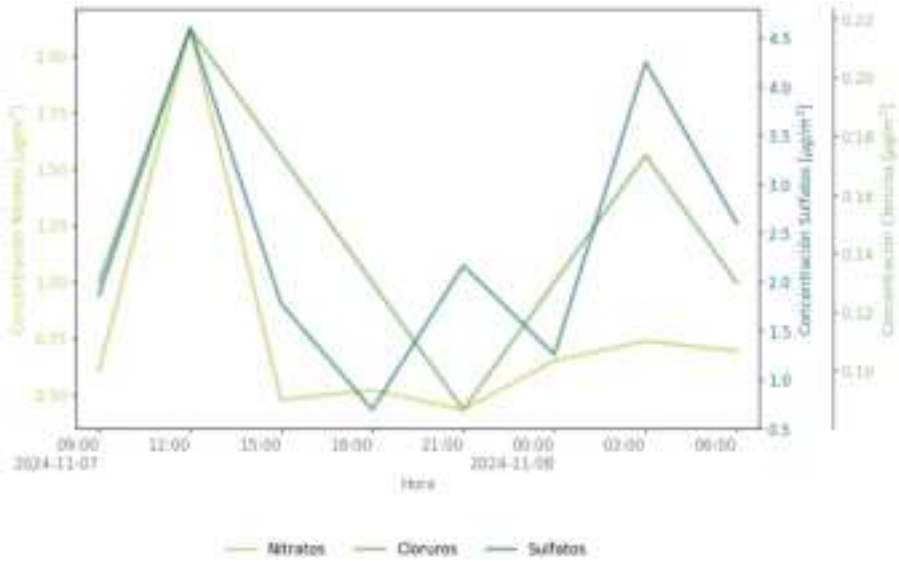
Con el objetivo de cuantificar las especies químicas de principal aporte al PM2.5 secundario (sulfatos, nitratos, cloruros, formaldehido y tolueno) en el Valle de Aburrá, así como tener una aproximación al ciclo diurno de las concentraciones de estos compuestos secundarios reactivos en la atmósfera, en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024 se realizó una campaña de caracterización química en 2 puntos de monitoreo ubicadas en los municipios de Girardota (GIR-EPM) e Itagüí (ITA-CJUS). Estas mediciones tuvieron una resolución temporal de cada 3 horas los días 1 y 7 de noviembre de 2024. Cabe aclarar que para el día viernes 1 de noviembre, se tomaron muestras durante 12 horas, mientras que para el día jueves 7 de noviembre las mediciones se realizaron de manera continua durante 24 horas, iniciando a las 06:00.

En el caso del formaldehido y del tolueno, se emplearon filtros de carbón activado, mientras que para la cuantificación de los aniones se emplearon filtros de PM2.5 en equipos de medición manual de referencia PQ200. Por último, los análisis de las muestras fueron realizadas por Conhintec y el Laboratorio Instrumental de Alta Complejidad (LIAC) de la Universidad de la Salle.

Los valores de las concentraciones de los compuestos medidos en la campaña, especialmente las mediciones del 08 de noviembre, evidencian que la formación de estos compuestos secundarios en ambos puntos, se favorecen en las primeras horas del día, como se observa en la Figura 89. La identificación de estos picos de concentración posibilitan enfocar acciones de control y seguimiento a fuentes de emisión, específicamente de las especies precursoras del PM2.5.



(a) ITA-CJUS



(b) GIR-EPM

Figura 89: Ciclo diurno de las concentraciones de sulfatos, nitratos y cloruros en las estaciones (a) ITA-CJUS y (b) GIR-EPM del 7 al 8 de noviembre de 2024.

Esta campaña de caracterización química enfocada a iones mayoritarios del PM2.5 secundario y su comportamiento diurno, permite identificar picos de concentración que posibilitan enfocar acciones de control y seguimiento a fuentes de emisión.

En el Anexo A: Campaña de medición de aerosoles secundarios en el Valle de Aburrá se expone con mayor detalle la metodología y resultados obtenidos en esta campaña de medición.

Campaña de caracterización química de compuestos tóxicos (HAPs)

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son un grupo especial de los compuestos orgánicos volátiles, por su afectación a la salud pública al ser compuestos potencialmente cancerígenos (Chu and Chen. (2002)). En la Resolución Nacional 2254 de 2017 se establecen los límites permisibles de compuestos tóxicos o especiales en una escala anual. Para el caso de los HAPs se especifica un límite de 1 ng/m^3 expresado en términos de benzo-a-pireno (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017)).

Con el objetivo de monitorear las concentraciones de compuestos tóxicos en el Valle de Aburrá y evaluar conforme a los límites de emisión permisibles establecidos en la Resolución Nacional 2254 de 2017, se realizó una campaña de medición de hidrocarburos aromáticos policíclicos en muestras de PM10 en cinco estaciones de monitoreo, en el período comprendido entre octubre y noviembre de 2024. En términos generales, las mayores concentraciones de HAPs se registraron en la estación ubicada en el sector de los Gómez del municipio de Itagüí, alcanzando valores de hasta 169 ng/m^3, como se puede observar en la Figura 90.

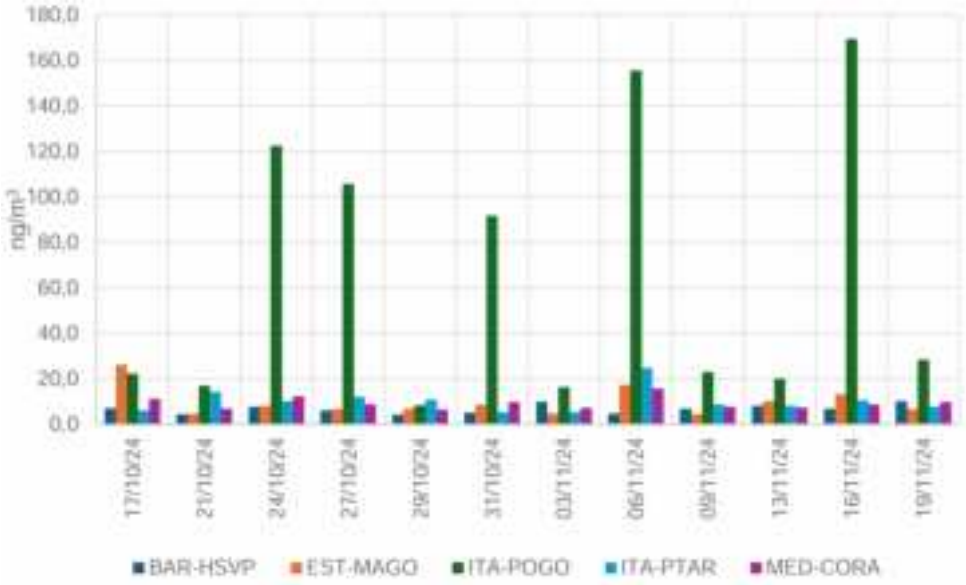


Figura 90: Concentración de HAPs en cinco puntos de monitoreo del Valle de Aburrá en el 2024.
Fuente: Reporte de resultados del laboratorio GAIA.

En el Anexo B: Campaña de caracterización química de compuestos tóxicos (HAPs) en el Valle de Aburrá se precisan con mayor detalle la metodología y resultados obtenidos en esta campaña de medición.

Campaña de medición de BTEX

Los BTEX (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) son compuestos orgánicos volátiles (VOC) que se encuentran en el petróleo y en sus productos derivados; son contaminantes que están presentes en la atmósfera en estado gaseoso a temperatura ambiente o que son muy volátiles a dicha temperatura. Si bien existe una gran cantidad de compuestos orgánicos volátiles en el aire ambiente, normalmente se hace seguimiento de las concentraciones de BTEX. Éstos compuestos se producen de la combustión de

combustibles fósiles, de fugas y derrames en staciones de servicio de suministro de combustibles y de diferentes procesos industriales que se llevan a cabo en una región. El benceno por ejemplo se emplea en la fabricación de plásticos, resinas y fibras sintéticas, lubricantes, tinturas, gomas, detergentes y pesticidas, como disolvente y como materia prima de numerosas síntesis orgánicas. El tolueno es un hidrocarburo derivado del benceno que se utiliza entre otros en la preparación de colorantes, medicamentos, detergentes y productos aromáticos. Es importante medir la concentración de BTEX en el aire e identificar las fuentes, con el fin de controlarlas y reducir el impacto ambiental. Cabe agregar que los VOC son precursores en la formación de ozono troposférico y la formación secundaria de material particulado PM2.5. La presencia de VOC en la atmósfera puede tener efectos adversos en la salud humana.

La Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible considera el benceno y el tolueno como contaminantes tóxicos. En este sentido establece niveles máximos permisibles para tolueno, para períodos de exposición de una semana y de 30 minutos (260 y 1000 $\mu g/m^3$, respectivamente), así como un nivel máximo anual para el benceno (5 $\mu g/m^3$).

Actualmente la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá, cuenta con un equipo automático, con resolución temporal de 6 minutos, para el monitoreo de las concentraciones de benceno, tolueno, etilbenceno y xileno. el equipo opera en la estación Tráfico Centro del municipio de Medellín. Teniendo en cuenta que las campañas de BTEX que históricamente se han realizado en el valle de Aburrá, se han concentrado en evaluar zonas de tráfico vehicular, estaciones de servicio de suministro de combustible y sectores cercanos a éstas, se consideró importante explorar otras zonas, para evaluar la potencial afectación por BTEX, asociada a las fuentes fijas cercanas. Así mismo, teniendo en cuenta las dinámicas de emisión de la escala de cada municipio, surge la necesidad de evaluar el comportamiento de otros contaminantes no convencionales que permitan fortalecer las estrategias de gestión del recurso aire por parte de la Autoridad Ambiental. Así mismo, se identificó la necesidad de llevar a cabo mediciones en el Polígono del Plan Parcial El Progreso en el Distrito de Medellín. De acuerdo con lo anterior, durante la vigencia del Contrato CCT 016 de 2024 se llevó a cabo una campaña de medición de compuestos orgánicos volátiles (benceno, tolueno, etilbenceno y xileno) en diferentes puntos del Valle de Aburrá: S.O.S. Norte en el municipio de Girardota (GIR-SOSN), Casa de Justicia del municipio de Itagüí (ITA-CJUS), estación Tráfico Centro (CEN-TRAF) y Plan Parcial El Progreso. Estas dos últimas en el Distrito de Medellín. El punto seleccionado en el polígono del Plan Parcial estuvo ubicado en el Campamento de Obra de este plan (Figura 91).



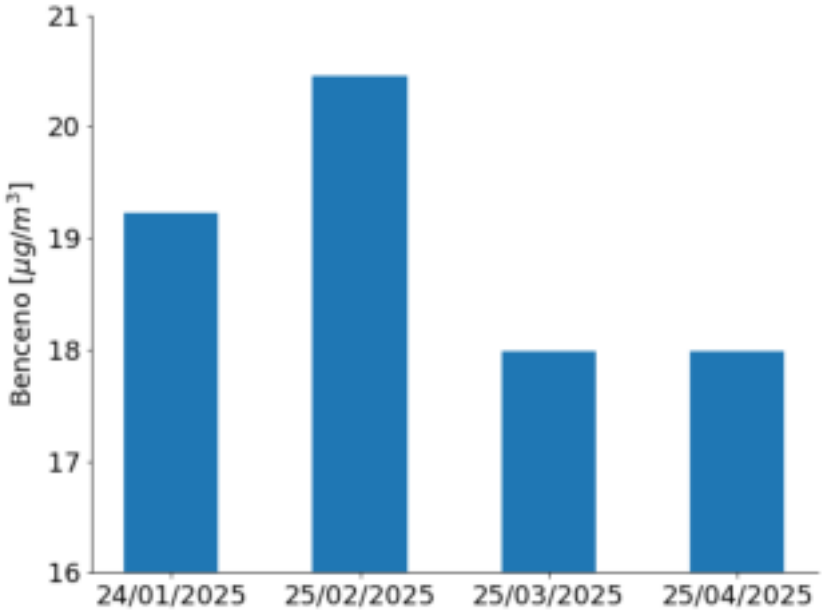
Figura 91: Ubicación del punto de medición de BTEX del Plan Parcial El Progreso.

Cabe agregar que en las mediciones se utilizaron filtros pasivos, los cuales fueron analizados mediante el método de cromatografía, en el laboratorio CONHINTEC, el cual se encuentra acreditado para la realización de este tipo de análisis.

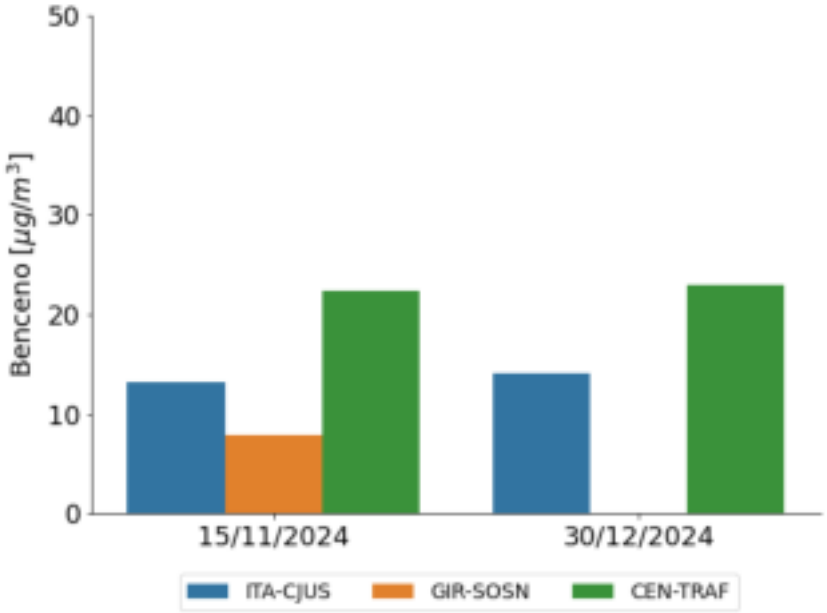
En la Figura 92 se muestran los resultados de las concentraciones de BTEX obtenidas en las estaciones GIR-SOSN, ITA-CJUS y CEN-TRAF, durante los períodos 30 de diciembre de 2024 a 30 de enero de 2025. En el caso del Plan Parcial El Progreso, las mediciones se llevaron a cabo entre el 24 de enero y el 27 de mayo de 2025.

Los resultados obtenidos para el Plan Parcial el Progreso muestran concentraciones superiores a los 15 μ g/m^3, siendo la máxima concentración la obtenida entre el 25 de febrero y el 24 de marzo de 2025. Respecto a las mediciones de los otros tres puntos considerados (GIR-SOSN, CEN-TRAF e ITA-CJUS), la mínima concentración obtenida se registró en GIR-SOSN, igual a 7.8 μ g/m^3. En este punto de medición, para el período comprendido entre el 30 de diciembre de 2024 y el 30 de enero de 2025 se obtuvieron masas absorbidas de benceno superiores al límite de cuantificación (LOQ) reportado por el laboratorio en el que se hicieron los análisis, igual a 1 μg.

Cabe resaltar que si bien las concentraciones obtenidas de benceno obtenidas en todos los puntos considerados son superiores a 5 μg/m^3, valor correspondiente al nivel máximo permisible anual definido para este contaminante en la norma nacional, no es posible establecer excedencias a la norma de benceno, dado que el período de medición es mucho menor que la norma de referencia, Resolución Ministerial 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. Se resalta además que dada la metodología de medición, las concentraciones de benceno reportadas no corresponden a un promedio para el período de medición, por el contrario, equivalen a la acumulación de este contaminante.



(a) Plan Parcial el Progreso.



(b) Puntos de medición adicionales.

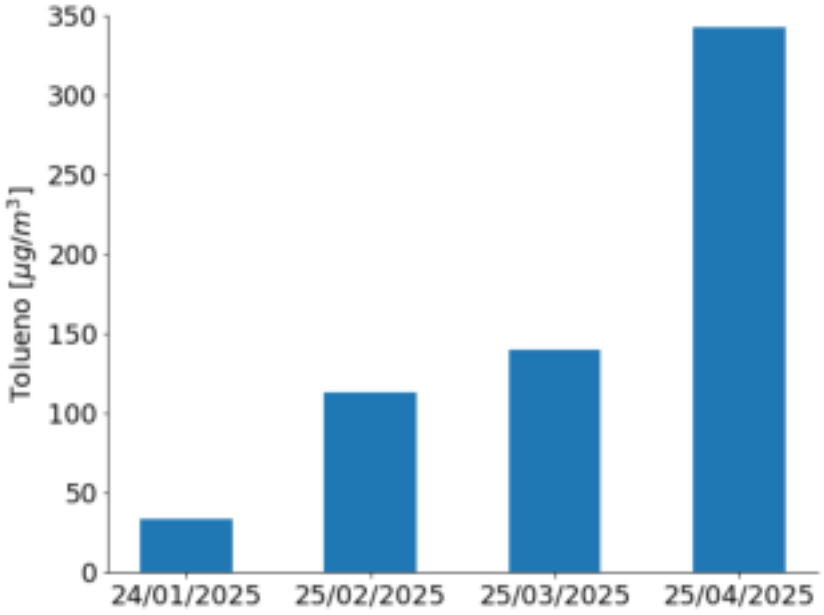
Figura 92: Comparativo de las concentraciones de benceno obtenidas durante las campañas de medición. No se incluye el nivel máximo permisible definido para este contaminante en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible dado que este nivel está definido para tiempos de exposición de un año y los resultados mostrados corresponden a campañas de un mes de duración.

Según los resultados obtenidos para tolueno (Figura 93, en el período comprendido entre el 25 de abril

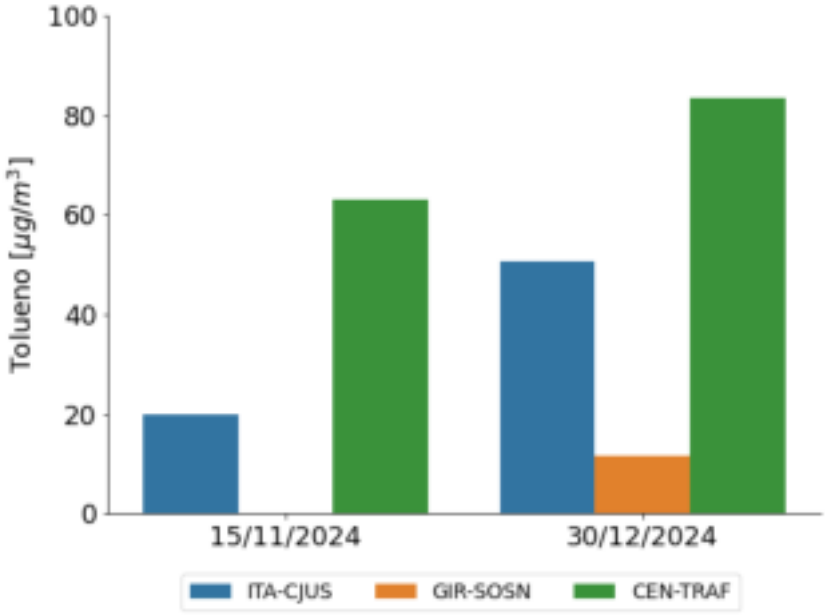
y el 27 de mayo de 2025 en el punto de medición del Plan Parcial El progreso, se obtuvo la máxima concentración de este contaminante, igual a 342.1 $\mu g/m^3$, valor superior al nivel máximo permisible definido para tolueno en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible para períodos de exposición de una semana (260 $\mu g/m^3$). No obstante lo anterior, es importante recordar que dada la metodología de medición, las concentraciones de tolueno reportadas no corresponden a un promedio para el período de medición, por el contrario, equivalen a la acumulación de este contaminante. Adicionalmente, el tiempo de medición (cercano a un mes) no permite comparar directamente con la norma semanal. En el caso del punto de medición ubicado en el municipio de Girardota, En este punto de medición, para el período comprendido entre el 15 de noviembre y el 16 de diciembre de 2024 se obtuvieron masas absorbidas de benceno superiores al límite de cuantificación (LOQ) reportado por el laboratorio en el que se hicieron los análisis, igual a 1 μg.

En el caso de los niveles de etilbenceno y orto-, meta- y para-xileno, presentados en las Figuras 94, 95 y 96, las concentraciones máximas de cada una de estas especies se registraron en la estación Tráfico Centro.

Las diferencias en los resultados reportados para los diferentes puntos de medición y las diferentes especies analizadas obedecen fundamentalmente a las dinámicas propias de la escala de cada punto de monitoreo, en especial del comportamiento de las fuentes móviles y de aquellas fuentes fijas que por su operación emiten este tipo de compuestos orgánicos volátiles.

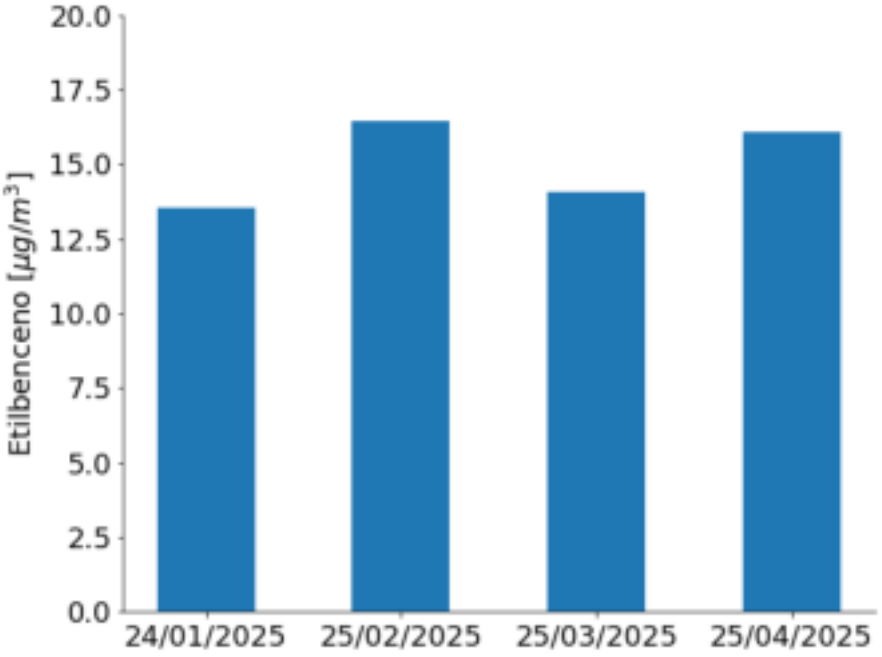


(a) Plan Parcial el Progreso.

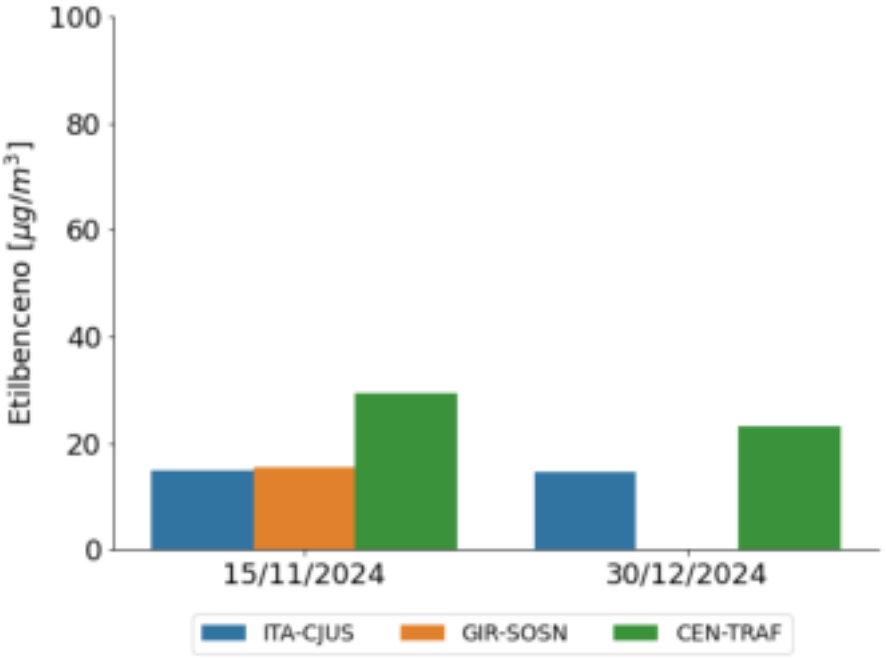


(b) Puntos de medición adicionales.

Figura 93: Comparativo de las concentraciones de tolueno obtenidas durante las campañas de medición. No se incluyen los niveles máximos permisibles definidos para tolueno en la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo sostenible, dado que estos están definidos para tiempos de exposición de una semana y de 30 minutos, y los resultados mostrados corresponden a campañas de un mes de duración.

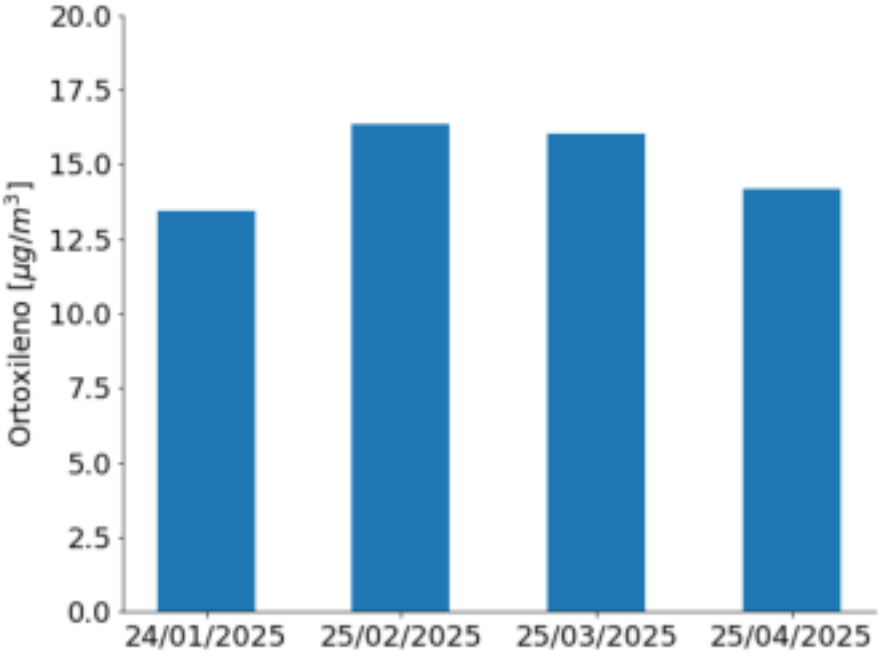


(a) Plan Parcial el Progreso.

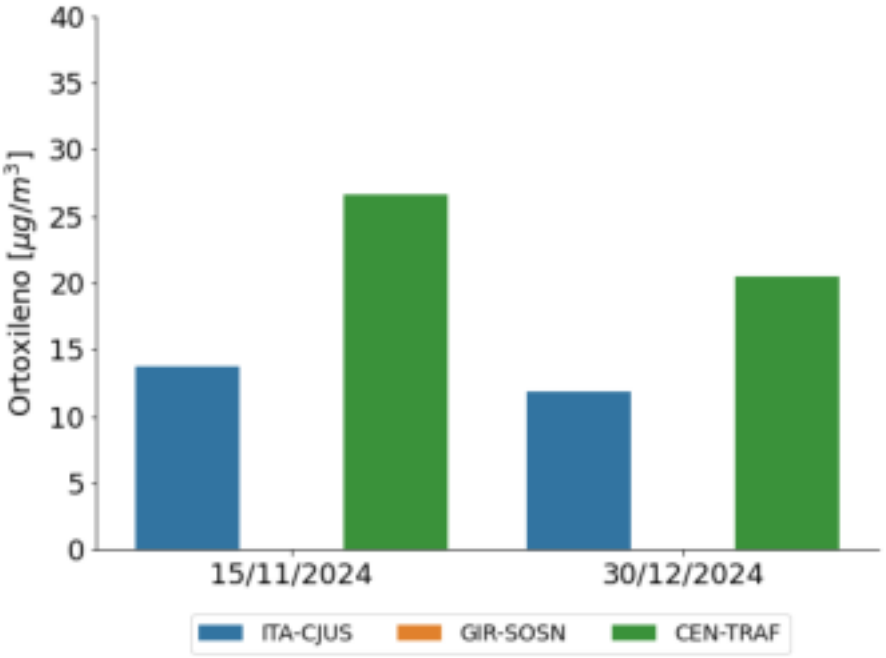


(b) Puntos de medición adicionales.

Figura 94: Comparativo de las concentraciones de etilbenceno obtenidas durante las campañas de medición.

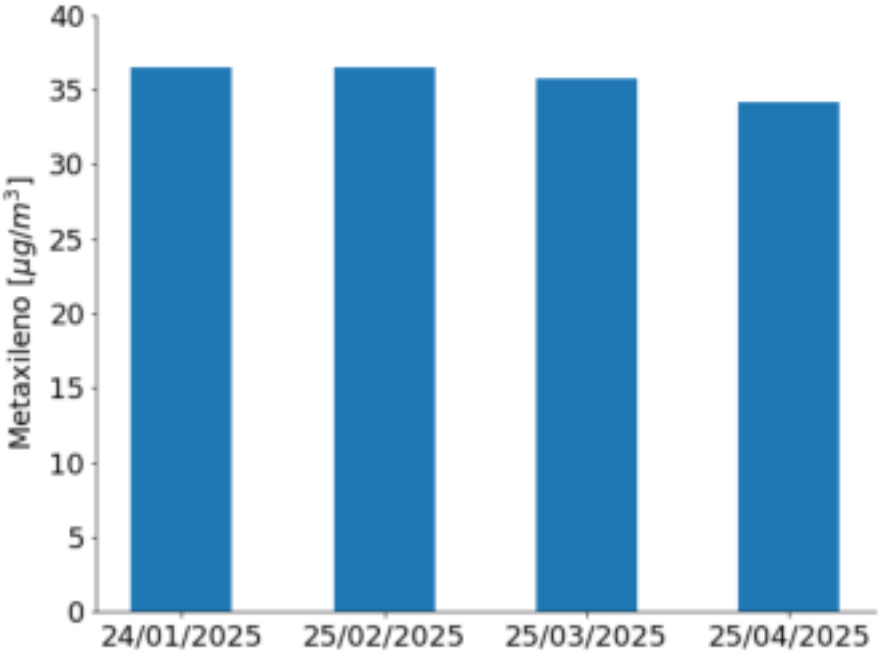


(a) Plan Parcial el Progreso.

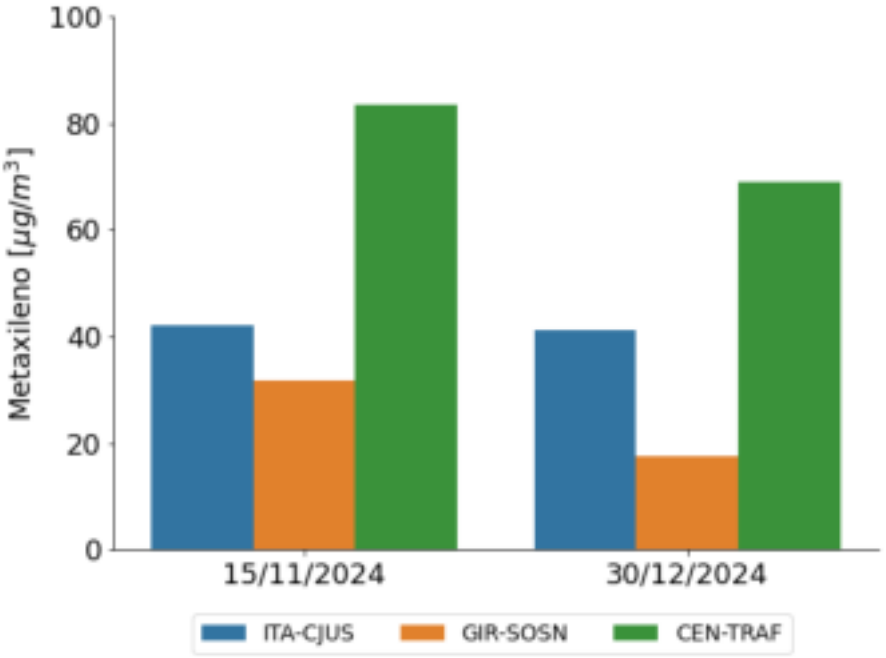


(b) Puntos de medición adicionales.

Figura 95: Comparativo de las concentraciones de ortoxileno obtenidas durante las campañas de medición.

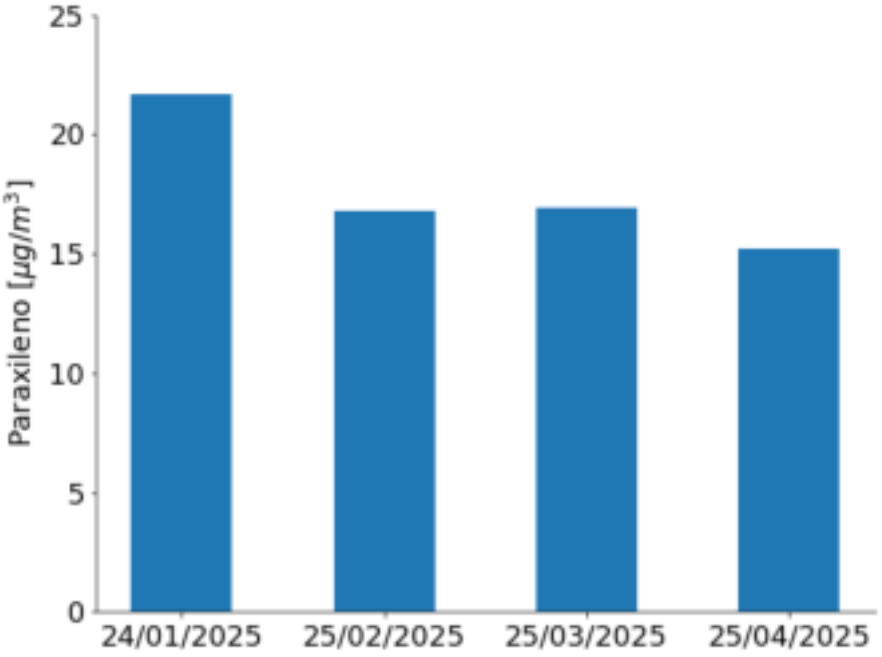


(a) Plan Parcial el Progreso.

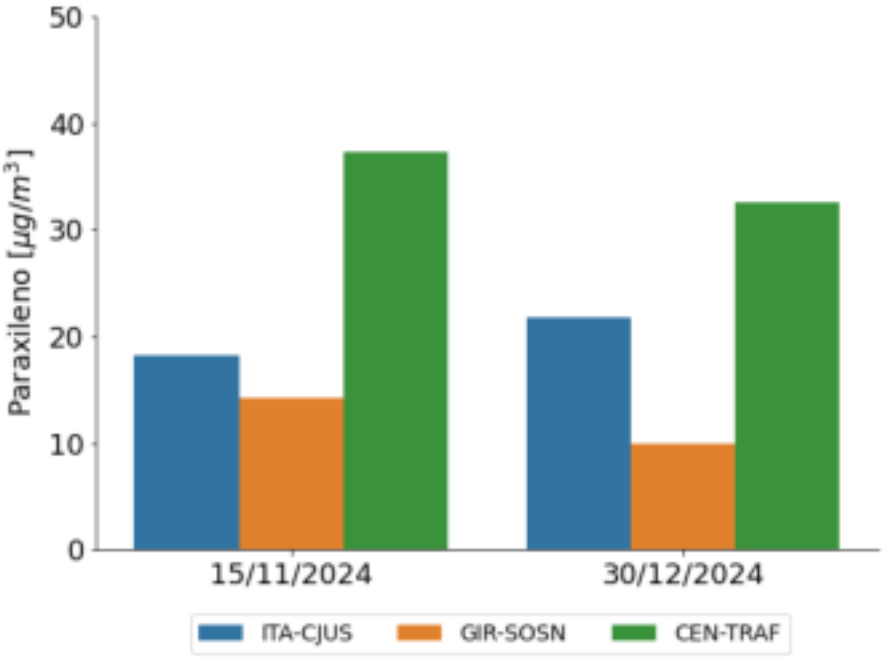


(b) Puntos de medición adicionales.

Figura 96: Comparativo de las concentraciones de metaxileno obtenidas durante las campañas de medición.



(a) Plan Parcial el Progreso.



(b) Puntos de medición adicionales.

Figura 97: Comparativo de las concentraciones de paraxileno obtenidas durante las campañas de medición.

Se identifica en las diferentes gráficas relacionadas con los compuestos orgánicos volátiles evaluados en el punto del Plan Parcial El Progreso, que cada compuesto tiene un comportamiento diferente, sin ser coincidentes los valores máximos o mínimos de cada uno de ellos en el mismo mes, lo que invita a pensar que existen otras variables adicionales a la emisión, que interfieren en las diferentes conformaciones químicas de los compuestos orgánicos volátiles que fueron evaluados.

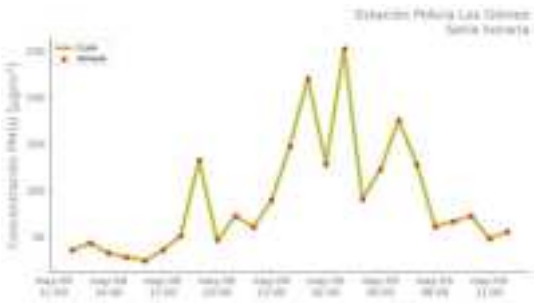
Campaña de monitoreo de fuentes de emisión a partir de cámaras térmicas.

La calidad del aire en una estación de monitoreo está afectada por el transporte de masas de aire desde fuentes de emisión fijas. La evaluación de fuentes de emisión cercanas a las estaciones de calidad del aire como Los Gómez en el municipio de Itagüí, y Belén Las Mercedes en el Distrito Especial de Medellín, a partir de cámaras, permiten identificar que cerca de estos puntos de medición existen fuentes industriales cuyas emisiones al parecer afectan los registros de PM10 y PM2.5.

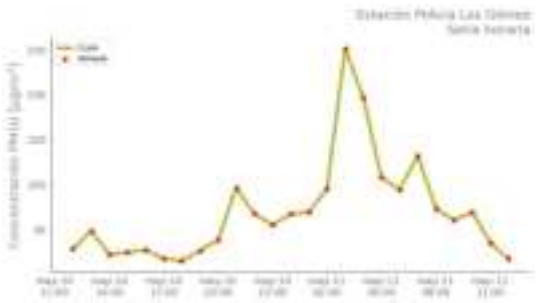
La Red de Cámaras Térmicas del proyecto SIATA permite hacer seguimiento, en su campo de visualización, de puntos de calor como chimeneas e incendios y poder así asociarlos con el comportamiento de contaminantes registrados en las estaciones de monitoreo de calidad del aire. De esta manera, durante la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024 se hizo el seguimiento de las imágenes generadas por la cámara térmica que está instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado (cámara Itagüí), la cual permite visualizar las chimeneas activas ubicadas en la ladera suroccidental del Valle de Aburrá, en la Vereda Los Gómez del municipio de Itagüí; la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea en el sector de Belén Las Mercedes, en el Distrito de Medellín (cámara Las Mercedes); y la cámara térmica del municipio de Girardota, ubicada en los Tanques de EPM de este municipio.

El análisis realizado en el marco de esta campaña tuvo como base la identificación de picos atípicos de concentración de PM10 (estación Los Gómez), PM2.5 (estación I.E. Pedro Justo Berrío y Tanques EPM de Girardota) y SO_2 (estación Tanques EPM de Girardota). Los resultados presentados en esta sección corresponden a los análisis reportados en el mes de mayo de 2025. El resto de eventos analizados se incluyen en el Anexo C. Campaña de monitoreo de fuentes de emisión a partir de cámaras térmicas.

La Figura 98 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) en el municipio de Itagüí para diferentes días del mes de mayo en los que se identificaron aumentos en las concentraciones de PM10 en este punto de medición.



(a) Mayo 08 - 09



(b) Mayo 10 - 11



(c) Mayo 28 - 29

Figura 98: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 01 - 02, (b) 02 - 03 y (c) 09 - 10 de mayo de 2025.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10 en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.

La Figura 99 muestra imágenes de los videos generados para los días 08 - 09, 10 - 11 y 28 - 29 de mayo. En términos generales, el video permite evidenciar que la intensidad de las chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura) es visible casi que para todos los períodos analizados y se vuelven más fuertes en el transcurso de la tarde y en la madrugada. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar esta información, la Figura 100 muestra el comportamiento de los vientos monitoreados en la estación de Policía Los Gómez para los mismos días para los que se construyeron los videos de la cámara. De acuerdo con esta Figura, predominaron los vientos con componente norte y occidente, especialmente después de las 18:00. De acuerdo con lo anterior, es altamente probable que los picos de PM10 registrados en este punto de medición durante las madrugadas de los días analizados estén afectados por las emisiones de fuentes fijas, específicamente por las chimeneas ubicadas cerca a la estación. La variación de la dirección del viento para estas fechas puede observarse en la Figura 100.



(a) Mayo 08 - 09.

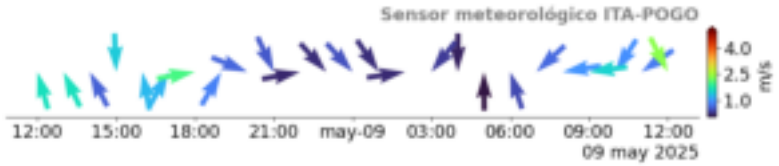


(b) Mayo 10 - 11.

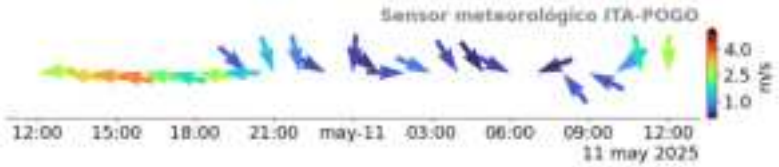


(c) Mayo 28 - 29.

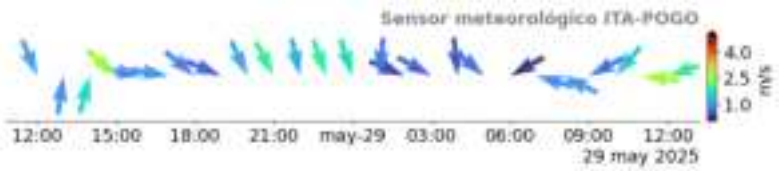
Figura 99: Imágenes de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos de los días (a) 08 - 09, (b) 10 - 11 y (c) 28 - 29 de mayo de 2025. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.



(a) Mayo 08 - 09.



(b) Mayo 10 - 11.



(c) Mayo 28 - 29.

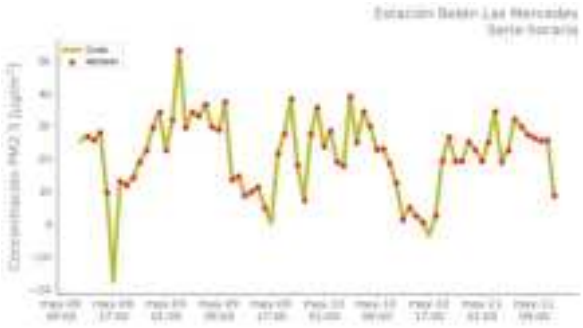
Figura 100: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados para los días (a) 08 - 09, (b) 10 - 11 y (c) 28 - 29 de mayo de 2025. La gráfica se construyó para el período comprendido entre las 12:00 de cada día y las 12:00 del día siguiente.

Cabe resaltar que la intensidad de las emisiones de estos puntos fijos (chimeneas) puede estar asociada a las condiciones de operación de equipos de combustión externa como hornos y calderas, de igual forma, la afectación a la calidad del aire asociadas a las masas de aire contaminado que salen de estas chimeneas, de acuerdo con los registros de la estación ITA-POGO, depende también de las dinámicas meteorológicas del lugar.

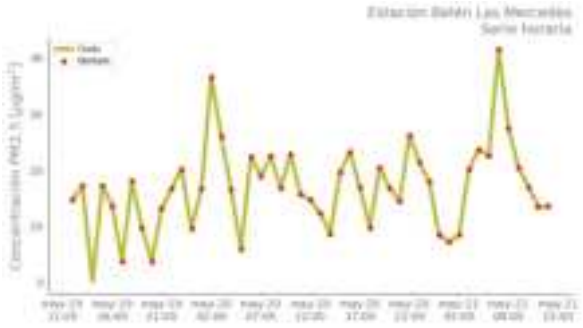
En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 101 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas también en forma general durante las visitas de campo realizadas en este sector. La cámara instalada en este sitio permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles asociadas a puntos fijos, durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación MED-BEME. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 08 - 11, 19 - 21 y 26 - 28 de mayo de 2025. La Figura 102 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



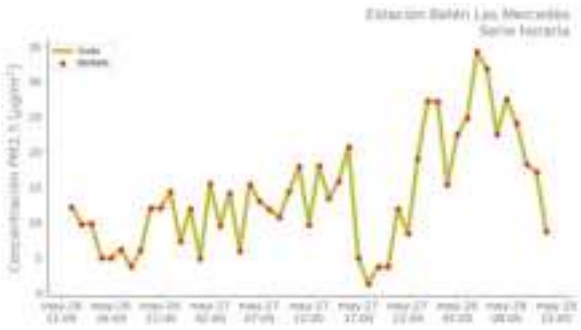
Figura 101: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



(a) Mayo 08 - 11.



(b) Mayo 19 - 21.



(c) Mayo 26 - 28.

Figura 102: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 08 - 11, (b) 19 - 21 y (c) 26 - 28 de mayo de 2025.

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad Residencial Azalea del Parque para los días anteriormente mencionados. Según los videos construidos para las fechas definidas, si bien las chimeneas estuvieron en términos generales, activas durante todo el día, en las noches el movimiento de las plumas emitidas, especialmente por las chimeneas ubicadas a la derecha de la Figura 101, coincide con la dirección en la que está ubicada la estación MED-BEME, por lo cual, es probable que el aumento en las concentraciones de PM2.5 que se registra en esta estación en las horas de la noche, y que se mantiene muy constante durante la madrugada, esté asociado a la afectación de las plumas emitidas por estas fuentes fijas. En la Figura 469 se muestra algunas imágenes de la cámara térmica.



(a) Mayo 08 - 11.



(b) Mayo 19 - 21.

Figura 103: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 08 - 11, (b) 19 - 21. En rojo se resaltan las chimeneas evidenciadas para este sector.



(a) Mayo 26 - 28.

Figura 103: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 08 - 11, (b) 19 - 21 y (c) 26 - 28 de mayo de 2025. En rojo se resaltan las chimeneas evidenciadas para este sector - Continuación.

Cabe agregar que la visibilidad de la pluma que sale constantemente por las chimeneas sugiere el desarrollo de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar éstas con la dirección del viento en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de contaminantes por estas chimeneas haya afectado las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.

WP1.1.4. Generación de pronósticos estadísticos que permitan prever eventos de crecientes extremas en el río Aburrá-Medellín y sus afluentes

Criterios estadísticos de evaluación

En esta sección se mencionan algunos estadísticos para evaluar el desempeño de las simulaciones hidrológicas. A continuación se presenta una explicación de los términos empleados en el desarrollo de esta subactividad.

- Kling-Gupta Efficiency (KGE) y Nash-Sut cliffe Efficiency (NSE): Ambos criterios estiman la eficiencia a partir de la sumatoria de las diferencias al cuadrado de los valores observados y simulados. Se diferencian principalmente en que el KGE además tiene en cuenta la correlación entre las series evaluadas. Ambos criterios presentan valores de 0 a 1, valores cercanos a 0 indican simulaciones deficientes y cercanos a 1 indican simulaciones ideales. Para efectos de este informe, y teniendo en cuenta las propuestas encontradas en la literatura (Moriasi et al. (2015), Cape York (2014), Chiew and McMahon (1993)), se considera la siguiente escala: (i) valores menores a 0.3: simulación deficiente, (ii) valores entre 0.3 y 0.5: simulación aceptable, (iii) valores mayores a 0.5: simulación satisfactoria.
- Coeficiente de determinación (R^2): Estima la proporción de la variación en una variable dependiente que es predecible a partir de una variable independiente. Presenta valores de 0 a 1, valores cercanos a 0 indican independencia entre el comportamiento de las variables, por el contrario, valores cercanos a 1 indican fuerte relación entre la variables.
- Sesgo porcentual (PBIAS): Estima la diferencia entre la tendencia promedio de los valores simulados y observados, permite la identificación de una subestimación (valores negativos) o sobreestimación (valores positivos), con un valor óptimo entre $\pm 25\,\%$ siendo 0 el ideal, determinado por la comunidad científica.
- Diferencia porcentual del nivel máximo (DNmax): Estima la diferencia entre el nivel máximo observado y el simulado en un evento. Con un valor aceptable entre $\pm 15\,\%$ siendo 0 el ideal.
- Diferencia del tiempo al pico (DTmax): Estima la diferencia entre la hora en el que ocurrió el nivel máximo observado y el simulado en un evento. Con un valor aceptable de entre ± 0.5 horas siendo 0 el ideal.
- Exactitud o accurracy: El número de eventos clasificados correctamente de todos los eventos presentes en el conjunto de datos. Se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$accuracy = \frac{TP + TN}{FP + FN + TP + TN}$$

  donde TP: Verdaderos Positivos, TN: Verdaderos negativos, FP: Flasos Positivos, TN: Verdaderos negativos.
- Precisión: es la medida de los verdaderos positivos sobre el número total de positivos predichos por su modelo. La fórmula de precisión se puede escribir como:

$$precision = \frac{TP}{FP + TP}$$

  donde TP: Verdaderos Positivos, FP: Falsos Positivos

Parte I: Modelación hidrológica en el Valle de Aburrá

En esta sección se presentan las aplicaciones que se desarrollaron con los modelos hidrológicos *SAC-SMA, SWAT y TETIS* para la cuenca del río Aburrá-Medellín y sus principales afluentes, durante la vigencia del CCT 016 de 2024. Para la implementación de los modelos se emplearon los registros históricos de la red de nivel, pluviómetros, el radar meteorológico del proyecto SIATA, así como algunos registros de velocidad superficial, que de manera conjunta con los aforos líquidos, permiten la construcción de curvas de estimación de caudales. Además se utilizó información espacial para variables como la evapotranspiración, texturas del suelo, coberturas del suelo, entre otras.

La estrategia de modelación de esta actividad, consistió en la implementación de diversos modelos hidrológicos para abordar la variedad de cuencas y subcuencas en el Valle de Aburrá. Las resoluciones temporales de simulación son de 15 minutos, 1 hora y 1 día. En la Figura 104 y Figura 105 se presenta un resumen del coeficiente de eficiencia KGE obtenido con cada modelo para las resoluciones temporales de 15 minutos y 1 hora respectivamente.

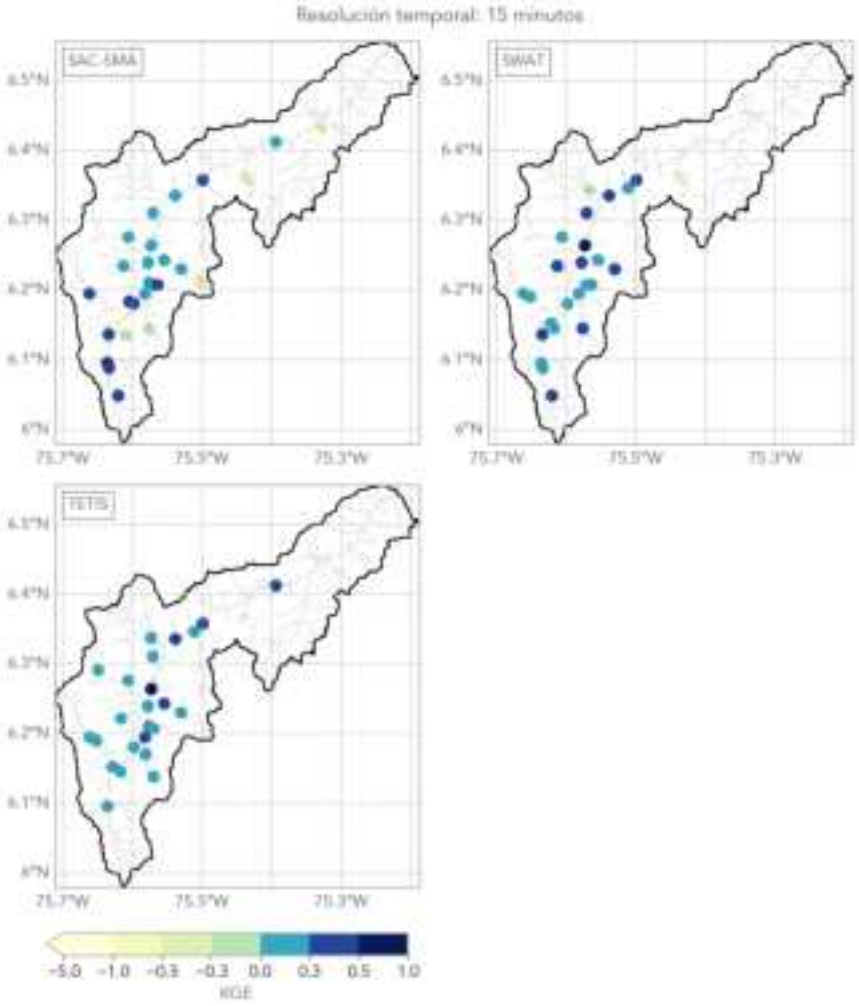


Figura 104: Distribución espacial de los valores de KGE obtenidos en las simulaciones realizadas en una resolución temporal de 15 minutos para cada modelo.

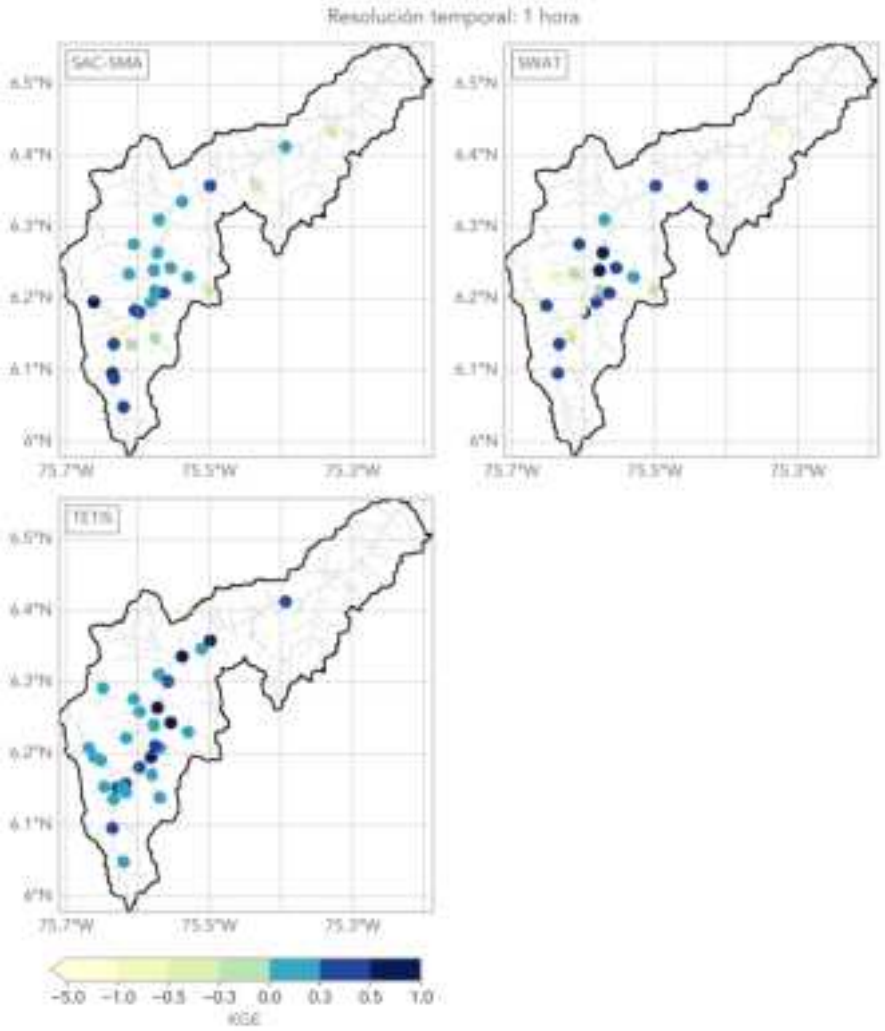


Figura 105: Distribución espacial de los valores de KGE obtenidos en las simulaciones realizadas en una resolución temporal de 1 hora para cada modelo

Durante el desarrollo de la actividad se realizaron algunas aplicaciones que surgieron a partir de la implementación de los modelos y sus adecuados rendimientos. Se destacan las aplicaciones relacionadas con la recarga de acuíferos, pronóstico para la ocurrencia de inundaciones y simulación de captaciones o puntos de abastecimiento de agua. A continuación se presentan las mejoras y aplicaciones que se realizaron durante esta vigencia para cada modelo implementado.

Modelo hidrológico SWAT

SWAT es un modelo hidrológico semi-distribuido que conceptualiza la cuenca en unidades hidrológicas de acuerdo a características de pendiente del terreno, cobertura y tipo de suelo. El modelo hidrológico requiere como información de entrada precipitación diaria o sub-diaria, temperaturas máximas y mínimas diarias, mapa de cobertura vegetal, mapa de tipo de suelos y el modelo digital de elevación de la cuenca.

Con el fin de profundizar en las ventajas derivadas del uso de este modelo basado en la física de los

procesos hidrológicos, se realizó la comparación de las variaciones temporales del contenido de agua en el suelo para explorar los comportamientos hidrológicos de las cuencas. Se analizó el flujo superficial, subsuperficial y base para diferentes eventos de lluvia. Además se realizó la caracterización de la respuesta del flujo subsuperficial para algunas de las sub-cuencas de estudio.

En particular, el modelo SWAT se utilizó para la representación de la humedad del suelo en el Valle de Aburrá. En la Figura 106, se muestra el ciclo multianual de humedad en el suelo para el mes de diciembre tomado como ejemplo, en donde se observa un patrón bimodal, es decir dos periodos con mayor cantidad de agua en el suelo. Los valores mas bajos de humedad se observan en el centro del Valle de Aburrá, en donde se concentra la cobertura urbana, por el contrario, en la parte norte del Valle de Aburrá, es donde se encuentran valores mas altos de humedad en el suelo debido a las condiciones de menor cobertura urbana y suelos permeables.

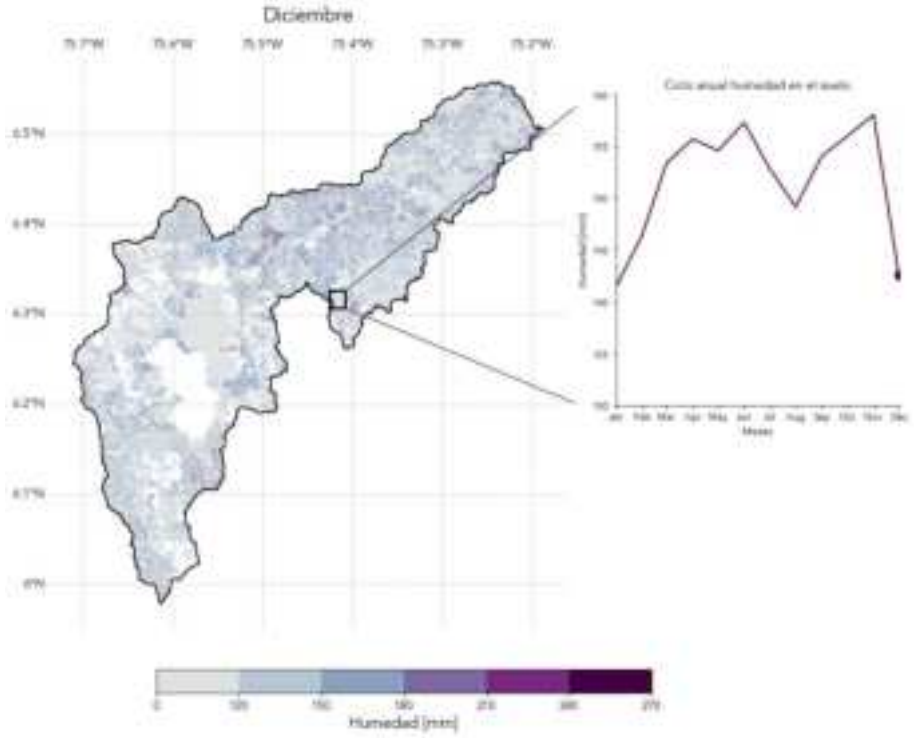


Figura 106: Mapa de humedad de suelo para el mes de diciembre (multianual) y ciclo anual calculado con resultados del modelo hidrológico SWAT entre 2014 y 2022.

Se implementó el pronóstico de caudales con SWAT usando información del modelo meteorológico WRF (Weather Research and Forecasting), implementado por el equipo de Meteorología del proyecto SIATA, por tanto se realizó el pre-procesamiento de la información, el montaje y algoritmos necesarios para la ejecución y una matriz de pronóstico para su visualización. Con esta implementación se logró que el modelo SWAT funcione de manera operacional y con un pronóstico de caudales a partir de la información de extrapolación de radar y con los resultados del modelo WRF.

A partir de esta información se desarrollaron los algoritmos necesarios para la aplicación del código de simulación de datos conocido como *Ensemble Kalman filter (EnKF)* con el fin de mejorar las simulaciones realizadas con SWAT en el Valle de Aburrá de manera operacional. Este algoritmo permite ajustar y corregir las simulaciones del modelo en tiempo real o en una serie de tiempo específica, utilizando datos

observados, para ofrecer una representación más precisa y confiable de la realidad. En La Figura 107 se presenta un ejemplo de los resultados obtenidos al implementar el algoritmo EnKF. Se concluye que las simulaciones pasan de ser aceptables o deficientes a satisfactorias con la implementación del algoritmo de asimilación de datos.

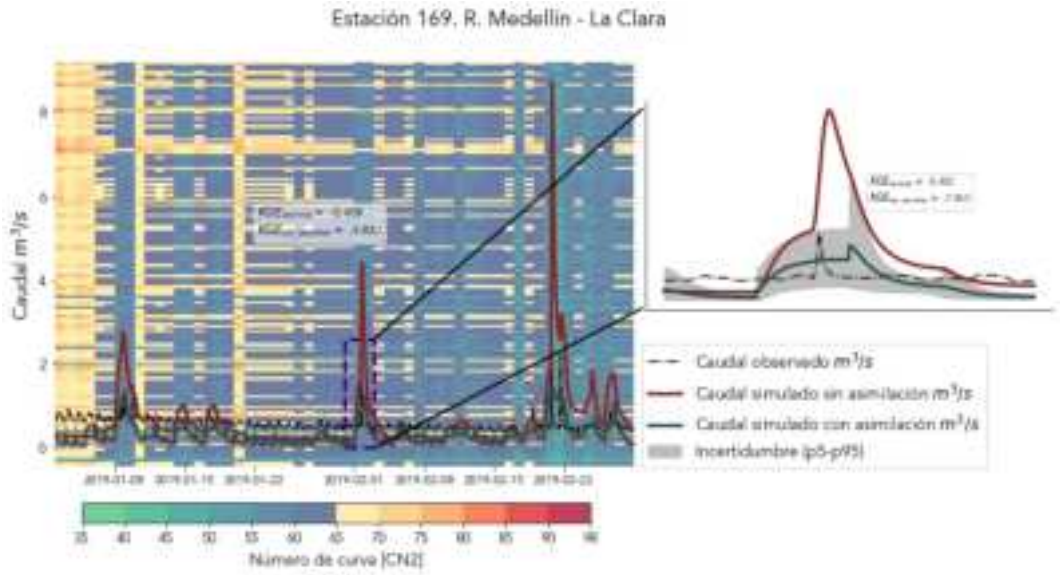


Figura 107: Aplicación Ensemble Kalman Filter (EnKF) con el modelo hidrológico SWAT para la estación 169. R. Medellín-La Clara a escala 15 minutos.

Por último, se realizó la aplicación del modelo SWAT con una resolución temporal diaria en la parte alta de las cuencas de la quebrada Santa Elena y Doña María, específicamente en los puntos en donde se ubican fuentes de abastecimiento de agua o acueductos veredales y que no se encuentran instrumentados. Estos resultados se compararon con los obtenidos por el modelo SAC-SMA y por el método de relación de áreas usando información de las subcuencas que se encuentran instrumentadas.

Modelo hidrológico SAC-SMA

El Sacramento (SAC-SMA) es un modelo conceptual y agregado que conceptualiza la cuenca como una unidad hidrográfica con características homogéneas, el modelo representa un intento de parametrizar las condiciones de la humedad del suelo. El modelo SAC-SMA requiere como información de entrada el área de la cuenca, la precipitación y la evapotranspiración potencial promedio para la cuenca. En este caso la información de lluvia se derivó del radar meteorológico y la evapotranspiración del producto MODIS (MOD16A2). Con el modelo SAC-SMA se realizaron las siguientes aplicaciones y adelantos de investigación:

- Con el fin de profundizar en las ventajas derivadas del uso de este modelo basado en la física, se realizó la comparación de las variaciones temporales del contenido de agua en el suelo para explorar los comportamientos hidrológicos de las cuencas. Se analizó el flujo superficial, subsuperficial y base para diferentes eventos de lluvia. Además se realizó la caracterización de la respuesta del flujo subsuperficial para algunas de las subcuencas de estudio.
- Se realizó la caracterización del flujo base con el modelo SAC-SMA. En la Figura 108 se presenta el flujo base promedio mensual para loes meses de febrero y abril, tomados como ejemplo, simulado

por el modelo SAC-SMA y la información relacionada con los acueductos veredales y captaciones para el abastecimiento de agua. Esto proporciona una aproximación a las condiciones actuales del flujo base en las subcuencas en el Valle de Aburrá y permite conocer cuáles subcuencas presentan cierta vulnerabilidad para sustentar los caudales superficiales.

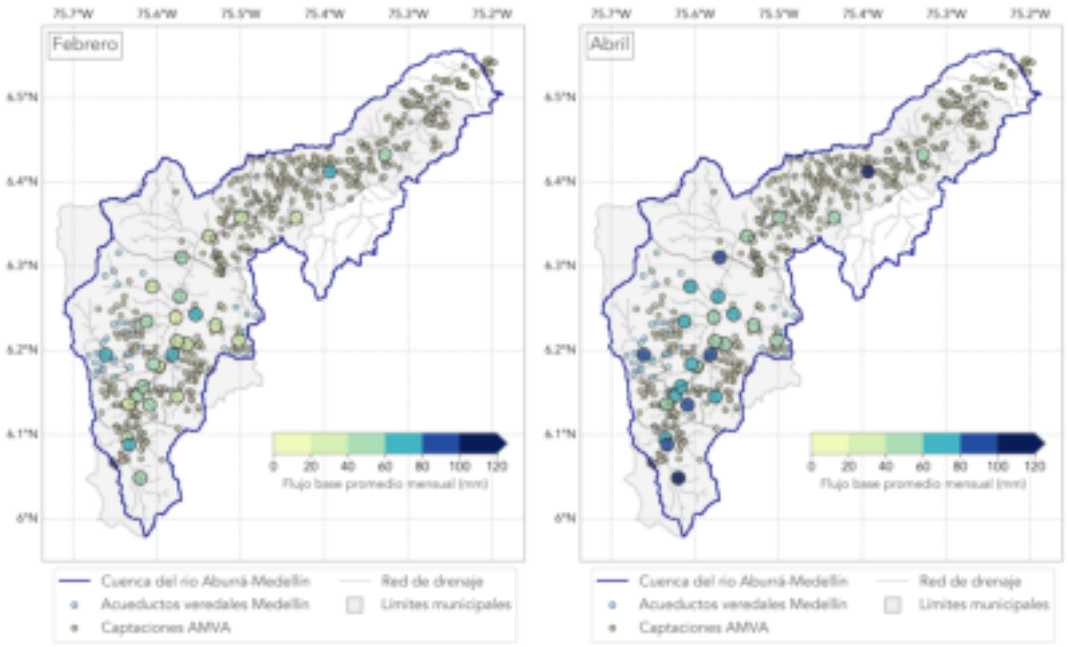


Figura 108: Flujo base promedio mensual simulado con SAC-SMA para los meses de febrero y abril. También se muestra la ubicación de captaciones y acueductos veredales dentro del Área Metopolitana del Valle de Aburrá.

- Se implementó el pronóstico de caudales con SAC-SMA usando información del modelo WRF implementado por el equipo de meteorología por tanto se realizó el pre-procesamiento de la información, el montaje y algoritmos necesarios para la ejecución y una matriz de pronóstico para su visualización.
- Se realizó la aplicación del modelo SAC-SMA en la parte alta de la cuenca de las quebradas Santa Elena y Doña María, específicamente en los puntos en donde se ubican fuentes de abastecimiento de agua o acueductos veredales y que no se encuentran instrumentados. Se simularon caudales diarios en estos puntos y se calculó el índice *Standardized Streamflow Index (SSI)* para cuantificar e identificar las sequías basadas en la información caudal (Figura 109). Igualmente se calcularon anomalías con los caudales simulados a escala mensual con el fin de conocer y dar una aproximación a las condiciones de riesgo para el abastecimiento en estos puntos de captación.

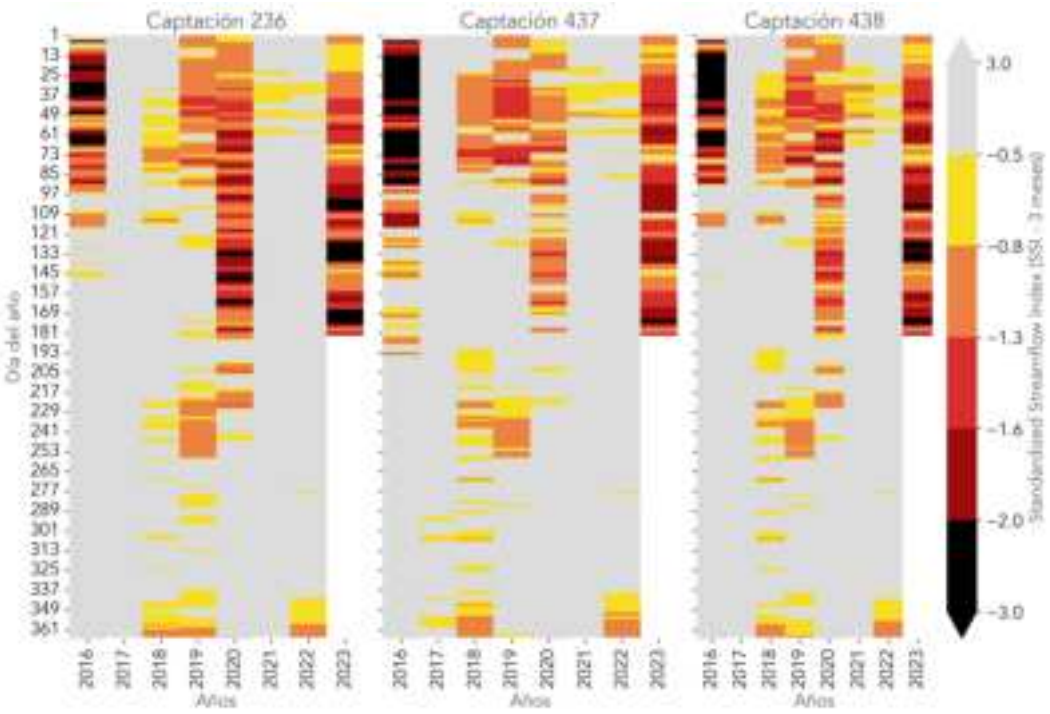


Figura 109: Cálculo del índice *Standardized Streamflow Index (SSI)* para 3 captaciones ubicadas en la quebrada Santa Elena.

Modelo hidrológico TETIS

El Modelo TETIS es un modelo de simulación hidrológica y del ciclo de sedimentos de tipo conceptual, distribuido en el espacio mediante una subdivisión de la cuenca en celdas regulares con sus respectivos parámetros. La información de entrada requerida para la modelación, se compone de mapas con información propia a cada celda respecto a sus parámetros y variables de estado (elevación, pendiente, capacidad de almacenamiento, conductividad hidráulica saturada, entre otros) y a ficheros de funcionamiento que contienen la información hidrometeorológica necesaria a modelar (precipitación, caudal, factores correctores, entre otros).

Durante la vigencia CCT 016 de 2024 se realización diferentes modificaciones y/o actualizaciones en el modelo TETIS que se resumen a continuación:

- Se realizó la actualización de los mapas de suelo empleados por el modelo a partir de la base de datos geoespacial del proyecto POMCA, 2018. Se emplearon las capas con resolución espacial de 10 m x 10 m correspondientes a: Tipos de Suelos, Coberturas y Usos del Suelo, Unidades Geológicas Superficiales, Unidades Geomorfológicas y se procesó la información aplicando los procedimientos de trabajos anteriores como los propuestos por Puricelli (2003) y Montoya (2008) (Figura 110).

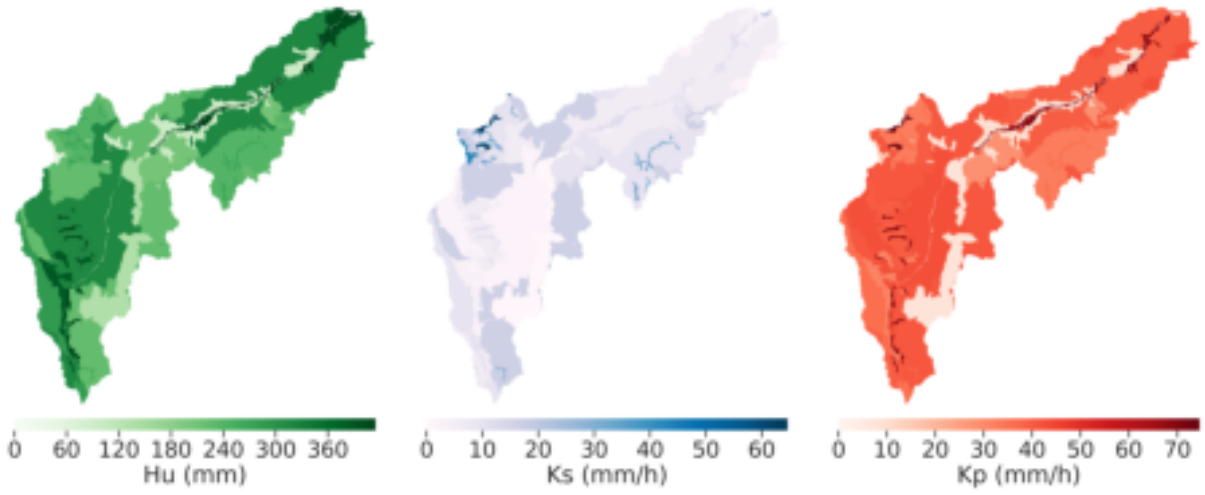


Figura 110: Mapa procesado de a) Hu: Almacenamiento estático b) Ks: Conductividad hidráulica saturada suelo c) Kp: Conductividad hidráulica saturada subsuelo.

- Se llevó a cabo un análisis de sensibilidad para las variables de estado utilizando el módulo de calibración automática del modelo TETIS. Además, se evaluó el desempeño del modelo TETIS a escala de evento como se muestra de ejemplo en la Figura 111 para los tres eventos más representativos, desde su instalación, en las estaciones 99. R. Medellín - Aula Ambiental y 93. R. Medellín - Puente 33.

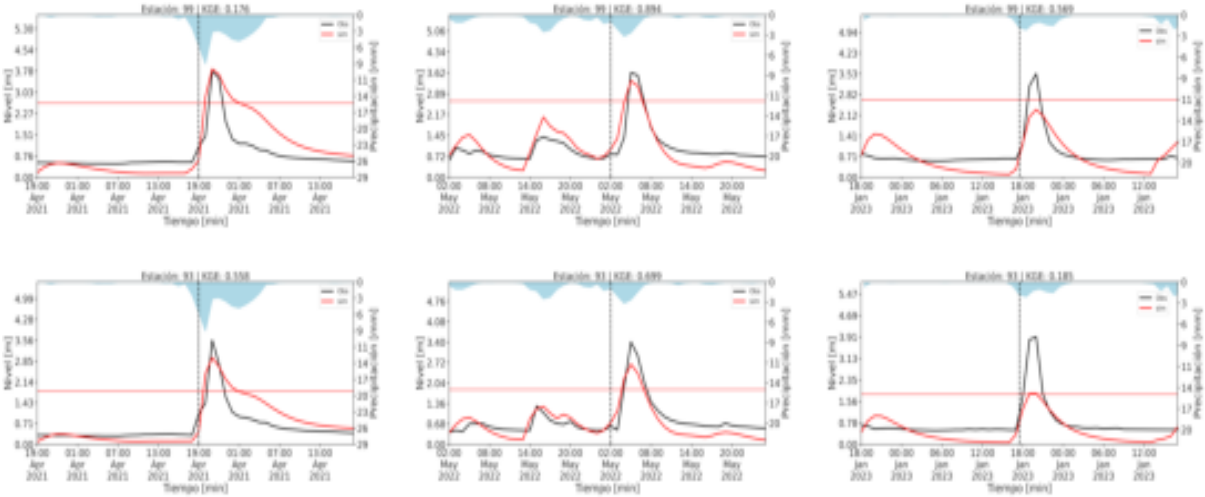


Figura 111: Resultados de las simulaciones de los eventos ocurridos los días 2021-04-05, 2022-05-18 y 2023-01-17 en las estaciones de nivel 99. R. Medellín - Aula Ambiental y 93. R. Medellín - Puente 33.

- Se implementaron los algoritmos y cambios necesarios para la ejecución operacional del modelo TETIS. Esto incluyó el aumento del tamaño de celda de 10 metros a 120 metros, con el fin de reducir y optimizar el tiempo computacional de simulación considerando mínimas afectaciones en la respuesta hidrológica de la cuenca.

- Se calcularon diferentes métricas y gráficas para la evaluación del rendimiento del modelo TETIS en las cuencas calibradas. Además, se realizó una comparación entre las curvas de duración para los caudales simulados y observados en las subcuencas de estudio. En la Figura 112 se presentan las curvas de duración correspondientes a las estaciones con los mayores valores del coeficiente de eficiencia KGE, para resoluciones temporales de 15 minutos y 1 hora, respectivamente.

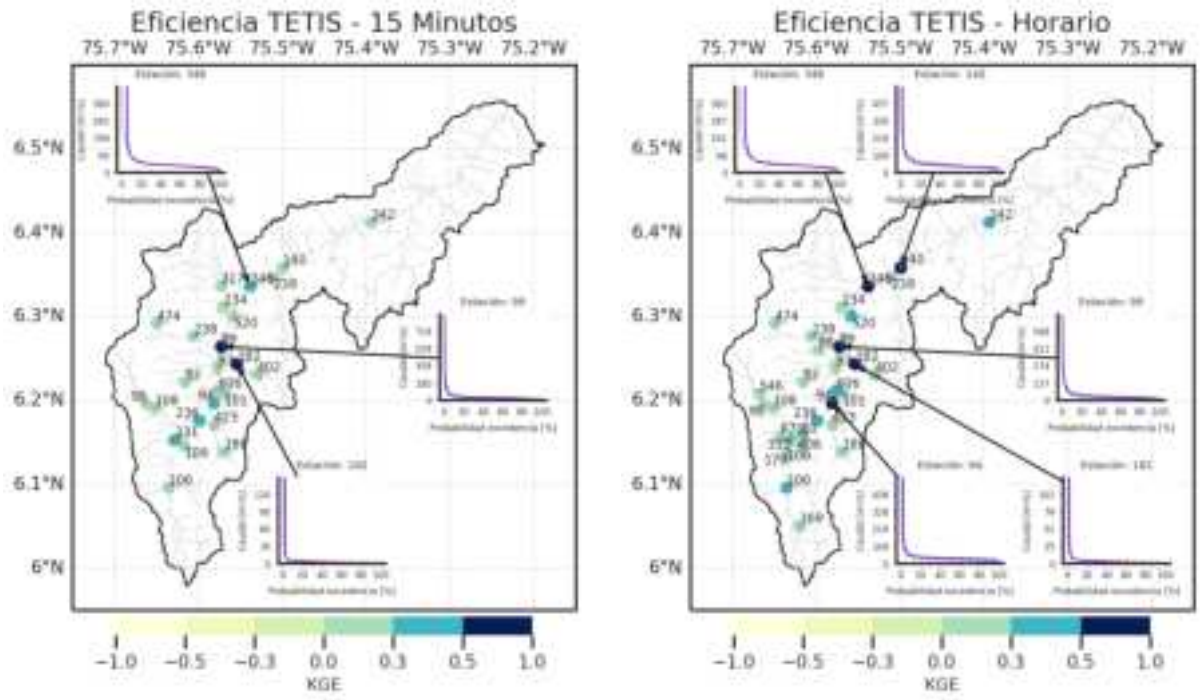


Figura 112: Distribución espacial de los valores de KGE obtenidos para las simulaciones con el modelo TETIS en dos resoluciones temporales; 15 minutos (izquierda) y 1 hora (derecha). Curvas de duración de caudal (azul: observado, rojo: simulado)

- Se obtuvo mapa de recarga de acuífero como resultado de uno de los tanques en la modelación. La simulación fue realizada entre los años 2017 y 2024.

Parte II: Pronóstico de nivel y caudal a partir de lluvia de WRF

Introducción

En el desarrollo de las actividades de simulación hidrológica del proyecto SIATA de la vigencia CCT 016 de 2024, se exploraron cuatro modelos: SHIA y TETIS (distribuidos), SWAT (semi-distribuido) y SAC-SMA (agregado). Las simulaciones se implementaron en concordancia con el monitoreo hidrometeorológico en la región, que incluye el monitoreo de lluvia con pluviómetros y radar, además del monitoreo de caudal por medio de las redes de nivel, velocidad superficial y la realización de aforos líquidos. Por lo tanto, los modelos mencionados han sido aplicados en algunas cuencas del Valle de Aburrá en donde la información histórica ha permitido obtener calibraciones que permiten obtener simulaciones con rendimiento satisfactorio.

Con los resultados obtenidos previamente se logró caracterizar comportamientos hidrológicos de las cuencas para distintas condiciones climáticas, además de la construcción de ciclos anuales, ciclos diurnos y curvas de duración para el análisis de caudales extremos. Una vez consolidadas las simulaciones con registros históricos, se planteó como objetivo de esta parte la aplicación de los modelos para generar pronósticos hidrológicos a corto plazo.

Los avances en el pronóstico hidrológico se encaminaron en explorar y proponer estrategias de acoplamiento entre modelos hidrológicos y algoritmos de asimilación de datos, destacando la importancia de esta integración para el avance de la gestión del riesgo hidrológico en el Valle de Aburrá.

Metodología

Para lograr este objetivo, se realizó un piloto de pronóstico de caudales con los modelos hidrológicos SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting Model) y SWAT (Soil and Water Assessment Tool) usando como información de entrada la lluvia del pronóstico del modelo WRF (Weather Research and Forecasting) implementado de manera operativa por el equipo de Meteorología del proyecto SIATA.

Esta actividad incluyó el pre-procesamiento de la información del pronóstico de lluvia de WRF, el montaje y algoritmos necesarios para la ejecución. Además del ensamble de los resultados de los dos modelos hidrológicos junto con un algoritmo de asimilación de datos llamado *Ensemble Kalman Filter* para el ajuste de las simulaciones. Este enfoque no sólo permite mejorar la precisión de las simulaciones, sino que también ajusta los modelos a las condiciones específicas del Valle de Aburrá, fortaleciendo así la capacidad de anticipación y gestión de eventos hidrológicos extremos en la región.

Este producto proporciona una visión de las condiciones hidrológicas del río Aburrá-Medellín y sus principales quebradas afluentes, ofreciendo una valiosa herramienta para la toma de decisiones y la gestión anticipada de situaciones de riesgo. Para el pronóstico hidrológico, los modelos operan en intervalos de 15 minutos en tiempo real, considerando el tiempo de calentamiento necesario para cada modelo. Simultáneamente, el algoritmo de asimilación de datos utiliza los registros de nivel del día anterior simulando (N) veces el caudal mediante los módulos diarios respectivos de cada modelo. La información recopilada durante el análisis de asimilación de datos se emplea directamente para corregir las simulaciones sub-diarias de los modelos.

Resultados

Al implementar esta estrategia se obtuvieron simulaciones de caudal en la misma ventana de tiempo en que se generan los pronósticos de lluvia, generalmente para cinco días posteriores a la ejecución. Considerando que las simulaciones son realizadas N cantidad de veces, existe una incertidumbre que puede ser entendida como una franja de caudales posibles, tal y como se presenta en la Figura 113. En donde el tiempo cero (inicio del pronostico) se encuentra marcado con la linea punteada, de allí hacia atrás se tiene la simulación con registros históricos, mientras que los datos hacia adelante corresponden a los pronósticos de caudal empleando el pronóstico de lluvia suministrado por el modelo WRF.

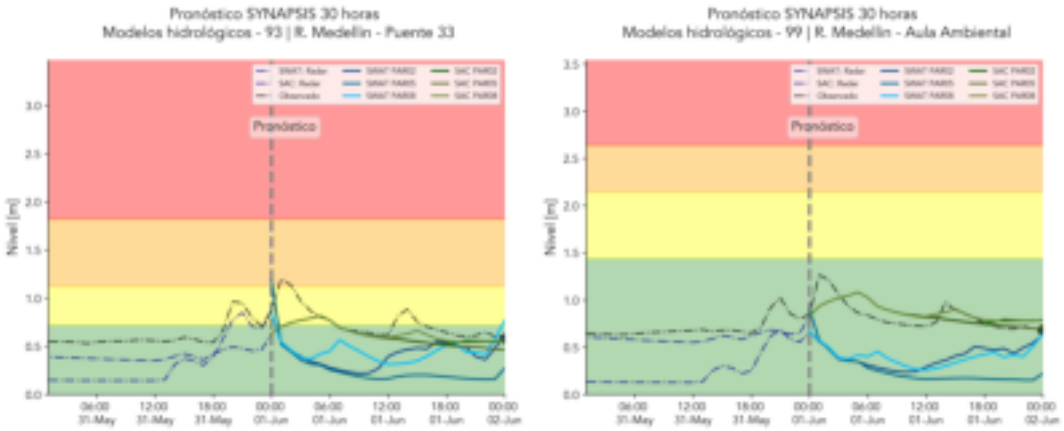


Figura 113: Características de la hidrografa y propiedades geormofológicas de acuerdo a las categorías de respuesta lenta, intermedia

Con la intención de que los resultados obtenidos con el pronóstico pudieran convertirse en herramienta operativa, se propuso una matriz en donde los niveles pronosticados son llevados a las categorías de riesgo estandarizadas en el proyecto SIATA (verde, amarillo, naranja y rojo), ver un ejemplo en Figura 114, en donde se emplean registros del evento ocurrido el 5 de abril de 2021 como ejemplo. La matriz esta dividida en registros de la última hora a escala de cinco minutos (izquierda) y en pronóstico para la próxima hora en escala de 15 minutos.

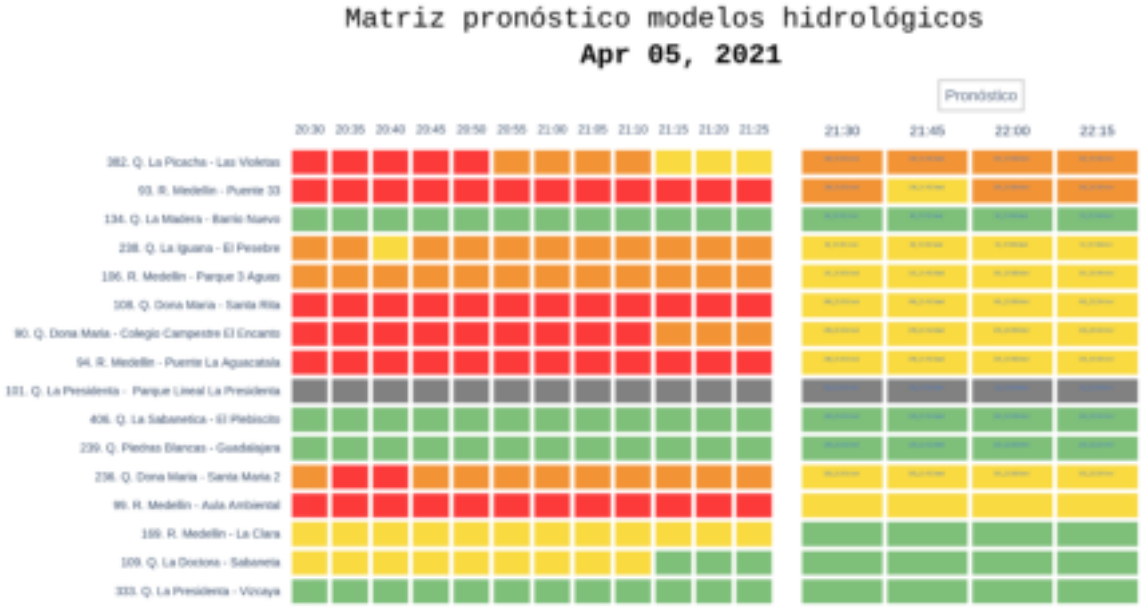


Figura 114: Matriz con niveles de riesgo antecedentes al la hora de pronostico (izquierda), y niveles de riesgo pronosticados para la proxima hora (derecha).

Conclusiones

En esta investigación se implementó una metodología que involucra el ensamble de modelos hidrológicos con estructuras diferentes para el pronóstico de inundaciones, así como una visualización simple, rápida y operativa que proporciona información oportuna para los gestores del riesgo y comunidades. El ensamble propuesto involucró el ajuste de la incertidumbre de las simulaciones con El Filtro Kalman Conjunto el cual muestra un aumento en los coeficientes de eficiencia y por tanto un diagnóstico rápido y confiable de las inundaciones para la alerta temprana.

Parte III: Conexión entre hidrógrafas de creciente y parámetros geomorfológicos en cuencas del Valle de Aburrá

Introducción

Los parámetros geomorfológicos, la variabilidad de las precipitaciones y la cobertura del suelo gobiernan los patrones espacio-temporales de las inundaciones. Este comportamiento diferencial y complejo puede verse reflejado en el hidrograma de creciente, el cual contiene información hidrológica como la magnitud, el tiempo de respuesta y la tasa de la recesión de la creciente. Algunos estudios han centrado sus esfuerzos en la caracterización de inundaciones a partir de hidrogramas con el fin de identificar tipos de crecientes con características similares que ayuden a proporcionar información de apoyo para la gestión de inundaciones (Zhai et al. (2021) Brunner et al. (2018)).

En cuencas andinas, el hidrograma de crecientes se encuentra principalmente influenciado por propiedades geomorfológicas como la pendiente, y propiedades físicas del suelo, se consideran un criterio más importante que las características climáticas de la región (Carrillo-Soto et al. (2019), Crespo et al. (2011), Muñoz et al. (2016)). Esto indica que una mejor comprensión de la dependencia de los procesos hidrológicos con los parámetros geomorfológicos proporciona información para mejorar la modelación basada en la física y la evaluación del riesgo de inundaciones repentinas en las cuencas hidrográficas en la región.

La cuenca del río Aburrá-Medellín, sujeta a inundaciones recurrentes, se caracteriza por una topografía compleja, cambios en las coberturas del suelo y alta variabilidad climática, además de presencia de poblaciones en llanuras aluviales. El presente estudio tiene como objetivo caracterizar los hidrogramas de creciente de la cuenca del río Aburrá-Medellín y sus afluentes, asociando características como el tiempo de máximo de la creciente, la tasa de crecimiento y recesión con las propiedades geomorfológicas de la cuenca. Este estudio resalta la importancia del análisis de los parámetros hidrogeomorfológicos y la planificación del uso del suelo en la prevención del riesgo de inundaciones, lo cual es un reto para la región. Esta investigación se desarrolla como parte del trabajo que hace el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) con el fin de generar conocimiento sobre la respuesta hidrológica de las cuencas y proporcionar información necesaria para la gestión del riesgo.

Metodología

Área de estudio

La cuenca del río Aburrá-Medellín se ubica en la cordillera central de los andes con altitudes que varían desde los 1200 a 3100 msnm. Es una región altamente urbanizada con aproximadamente 4 millones de habitantes. La hidroclimatología de la cuenca sigue un régimen bimodal, como resultado del doble paso de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).

Para este trabajo se utilizó información histórica de las crecientes de 33 subcuencas a partir de los datos de la red de sensores de nivel del Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá (SIATA) (Figura 115) y (Figura 116). La información de lluvia se obtuvo a partir de la información del radar meteorológico operado por el SIATA, el cual permite obtener precipitación en intervalos de 5 minutos (Sepúlveda (2016)) con una resolución espacial de 128 m. Igualmente se utilizó la información de la red de pluviómetros de SIATA con disponibilidad de datos en intervalos de 1 minuto. La información espacial requerida para el cálculo de los parámetros geomorfológicos incluye un modelo de elevación digital (DEM) con resolución espacial de 12.5 X 12.5 metros de ALOS-PALSAR y el mapa de coberturas a partir de la metodología Corine Land Cover del IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

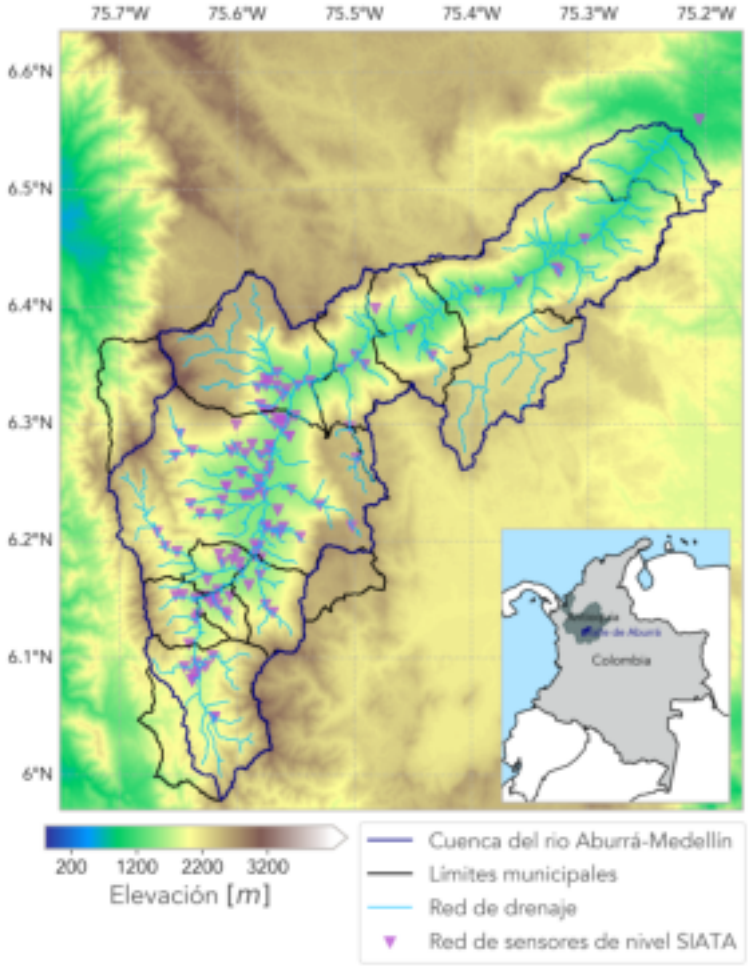


Figura 115: Ubicación de la cuenca del río Aburrá Medellín y los sensores de la red de nivel de SIATA.

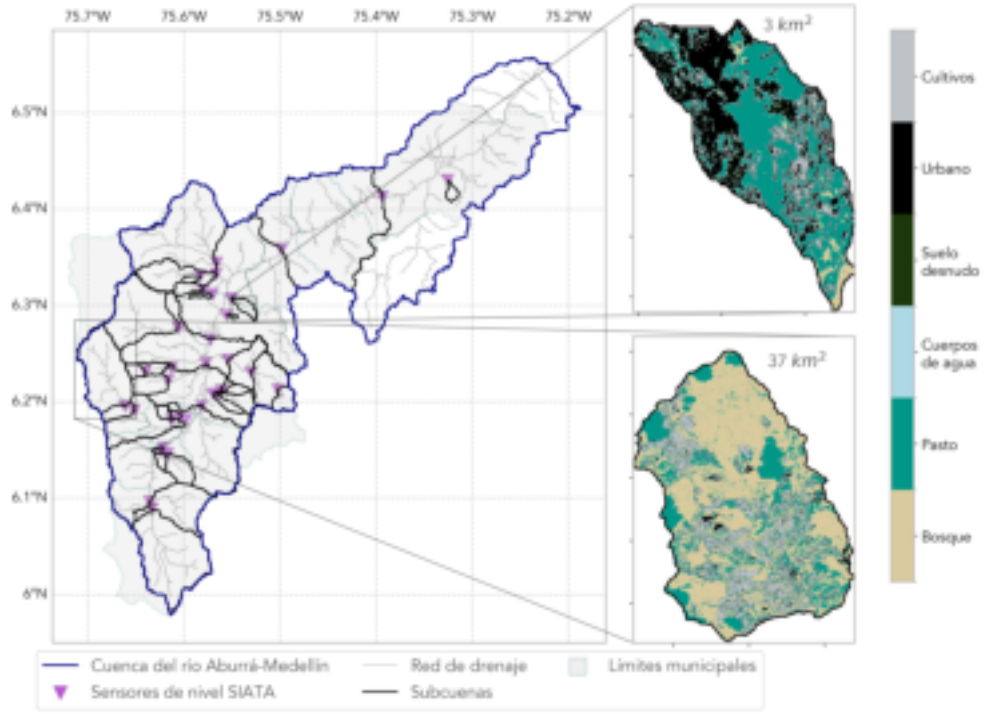


Figura 116: Subcuencas de estudio. Se indica la cobertura del suelo y el área de dos subcuencas diferenres

Selección de eventos

La determinación de los eventos de crecientes se realizó a partir del histórico de niveles de las 33 subcuencas. El umbral de selección de los eventos fue el nivel de riesgo naranja de cada cuenca hidrográfica, los cuales son determinados por el equipo de hidrología del SIATA e indican la profundidad del agua según la exposición de la población en las orillas del río o quebrada.

A partir de los eventos de creciente se analizó el evento de lluvia detonante y el hidrograma de creciente registrado por la estación de nivel. De acuerdo a la metodología empleada por Zhai et al. (2021) se identificaron diferentes métricas para la caracterización de la creciente: tiempo al pico o tiempo en el que se alcanza el nivel máximo, tiempo de retardo (Lg) denominado como la diferencia de tiempo entre el inicio o porcentaje de acumulado de lluvia hasta el tiempo al pico, la tasa de crecimiento de la creciente, la tasa de recesión de la creciente, el coeficiente de variación y la magnitud del nivel máximo (Tabla 12). En la Figura 117 se presenta el ejemplo del cálculo del tiempo de retardo o LagTime en un evento de creciente.

Tabla 12: Parámetros de calibración en el modelo SAC-SMA.

Parámetro	Unidad	Abreviación	Ecuación
Tiempo de retardo	Lg	minutos	$LagTime = T_{max} - T_{lluvia(20\,\%)}$ (7.9)
Tasa de crecimiento de la creciente	Tc	cm/horas	$TC = \frac{N_{max} - N_{inicial}}{T_{max} - T_{inicial}}$ (7.10)
Tasa de recesión de la creciente	Tr	cm/horas	$TR = \frac{N_{max} - N_{final}}{T_{max} - T_{final}}$ (7.11)
Coeficiente de variación	CVn	Adimensional	$CV_{hidrografa} = \frac{\sigma[N(t)]}{N_{promedio}}$ (7.12)
Intensidad	Inmax	cm/km^2	$I = \frac{N_{max}}{Area_{cuenca}}$ (7.13)



Figura 117: Ejemplo de un evento de creciente generado a partir de la curva de masa de lluvia (figura superior)

Las propiedades geomorfológicas que se determinaron para cada subcuenca fueron: el área (A), la pendiente media de la cuenca (Pm), pendiente media del cauce (Pc), densidad de drenaje (Dd), tiempos de concentración promedio entre varias metodologías (Tc), porcentaje de cobertura urbana (Im), el coeficiente de Gravelius (G) y el coeficiente de variación de las elevaciones del canal o cauce (CVeL). Este último fue calculado a partir del perfil de elevaciones del cauce principal para cada cuenca (Figura 118)

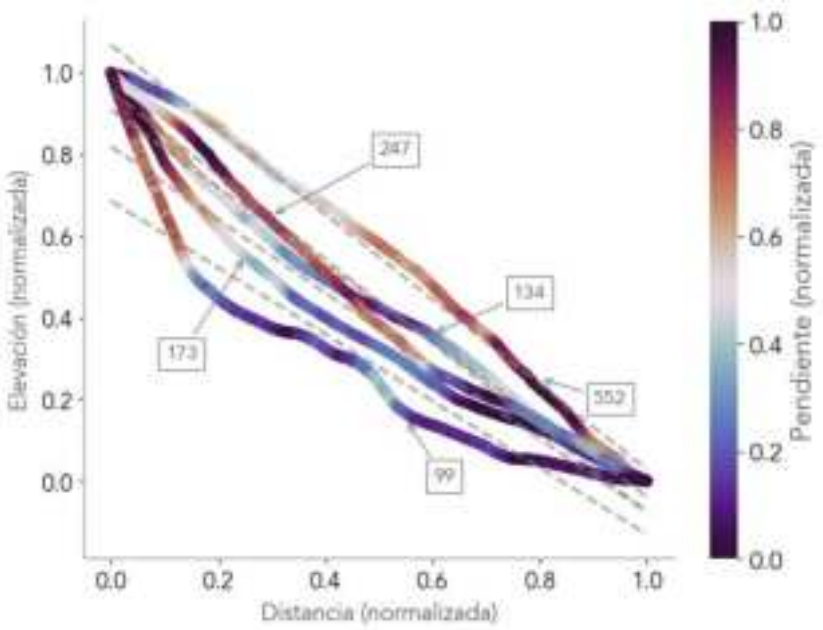


Figura 118: Perfil de elevación del cauce principal para varias subcuencas de estudio

Análisis estadístico

Se realizó un análisis de correlación de Spearman con el fin de encontrar las relaciones entre los valores promedio de las características del hidrograma y las propiedades geomorfológicas de las cuencas. La correlación se calcula de la siguiente manera:

$$Cs = \frac{Cov(rg_x, rg_y)}{\sigma rg_x \sigma rg_y} \tag{7.14}$$

donde X y Y son puntos de muestra (características de la hidrografa y propiedades geomorfológicas de las cuencas), $Cov(rg_x, rg_y)$ es la covarianza de las variables en rango, y $\sigma rg_x \sigma rg_y$ son las desviaciones estándar de las variables en rango. Los valores se encuentran entre -1 $\leq Cs \leq$ 1. Valores cercanos a -1 y 1 indican las correlaciones más fuertes.

Luego, se identificaron tipos representativos de crecientes (rápidas, intermedias y lentas) mediante un análisis de agrupamiento con el algoritmo no supervisado k-means, como se propone en Zhai et al. (2021) y Brunner et al. (2018). Este algoritmo permite agrupar observaciones similares al minimizar la distancia (generalmente euclidiana) entre cada dato y el centroide del grupo al que pertenece. En este caso, los datos de entrada para el análisis fueron los hidrogramas normalizados de todas las cuencas en el área de estudio, lo cual garantiza que las diferencias en escala no afecten el agrupamiento. La normalización permitió enfocar el análisis en la forma y dinámica relativa de las crecientes, más que en sus magnitudes absolutas.

La selección del número óptimo de clústeres se realizó considerando tanto criterios cuantitativos como cualitativos. En la Figura 119, se muestra la proporción de eventos y el índice de silueta promedio por clúster para valores de K entre 2 y 6. Se buscó un equilibrio entre una alta cohesión intra-cluster (reflejada por el índice de silueta) y una distribución relativamente balanceada de eventos entre clústeres. Con base en estos criterios y en la interpretabilidad hidrológica de los resultados, se seleccionó K=3 como

el número óptimo de grupos, ya que ofrecía una buena separación entre tipos de crecientes sin fragmentar excesivamente la muestra. Una vez determinado este valor, cada hidrograma fue asignado al clúster cuyo centroide minimizó el error cuadrático medio, permitiendo caracterizar patrones hidrológicos dominantes en la región.

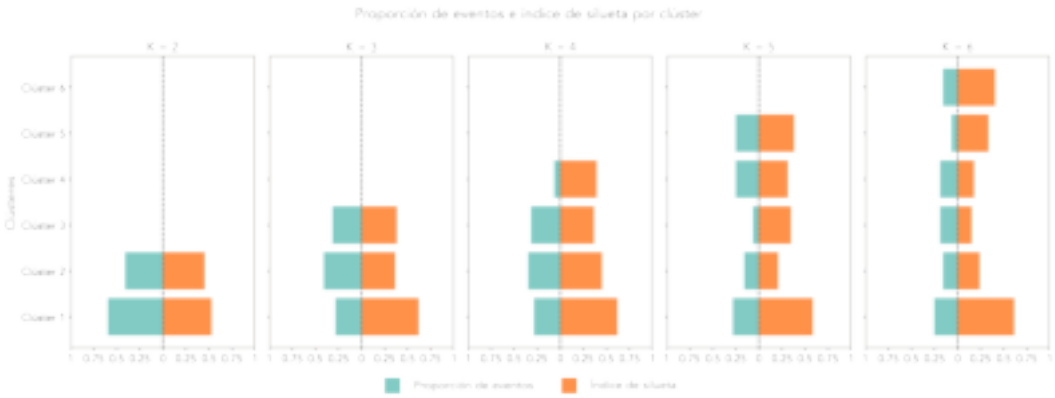


Figura 119: Evaluación del párametro K con el índice de silueta y proporción de eventos

Resultados

A partir de la información de los eventos de creciente se calculan las cinco características del hidrograma. En la Figura 120 se presenta la distribución de características del hidrograma como tasa de crecimiento y de recesión calculadas para los eventos de creciente de la cuenca de la quebrada Doña María (estación de nivel 108). Se evidencia que el 50 % de los eventos están entre una tasa de crecimiento de aproximadamente 8 y 15 cm/hora. Mientras que la tasa de recesión es mucho más lenta, en donde el 50 % de los eventos están entre 40 y 110 cm/hora. El tiempo de retardo o el tiempo después del 20 % acumulado desde el inicio de la lluvia es en promedio de 65 minutos. Este análisis se realizó para todas las cuencas de estudio, en la Tabla 13 se presenta un resumen del percentil 50 obtenido para cada característica del hidrograma.

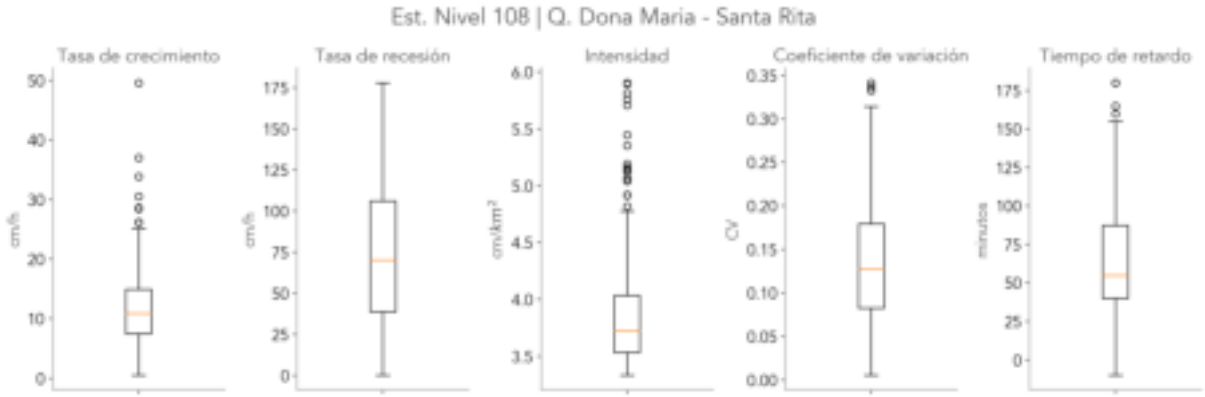


Figura 120: Distribución de las características de la creciente para la cuenca de la quebrada Doña María

Tabla 13: Percentil 50 de las características de la hidrografa obtenidas para cada estación

Estación	Tasa de crecimiento (cm/hora)	Tasa de recesión (cm/hora)	Intensidad (cm/km^2)	Coeficiente de variación	Tiempo de retardo (minutos)
134	25.88	-	142.34	0.48	25.0
265	30.44	156.37	63.51	0.33	0.0
406	31.58	-	56.13	0.94	15.0
344	25.22	-	117.62	1.07	15.0
316	13.76	61.61	9.5	0.21	85.0
333	11.45	-	19.42	0.21	25.0
92	16.45	151.52	15.91	0.29	45.0
404	18.97	95.15	22.15	0.61	60.0
150	19.12	-	33.01	0.48	25.0
247	0.64	1.7	25.98	0.01	25.0
552	11.75	50.04	56.85	0.57	45.0
402	7.07	38.54	3.62	0.23	95.0
101	22.25	-	18.79	0.33	25.0
109	19.25	116.72	18.2	0.54	50.0
108	10.89	70.31	3.73	0.13	55.0
106	11.15	42.56	1.23	0.23	70.0
140	37.65	90.5	0.56	0.25	140.0
173	25.92	-	58.31	0.56	25.0
236	19.13	124.54	2.73	0.34	90.0
238	10.7	40.64	2.91	0.22	90.0
182	9.6	-	2.83	0.14	35.0
128	13.8	69.04	1.8	0.21	97.5
124	21.89	58.98	2.57	0.43	120.0
382	22.11	-	22.6	0.69	45.0
483	33.84	93.5	19.25	0.44	40.0
90	14.28	88.58	4.23	0.21	58.75
93	13.15	39.15	0.36	0.23	70.0
94	25.65	106.94	0.79	0.28	65.0
99	35.64	113.5	0.53	0.52	95.0
290	19.56	-	128.15	0.34	20.0
158	20.44	-	239.63	1.09	20.0
342	23.94	48.56	0.67	0.13	155.0

Se identificó un tipo de hidrograma de creciente representativo mediante el análisis de los eventos para cada subcuenca. En la Figura 121 se presentan todos los eventos de creciente en azul claro y en azul oscuro el hidrograma de creciente representativo correspondiente al percentil 50. Se encontraron diferencias entre las formas de las hidrografas entre subcuencas como se evidencia para las cuenca la quebrada La Presidenta y la quebrada Doña María (Figura 121). Estas formas diferenciales de los hidrogramas de crecida contiene una gran cantidad de información hidrológica sobre los mecanismos de generación de inundaciones y refleja comportamientos complejos que combinan las características geomorfológicas de

las cuencas y la información meteorológica (Brunner et al. (2018), Zhai et al. (2021)).

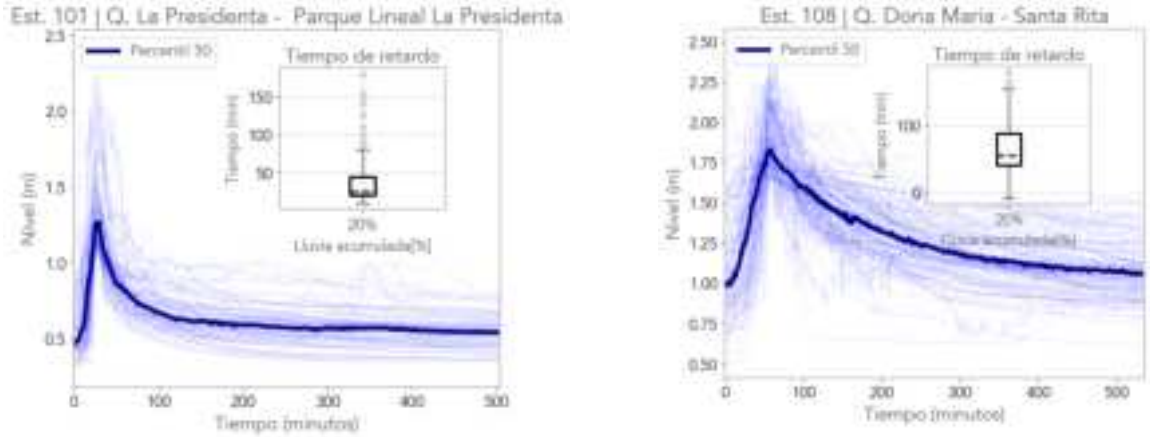


Figura 121: Hidrograma de crecientes y la distribución de los tiempos de retardo para un acumulado de lluvia de 20 % mediante un diagrama de caja y bigotes para considerar incertidumbre

Para comparar estos hidrogramas entre las subcuencas se determinó un hidrograma normalizado de crecida (Figura 122) en donde se evidencia la variabilidad en la respuesta hidrológica de las cuencas del Valle de Aburrá, con patrones que indican diferencias en las formas del hidrograma. Se observaron diferencias en los tiempos de retardo (LagTime) y en las formas de los hidrogramas de creciente. Se encontró que las hidrógrafas con tiempos de respuesta rápidos tienen formas similares, con tasas de crecimiento y recesión rápidas.

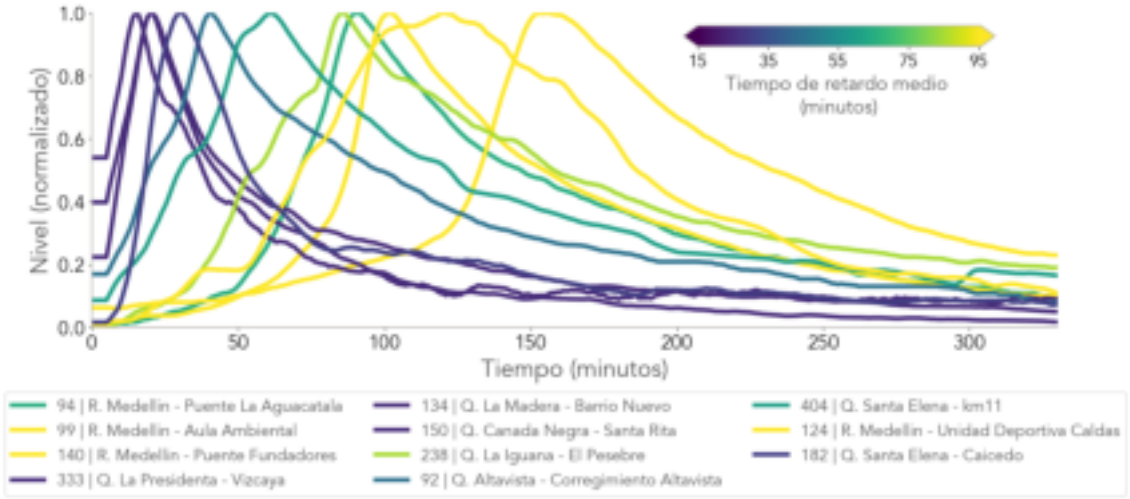


Figura 122: Hidrogramas normalizados para algunas de las subcuencas de estudio. Los colores morados indican un tiempo de retardo o de respuesta menor y los colores amarillos tiempos mayores.

Finalmente, las características del hidrograma calculadas se relacionaron con las propiedades geomorfológicas de las cuencas. En la Figura 123 se presentan las relaciones obtenidas entre cada unas propieda-

des geomorfológicas de las cuencas y el tiempo de retardo. Se evidencia que el tiempo de retardo o tiempo de respuesta de la cuenca al evento de lluvia tiene una correlación positiva estadísticamente significativa con el área de la cuenca (coeficiente de spearman igual a 0.87) y el tiempo de concentración (spearman igual a 0.86), por otro lado hay una correlación negativa con la densidad de drenaje (spearman igual a -0.65), la pendiente media del cauce (spearman igual a -0.64) y la cobertura impermeable (spearman igual a -0.44). Esto indica que las cuencas con tiempo de respuesta lento se relaciona con el aumento del área de la subcuenca, el tiempo de concentración y la densidad de drenaje, mientras que las cuencas con tiempo de respuesta rápido se relacionan con el aumento de la pendiente del cauce y el porcentaje de cobertura impermeable.

Se encontró que las cuencas con hidrógrafas más variables (CV hidrógrafa) son aquellas con mayor porcentaje de cobertura impermeable, menor área y menor tiempo de concentración. Además, las cuencas asociadas a mayor índice de intensidad son las que tienen mayor pendiente del cauce principal, área, tiempo de concentración y densidad de drenaje. La tasa de crecimiento de la hidrografa no se relacionó de manera significativa con ninguna de las propiedades geomorfológicas lo que puede indicar que esta característica pueda asociarse a la magnitud y variabilidad del evento de lluvia, mientras que la tasa de recesión de la hidrografa se relacionó con el aumento en el porcentaje de cobertura impermeable.

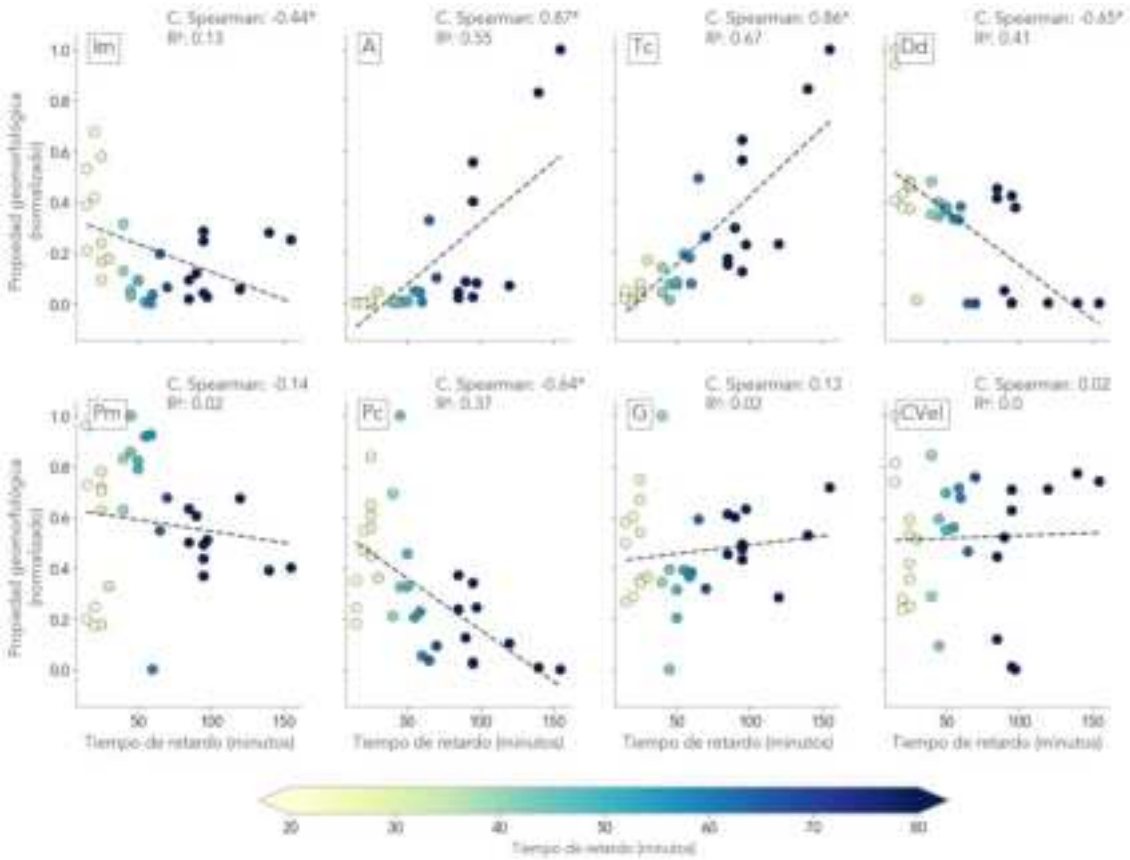


Figura 123: Relación entre el tiempo de retardo y las propiedades geomorfológicas de las cuencas. Los colores azules indican un tiempo de retardo mayor y los colores amarillos un tiempo de retardo menor. En la parte superior de cada gráfico se encuentra el coeficiente de correlación de Spearman (C. Spearman) y el coeficiente de determinación (R^2)

De acuerdo a los resultados obtenidos, se encontró que son tres parámetros los que dominan principalmente la respuesta hidrológica, y en general, las características de la hidrografa de las cuencas del Valle de Aburrá: cobertura impermeable, pendiente del cauce principal y al área de la cuenca.

El algoritmo k-means fue implementado utilizando tres categorías de agrupamiento como en Zhai et al. (2021) y Brunner et al. (2018) para las hidrografas normalizados de cada una de las cuencas. Se agruparon las hidrografas en tres categorías denominadas: rápidas, intermedias y lentas. En la Figura 124 se presenta el centroide o mediana de cada uno de los grupos obtenidos con el algoritmo k-means. Las cuencas con hidrográfas rápidas se caracterizan por tener tasas de crecimiento y recesión bastante pronunciadas. Las hidrografas intermedias, por lo general, también presentan tasas de creciente bastante rápidas, mientras que la tasa de recesión es mucho más lenta en comparación con las hidrografas rápidas. Por otro lado, las cuencas con hidrográfas lentas se caracterizaron por tasas de recesión y creciente alargados y lentos.

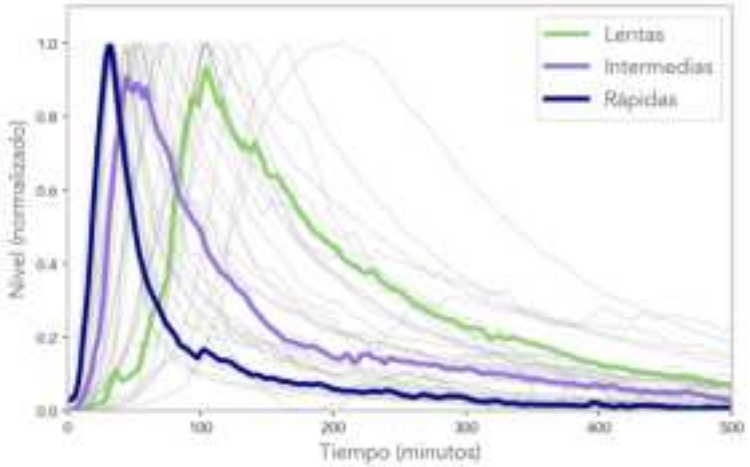


Figura 124: Tipos representativos de hidrografas en las cuencas de estudio. Las hidrografas de color gris claro corresponden al conjunto de datos de entrada para las cuencas de estudio. La linea verde, morada y azul oscuro corresponden a los centroides de cada uno de los grupos.

Además, existen diferencias en las características del hidrograma y las propiedades geomorfológicas entre los tres tipos de hidrografas. En cuanto a las propiedades geomorfológicas, en la (Figura 125) se evidencia que las cuencas con respuesta rápida tienen un área menor a los 15 km^2, pendientes del cauce principal superiores al 10 % y el porcentaje de cobertura impermeable es superior al 15 %. Mientras que las cuencas con respuesta lenta tienen áreas en un rango más variable, que puede superar los 200 km^2, pendientes del cauce menores al 10 % y un porcentaje de cobertura impermeable que no supera el 15 %. Las cuencas con respuesta intermedia tienen un comportamiento similar a las cuencas con respuesta lenta en el porcentaje de cobertura impermeable, sin embargo, la pendiente del cauce principal de las cuencas intermedias es mucho mayor que en las cuencas lentas.

Adicionalmente, se encontró que las cuencas de respuesta rápida tienen tiempos de respuesta (tiempo de retardo) de aproximadamente 25 minutos, mayor variabilidad de la hidrografa, tasas de recesión más rápidas con valores superiores a 20 cm/h y valores de intensidad mayores de 100 cm/km^2. Mientras que las cuencas de respuesta lenta tienen tiempos de retardo superiores a 60 minutos, tasas de recesión más lentas con valores que tienen una mediana de 16 cm/h, hidrografas menos variables y una intensidad con valores inferiores a los 10 cm/km^2 (Figura 125).

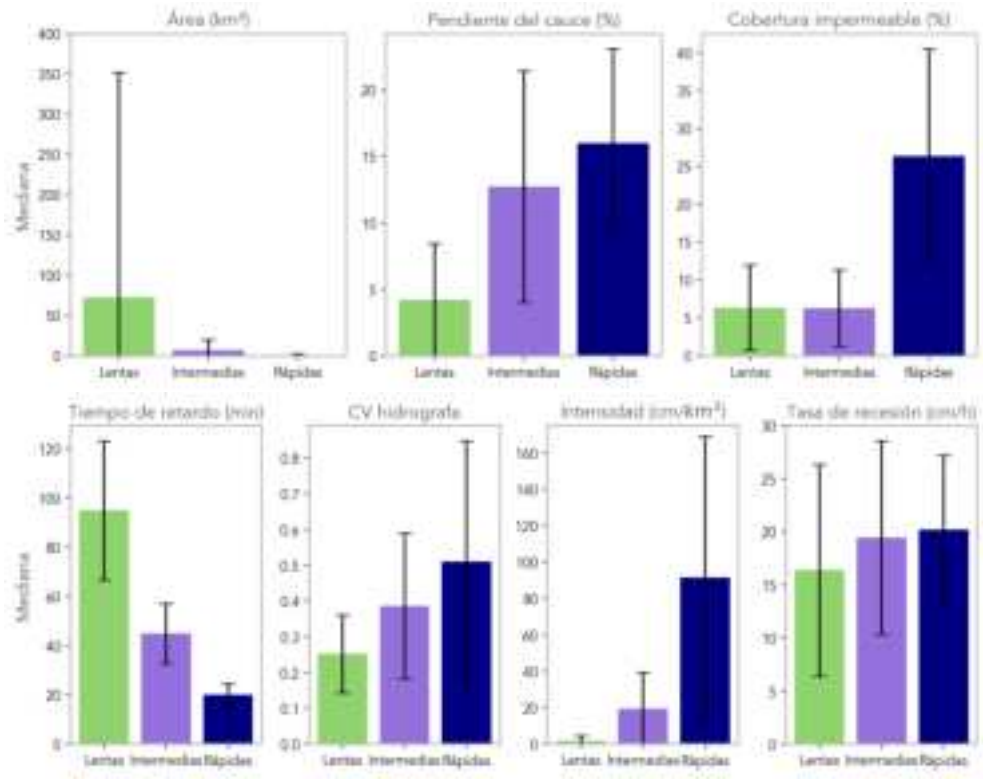


Figura 125: Características de la hidrografa y propiedades geormofológicas de acuerdo a las categorías de respuesta lenta, intermedia

Finalmente, en la Figura 126 se evidencia la distribución espacial de las cuencas categorizadas. Se observa que las cuencas de respuesta rápida son las más pequeñas en área y se ubican cerca de la mancha urbana. Las cuencas de respuesta lenta tienen una ubicación espacial más variable dentro del Valle de Aburrá con presencia en las laderas.



Figura 126: Distribución espacial de las cuencas categorizadas por respuesta lenta, intermedia y rápida.

WP1.2. Estudio/modelación de amenaza/riesgo

WP1.2.1. (Amenaza meteorológica) Seguimiento, caracterización y evaluación de fenómenos hidrometeorológicos

Las tareas que se desarrollan dentro de esta actividad están enfocadas a la generación y el análisis de la información proveniente de las redes internas y externas al proyecto, para una adecuada caracterización y gestión efectiva de aquellas amenazas de origen hidrometeorológico sobre la región metropolitana.

Parte I: Registros de ocurrencia de eventos

El monitoreo permanente de las condiciones hidrometeorológicas de los municipios del Valle de Aburrá y sus alrededores se consigna en los informes de eventos de precipitación, que se generan cuando se registran precipitaciones dentro del valle y se supera el umbral de 5 mm de precipitación acumulada en al menos una estación de la red pluviométrica. En estos informes se resume la formación y evolución de los sistemas que producen las precipitaciones, los valores máximos de intensidades y acumulados registrados por la red pluviométrica, la distribución geográfica de las precipitaciones a través del mapa de acumulados obtenido con la información del radar meteorológico, la ocurrencia de descargas eléctricas, y los aumentos significativos en el nivel del río y las quebradas monitoreadas por el proyecto SIATA. Es importante señalar que la duración del evento se define como el tiempo que transcurre entre la formación del sistema de precipitación al interior del valle de Aburrá o la entrada a éste desde otra región (de acuerdo con la información registrada por el radar meteorológico), hasta el momento en el cual ya no muestra ningún valor de reflectividad asociado a lluvia dentro de la zona de interés. Por lo anterior, sumado a que la lluvia se desplaza, y no todo el tiempo llueve sobre el mismo pluviómetro, las duraciones de los eventos son mayores a las registradas por la red pluviométrica.

Durante la ejecución del CCT 016 de 2024 se registraron 413 eventos de precipitación. El promedio histórico de eventos de precipitación anual, con información disponible desde 2013, es de 257. En ese sentido, el año 2024, con un total de 258 eventos, se ubica dentro de ese promedio. Para el año 2025, considerando el periodo de enero a julio, el promedio histórico es de 138 eventos; sin embargo, en 2025 se han registrado 160, superando ampliamente dicho valor. Aun así, este no es el registro más alto para ese periodo, ya que en 2022 se presentaron 203 eventos y en 2021, 169.

En las Figura 127 y Figura 128 se puede observar un comparativo entre los eventos de lluvia registrado durante la vigencia del contrato, con los promedios históricos para cada uno de los meses desde el año 2013.

A continuación, se listan los datos más destacados:

- Durante el mes de febrero de 2024 se registró un número de informes apenas superior al observado en 2016, cuando solo se generaron 4 informes, la cifra más baja registrada. Además, este valor igualó el número de informes reportados en febrero de los años 2018 y 2020. Sin embargo, se encuentra por debajo del promedio mensual, que es de 15 informes. En contraste, febrero de 2025 superó dicho promedio al registrar 26 informes, ubicándose solo dos por debajo del valor máximo para este mes, registrado en 2022 con 28 informes.
- En marzo de 2024 se llevaron a cabo 15 informes, igualando la cifra más baja registrada para este mes en el año 2013. Este número está por debajo del promedio histórico de 24 informes. Por otro lado, en marzo de 2025 se generaron 25, superando en una cifra el promedio. El mayor número de eventos registrados para este mes desde 2013 ocurrió en 2021, con un total de 37 informes.
- En abril de 2023, se alcanzó el registro más alto de informes desde 2013, con un total de 34, superando los 26 informes registrados en 2024. No obstante, esta cifra sigue siendo superior al promedio histórico para este mes, que se sitúa en 24 informes. El abril de 2025, por otro lado, se ubica como el segundo registro más alto de eventos para este mes desde 2013, con un total de 32.
- Mayo de 2024 superó el promedio histórico de 27, con un registro de 33 eventos. Sin embargo, en los años 2018 y 2022 se realizaron la mayor cantidad de informes de lluvia para este mes desde 2013, con 37 y 35 informes, respectivamente. Por el contrario, mayo de 2025 se sitúa apenas dos valores por encima del promedio con un total de 29, posicionándose como un mes típico en registro de eventos de precipitación.
- Los 35 eventos registrados en junio de 2022 superan los 30 reportados en junio de 2024 y los 23 de 2025. Sin embargo, el promedio histórico de eventos para este mes, desde el año 2013, es de 20. Esto indica que en todos estos casos se superó ampliamente el promedio, siendo junio de 2024 el segundo registro más alto para este mes desde 2013.
- El promedio histórico de eventos para el mes de julio es de 15. En 2024 se registraron 11 eventos y en 2025, 10. Julio de 2022 es el mes con mayor número de eventos registrados, con un total de 29.
- Agosto de 2024 se posiciona como el cuarto mes con mayor número de eventos, con un total de 24. Esta cifra se encuentra 8 eventos por debajo del registro máximo para este mes, alcanzado en agosto de 2022.
- Septiembre de 2024 se ubica dentro del promedio histórico de eventos, con un total de 25. Por su parte, septiembre de 2022 registra la mayor cantidad de eventos para este mes, con un total de 40.
- Octubre de 2024 se posiciona como el segundo mes de octubre con menor número de eventos, con un total de 19, apenas por encima del registro de 2013, que fue de 16. Típicamente, durante este mes se registran en promedio 29 eventos.
- Noviembre de 2024 también se situó por debajo del promedio histórico, que es de 28 eventos, con un total de 27 registrados. El valor máximo para este mes corresponde a noviembre de 2022, con 37 eventos, mientras que el mínimo se presentó en 2023, con 17.
- Diciembre de 2024 se posiciona como el mes con el mayor número de eventos registrados para diciembre desde el año 2013, con un total de 26. Este valor supera el récord anterior de 25 eventos registrado en 2022, que hasta entonces había sido el año con más eventos de precipitación en general.



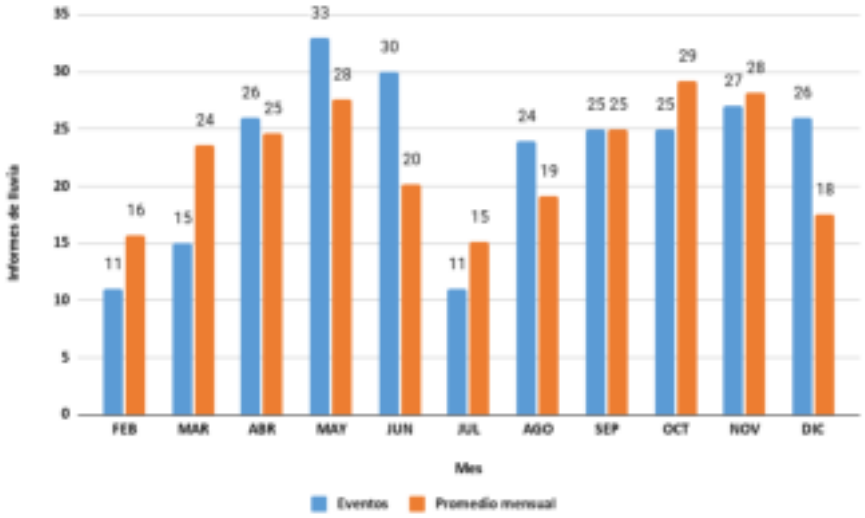


Figura 127: Informes de lluvias durante el CCT 016 de 2024 para el año 2024.

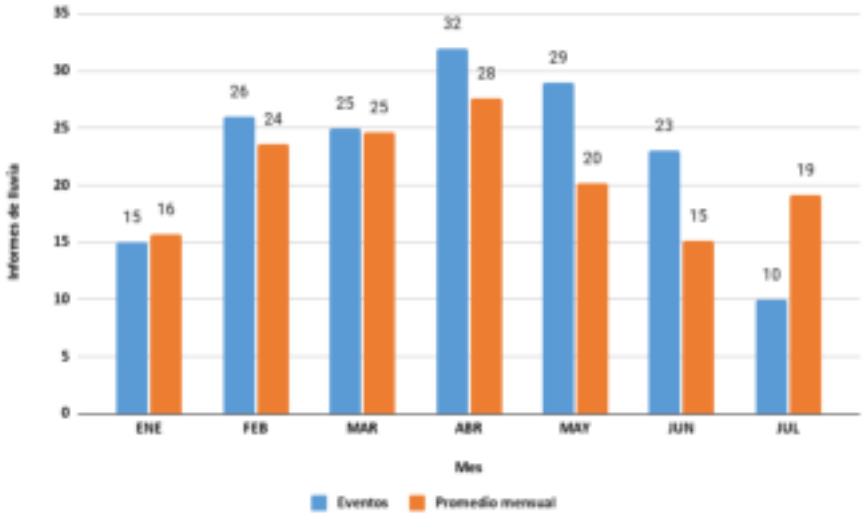


Figura 128: Informes de lluvias durante el CCT 016 de 2024 para el año 2025.

Estos informes se pueden consultar en `https://siata.gov.co/reporte_eventos/` y en el link: Histórico informes lluvia se encuentra información histórica de estos reportes.

Parte II: Pronóstico de la precipitación y la actividad eléctrica en el Valle de Aburrá a partir de información satelital de GOES16, usando una herramienta de inteligencia artificial

Introducción

La estimación y el pronóstico de la precipitación, y la actividad eléctrica son aspectos fundamentales tanto desde una perspectiva científica como por sus aplicaciones prácticas en la gestión del riesgo de desastres naturales. La precipitación constituye un factor crítico en la generación de amenazas como movimientos en masa, inundaciones, avenidas torrenciales y granizadas. Según Poveda et al. (2020), entre 2000 y 2015, Colombia experimentó 67 desastres hidrometeorológicos, con un saldo de 2,410 personas fallecidas. Por su parte, Stäubli et al. (2018) destaca que la cordillera de los Andes es la segunda región montañosa del mundo en términos de mortalidad asociada a estos desastres, registrando pérdidas económicas estimadas en $3100 millones de dólares entre 1985 y 2014. Similarmente, Colombia tiene varias de las regiones en el mundo, con mayor actividad asociada a descargas eléctricas de origen atmosférico. De acuerdo con Albrecht et al. (2016), 2 (7) de los 10 lugares con mayor actividad eléctrica en el mundo (Suramérica) se localizan en Colombia. Esto, sumado a la falta de medidas efectivas para la gestión del riesgo, han hecho que Colombia sea uno de los países con mayor tasa de mortalidad en la región de Suramérica debido a descargas eléctricas con 1.5 muertes por millón de habitantes al año (Cruz-Bernal et al., 2018). En este contexto, Antioquia se presenta como el departamento con mayor cantidad promedio de muertes con 12.1 muertes al año, seguido por Cauca con 6.9 muertes al año (Cruz-Bernal et al., 2018).

La comprensión de los mecanismos que desencadenan eventos meteorológicos extremos en los Andes es limitada (Poveda et al., 2020), debido a la complejidad de los fenómenos, influenciados por factores físicos, naturales y antropogénicos. La necesidad de superar estas limitaciones ha impulsado el uso de herramientas innovadoras para construir modelos de pronóstico, como los modelos de inteligencia artificial, y en particular, el aprendizaje profundo (Deep Learning - DL, Chase et al. (2022b, 2023); Cintineo et al. (2022)). Aunque la implementación de estas técnicas en las ciencias atmosféricas es incipiente, aplicaciones exitosas sugieren un alto potencial, especialmente en regiones con dinámicas meteorológicas complejas. A diferencia de los modelos estadísticos o físicos tradicionales, que dependen de un conocimiento a priori del fenómeno objeto de estudio, los modelos de aprendizaje profundo tienen la capacidad de extraer y usar las relaciones subyacentes a los datos que se mantienen veladas a los expertos del tema, construyendo su propio marco de conocimiento para estimar variables de interés, como la precipitación y la actividad eléctrica.

Un caso especial que representa un desafío ha sido el de identificar relaciones claras entre la radiación terrestre en el espectro infrarrojo, la precipitación y las descargas atmosféricas. En este contexto, los modelos de DL se revelan como una solución potencial. En SIATA, donde además de una gran base de datos de las variables en mención, provenientes del satélite GOES16 y el radar meteorológico, se cuenta con los recursos computacionales de procesamiento requeridos para el ajuste de modelos de DL. Particularmente, se ha almacenado información de los últimos 8 años proveniente del sensor ABI abordo del satélite GOES16-19, el cual proporciona datos en 16 bandas del espectro visible e infrarrojo, con ventajas significativas como monitoreo continuo, alta resolución temporal y espacial, y una amplia cobertura geográfica, elementos cruciales para observar eventos de alta variabilidad temporal y corta duración. Las bandas espectrales en el rango infrarrojo permiten inferir variables como el contenido de humedad en diferentes niveles de la atmósfera, la temperatura del tope de las nubes y algunas de las características microfísicas de las partículas en las nubes, todas ellas relacionadas con la precipitación. Precisamente se espera que las correlaciones que se intuyen entre estos procesos puedan ser identificadas y aprovechadas por los modelos de DL para el pronóstico de la precipitación y la actividad eléctrica en el área metropolitana y su región vecina".

En años recientes se han desarrollado modelos de aprendizaje profundo para la estimación de la precipitación utilizando información indirecta, como imágenes satelitales en distintas longitudes de onda del espectro electromagnético. Estos modelos infieren la precipitación a partir de características de las nubes (Andelsman et al., 2023; Chen et al., 2019a; Fujimoto and Tebakari, 2023; Li et al., 2021b; Moraux et al., 2019), complementando a menudo los datos espectrales con variables geográficas como elevación, latitud y longitud, para considerar la influencia de la topografía y la ubicación en la formación de nubes (Fujimoto and Tebakari, 2023; Li et al., 2021b; Moraux et al., 2019), así como con variables dinámicas y termodinámicas como humedad, CAPE (energía potencial convectiva disponible) y cizalladura del viento, que están asociadas con la iniciación y el desarrollo de nubes generadoras de precipitación (Li et al., 2021b).

Entre las arquitecturas más utilizadas para pronósticos de precipitación se encuentran las Redes Neuronales Artificiales (ANN), las Redes Neuronales Convolucionales (CNN) y las U-NET. En las Redes Neuronales Artificiales (ANN), la información de cada perceptrón, neorona defina dentro de la arquitectura de la red, en una capa se transfiere a todos los perceptrones de la capa siguiente, como se ilustra en la Figura 129, panel a). En las CNN (Figura 129, panel b), los perceptrones de una capa están organizados en matrices rectangulares y reciben información solo de una región limitada de perceptrones de la capa anterior, en lo que se conoce como operación convolucional, que explora patrones locales en matrices bidimensionales. Además, las matrices en cada capa reducen la resolución de la información de las mismas por medio de un promedio o el máximo de regiones de perceptrones, procedimiento al que se refiere como agrupamiento (pooling layers, flecha continua en el diagrama) y que se utiliza para optimizar la extracción de características relevantes. En la última capa convolucional de las CNN, a menudo se agrega una capa de ANN (como se muestra en el recuadro rojo), para transformar la información matricial en un vector o número escalar que representa el pronóstico, utilizando por ejemplo una imagen de ABI como entrada. Las U-NET (Figura 129, panel c), también utilizan convoluciones, pero incorporan capas de reescalado (unpooling o upsampling, representado en el recuadro rojo a la derecha del diagrama) para aumentar la resolución de la matriz de salida, reconstruyendo así las matrices de salida con resoluciones equivalentes a las de entrada. La “U” en el nombre de esta arquitectura refleja cómo la resolución de la imagen decrece y aumenta nuevamente. Estos tres tipos de redes neuronales pueden ser utilizados para crear modelos imagen a imagen, donde se genera una imagen de pronóstico a partir de una o varias imágenes predictoras. La principal ventaja de U-NET es que su salida es directamente una imagen, sin necesidad de redimensionamientos finales para obtener este tipo de dato.

En este estudio se exploró el potencial del DL en el pronóstico a corto plazo de la precipitación y la actividad eléctrica en el Valle de Aburrá. Se ajustó un modelo basado en redes neuronales convolucionales (CNN), utilizando seis bandas espectrales de ABI como variables predictoras, y máscaras de lluvia y actividad eléctrica como variables objetivo, estas últimas derivadas de información de radar meteorológico y el sensor GLM a bordo del satélite GOES16, respectivamente. El objetivo principal fue estimar la la futura ocurrencia de precipitación y actividad eléctrica en un área que comprende la región del Valle de Aburrá, así como su correspondiente probabilidad de ocurrencia, en una ventana de pronóstico de 1 hora, para pixeles de 2x2 km de área.

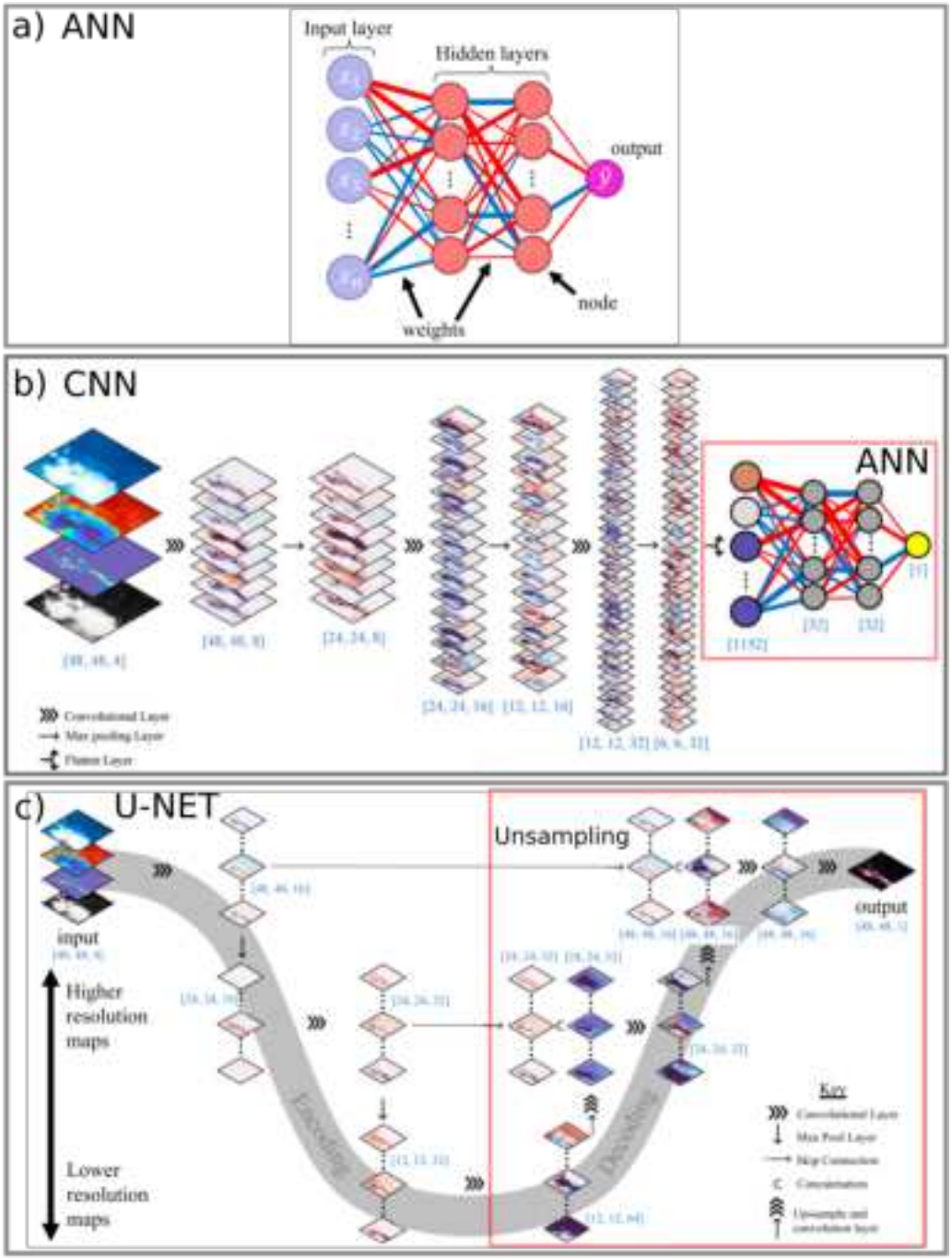


Figura 129: Arquitecturas de redes neuronales que pueden ser funcionales para un modelo de pronóstico de precipitación en el Valle de Aburrá, a partir de datos espectrales del infrarojo provenientes del sensor ABI-GOES16. a) Red Neuronal Artificial (ANN); b) Red Neuronal Convolutional; c) Red Reuronal U-NET. Imagen modificada de Chase et al. (2022a).

Metodología

Datos y región de estudio

El área de estudio seleccionada abarca las latitudes 5.97°N a 6.54°N y las longitudes 75.75°W a 75.19°W, cubriendo la totalidad de municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (Figura 130, rectángulo rojo). Las variables objetivo, definidas como las máscaras de ocurrencia/no ocurrencia de precipitación y actividad eléctrica, se construyeron a partir de datos del radar meteorológico y del sensor GLM a bordo del satélite GOES16, respectivamente. Su resolución espacial es de 2 km y temporal de 10 minutos para coincidir con las imágenes del sensor ABI. Además, se seleccionaron registros temporales del radar cercanos a las fechas y horas de los datos de ABI, asegurando una coherencia temporal entre ambas fuentes.

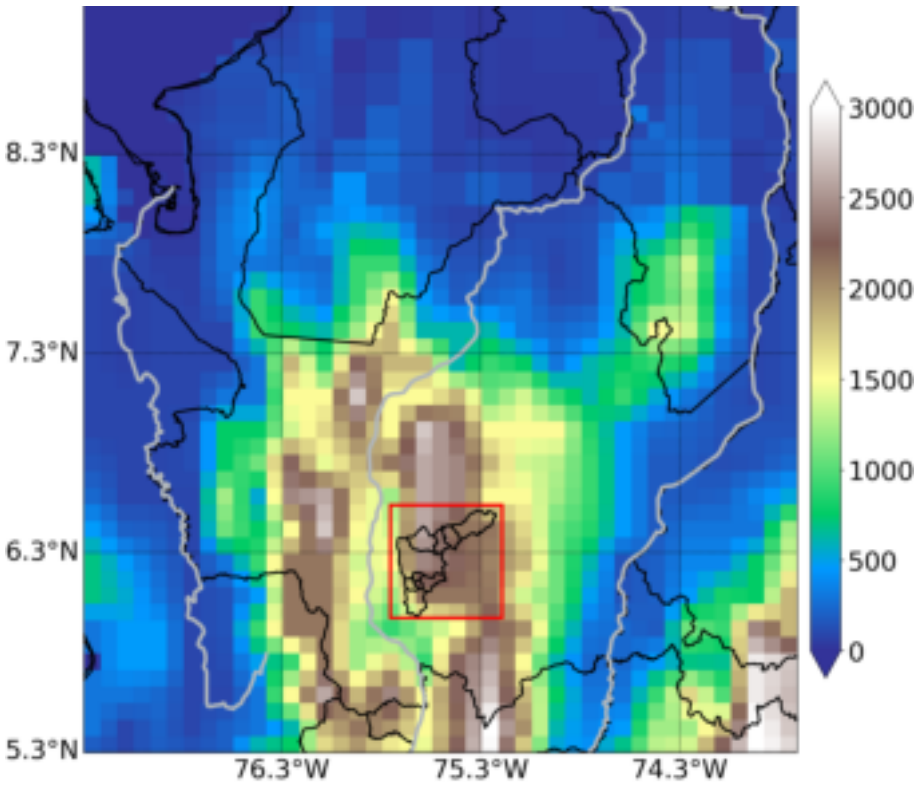


Figura 130: Región de ajuste del modelo de pronóstico de precipitación y actividad eléctrica (rectángulo rojo). Los colores representan la altura de cada uno de los pixeles con respecto al nivel del mar en metro (masl, por sus siglas en inglés)

Como variables predictoras, se analizaron 7 bandas espectrales del sensor ABI en las regiones del infrarrojo y el infrarrojo cercano (bandas 5, 6, 8, 9, 10, 13 y 15). Estas bandas fueron seleccionadas por ser indicadores de características atmosféricas relacionadas con el desarrollo de precipitación, formación de nubes y descargas eléctricas, como el tamaño de las partículas de nube, la concentración de vapor de agua en distintos niveles de la atmósfera, y la temperatura del tope de las nubes. Por ejemplo, la banda 5 de ABI, con longitud de onda central en 1.61 μm, permite distinguir nubes de agua líquida de nubes con mayor proporción de partículas de hielo, en virtud de que el agua líquida es más brillante o reflectiva en dicha longitud de onda, que las partículas de hielo, las cuales son más absorbentes en la misma región

del espectro. La banda 6, centrada en 2.24 μm, permite la estimación del tamaño de partículas que componen las nubes, lo cual podría indicar, a su vez, el grado de desarrollo de una nube. Las bandas 8, 9 y 10, centradas en 6.2, 6.9 y 7.3 μm, respectivamente, son indicadores de la concentración de vapor de agua en niveles altos, medios y bajos de la troposfera, respectivamente. La banda 13, centrada en 10.3 μm, es usada comúnmente en la estimación de la temperatura de brillo del tope de las nubes, la cual se relaciona con el desarrollo vertical de las mismas. Finalmente, la banda 15 está centrada en 12.3 μm. Valga decir que esta información tiene una naturaleza instantánea. No obstante, se incluyó información histórica promediada de la última hora para cada una de estas bandas, bajo la hipótesis de que la la tendencia temporal de las condiciones atmosféricas influye significativamente en el desarrollo futuro de la precipitación. Finalmente, las mascaras de la variable objetivo se construye tal que representen la ocurrencia o no durante los 60 minutos siguientes a un momento en específico. La Tabla 14 resume las variables predictoras y la variable objetivo.

Tabla 14: Variables predictoras y variable objetivo.

Variable	Interpretación física
Banda 5	Diferencia entre nubes líquidas y de hielo
Promedio Banda 5	Tendencia temporal de la última hora de la Banda 5
Banda 6	Tamaño de partículas y desarrollo de las nubes
Promedio Banda 6	Tendencia temporal de la última hora de la Banda 6
Banda 8	Concentración de vapor de agua en la alta atmósfera
Promedio Banda 8	Tendencia temporal de la última hora de la Banda 8
Banda 9	Concentración de vapor de agua en niveles medios
Promedio Banda 9	Tendencia temporal de la última hora de la Banda 9
Banda 10	Concentración de vapor de agua en niveles bajos
Promedio Banda 10	Tendencia temporal de la última hora de la Banda 10
Banda 13	Desarrollo vertical de las nubes
Promedio Banda 13	Tendencia temporal de la última hora de la Banda 13
Máscara de precipitación	Ocurrencia de precipitación durante la próxima hora (variable objetivo)
Máscara de actividad eléctrica	Ocurrencia de actividad eléctrica durante la próxima hora (variable objetivo)

Se excluyeron bandas en el espectro visible debido a su dependencia con la radiación solar, lo que limita su uso en horas de la tarde, noche y madrugada. Esta decisión resulta relevante, dado que el régimen de precipitación diurno en la región exhibe acumulados significativos durante dichas franjas horarias.

El análisis se llevó a cabo en el período de marzo-abril-mayo (MAM) de 2018 a 2024. Para evitar el sesgo hacia píxeles sin ocurrencias (no lluvia, no descargas eléctricas) y mejorar la capacidad del modelo de generalizar, se realizó un muestreo balanceado. Para el caso de la precipitación, se seleccionaron imágenes con más del 50 % de píxeles con lluvia como representativos de eventos de precipitación, e imágenes con menos del 20 % de píxeles con lluvia para muestras de no precipitación. Ambas muestras se equilibraron aleatoriamente. Para el modelo de actividad eléctrica, los mapas predictores y objetivo fueron seleccionados tal que las máscaras de ocurrencia de actividad eléctrica exhibieran al menos un

2.5 % del territorio con actividad eléctrica, siguiendo la metodología propuesta en Cintineo et al. (2022).

Los datos se dividieron aleatoriamente en tres conjuntos: entrenamiento (80 %), validación (10 %) y prueba (10 %). El trimestre MAM de 2024 se reservó como un conjunto de prueba independiente, abarcando distintos eventos de precipitación y el ciclo diurno completo.

Fundamentos teórico-matemático detrás de las redes neuronales artificiales

El desarrollo teórico en el que se sustenta la vasta mayoría de arquitecturas de redes neuronales, desde la concepción del perceptrón, hasta los grandes modelos de lenguaje (LLM, por sus siglas en inglés), consta de tres conceptos fundamentales:

I. Propagación de la información (*Feedforward*)

II. Descenso del gradiente

III. Retropropagación (*Backpropagation*)

El *Feedforward* se refiere a cómo transita y se transforma la información que ingresa en la capa de entrada de una red hasta la capa de salida. En otras palabras, hace referencia a la forma en cómo funciona la red neuronal. Dado un vector x de tamaño K en la capa de entrada, un número J de neuronas en la primera capa oculta de la red, una matriz de pesos w con forma $J \times K$, y un vector b de desviaciones de tamaño J, la salida de la primera capa oculta se calcula como sigue:

$$a^l = \sigma(x \cdot w^l + b^l) \tag{8.1}$$

donde l representa la capa en la que se está haciendo el cálculo (en este caso $l = 1$, con $0 \leq l \leq L$), con a^l de tamaño J, y σ la función de activación de la capa. Esta última tiene el fin de convertir lo que en un principio se comporta como una función lineal en una no-lineal, aplicándose elemento a elemento, y se escoge de acuerdo al tipo de problema que se está resolviendo. Algunos ejemplos de funciones de activación son como sigue:

$$\sigma(z) = \frac{1}{1 + e^{-z}}$$

$$\sigma(z) = \frac{e^z - e^{-z}}{e^z + e^{-z}}$$

$$\sigma(z) = \begin{cases} 0 & z \leq 0 \\ z & z > 0 \end{cases}$$

conocidas como, función de activación sigmoide, tangente hiperbólica y ReLU, respectivamente. Finalmente, la salida de la capa l será la entrada hacia la capa $l + 1$ y se volverá a aplicar la ecuación 8.1 actualizando el valor de $l = l + 1$.

Aunque la idea y el concepto detrás de las redes neuronales es ciertamente sencillo, lo que reviste especial dificultad está en el hallar los valores óptimos para los pesos w y el bias b. En este punto entra en juego el algoritmo del ***Descenso del gradiente***, una versión multivariada del algoritmo o método de Newton-Rapson para encontrar raíces. Se parte del hecho de que se quiere reducir cuanto sea posible el error (C), definido como cualquier indicador de la distancia entre la salida de la red neuronal y el valor real:



$$C = f(a^L, O)$$

con O, la variable objetivo. Analíticamente, los valores de w^l y b^l para cada l serían tales que $\frac{\partial C}{\partial w} = \frac{\partial C}{\partial b} = 0$. Ante la imposibilidad de conocer la función $C = f(w, b)$, el algoritmo del descenso del gradiente propone que no debemos conocer dicha función para toda combinación de w y b sino, unos cuantas combinaciones y el gradiente del error en dicho punto $(\frac{\partial C}{\partial w}, \frac{\partial C}{\partial b})$, comenzando por cualquier combinación que el usuario defina. Entonces, lo que se propone es que dado el valor de w_0 y b_0 cualquiera, se den pequeños pasos en dirección opuesta al gradiente en dicho punto, acercando de esta forma el valor de w y b hacia un menor valor del error C:

$$w := w - \eta \frac{\partial C}{\partial w} \tag{8.2}$$

$$b := b - \eta \frac{\partial C}{\partial b} \tag{8.3}$$

donde η es la tasa de aprendizaje la cual denota el tamaño del paso que se está dando en dirección contraria al vector gradiente. De hecho este es el motivo de la aparición del signo negativo en las ecuaciones 8.2 y 8.3, y es que, por definición, el vector gradiente apunta en la dirección de mayor pendiente de la función de interes, en este caso de la función $C = f(w, b)$. Es por ello que si damos pasos en dirección contraria al vector gradiente, estamos asegurando que estaremos dando un paso hacia valores menores del error C.

Como mencionamos anteriormente, no necesitamos saber el gradiente para todo el espacio formado por las variables w y b; no obstante sí necesitamos saber el gradiente para cada valor actualizado de estas siguiendo las ecuaciones 8.2 y 8.3. Con esta necesidad en mente se desarrolló el algoritmo de ***Retropropagación*** (Rumelhart et al., 1986), el cual brinda una solución numérica para el cálculo de dichas expresiones, a partir de 4 ecuaciones fundamentales:

$$\frac{\partial C}{\partial b^l_j} = \delta^l_j \tag{8.4}$$

$$\frac{\partial C}{\partial w^l_{jk}} = \delta^l_j a^{l-1}_k \tag{8.5}$$

$$\delta^l_j = \sigma'(z^l_j) \sum_k^K \delta^{l+1}_k w^{l+1}_{kj} \tag{8.6}$$

$$\delta^L_j = (a^L_j - y_j)\sigma'(z^l_j) \tag{8.7}$$

donde $z^l = a^{l-1} \cdot w^l + b^l$, $a^l = \sigma(z^l)$, y donde σ' es su derivada, es decir, $\sigma' = \frac{\partial a^l}{\partial z^l}$.

Aproximación al modelo de redes neuronales convolucionales - CNN

Se desarrolló y optimizó un modelo de redes neuronales convolucionales (CNN) para el pronóstico a corto plazo (nowcasting) de la precipitación y la actividad eléctrica en una región cuya extensión cubre al Valle de Aburrá. Este modelo permite realizar una clasificación binaria, identificando la presencia o ausencia

de precipitación y actividad eléctrica. La arquitectura general del modelo es de tipo convolucional. Los segmentos que componen esta implementación se presentan en la Figura 131. Las capas convolucionales emplean filtros de 3×3, seguidas de normalización por lotes (Batch Normalization) y funciones de activación como ReLU, sigmoide o de otros tipos. Para reducir la dimensionalidad, se utilizaron capas de max pooling, complementadas con capas densas para la fase final del modelo.

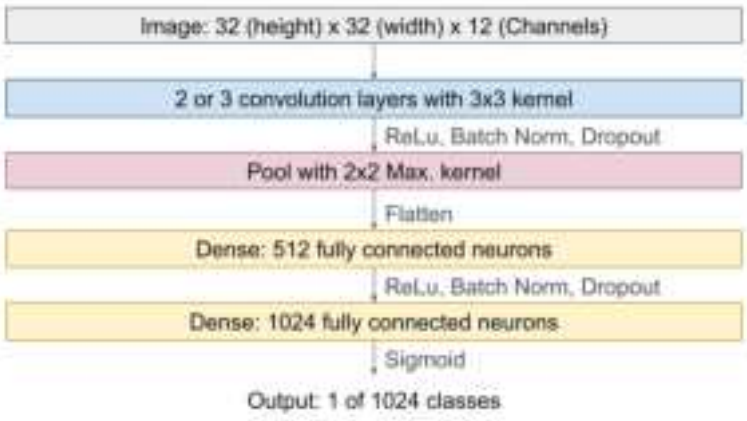


Figura 131: Arquitectura CNN utilizada para la optimización de los modelos de pronóstico de lluvia y actividad eléctrica.

El proceso de construcción del modelo incluyó la optimización de hiperparámetros críticos como el número de capas, el tamaño y cantidad de filtros, la tasa de aprendizaje (learning rate), el tamaño del lote (batch size), y las técnicas de regularización, incluyendo dropout y regularización L2. Para los efectos de tener un lenguaje común, la literatura acerca de Deep Learning ha definido como hiperparámetros a todos aquellos parámetros que determinan el funcionamiento de un modelo, pero cuyos valores no pueden ser ajustados vía las técnicas de descenso del gradiente y de retropropagación (backpropagation), o dicho de de otra forma, son aquellos parámetros que deben ser ajustados vía análisis de sensibilidad.

Evaluación del modelo: para evaluar el desempeño del modelo, se utilizaron diversas métricas que permiten analizar distintos aspectos de la clasificación binaria, incluyendo *precision* (tasa de pronósticos positivos correctamente ejecutados), *recall* (proporción de observaciones positivas correctamente pronosticados), *especificidad* (proporción de píxeles negativos correctamente pronosticados), *tasa de falsos positivos (FPR)*, *exactitud (tasa de pronósticos correctos)* y *el área bajo la curva (AUC)*. Estas métricas se definen a continuación:

Tabla 15: Matriz de confusión. Donde, VP significa verdadero positivo, FP significa falso positivo, FN significa falso negativo y VN significa verdadero negativo.

		Predicción: Modelo		
		Positivos	**Negativos**	Total
Observación: Radar	**Positivos**	Verdaderos Positivos (VP)	Falsos Negativos (FN)	(VP + FN)
	Negativos	Falsos Positivos (FP)	Verdaderos Negativos (VN)	(FP + VN)
	Total	(VP + FP)	(FN + VN)	

A continuación se defienen algunos índices basados en al matriz de confusión (Tabla 15).

- **Precisión**: porcentaje de predicciones positivas correctas. Una alta precisión significa que cuando el modelo predice una clase positiva, es muy probable que esté en lo correcto (es decir, hay pocos falsos positivos).

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positives (TP)}}{\text{True Positives (TP)} + \text{False Positives (FP)}}$$

- **Recall**: porcentaje de observaciones positivas en que la correspondiente predicción fue realizada correctamente. Un alto recall significa que el modelo es capaz de capturar la mayoría de los ejemplos positivos (pocos falsos negativos). Especialmente útil en la predicción de la precipitación.

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positives (TP)}}{\text{True Positives (TP)} + \text{False Negatives (FN)}}$$

- **Especificidad**: porcentaje de observaciones negativas en que la correspondiente predicción fue realizada correctamente. Una alta especificidad significa que el modelo está identificando correctamente la mayoría de las instancias negativas.

$$\text{Especificidad} = \frac{\text{True Negatives (TN)}}{\text{True Negatives (TN)} + \text{False Positives (FP)}}$$

- **FPR**: porcentaje de observaciones negativas en que la correspondiente predicción no se realizó correctamente. Es el complemeneto de la especificidad. Una FPR baja indica que el modelo no está cometiendo muchos errores al clasificar ejemplos negativos como positivos.

$$\text{FPR} = \frac{\text{False Positives (FP)}}{\text{True Negatives (TN)} + \text{False Positives (FP)}} = 1 - Especificidad$$

- **Accuracy**: porcentaje de todas las predicciones correctas (tanto positivas como negativas). Se debe tener cuidado con esta métrica, pues cuando los datos están desbalanceados podría igual un alto valor, pero las predicciones podrían estar sesgaas hacia los valores con mayor cantidad de muestras.

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{True Positives (TP)} + \text{True Negatives (TN)}}{\text{Total samples}}$$

- **AUC**: es el área bajo la curva ROC (Receiver Operating Characteristic), que representa la relación entre la Tasa de Verdaderos Positivos (TPR o recall) y la Tasa de Falsos Positivos (FPR) a diferentes umbrales de decisión. El valor del AUC proporciona una medida global del desempeño de un modelo de clasificación binaria, sin depender de un umbral específico. El AUC refleja la capacidad del modelo para distinguir entre las clases positivas y negativas. Cuanto más alto sea el AUC, mejor es el rendimiento del modelo.



Resultados

Modelo de precipitación

Para la optimización del modelo de precipitación se empleó la biblioteca Optuna [1] de Python, que permitió explorar de manera eficiente el subespacio de combinaciones posibles de los hiperparámetros antes mencionados. En total, se ejecutaron 1,000 pruebas experimentales, ajustando los valores de los parámetros según los rangos definidos en la Tabla 16.

Tabla 16: Espacio de búsqueda de hiperparámetros y configuración óptima identificada durante la optimización.

Hiperparámetro	Rango de Valores
Número de capas	2, 3
Número de kernels	[16,32], [32,64], [16,32,64]
Batch size	64, 128, 512
Learning rate	1e-2, 1e-4, 1e-5, 1e-6, 1e-7, 1e-8, 1e-9
Learning rate decay	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 0.9, 0.95
Dropout rate	0.2, 0.3, 0.4 y 0.5
Regularization L2	1e-2, 1e-4, 1e-5, 1e-6

El modelo se evaluó utilizando un conjunto de datos independientes a los empleados durante el entrenamiento. En concreto, se compararon los resultados del modelo con las máscaras de precipitación derivadas de datos de radar. Los conjuntos de datos evaluados fueron:

I. **Conjunto de prueba**: Compuesto por el 10 % de los datos balanceados y recolectados entre los años 2018 y 2023.

II. **Periodo MAM 2024**: Incluye todos los datos no balanceados correspondientes a los meses de marzo a mayo de 2024.

III. **Eventos específicos de precipitación**: 11 eventos seleccionados dentro del periodo MAM 2024.

IV. **Conjunto excluido**: Datos no utilizados en el entrenamiento, prueba o validación, correspondientes al periodo 2018-2023 (no balanceados).

Adicionalmente, los resultados del modelo se contrastaron con dos pronósticos operacionales, utilizando los datos del trimestre MAM 2024 y los 11 eventos específicos de precipitación:

I. **Modelo numérico regional WRF (configuración SYNAPSIS PAR08)**: Ejecutado diariamente a las 07:00 LT (12:00 UTC), con una ventana de pronóstico de 6 días y salidas horarias.

II. **Modelo estadístico basado en perceptrones multicapa**: Emplea salidas de diversas configuraciones del WRF para calcular probabilidades de lluvia (leve, moderada, intensa y muy intensa) por municipio cada 3 horas, con resultados por hora y una ventana de 24 horas.

[1] https://optuna.org/

Dado que el modelo CNN realiza pronósticos únicamente para una ventana de 1 hora, se definieron ventanas específicas para la comparación. Para el modelo WRF se analizaron resultados entre las 19:00 (LT) del mismo día de ejecución y las 19:00 (LT) del día siguiente, excluyendo las primeras 12 horas para evitar la influencia de las condiciones iniciales. Para el modelo estadístico, los resultados fueron evaluados desde las 3 horas hasta las 6 horas posteriores al inicio de la ejecución, dado que el tiempo requerido para su procesamiento es de 3 horas y el modelo se ejecuta cada 3 horas. En este caso, se tomaron 3 horas de cada ejecución.

Para la comparación de los pronósticos entre modelos, se obtuvo la probabilidad de lluvia para cada uno de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, y se calcularon las métricas de desempeño descritas anteriormente.

Optimización del modelo CNN

De las 1000 pruebas realizadas, los modelos con un desempeño óptimo se caracterizaron por incorporar dos capas convolucionales configuradas con 32 y 64 filtros. Estos modelos presentaron los menores niveles de falsos positivos y falsos negativos, además de registrar los mayores valores en verdaderos positivos y verdaderos negativos. En términos generales, alcanzaron los valores más altos de exactitud (accuracy).

La evaluación del rendimiento del modelo se centró en métricas clave como la precisión (precision) y la sensibilidad (recall). Los modelos con dos capas convolucionales de 32 y 64 filtros, combinados con una tasa de aprendizaje de 0.01, destacaron por su desempeño superior en los conjuntos de datos de entrenamiento y validación (Figura 132). Estos resultados indican que estos modelos son altamente efectivos en la predicción de eventos de precipitación, con una baja tasa de falsas alarmas; es decir, la mayoría de las predicciones de precipitación fueron correctas.

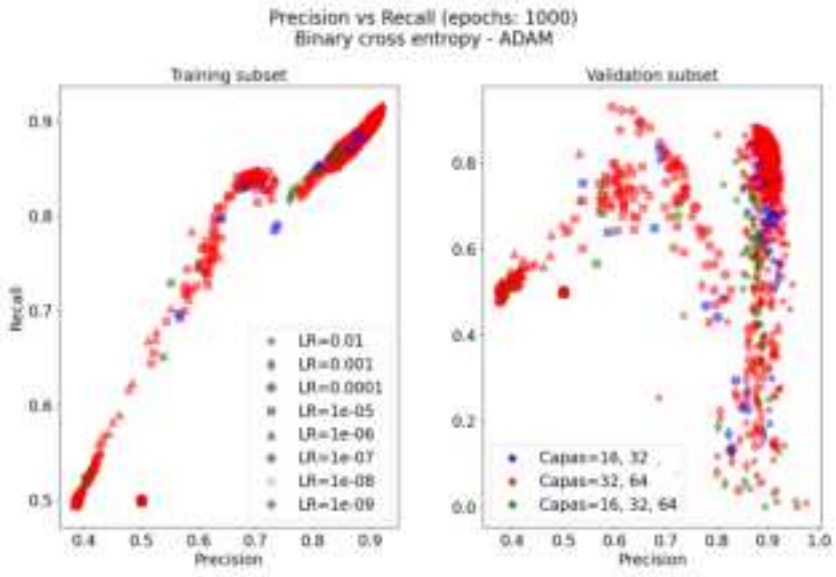


Figura 132: Comparación de la precisión y el recall o sensibilidad de los modelos entrenados en el segundo análisis de sensibilidad utilizando Optuna. El gráfico de la izquierda relaciona las métricas obtenidas con los datos de entrenamiento y el de la derecha las obtenidas con los datos de validación. Se muestran los modelos según el número de capas utilizado y el valor de la tasa de aprendizaje o learning rate.

Asimismo, el análisis de la relación entre exactitud y precisión (Figura 133) reveló que una gran proporción de los modelos, especialmente aquellos configurados con dos capas de 32 y 64 filtros y una tasa de aprendizaje de 0.01, mostraron altos valores en ambas métricas. Esto evidencia que estos modelos no solo predicen los eventos de precipitación con alta fiabilidad, sino que también minimizan los errores en sus predicciones positivas. No obstante, se identificó una tendencia lineal positiva en el rendimiento de los modelos entre los conjuntos de entrenamiento y validación, con algunas excepciones en este último. En particular, ciertos modelos con tres capas convolucionales (16, 32 y 64 filtros) alcanzaron alta precisión pero baja exactitud en los datos de validación. Esto sugiere que, si bien estos modelos reducen los falsos positivos, pueden generar un número considerable de falsos negativos, lo que afecta su desempeño global. La configuración óptima, identificada tras este análisis, se detalla en la tercera columna de la misma tabla.

Al analizar métricas adicionales, como la relación entre sensibilidad y especificidad, la tasa de falsos positivos (FPR) y la precisión, y entre la FPR y la sensibilidad, se identificó un comportamiento consistente. Los modelos con mejor desempeño continuaron siendo aquellos configurados con dos capas de convolución de 32 y 64 filtros y tasas de aprendizaje entre 0.01 y 0.001.

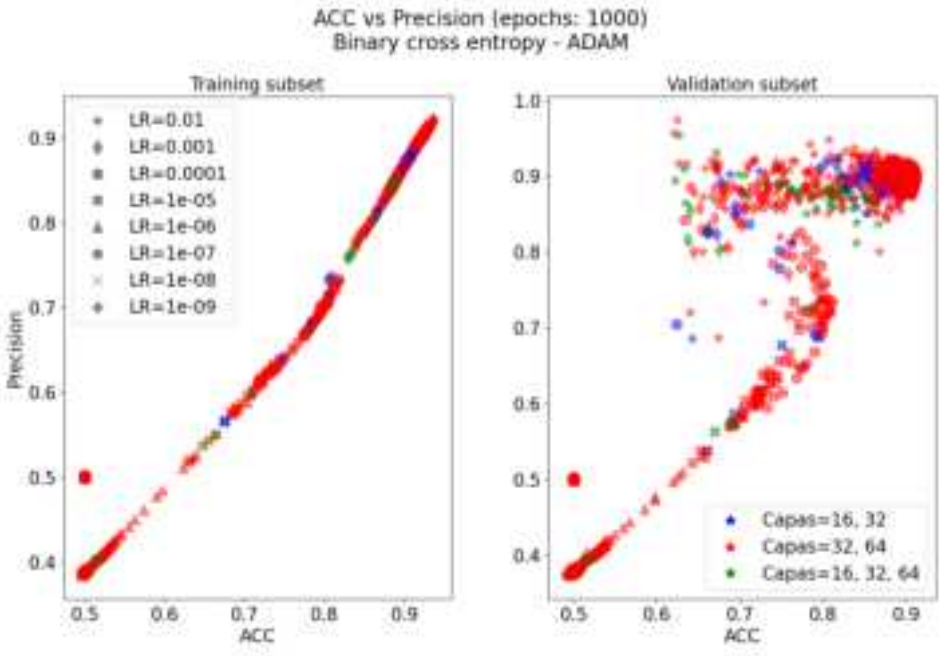


Figura 133: Comparación del acuracy o exactitud y la precisión de los modelos entrenados en el segundo análisis de sensibilidad utilizando Optuna. El gráfico de la izquierda relaciona las métricas obtenidas con los datos de entrenamiento y el de la derecha las obtenidas con los datos de validación. Se muestran los modelos según el número de capas utilizado y el valor de la tasa de aprendizaje o learning rate.

El análisis de optimización realizado mediante Optuna permitió identificar los hiperparámetros más adecuados para maximizar el rendimiento del modelo. Los parámetros óptimos encontrados incluyen: dos capas convolucionales con 32 y 64 filtros, una tasa de dropout de 0.2, una tasa de aprendizaje inicial de 0.01, un factor de descenso de la tasa de aprendizaje de 0.3, un tamaño de lote de 512 y un coeficiente de regularización de 8.4e-04. El esquema de la arquitectura óptima de la CNN para la clasificación de lluvia/no-lluvia se muestra en la Figura 134.

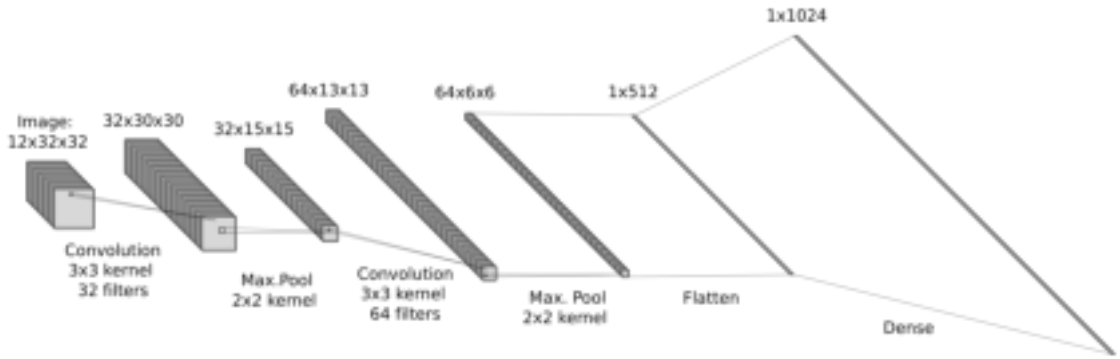


Figura 134: Arquitectura óptima de Red Neuronal Convolucional - CNN para la clasificación de lluvia/no-lluvia.

Evaluación del modelo

La evaluación del modelo optimizado se llevó a cabo mediante la comparación de sus predicciones con diferentes conjuntos de datos independientes, diferentes a los datos de entrenamiento y validación, utilizando como referencia la máscara de precipitación derivada de los datos del radar meteorológico. Para el conjunto de prueba independiente (10 % de los datos correspondientes al periodo 2018-2023 no utilizados en el entrenamiento), el modelo alcanzó una exactitud general del 90.1 %. El recall obtenido fue del 84.7 %, indicando que el modelo identificó correctamente el 84.7 % de los eventos de precipitación registrados. Asimismo, la precisión fue del 90.2 %, lo que refleja que el 90.2 % de las predicciones de precipitación correspondieron efectivamente a eventos observados. Además, el modelo mostró una especificidad del 93.8 %, minimizando la incidencia de falsos positivos.

Sin embargo, al evaluar el desempeño del modelo en el trimestre MAM 2024, se observó una degradación significativa en las métricas: el recall disminuyó a 44.3 % y la precisión a 56.9 %. Este deterioro se asocia a un marcado desbalance en los datos. En el conjunto de prueba 2018-2023, el 40 % de los registros correspondían a precipitación, mientras que en MAM 2024 este porcentaje se redujo al 13 %. Esta discrepancia afectó la capacidad del modelo para identificar eventos de precipitación bajo condiciones de desbalance extremo en los datos.

Para corroborar esta hipótesis, se evaluó el modelo con un conjunto de datos excluidos, obteniéndose métricas aún más bajas: una precisión del 48 % y un recall del 27 %. Adicionalmente, se realizó un análisis detallado de 11 eventos específicos de precipitación durante el trimestre MAM 2024, seleccionados por presentar diferentes grados de balance entre píxeles con y sin precipitación (Figura 136). Se observó un mejor desempeño del modelo en eventos con proporciones más equilibradas (entre 37 %-57 % de píxeles con precipitación y 63 %-47 % sin precipitación), lo que confirma la influencia del balance de los datos en el desempeño del modelo. En contraste, mientras el conjunto de prueba mantenía una proporción de 40 %/60 % (precipitación/sin precipitación), el trimestre MAM 2024 y el conjunto excluido presentaban relaciones de 13 %/87 % y 12 %/88 %, respectivamente.

Estos resultados, resumidos en las Figuras 135 y 136, evidencian la sensibilidad del modelo a la distribución de las clases en los datos y subrayan la importancia de abordar el desbalance durante el entrenamiento para mejorar su capacidad de generalización para su uso operativo.

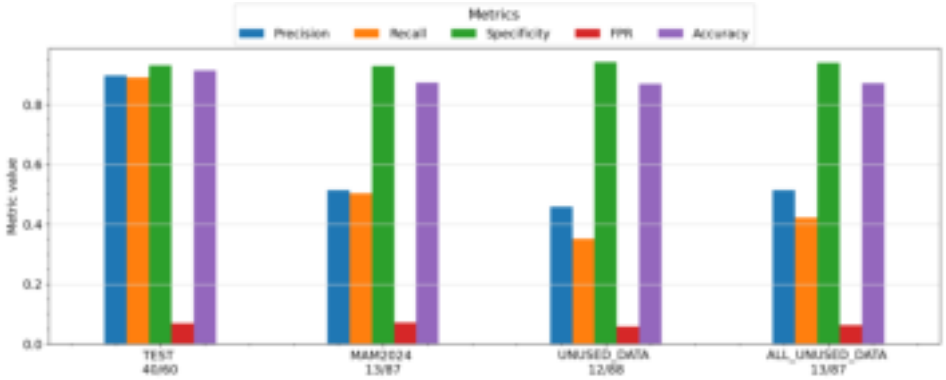


Figura 135: Métricas de desempeño para los diferentes conjuntos de datos independientes. De izquierda a derecha se muestra el valor de las métricas para los conjuntos de datos de prueba, MAM 2024, datos excluidos y datos excluidos más datos MAM2024. En el eje x se muestra además, para cada conjunto de datos, la proporción de pixeles con-lluvia/sin-lluvia.

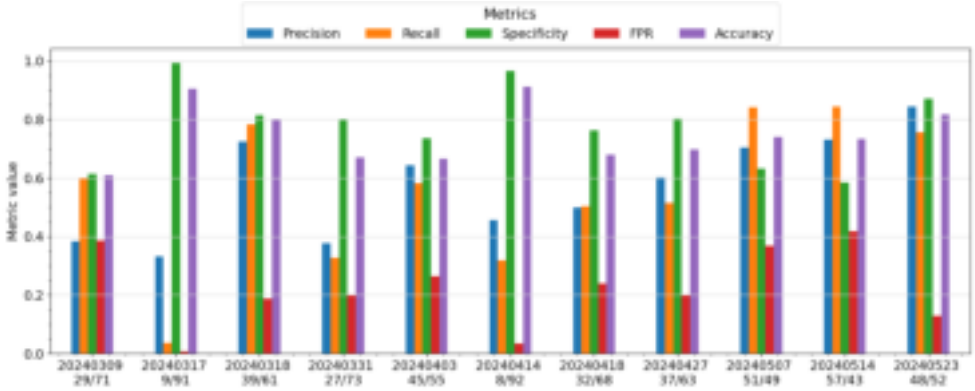


Figura 136: Métricas de desempeño para los 11 eventos de precipitación seleccionados en el periodo MAM2024. En el eje x se muestra la proporción de pixeles con-lluvia/sin-lluvia para cada evento.

Las Figuras 137 y 138 presentan los resultados de las predicciones a una hora para dos eventos de precipitación con características diferentes. El evento del 9 de marzo de 2024 exhibe alta especificidad (99 %) y baja tasa de falsos positivos (1 %): el modelo es muy bueno para identificar correctamente los días sin lluvia. Esto indica que cuando el modelo predice que no lloverá, es muy probable que esté en lo correcto. Sin embargo, el modelo tiene dificultades para identificar correctamente los casos con lluvia, reflejado en baja precisión (35 %) y bajo recall (5 %). Esto sugiere que el modelo subestima significativamente la probabilidad de lluvia, especialmente considerando el gran desequilibrio de clases (9/91). A pesar de los bajos valores de precisión y recall, la exactitud es alta (90 %) debido al gran número de casos sin lluvia en el conjunto de datos. Sin embargo, esta métrica puede ser engañosa en casos de desequilibrio de clases, ya que el modelo podría obtener una alta exactitud simplemente prediciendo siempre la clase mayoritaria (sin lluvia). En general, para este evento, el desempeño fue muy bueno en la identificación de casos secos, pero fue muy conservador al predecir los casos de lluvia. La Figura 137 muestra que el modelo CNN logra identificar regiones con una probabilidad de precipitación similar a la máscara de radar, pero estas probabilidades son generalmente bajas. Al aplicar un umbral de clasificación, se observa una alta tasa de falsos negativos, indicando que el modelo subestima la ocurrencia de precipitación.

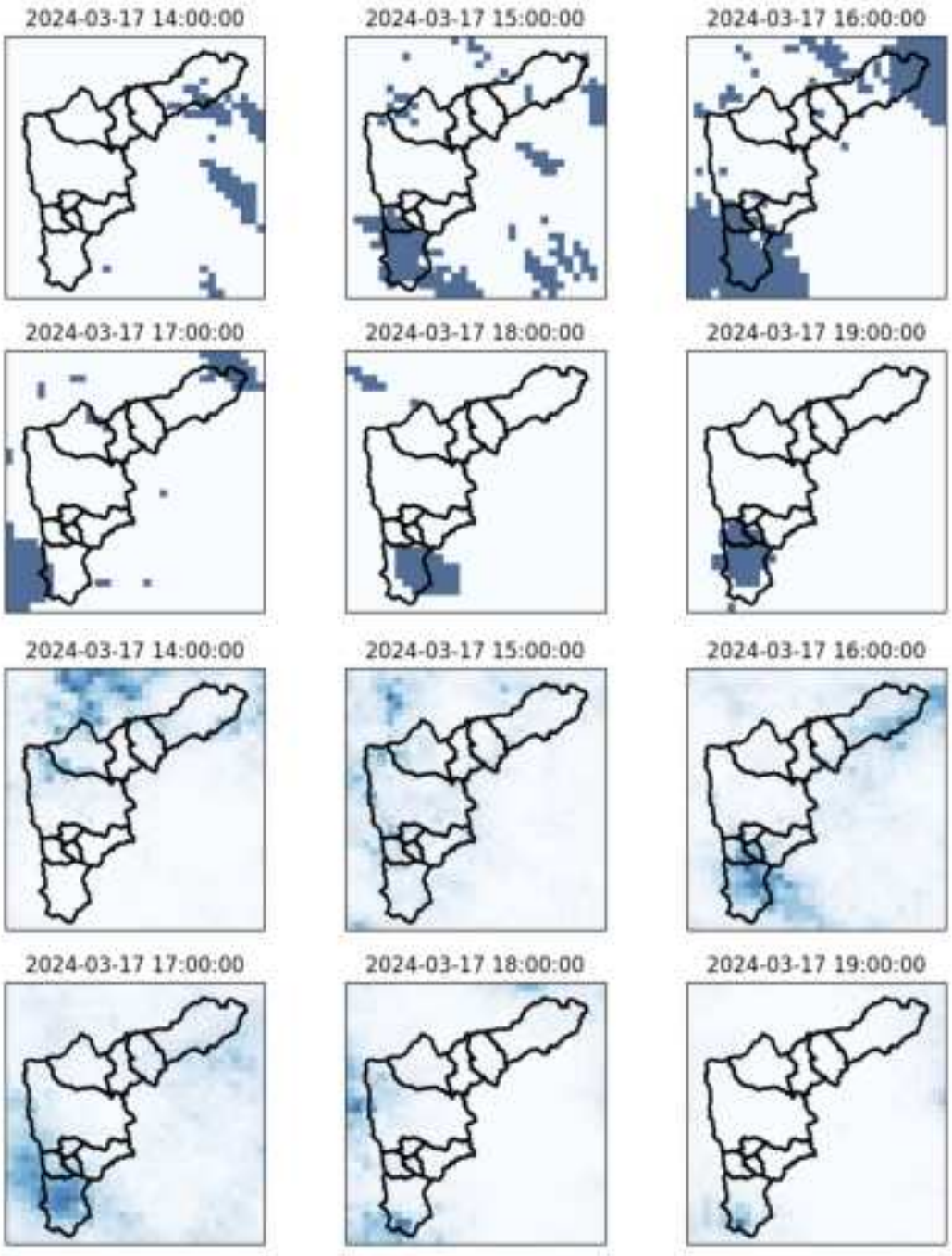


Figura 137: Clasificación de precipitación (píxeles azules) y no-precipitación utilizando la información de precipitación obtenida con datos del radar meteorológico (filas 1 y 2), y probabilidad de ocurrencia de precipitación obtenida con el modelo CNN (filas 3 y 4), para el evento del 17 de marzo del 2024.

El evento del 7 de mayo (Figura 138) muestra una mayor concordancia entre las predicciones del modelo y las observaciones de radar, revelando una mejora sustancial en su desempeño, con una mayor precisión (70 %) y recall (85 %) en comparación con el evento del 9 de marzo. Esto indica que se adapta mejor a conjuntos de datos con una distribución de clases más equilibrada. También, se obtuvo una especificidad más baja (65 %) y mayor tasa de falsos positivos (35 %), por lo que, aunque el modelo es mejor en identificar los casos de lluvia, también tiende a generar más falsos positivos. Esto significa que a veces predice lluvia cuando en realidad no llueve. En este evento, el modelo muestra un mejor desempeño general, pero aún presenta algunas limitaciones. La mayor tasa de falsos positivos sugiere que el modelo podría estar sobreajustándose a los datos de entrenamiento o que la complejidad del evento podría estar superando la capacidad del modelo.

En la Figura 139 se presenta el ciclo diurno de las métricas de desempeño del modelo, en hora local, para tres conjuntos de prueba: (a) el conjunto de prueba compuesto por el 10 % de los datos entre 2018 y 2023 (TEST), (b) el conjunto correspondiente al trimestre MAM de 2024 (MAM2024) y (c) los datos no utilizados durante el entrenamiento y validación del modelo entre 2018 y 2023 (UNUSED).

Las métricas obtenidas con el conjunto TEST muestran un comportamiento uniforme a lo largo del día, con valores de Precision, Recall, Specificity y Accuracy convergiendo hacia niveles superiores al 80 %. No obstante, el Recall experimenta una pequeña disminución entre las 10:00 y las 14:00 horas. La tasa de falsos positivos (FPR) se mantiene consistentemente baja (¡10 %), lo que sugiere un buen desempeño general del modelo en este conjunto de datos. Este comportamiento indica que el conjunto TEST está bien balanceado, y la baja dispersión entre las métricas refuerza la idea de un modelo robusto bajo estas condiciones.

En el caso del conjunto MAM2024, se observa mayor variabilidad en Precision y Recall, mientras que Specificity y Accuracy permanecen consistentes. El Recall, en particular, presenta fluctuaciones más pronunciadas durante las horas de la tarde. Este comportamiento se explica por la naturaleza no balanceada del conjunto, que incluye todo el registro de datos del trimestre MAM. Las oscilaciones en Precision y Recall sugieren la necesidad de ajustar los datos de entrada o los parámetros del modelo para mejorar su capacidad de generalización en escenarios con mayor variabilidad o desbalanceados.

De manera similar, los resultados para el conjunto UNUSED 2018-2023 revelan métricas de Specificity y Accuracy consistentemente altas (¿80 %), lo que denota un buen desempeño general y una baja tasa de falsos positivos. Sin embargo, Precision muestra oscilaciones moderadas (40 %-60 %), especialmente alrededor del mediodía, mientras que el Recall decrece progresivamente durante la mañana, indicando dificultades en la identificación de eventos positivos en estas horas. La FPR se mantiene baja (¡20 %), lo que refleja una baja proporción de falsos positivos en este conjunto de datos. Estos resultados sugieren que el modelo enfrenta desafíos específicos relacionados con Precision y Recall, probablemente asociados a un desbalance en los datos (mayor proporción de eventos negativos que positivos).

En general, el modelo exhibe mayor efectividad en la clasificación de eventos negativos (alta Specificity) en comparación con eventos positivos (bajo Recall en ciertos momentos), destacando un desempeño sólido pero con áreas de oportunidad para mejorar la detección de eventos positivos en situaciones con desbalances o mayor complejidad en los datos.

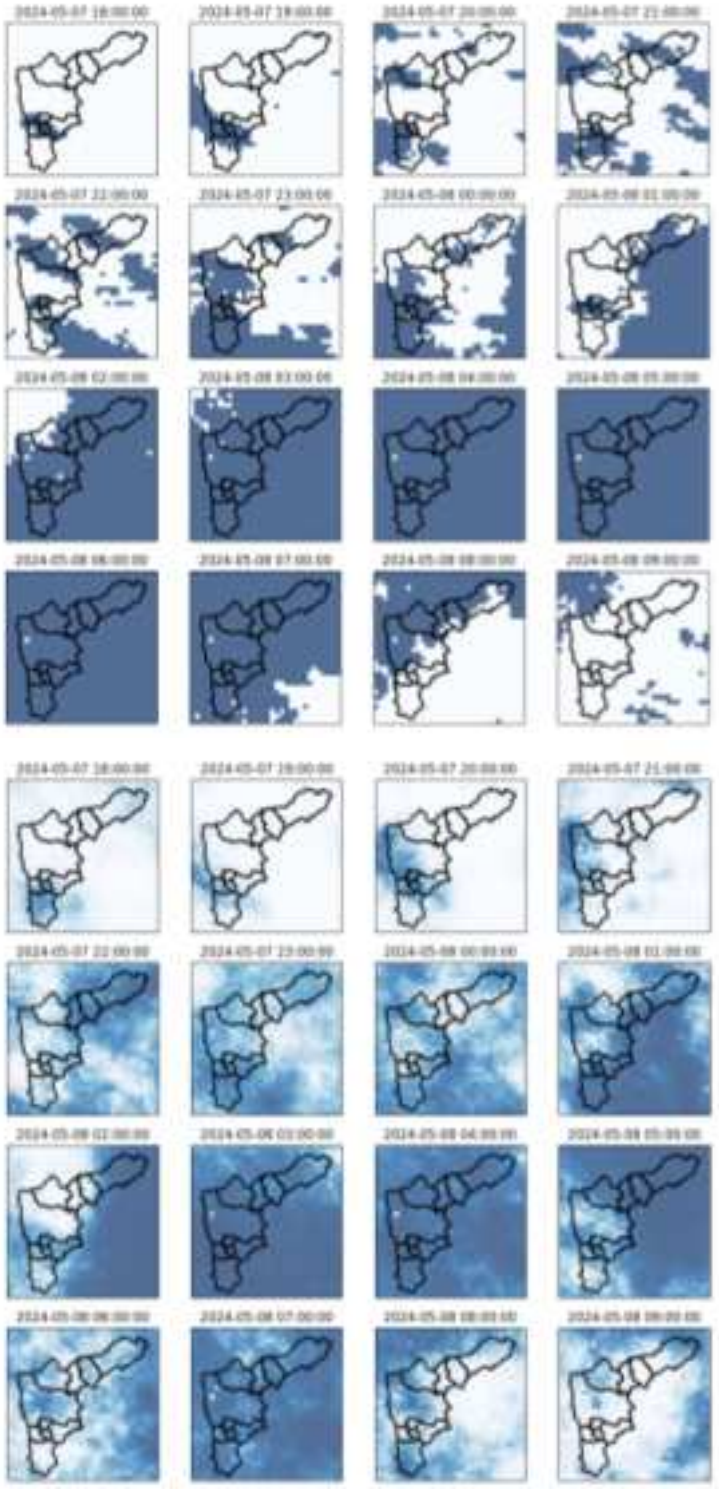


Figura 138: Clasificación de precipitación (píxeles azules) y no-precipitación utilizando la información de precipitación obtenida con datos del radar meteorológico (filas 1 a 4), y probabilidad de ocurrencia de precipitación obtenida con el modelo CNN (filas 5 a 8), para el evento del 07 de mayo del 2024.

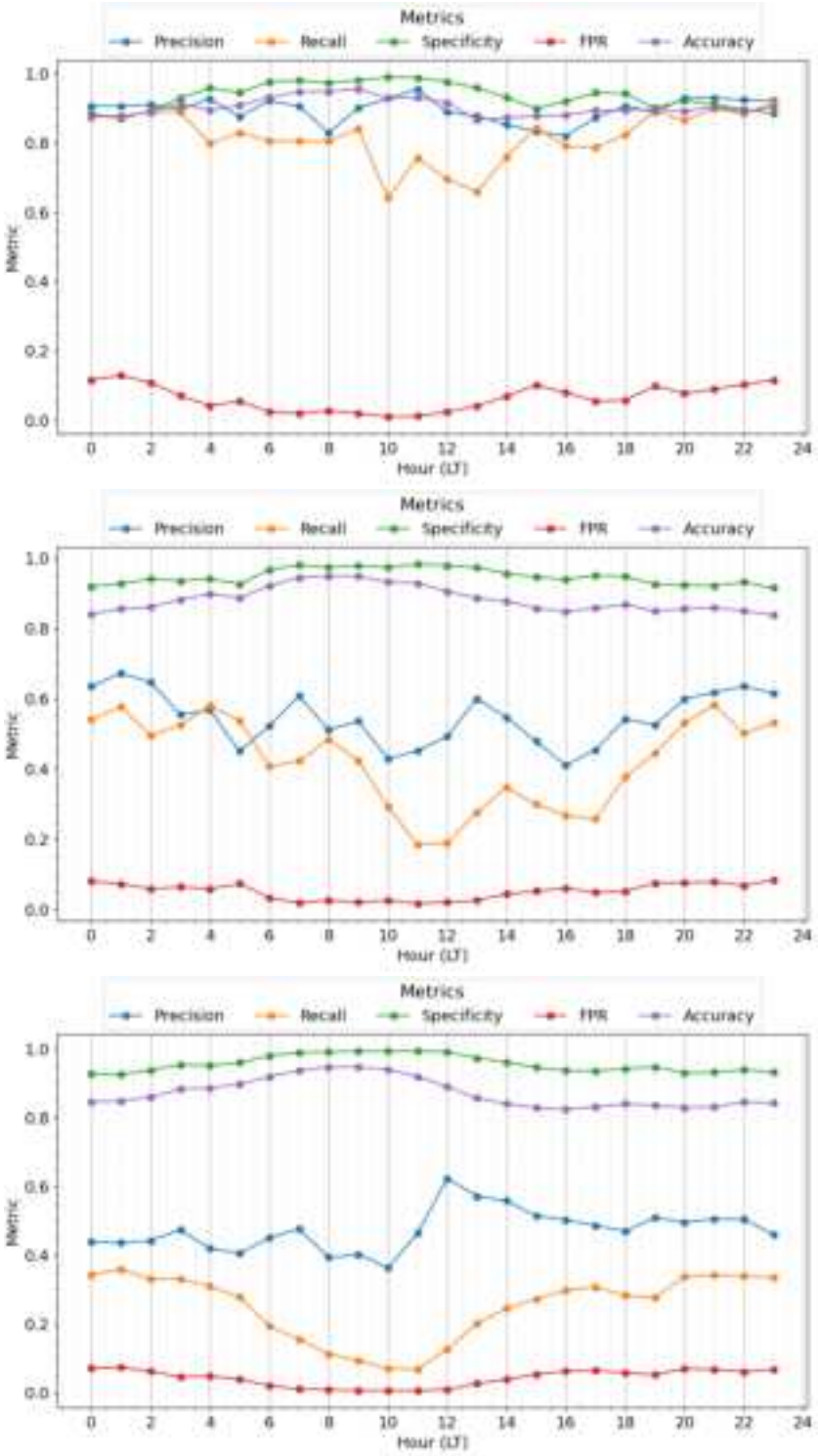


Figura 139: Ciclo diurno de las métricas de desempeño para las diferentes bases de datos utilizadas en la evaluación del modelo CNN.

Comparación del modelo CNN con otros pronósticos operacionales

En el periodo MAM 2024, el modelo CNN superó al modelo WRF en precisión (58.9 % frente a 25.9 %), aunque el WRF presentó un recall ligeramente mayor (51.7 % frente a 44.4 %). Esto indica que el modelo CNN genera menos falsos positivos, mientras que el WRF tiende a producir menos falsos negativos. Finalmente, al comparar el modelo CNN con el modelo estadístico, se obtuvieron métricas superiores en precisión y recall con el modelo CNN (valores superiores al 50 %) frente al modelo estadístico (valores inferiores al 40 %) como se observa en la Figura 140.

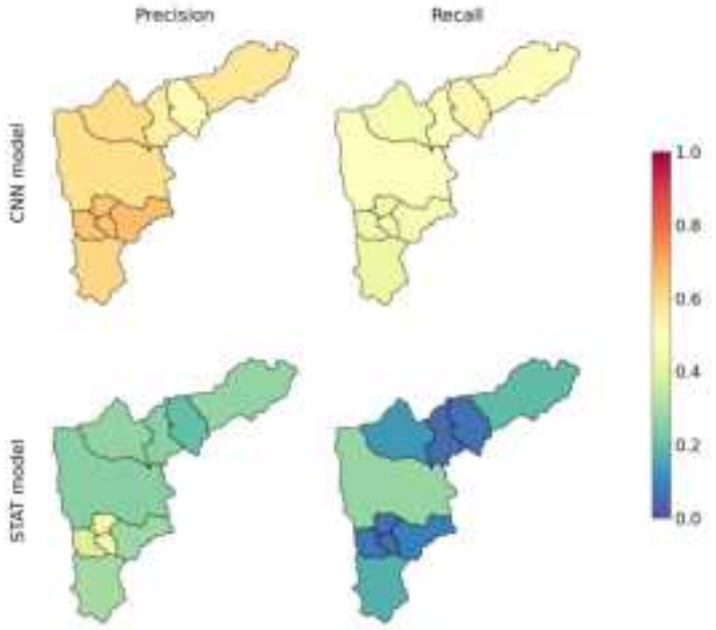


Figura 140: Métricas de desempeño (Precision y Recall) para cada uno de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, obtenidas el comparar los resultados en el periodo MAM2024 del modelo CNN y del modelo WRF con los datos del radar meteorológico.

Parte III: Monitoreo de fuentes de humedad hacia el territorio metropolitano

Introducción

La identificación de las fuentes de humedad hacia el territorio y los procesos de transporte de dicha humedad a través de la atmósfera es relevante para complementar el monitoreo de las condiciones ambientales en el Valle de Aburrá, y en especial aquellas asociadas a la vulnerabilidad del territorio a variaciones en los atributos de fuentes de humedad y patrones de transporte en la atmósfera.

Múltiples estudios han identificado las principales fuentes de humedad hacia diferentes regiones de Colombia, junto con los procesos que modulan su transporte estacional de humedad. Arias et al. (2015) evaluaron las diferentes fuentes de humedad y sus procesos de transporte durante la temporada de 2010-2012 en el norte de Suramérica a partir de los campos del flujo de humedad integrado en la vertical y el monitoreo, a partir de índices que se relacionan con las corrientes viento de bajo nivel que confluyen en la región. Sus análisis sugieren que la humedad desde el océano Pacífico y el mar Caribe fueron relevantes para el periodo de interés, a partir del transporte ejercido por el Jet del Chocó, junto con el debilitamiento del Jet del Caribe y el desarrollo de flujos anómalos hacia el sur. Por otro lado, Hoyos et al. (2018) y Hoyos et al. (2019), a partir de diferentes métodos, obtienen que regiones como el océano Atlántico, el océano Pacífico y las cuencas del Amazonas y del Orinoco tienen un papel importante como fuentes de humedad atmosférica hacia Colombia, junto con su variabilidad.

Lo anterior indica la diversidad de fuentes de humedad hacia el territorio, junto con los procesos que permiten su transporte a través de la atmósfera; y a su vez, reafirma la importancia de realizar el monitoreo de dicho transporte de humedad atmosférica para evaluar fluctuaciones en las condiciones ambientales en el Valle de Aburrá, desde condiciones más húmedas a más secas, por cambios en la disponibilidad de humedad en la columna atmosférica de la región. Por lo anterior, en este informe se presentan los productos generados durante el contrato 016 de 2024 para el monitoreo de los patrones de transporte de humedad hacia el territorio.

Metodología

Para realizar el monitoreo de los patrones de transporte de humedad atmosférica hacia el territorio metropolitano, se tomó la información del Sistema de Pronóstico Global (GFS por sus siglas en inglés, National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce (2007)) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de Estados Unidos (NOAA) en resolución espacial de 0.5° y con información de pronóstico de variables atmosféricas cada 3 horas. A partir de esta información, este producto se ejecuta de manera operativa para las 13:00, 19:00, 01:00 y 07:00 de cada día, el cálculo de los campos del Flujo de Humedad Integrado en la Vertical (VIMF, ecuación 8.8), el cual toma información de humedad específica (q, Kg/Kg), la aceleración de la gravedad (g, m/s2) y el vector de viento (V, m/s) en un rango de niveles de presión (Pl a Pu, Pa):

$$VIMF = \frac{1}{g}\int_{pl}^{pu} \mathbf{V} q dp \tag{8.8}$$

Por otro lado, se calculó el divergente del campo del VIMF para obtener los patrones de convergencia y divergencia (Divergencia del Flujo de Humedad Integrado en la vertical, VIMFD). Este análisis se realizó para la tropósfera baja, definida entre los niveles de 1000 a 850 hPa, y la troposfera media, definida entre los niveles de 650 a 500 hPa.

Además, se realizó el monitoreo de dos corrientes de bajo nivel que tienen un rol en el transporte de humedad atmosférica hacia la región: el jet del Chocó y la corriente de bajo nivel del Orinoco. El índice para el monitoreo del jet del Orinoco definido por Sierra et al. (2021) se basa en el valor máximo del viento zonal a 925 hPa promediado entre las longitudes de 80°W y 82°W y a lo largo de las latitudes de 10°S y 10°N, mientras que la ubicación latitudinal del jet se obtiene a partir de la latitud en donde se encuentre el máximo de viento zonal. Por otro lado, el índice del monitoreo de la corriente de bajo nivel del Orinoco se define como el promedio de viento meridional en la región comprendida entre los 3°N-5°N y 73°W-67°W entre los niveles de 950 y 825 hPa (Correa et al. (2024), Jiménez-Sánchez et al. (2019)).

Resultados

La Figura 141 muestra el producto de monitoreo del VIMF (vectores) y el VIMFD (barra de colores) para la troposfera baja y media. El tamaño y la orientación de los vectores representan la magnitud y dirección del VIMF en el rango de presiones específico, mientras que los valores positivos del VIMFD (tonalidades violetas) representan divergencia del flujo, mientras que valores negativos (tonalidades verdes) representan la convergencia del flujo. Dado que el producto se realiza a partir del producto de pronóstico del GFS, dicho producto se obtiene diariamente para las 13:00 y 19:00 de ese día, y las 01:00 y 07:00 del día posterior, con el fin de actualizar constantemente los campos de pronóstico e intentar reducir la incertidumbre asociada a la ventana del pronóstico.

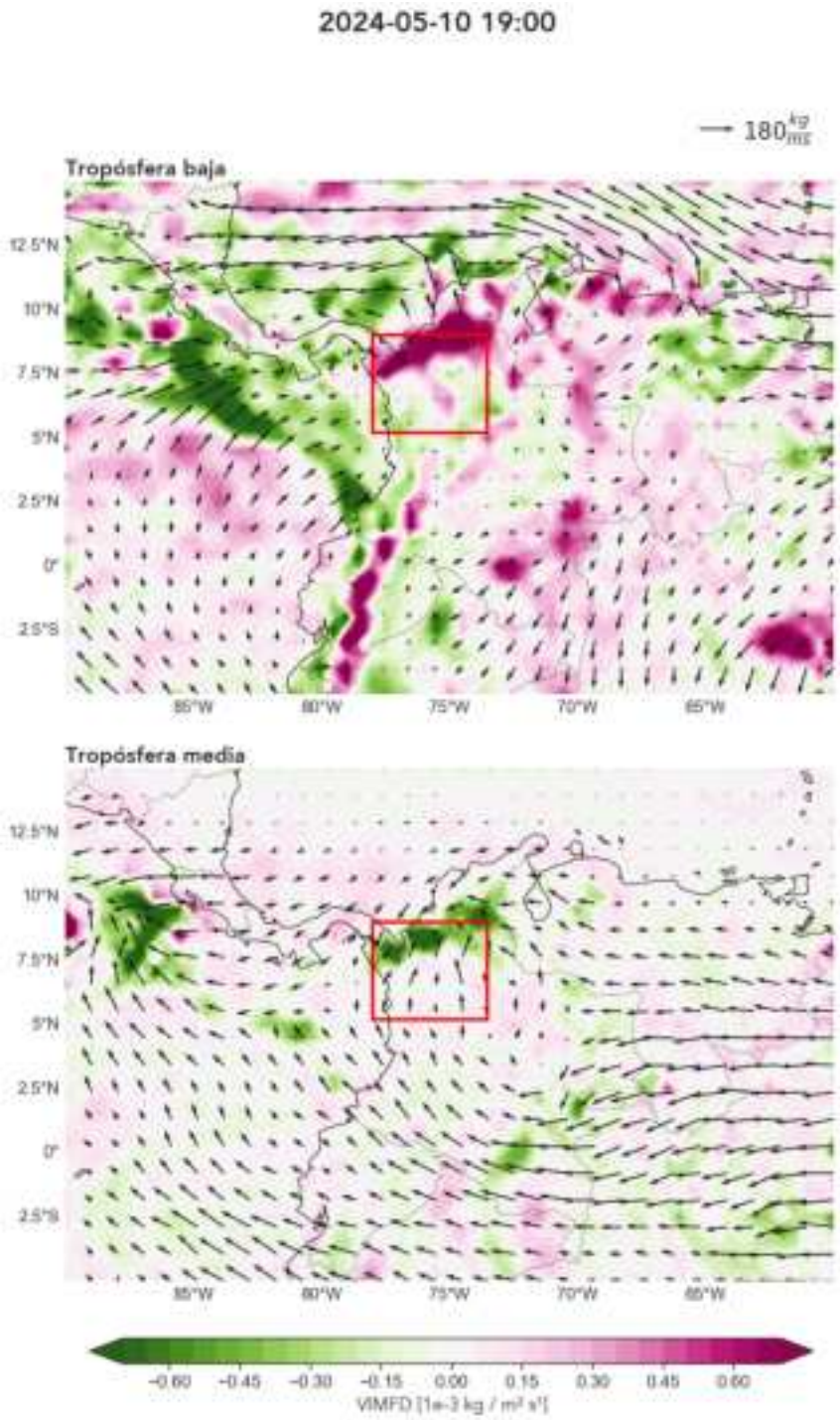


Figura 141: Monitoreo del flujo de humedad integrado en la vertical (VIMF, vectores) y la divergencia del campo (VIMFD, barra de colores) para la tropósfera baja (panel superior) y la troposfera media (panel inferior). El recuadro rojo representa la región de Antioquia.

De manera similar, la Figura 142 muestra el índice de la intensidad y ubicación del jet del Chocó a partir de la información del GFS. El panel superior muestra la intensidad del jet en función del valor máximo del viento zonal, mientras que en el panel inferior se presenta la latitud donde se encuentre la actividad máxima del jet en función del viento zonal, i.e, la ubicación del jet.

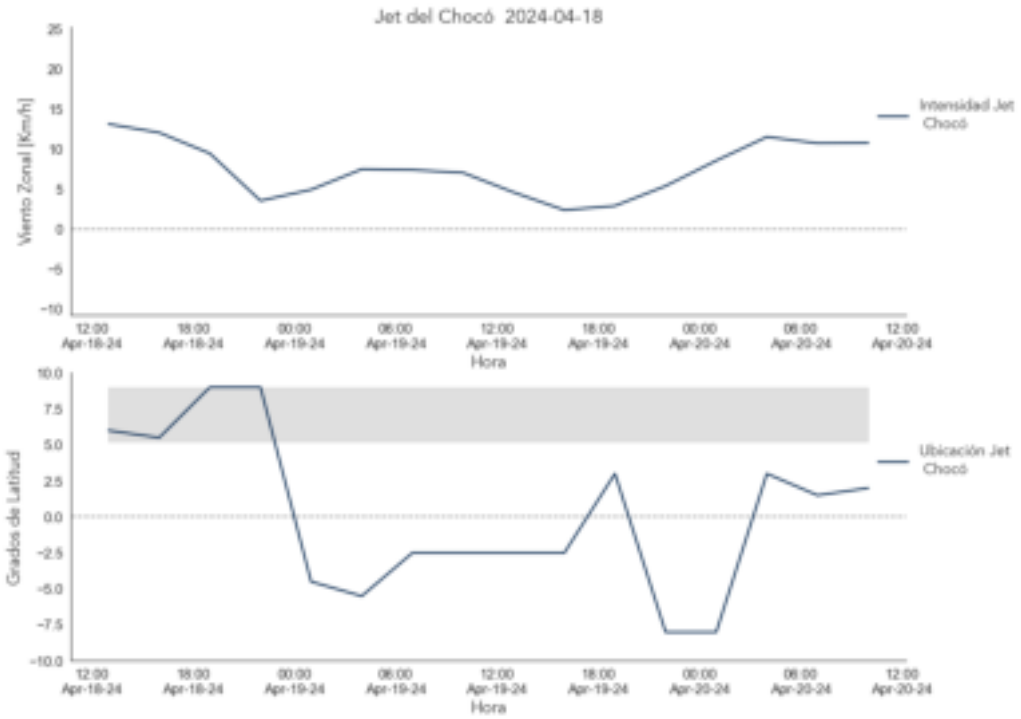


Figura 142: índice del jet del Chocó a partir del máximo de viento zonal a 925 hPa en el oeste de Colombia, que indica la intensidad del jet (panel superior), junto con la latitud donde se encuentra la mayor intensidad del jet (panel inferior). La región sombreada en el panel de la ubicación del jet indican las latitudes que corresponden a la región de Antioquia.

Por otro lado, la Figura 143 muestra el índice de monitoreo de la corriente de bajo nivel del Orinoco a partir del viento meridional promediado entre los 825 y 950 hPa en una región en la cuenca del Orinoco. Dado que las componentes del viento, en función de su signo, también dan razón de la dirección del mismo, valores positivos del viento meridional indican flujos hacia el norte, mientras que valores negativos indican flujos hacia el sur. Esto permite monitorear tanto la intensidad de la corriente como su dirección predominante, lo cual adquiere relevancia al momento de relacionar la circulación de vientos con su transporte de humedad hacia la región.

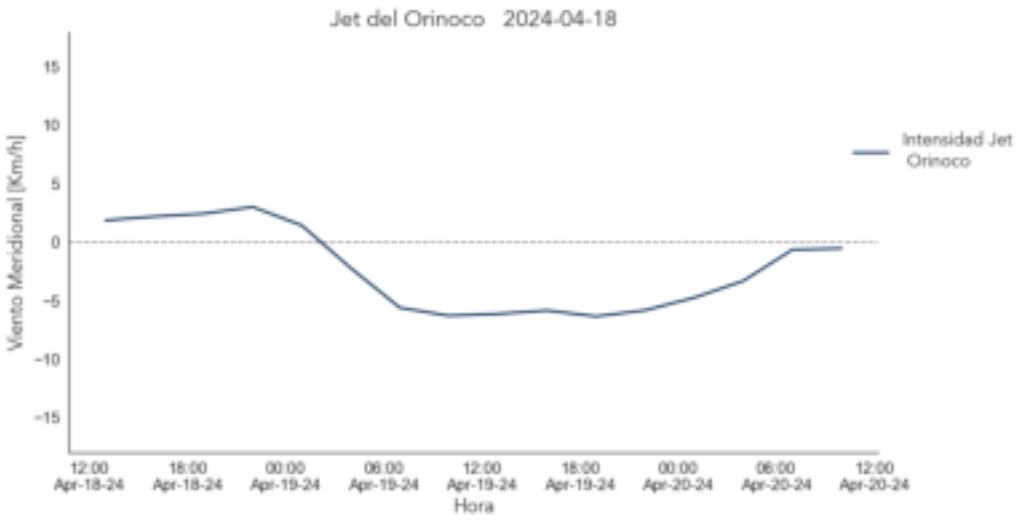


Figura 143: índice de la corriente de bajo nivel del Orinoco en función del viento meridional entre 825 y 950 hPa en la cuenca del Orinoco. Siguiendo la convención del viento meridional, valores positivos indican flujos hacia el norte, mientras que valores negativos indican flujos hacia el sur.

Conclusiones

Dada la contribución de humedad atmosférica desde regiones oceánicas como el Atlántico y Pacífico, y desde regiones continentales como el Orinoco y la Amazonía para Colombia y su región Andina, es relevante realizar el monitoreo de los patrones de circulación atmosférica que modulan el transporte de humedad hacia el territorio. Por lo anterior se realizaron un conjunto de productos operativos para adelantar el análisis y monitoreo del transporte de humedad hacia el territorio desde diferentes fuentes.

Para esto, se usó la información del Modelo Atmosférico de Pronóstico GFS, la cual compone información atmosférica de pronóstico, con resolución espacial de 0.5°, y se calcularon los campos de flujo de humedad integrado en la vertical en la tropósfera media y baja, junto con sus respectivos campos de divergencia. Adicionalmente, se calcularon algunos índices para el monitoreo del jet del Chocó y la corriente de bajo nivel del Orinoco con el fin relacionar la actividad de estos fenómenos con un mayor o menor transporte de humedad desde regiones específicas, en este caso desde la cuenca del Orinoco y el océano Pacífico.

Estas herramientas pueden contribuir a un mejor monitoreo de las condiciones ambientales del territorio al complementar el pronóstico operacional que se realiza para la región, entregando información adicional del estado de las circulaciones de viento regionales, y su modulación en el movimiento de la humedad en la atmósfera, permitiendo fortalecer los procesos de alerta temprana en el Valle de Aburrá.

Parte IV: Exploración de la influencia de la oscilación intraestacional de Madden-Julian en las condiciones hidrometeorológicas del Valle de Aburrá y su región vecina

Introducción

La variabilidad climática natural de la hidroclimatología de Colombia y del Valle de Aburrá está determinada tanto por procesos de gran escala como por factores locales que influyen en su variabilidad espacial y temporal. En cuanto a la variabilidad espacial, la precipitación está condicionada por la interacción de la circulación global con aspectos geográficos, como la localización en una región tropical con topografía compleja debido a su ubicación sobre la cordillera de los Andes. En la escala temporal, la variabilidad está modulada por la influencia de fenómenos climáticos de gran escala, como el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur (ENSO), que ocurre en una escala interanual, aproximadamente entre 3 y 7 años. A escala anual, se identifican diversos factores que afectan la variación de la hidroclimatología del país, como el Chorro del Chocó y los sistemas convectivos de mesoescala; sin embargo, el principal modulador es el desplazamiento de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) (Poveda, 2004).

En la escala intraestacional, entendida como la variabilidad que ocurre entre alrededor de los 20 y 100 días, el fenómeno dominante es la Oscilación de Madden-Julian (MJO), la cual ha mostrado impactos a nivel global sobre la precipitación y los eventos extremos (Yoneyama and Zhang, 2020). No obstante, en esta escala, la precipitación también se asocia a la ocurrencia de episodios de lluvias extremas (Waliser and Lau, 2005; Torres-Pineda and Pabón-Caicedo, 2017), los cuales no pueden atribuirse a un solo mecanismo, sino a la influencia o combinación de varios (Arias and Poveda, 2005), como los huracanes sobre el Caribe y el Pacífico nororiental, la Oscilación de Madden-Julian (MJO) y/o las ondas tropicales del Este (Poveda et al., 2002; Poveda, 2004). La influencia de estos mecanismos demuestra la gran complejidad en el entendimiento de la precipitación en esta escala temporal.

En Colombia, si bien son pocos los estudios que se han desarrollado, los avances en la comprensión de la variabilidad intraestacional parten del análisis de precipitación y temperatura, tanto de estaciones como de fuentes satelitales. Dentro de los aspectos a resaltar, se ha identificado que los principales modos de variabilidad intraestacional de la precipitación en Colombia presentan periodos dominantes de 20 y 30 días, que podrían estar asociados con la MJO (Yepes Palacio, 2012). En el caso de la precipitación extrema, se presenta una probabilidad de ocurrencia de eventos extremos con una variación del 20-30 %, con mayor intensificación sobre los Andes colombianos en la fase 8 y sobre la parte noroeste del país en la fase 1 de la MJO (Grimm, 2019).

Estudios a nivel de Suramérica han encontrado que la respuesta a la actividad de la MJO sobre el continente se logra observar mediante cambios en las regiones de convergencia y divergencia de alto nivel en la zona tropical, así como una diferencia entre trimestres del año, donde la probabilidad de excedencia de la precipitación acumulada tiende al aumento durante las fases 1 y 8, mientras esta probabilidad se reduce durante fases 4 y 5, siendo más fuertes durante los trimestres SON y JJA Alvarez et al. (2016).

Cabe mencionar que la escala intraestacional se define entre 20-100 días, pero los diferentes estudios se centran en aquellos periodos que dominan la variabilidad en cada región de interés o del fenómeno que se desea analizar. Usualmente, el análisis de estas bandas requiere técnicas de filtrado en una banda específica; sin embargo, resultados a partir de datos diarios crudos pueden dar una idea de la variabilidad en esta escala. Por ejemplo, Recalde-Coronel et al. (2020) encuentra que la variabilidad de la precipitación sobre la región andina tiende a verse favorecida en las fases 8+1, mientras se inhibe durante las fases 4+5 de la MJO. Por el contrario, hacia el noreste de Colombia es posible apreciar una respuesta diferente, donde se favorece la convección durante las fases 6+7 y tiende a suprimirse durante las fases 2+3.

Metodología

Variabilidad intraestacional sobre nuestro territorio

Con el fin de comprender mejor la variabilidad intraestacional en nuestro territorio, este estudio tiene como objetivo explorar las posibles influencias de fenómenos macroclimáticos de variabilidad natural sobre las condiciones hidrometeorológicas del Valle de Aburrá y sus regiones vecinas, centrándose en la influencia de la Oscilación de Madden-Julian (MJO). Dado que los fenómenos climáticos de gran escala afectan frecuencias específicas dentro de la banda intraestacional (20-100 días) y no toda su amplitud, es crucial identificar el porcentaje de varianza en ciertas frecuencias clave. Para este análisis, se utilizó la base de datos satelital IMERG Huffman et al. (2015), para el periodo comprendido entre 2001-2023. Inicialmente, se calcula el porcentaje de varianza en diferentes bandas temporales relevantes para la región de Colombia y Antioquia, comenzando con la banda intraestacional (20-100 días) y la banda de 30-90 días asociada a la MJO. Con el fin de comparar la contribución de otras frecuencias, también se estima el porcentaje de varianza para las componentes semianual (5-7 meses) y anual (11-13 meses). Este enfoque permite evaluar de manera más completa la influencia de la MJO sobre la variabilidad hidrometeorológica en el Valle de Aburrá.

Los mapas de varianza (Figura 144) en la banda intraestacional (20-110 días) muestran que sobre la cordillera de los Andes el porcentaje de variabilidad es de alrededor más del 20 %, mientras que en el resto de Colombia es de aproximadamente el 15 %. Sin embargo, al analizar la banda asociada a la MJO (30-90 días), aunque el porcentaje disminuye, sigue evidenciándose una mayor variabilidad sobre las cordilleras, alcanzando un 10-15 %, este valor es considerablemente alto en comparación con la variabilidad anual y semianual que caracteriza al país. En la región andina predomina un régimen bimodal (aproximadamente 10 %), mientras que en el norte del país y parte de la región del Orinoco, el régimen anual domina con porcentajes del orden de 15-10 %.

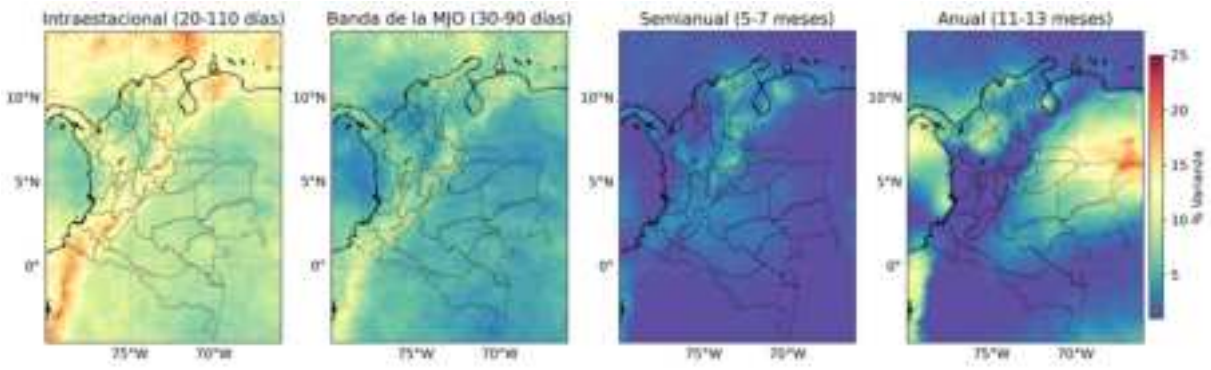


Figura 144: Porcentaje de varianza para las bandas intraestacional, semianual y anual sobre Colombia

Estas mismas bandas sobre Antioquia (Figura 145) y el Valle de Aburrá, permiten notar que sobre el Valle alrededor de un 15 % de la variabilidad se da en la banda intraestacional y un 10 % en la banda de la MJO. Así mismo es posible notar que la banda semianual domina el régimen de precipitación sobre el Valle en comparación de la anual que para la región vecina, hacia el norte del departamento presenta valores del 15 % de varianza.

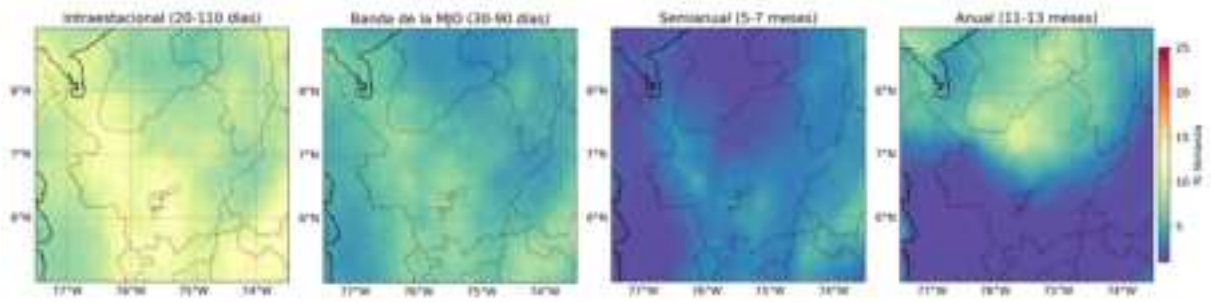


Figura 145: Porcentaje de varianza para las bandas intraestacional, semianual y anual sobre Antioquia

Oscilación de Madden-Julian (MJO)

La Oscilación de Madden-Julian (MJO, por sus siglas en inglés) es el principal modo de variabilidad climática intraestacional en los trópicos, caracterizada por su organización a escala global y un período que típicamente varía entre 30 y 90 días (Madden and Julian, 1972). Este fenómeno se manifiesta como una región de convección profunda intensificada que se propaga hacia el este, acompañada de nubosidad y precipitaciones, especialmente sobre el Pacífico occidental (Woolnough, 2019). Las anomalías convectivas intraestacionales de gran escala que conforman la MJO presentan distintas formas de propagación a lo largo del ecuador, siendo rastreables a través de los trópicos por su influencia en el campo de viento (Figura 146a), así mismo, la estructura de la MJO esta comprendida por un dipolo de convección el cual tienen una región de lluvia intensificada y otra de lluvia suprimida, típicamente observadas sobre los océanos Índico occidental y Pacífico. Este patrón de anomalías de precipitación se desplaza hacia el este a una velocidad aproximada de 5 m/s, manteniéndose activo mientras cruza las cálidas aguas del Pacífico tropical occidental, donde alcanza su máxima intensidad (Madden and Julian, 1971, 1972; Zhang, 2015). Aunque la nubosidad y las precipitaciones suelen debilitarse al este de los 180º de longitud, la señal de viento asociada a la MJO continúa propagándose hacia el este, atravesando el Pacífico oriental, América del Sur y el Atlántico tropical.

El monitoreo de la MJO se realiza mediante el seguimiento del desplazamiento desde el este de las anomalías de convección, para esto, este desplazamiento se clasifica en fases numeradas del 1 al 8 (Figura 146b), cada una de esta fase representa una región geográfica diferente:

- Fases 1 y 2: MJO activa sobre África y el Océano Índico occidental.
- Fases 3 y 4: MJO activa sobre el Océano Índico oriental y el Mar de Indonesia.
- Fases 5 y 6: MJO sobre el Océano Pacífico occidental.
- Fases 7 y 8: MJO en el Océano Pacífico central y oriental.

Este desplazamiento se representa utilizando el Índice Multivariado en Tiempo Real (RMM), formulado por Wheeler and Hendon (2004), el cual indica tanto la ubicación como la intensidad de la oscilación. Cuando el índice RMM está cerca del centro del diagrama de fase (también llamado diagrama de Wheeler-Hendon) y mostrado en la Figura 146c (Tomado de `http://www.bom.gov.au/climate/mjo/#tabs=Monitoring`), indica una MJO débil o inactiva. Cuando el valor está más lejos del centro, la MJO es más fuerte.

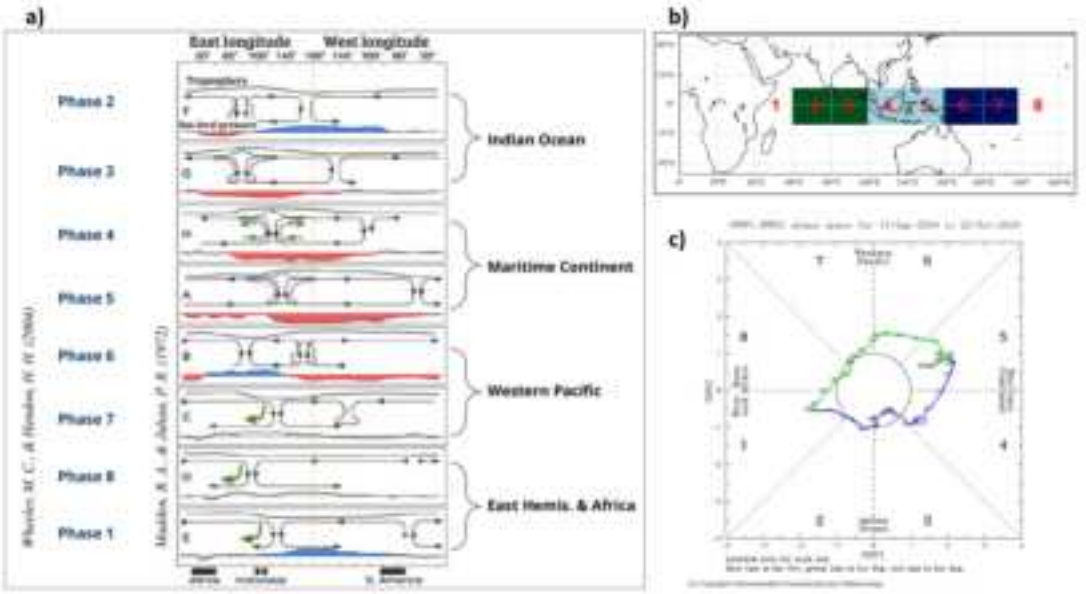


Figura 146: Representación de la localización de las fases de la MJO, regiones geográficas del índice RMM y diagrama de fases del mismo.

Resultados

Relación de la MJO y la precipitación sobre el Valle de Aburrá, y su región vecina

Durante el desplazamiento de la MJO en su región de influencia (Indo-Pacífico), es importante identificar si, en alguna de sus fases, nuestra región de interés presenta patrones característicos de precipitación. Para ello, se analizan las anomalías de precipitación asociadas a cada fase de la MJO. Este análisis se realiza utilizando el índice RMM, el cual es fácilmente accesible y puede descargarse en `http://www.bom.gov.au/climate/mjo/graphics/rmm.74toRealtime.txt`.

Para la estimación de las anomalías diarias, se utiliza una climatología diaria basada en una media móvil de 31 días. Sin embargo, antes de seleccionar esta opción, se analizaron dos ventanas adicionales de 7 y 15 días, con el objetivo de capturar la variabilidad intraestacional y eliminar el ruido que genera el uso de una climatología diaria. En la Figura 147 se muestra, el promedio de la precipitación para una región centrada en el Valle de Aburrá, utilizando la base de datos IMERG, la comparación entre una climatología sin suavizado (en color gris) y las diferentes ventanas consideradas (en colores). La ventana de 31 días captura adecuadamente la variabilidad a lo largo del año, y con esta referencia se estiman las anomalías diarias para el periodo de análisis 2001-2023.

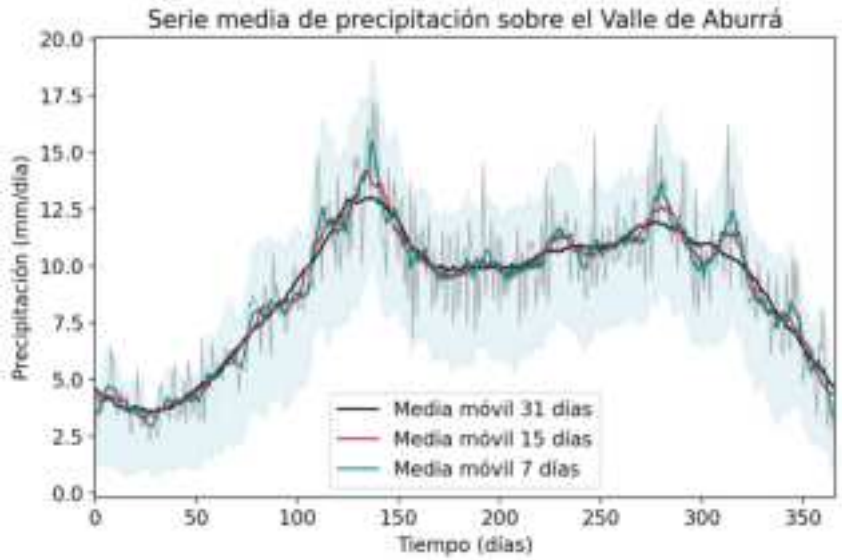


Figura 147: Climatología suavizada con diferentes ventanas temporales para el cálculo de anomalías diarias de precipitación. La serie de precipitación se estima a partir de la base de datos satelital IMERG y corresponde a un promedio regional centrado en el Valle de Aburrá, para el período 2001–2023.

Una vez se estiman las anomalías diarias sobre todo el territorio de interés, Colombia y Antioquia, estas son agrupadas en las fases del índice RMM. En la Figura 148 se representan las anomalías promedio para cada una de las fases. En primer lugar, se identifican patrones generalizados tanto de anomalías positivas y negativas en todo el territorio de acuerdo a la localización de la oscilación. Cuando la MJO esta en las fases 3 a 6 se tienen anomalías negativas en casi todo Colombia, con excepción una región del noreste de Colombia (sobre Córdoba, norte de Choco y Antioquia), donde en la fase 5 y 6, la anomalías son levemente positivas. A su vez, un patrón generalizado de anomalías de precipitación en todo el territorio se presenta cuando la MJO se localiza en las fases 7,8,1,2. Estos resultados son acordes a los reportados por Rojo Hernandez and Mesa (2018), el cual muestra que durante las fases 8,1,2 las anomalías positivas de la precipitación en Colombia aumentan.

Al explorar la respuesta de las anomalías en el departamento de Antioquia y el Valle de Aburrá (Figura 149), se observa que estas siguen una tendencia similar a la señal generalizada de Colombia mencionada previamente. En el Valle de Aburrá, las anomalías negativas se presentan en las fases 3, 4, 5 y 6, mientras que las anomalías positivas ocurren durante las fases 7, 8, 1 y 2. Es importante destacar que, cuando las anomalías son positivas en el Valle, se registran anomalías negativas en la región noroccidental del departamento, que abarca el norte del Chocó y parte del departamento de Córdoba.

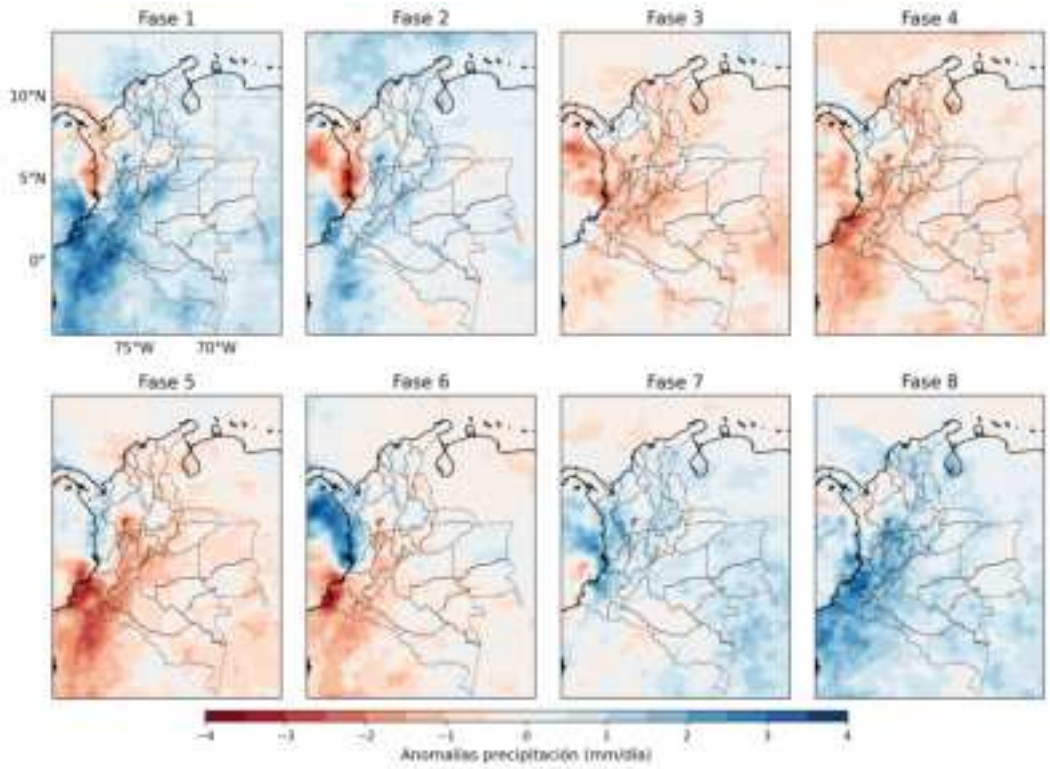


Figura 148: Anomalías de precipitación durante las fases de la MJO sobre Colombia. Usando IMERG entre 2001-2023.

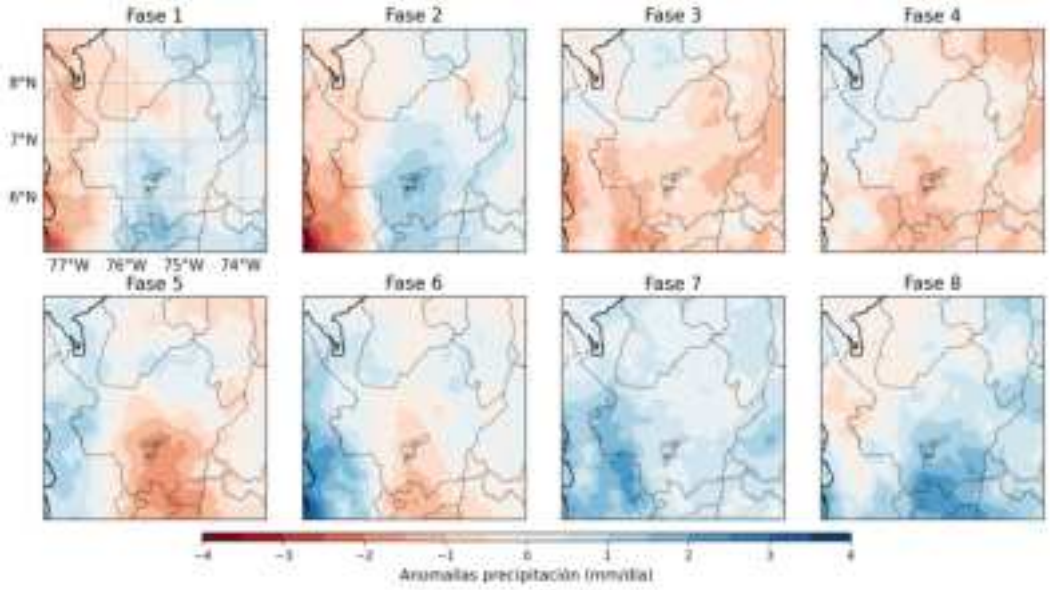


Figura 149: Anomalías de precipitación durante las fases de la MJO sobre Antioquia.

Relación de la MJO y las fases del ENSO sobre el Valle de Aburrá, y su región vecina

Con el fin de conectar el estado de la MJO (escala intraestacional) con el del ENSO (escala interanual), se estiman los campos de anomalías para las ocho fases de la MJO durante las fases cálida y fría del ENSO. Los acumulados de precipitación en nuestro territorio están influenciados por este fenómeno, y se observa que la magnitud de las anomalías es mayor durante las fases del ENSO, con rangos que van de -20 a 20 mm/día (Figuras 150 y 151).

Durante la fase El Niño, generalmente se evidencian disminuciones en las precipitaciones en gran parte de la región andina y, por ende, en el Valle de Aburrá. Al observar las fases de la MJO, se manifiesta una dominancia de anomalías negativas en todas las fases, con ciertas particularidades. Por ejemplo, durante la fase 6, que en condiciones normales tiende a ser negativa, se observan anomalías positivas muy localizadas en el Valle y hacia el este durante la fase cálida de la MJO-ENSO. Cabe mencionar que este análisis es un promedio de menos fechas que si se tomara todo el periodo, por lo que para tener robustez en estos resultados, se requiere un registro de datos más amplio. En la Figura 150, se muestra en color gris el número de eventos para cada fase de la MJO.

Por otro lado, la fase La Niña está asociada con un incremento de las precipitaciones en gran parte de la región andina. Esto se evidencia durante las fases de la MJO, ya que aquellas fases que en promedio tienden a ser negativas (fases 3-6) cambian su patrón a positivo cuando la MJO se localiza en el Índico oriental, el mar de Indonesia y el Pacífico occidental. En particular, la fase 5 tiende a mostrar la mayor magnitud de anomalía positiva. Por el contrario, las fases 1, 2, 7 y 8, a pesar de mantener una señal positiva casi generalizada, presentan una señal más débil en comparación con las otras fases (Figura 151).

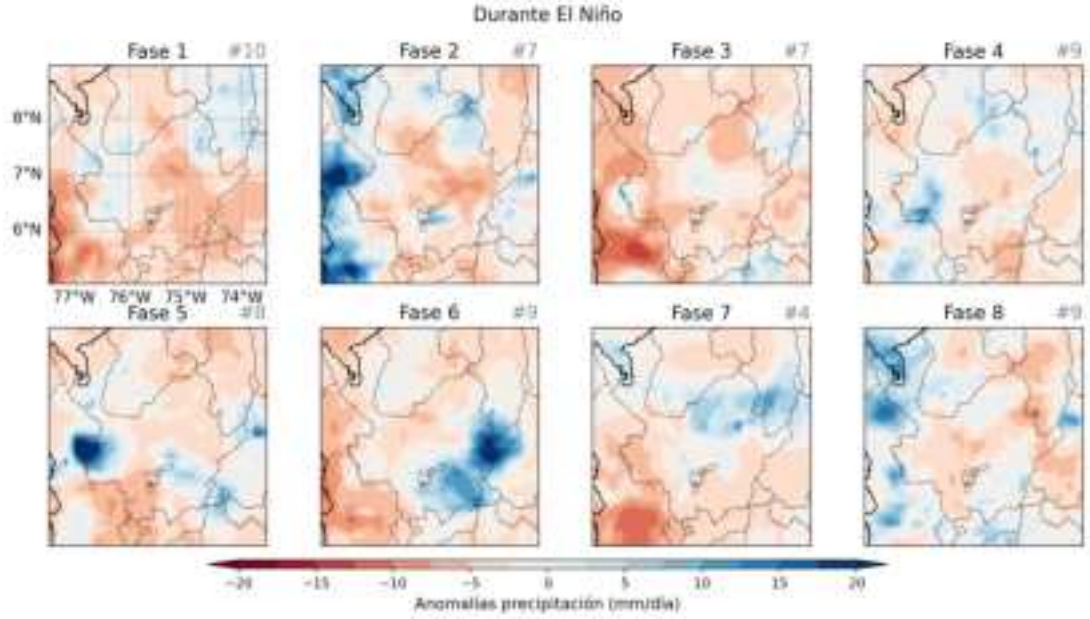


Figura 150: Anomalías de precipitación durante las fases de la MJO sobre Antioquia durante la fase El Niño del fenómeno ENSO.

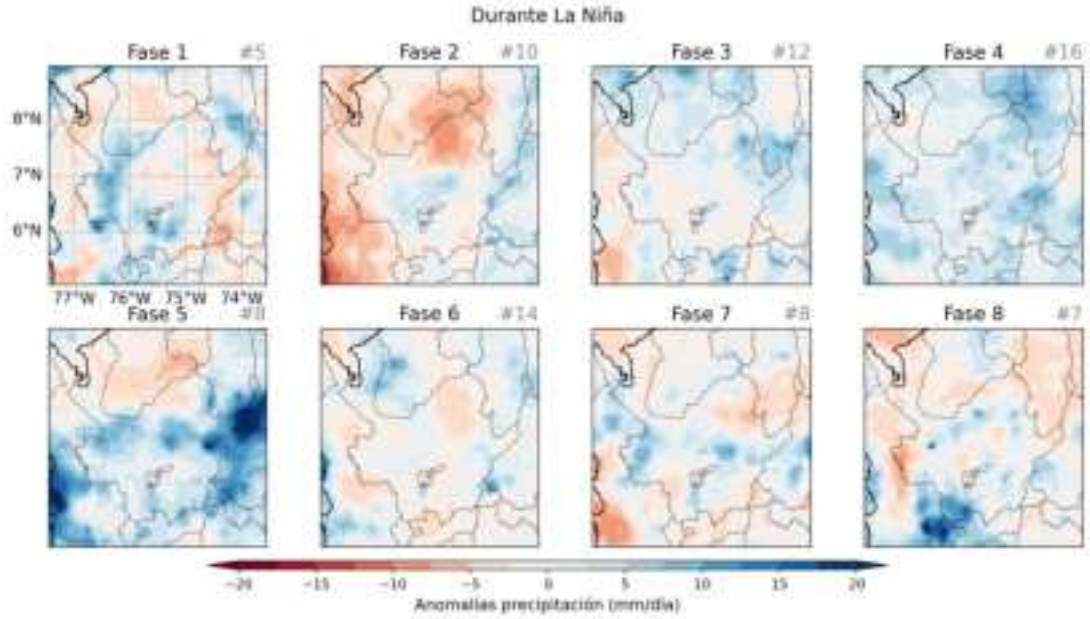


Figura 151: Anomalías de precipitación durante las fases de la MJO sobre Antioquia durante la fase La Niña del fenómeno ENSO.

Influencia de la MJO sobre el Valle de Aburrá usando información pluviométrica

Con base en la metodología y los resultados presentados previamente, se procede a analizar la influencia de la MJO en la red pluviométrica del proyecto SIATA. Para ello, se consideró toda la información disponible de precipitación en cada punto hasta junio de 2024. Sin embargo, teniendo en cuenta los análisis de interés, se realizó un preprocesamiento. Inicialmente, se utilizó la información a escala diaria de las estaciones; para esto, se realizó la agregación de la precipitación diaria, siempre y cuando cada día contara con más del 70 % de información. En caso contrario, se descartó el dato de ese día. Cabe mencionar que este proceso se llevó a cabo para los registros de los dos pluviómetros disponibles de cada estación. En la Figura 152 se presenta la precipitación media diaria estimada para cada estación.

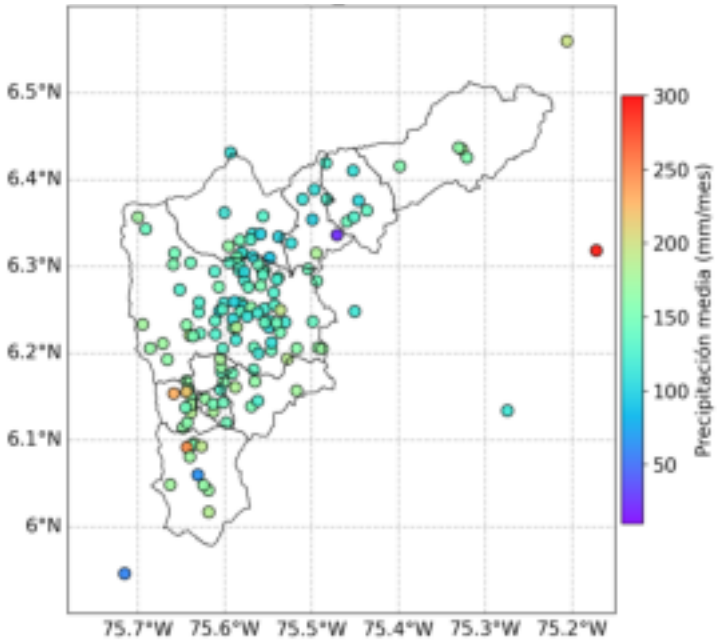


Figura 152: Precipitación media diaria de la red pluviométrica. Este análisis incluye la información de precipitación disponible para cada estación hasta junio de 2024.

Para el análisis espectral de las estaciones, se seleccionaron aquellas que cuentan con al menos 3 años de información. Además, dado que este tipo de análisis no permite datos faltantes, se realizó un llenado de información para las estaciones que presentaban menos de 180 datos faltantes consecutivos (aproximadamente 6 meses). Con base en este criterio, se dispone de un total de 130 estaciones. El proceso de llenado de la información se llevó a cabo utilizando una climatología diaria, aplicada mediante un promedio móvil de 7 días, tal como se muestra en la Figura 147. Es importante resaltar, que se podría realizar un análisis de sensibilidad al llenado de datos faltantes, con el fin de evidenciar si las señales en el porcentaje de varianza se alteran significativamente, sin embargo, para este ejercicio, los resultados mostraron coherencia con los mostrados por la base de datos IMERG (Figura 145). Cabe mencionar que el proceso de llenar datos faltantes solo se realizó para este análisis, y los resultados se presentan en la Figura 153.

En dicha figura se identifica que, sobre el Valle de Aburrá, la varianza asociada a la variabilidad intraestacional (20-110 días) representa aproximadamente el 15 %, mientras que para la banda de la MJO (30-90 días) alcanza cerca del 10 %. Por otro lado, las bandas semianual y anual presentan porcentajes de varianza menores al 5 %. Estos resultados son coherentes con los obtenidos mediante la base de datos IMERG; si bien los porcentajes en cada banda son relativamente más altos en IMERG que en las estaciones, se mantiene la conclusión de que la variabilidad intraestacional aporta un porcentaje significativo de varianza en comparación con las demás bandas, lo que sugiere que este rango de tiempo es clave para comprender los patrones de precipitación en la región.

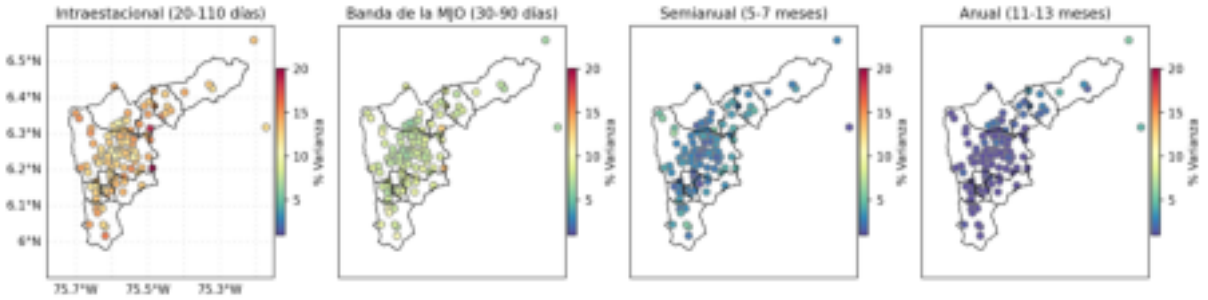


Figura 153: Porcentaje de varianza explicada de la precipitación media diaria de las estaciones pluviométricas, para diferentes bandas temporales.

Ahora bien, para el análisis de cómo responden las anomalías de precipitación durante las fases de la MJO sobre el Valle de Aburrá (Figura 154), se utilizaron las estaciones que cuentan con al menos 3 años de información. En este caso, se seleccionaron 147 estaciones. Las anomalías se calcularon con base en una climatología diaria, empleando una media móvil de 31 días (Figura 147). Posteriormente, se agruparon los datos según las ocho fases de la MJO y se evaluó el comportamiento promedio de las anomalías de precipitación en cada fase. Los resultados obtenidos muestran que las fases 1, 2, 7 y 8 presentan un aumento de la precipitación, mientras que las fases 3, 4, 5 y 6 tienden a mostrar una disminución, lo que indica una modulación de la MJO sobre las condiciones locales de precipitación. Este patrón es consistente con estudios previos realizados en la región y resalta la influencia intraestacional de la MJO en los regímenes de precipitación media diaria del Valle de Aburrá.

Los resultados son altamente consistentes con los obtenidos a partir de la base de datos IMERG, a pesar de las diferencias en los períodos analizados: estaciones con información disponible hasta junio de 2024 e IMERG para el período 2001–2023, tal como se indicó previamente. Cabe mencionar que este tipo de análisis de diagnóstico debe ser extendido y robustecido a medida que se disponga de registros más largos y completos de información. Actualmente, algunas estaciones cuentan con apenas 3 años de datos, lo que limita la representatividad de los resultados y sugiere la necesidad de realizar análisis más detallados en el futuro. Esto permitirá evaluar con mayor precisión la influencia de la MJO sobre las condiciones climáticas locales y mejorar las proyecciones basadas en estas señales intraestacionales.

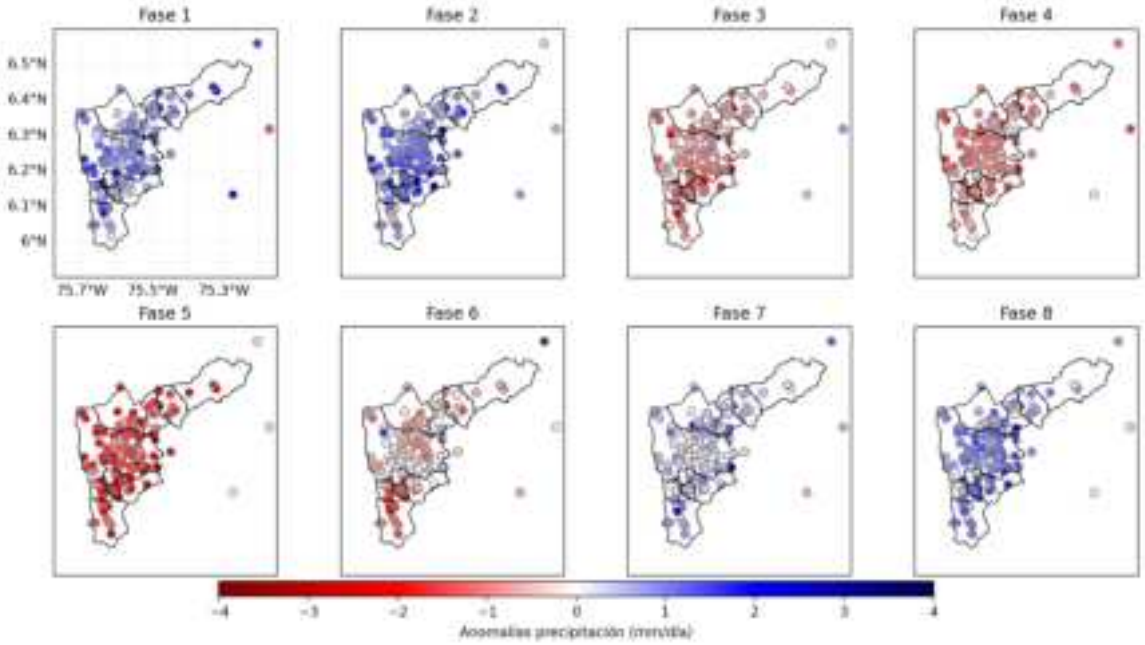


Figura 154: Anomalías de precipitación de las estaciones pluviométricas durante las fases de la MJO.

El análisis de la relación entre la MJO y las fases del ENSO no se realizó utilizando las estaciones, ya que la mayoría de estas cuentan con un registro de información muy corto, lo que podría conducir a conclusiones poco robustas. Sin embargo, dada la coherencia observada con los datos de IMERG, se pueden tomar como referencia los resultados obtenidos con esta base de datos, proporcionando una visión confiable sobre la interacción entre ambos fenómenos.

Exploración de la relación entre la influencia de la MJO y los eventos extremos de precipitación en el Valle de Aburrá usando información pluviométrica

Los resultados obtenidos con las anomalías diarias de precipitación conducen a analizar si la ocurrencia de los eventos más extremos sobre el Valle de Aburrá tiene alguna relación con las fases de la MJO. Para ello, se realizó un conteo de los eventos extremos fuertes y muy fuertes ocurridos desde enero de 2012 hasta mayo de 2025, de acuerdo a la base de datos de eventos extremos construída a partir de datos de pluviometros en contratos pasados. Con el objetivo de contextualizar, se define como evento extremo aquel cuya intensidad quince minutal máxima a lo largo del evento supera el percentil 95 de las intensidades en esta misma resolución temporal para los eventos históricos en cada una de las estaciones; por su parte la clasificación de evento extremo débil, moderado, fuerte y muy fuerte se hace usando características como el acumulado y la duración donde los límites estarán definidos por los cuartiles. Por ejemplo un evento extremo muy fuerte es aquel que cumple el criterio de intensidad y además tuvo un gran acumulado en un corto período de tiempo. La agrupación de los eventos se realizó según la fase de la MJO, tal como se muestra en la Figura 155, la cual presenta el número de eventos registrados.

Los resultados indican que se mantiene una relación con las fases que corresponden a mayores precipitaciones; sin embargo, este conteo revela que las fases 1 y 2 registran la mayor cantidad de eventos, seguidas por las fases 7 y 8. En las demás fases, aunque el número de eventos es menor, se identifican zonas importantes, como el occidente de Medellín y el sur del Valle, como áreas que reportan eventos extremos durante aquellas fases que en promedio tienen a tener anomalías negativas (fases 3-6).

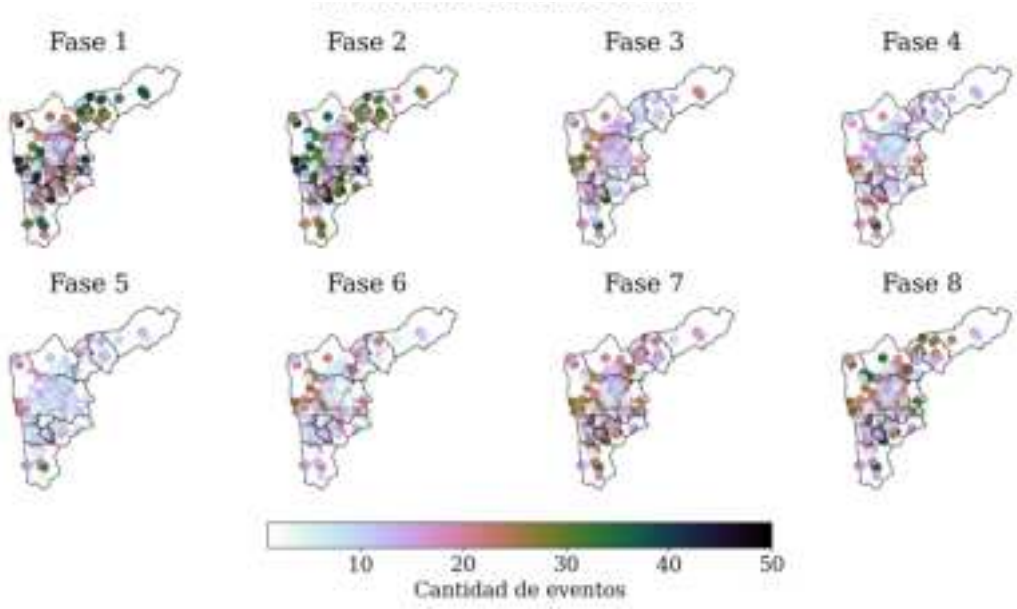


Figura 155: Conteo de eventos extremos de precipitación, categorizados como fuertes y muy fuertes, para cada una de las fases de la MJO, basado en el registro histórico de enero de 2012 a mayo de 2025.

Parte V: Identificación y Seguimiento de Ondas Tropicales

Introducción

Las condiciones climáticas del norte de América del Sur y el Mar Caribe están moldeadas por una variedad de procesos atmosféricos que operan en distintas escalas espaciales y temporales. Estas regiones experimentan una dinámica atmosférica compleja debido a su ubicación geográfica, la cual permite una alta afluencia de radiación solar durante todo el año (Poveda et al., 2006). Este calentamiento solar constante induce variabilidad en la circulación atmosférica y desencadena múltiples procesos atmosféricos. La migración meridional de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) domina el ciclo anual de precipitación en estas regiones, lo cual produce un ciclo bimodal en el centro y occidente de Colombia y un ciclo mayormente unimodal sobre el norte de Colombia y el sur del Mar Caribe (Poveda et al., 2006; Espinoza et al., 2020). Entre los principales motores de esta variabilidad se encuentran las fluctuaciones intraestacionales asociadas con la Oscillación de Madden-Julian (MJO) y la variabilidad interanual impulsada por el ENSO (Poveda, 2004; Poveda et al., 2011). La interacción de estos fenómenos contribuye a la dinámica climática de la región, afectando patrones de precipitación, temperatura y viento.

Entre las diversas perturbaciones atmosféricas que influyen en estas regiones, las Ondas Tropicales (OT) destacan por su impacto en los patrones de lluvia y en el clima regional, especialmente durante la temporada de lluvias. Las OT, originadas en el norte de África y caracterizadas por su desplazamiento hacia el oeste a aproximadamente 7–8 m/s (Kiladis et al., 2006), impactan significativamente los patrones de lluvia y el clima en el norte de América del Sur y el Caribe, especialmente durante la temporada de lluvias. Estas ondas, que recorren el Atlántico e influyen en la hidroclimatología regional, presentan ondulaciones cuasi-periódicas de entre 2000 y 4000 km, con ciclos de 2 a 10 días (Burpee, 1972), y se desarrollan en la Corriente de Chorro Oriental de África (AEJ, Hsieh and Cook, 2005; Kiladis et al., 2006). Al propagarse, las OT inducen circulación ciclónica y convergencia de vientos en superficie, promoviendo actividad

convectiva y precipitación al este de su eje de vaguada (Burpee, 1975; Mekonnen et al., 2006), aunque solo la fase de vaguada parece activar estos fenómenos sobre el Atlántico (Janiga and Thorncroft, 2014).

El presente estudio se centra en el seguimiento de las OT para comprender mejor su influencia en la precipitación y en la dinámica atmosférica del norte de América del Sur y el Caribe. El objetivo es analizar las características de las OT, incluyendo su ocurrencia, trayectoria e impacto en la precipitación, particularmente cuando estas perturbaciones atraviesan el norte de América del Sur y el Mar Caribe. Al emplear un enfoque de seguimiento de ondas individuales, esta investigación busca proporcionar una visión más detallada de la dinámica de las OT y su papel en la modulación del clima regional, contribuyendo a una mejor comprensión de las complejas interacciones hidroclimáticas en estas regiones.

Metodología

Datos

Esta investigación utiliza el conjunto de datos de reanálisis ERA5, elaborado por el Centro Europeo de Previsiones Meteorológicas a Medio Plazo (ECMWF; Hersbach et al., 2020). Se utilizaron los datos de ERA5 desde 1991 hasta el 2020, con una resolución temporal de 6 horas y una resolución horizontal de aproximadamente 0.25. El estudio de las OT abarcó los meses de mayo a noviembre de cada año dentro del intervalo mencionado, el cual corresponde al período del año cuando las OT son más activas (Reed et al., 1988).

Algoritmo de seguimiento de Ondas Tropicales (OT)

Siguiendo una metodología similar a Brammer and Thorncroft (2015) las OT se identifican analizando la vorticidad de curvatura (CV) cerca del nivel del Chorro del Este Africano (i.e., 700 hPa) donde el chorro es más intenso y las OTs son más pronunciadas (Fink et al., 2017). Para resaltar la estructura sinóptica de las OT, la vorticidad de curvatura se promedió radialmente en un radio de 600 km (Lawton et al., 2022). Este enfoque permite reducir el ruido y destacar las perturbaciones persistentes, eliminando así otras perturbaciones, como los sistemas convectivos de mesoescala, que podrían ser erróneamente identificadas como posibles OT.

La metodología de rastreo se desarrolla mediante un proceso iterativo compuesto por varios pasos. En cada instante de tiempo, se calcula la vorticidad de curvatura a partir de las componentes del viento u y v, y posteriormente se aplica un promedio radial. Este procedimiento permite identificar y registrar las ubicaciones de los centros de vorticidad máxima, que son potenciales indicadores de OT. Las posibles OT fueron identificadas mediante un umbral de la vorticidad de $2 \times 10^{-6} s^{-1}$ (Brammer and Thorncroft, 2015).

Para cada paso temporal, los máximos de vorticidad de curvatura detectados se emparejaron con las trayectorias de OT existentes utilizando un criterio de proximidad: únicamente se consideraron como posibles coincidencias aquellos máximos ubicados dentro de un radio de 600 km desde la última posición registrada de una OT. Si un máximo detectado no coincidía con ninguna trayectoria existente, se iniciaba una nueva OT. Además, se estableció como condición inicial que las OT debían originarse al este de 20°W.

El algoritmo rastrea las posibles OT hasta que los valores de vorticidad en las posiciones identificadas se vuelven negativos. Si los valores negativos persisten durante tres intervalos temporales consecutivos (i.e., $6h \times 3 = 18h$), el algoritmo asume que la perturbación se ha disipado y detiene su seguimiento. La Figura 156 muestra el rastreo de algunas OT sobre los campos de vorticidad de curvatura. En esta figura, los puntos conectados por líneas corresponden a las posiciones rastreadas por cada retrotrayectoria.

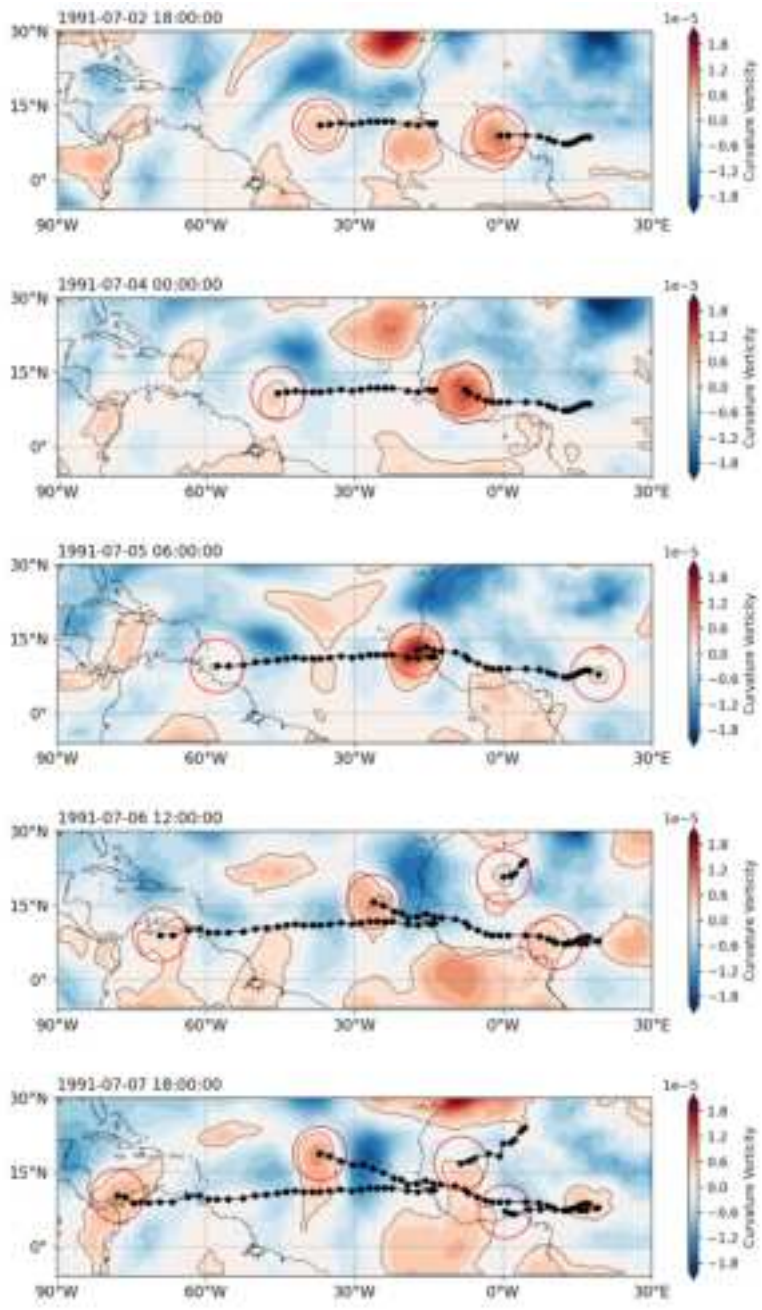


Figura 156: Demostración del algoritmo de seguimiento de Ondas Tropicales utilizando datos ERA5 de vientos zonales (u) y meridionales (v) a 700 hPa. Los campos de viento se emplearon para calcular la vorticidad por curvatura (CV). Las líneas trazadas representan las trayectorias de las perturbaciones en el tiempo, mientras que los puntos indican las localizaciones registradas a lo largo de su desplazamiento. El círculo rojo marca la última posición identificada y la cual correspondiente a un radio de 600 km. El contorno negro delimita el umbral de $2 \times 10^{-6} s^{-1}$ (Brammer and Thorncroft, 2015) establecido para identificar las perturbaciones.

Finalmente, tras identificar todas las posibles OT, se lleva a cabo un proceso de filtrado para seleccionar únicamente aquellas perturbaciones que se desplazan hacia el occidente y que registran un desplazamiento mínimo de 15° de longitud. Adicionalmente, se excluyen las perturbaciones que no cumplan con una duración mínima de dos días o que permanezcan restringidas a latitudes demasiado bajas, es decir, con un valor máximo en su latitud inferior a 5°N. Estas restricciones garantizan que las perturbaciones analizadas posean las características dinámicas y espaciales propias de las OT, eliminando ruido o eventos transitorios que no cumplen con los criterios establecidos.

Resultados

Los resultados presentados en la siguiente sección proporcionan una visión de las características y la variabilidad de las ondas tropicales (TW) durante el período mayo-octubre. La Figura 157 revela una importante variabilidad interanual en la aparición de las ondas tropicales entre 1991 y 2021, con una media de 74 ondas al año y picos notables en 2011 y 2021. Esta variabilidad concuerda con los hallazgos de Wu et al. (2013), que atribuyó tales fluctuaciones a los patrones y fenómenos atmosféricos a gran escala, como también a las anomalías de la temperatura de la superficie del mar.

La Figura 158 muestra un ciclo estacional pronunciado, en el que julio presenta un pico de actividad (aproximadamente 17,7 perturbaciones), en consonancia con los estudios climatológicos de Thorncroft and Hodges (2001). Este máximo de mediados de verano coincide con el desplazamiento hacia el norte del chorro oriental africano, que Berry et al. (2007) identificó como un factor crucial en la génesis de TW.

La función de densidad de probabilidad de las velocidades de los OT (Figura 159) se centra en torno a una mediana de 8,11 m/s, con una distribución asimétrica que muestra una cola más larga hacia velocidades más altas. Estas velocidades de propagación son comparables a las reportadas por Reed et al. (1977) y por Serra et al. (2010), quienes encontraron rangos de velocidad similares usando métodos de rastreo satelital.

La Figura 160 representa la distribución de la vorticidad de curvatura, revelando un patrón sesgado positivamente con una densidad de probabilidad máxima cerca de $4 \times 10^{-6} s^{-1}$. El umbral establecido de $2 \times 10^{-6} s^{-1}$ (Brammer and Thorncroft, 2015) captura eficazmente la población de ondas, mientras que los percentiles 25, 50 y 75 (2,34, 4,12 y 6,70 $\times$ $\times 10^{-6} s^{-1}$, respectivamente) proporcionan una medida cuantitativa de la variación de la intensidad de la vorticidad. Este patrón de distribución coincide con el de Kiladis et al. (2006), que documentó características similares de la vorticidad utilizando datos de reanálisis.

El análisis colectivo sugiere que las OT presentan patrones espaciotemporales complejos influidos por múltiples factores atmosféricos. Las variaciones estacionales e interanuales observadas pueden estar relacionadas con oscilaciones climáticas como la Oscilación Madden-Julian (Ventrice et al., 2011) y El Niño-Oscilación del Sur (Patricola et al., 2018). Estos hallazgos no solo mejoran nuestra comprensión de la dinámica de los OT, sino que también proporcionan métricas valiosas para evaluar el rendimiento de los modelos climáticos en la representación de estas importantes características atmosféricas.

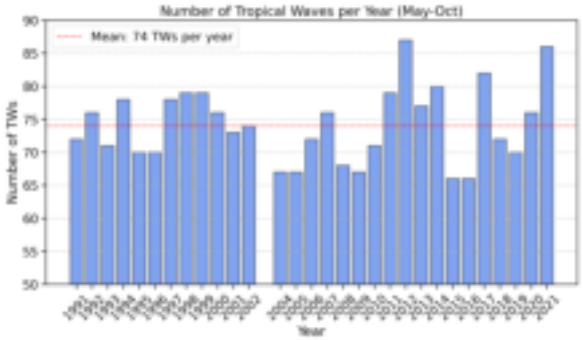


Figura 157: Número anual de ondas tropicales (TW) observadas de mayo a octubre para los años 1991 a 2021. La línea discontinua roja indica el número medio de TW (74 al año). El gráfico revela una variabilidad interanual significativa, con años de picos notables (e.g., 2011, 2021).

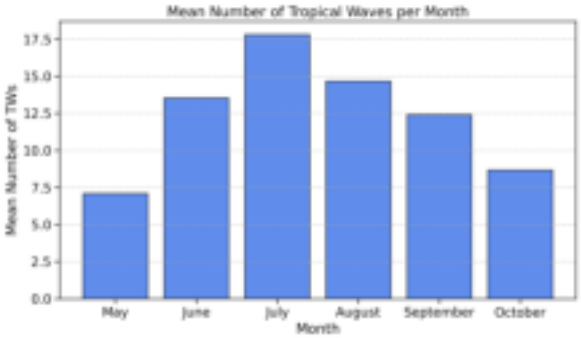


Figura 158: Número medio de ondas tropicales (TW) por mes durante el período mayo-octubre. El mes de julio presenta el mayor número medio de TW (17,7).

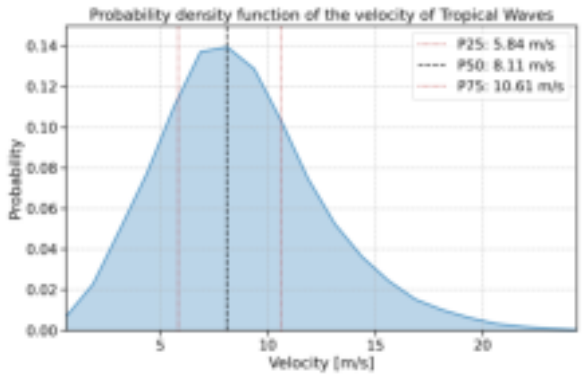


Figura 159: Función de densidad de probabilidad de la velocidad de las ondas tropicales. Se destacan los percentiles 25 (P25: 5,84 m/s), 50 (P50: 8,11 m/s, mediana) y 75 (P75: 10,61 m/s). La distribución muestra un pico alrededor de la mediana y una cola hacia velocidades más altas.

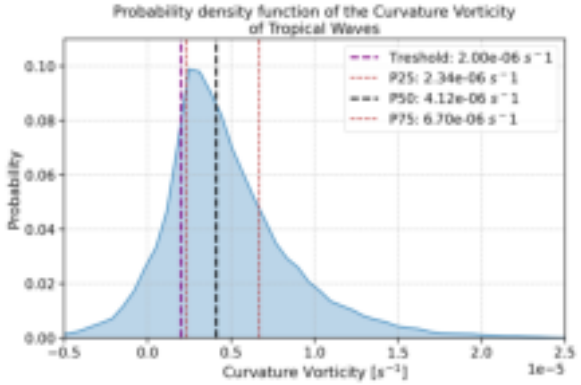


Figura 160: Función de densidad de probabilidad de la vorticidad de curvatura en ondas tropicales. La distribución presenta un sesgo positivo con un pico alrededor de $4 \times 10^{-6}\, s^{-1}$. Las líneas verticales indican el umbral utilizado para identificar las OT ($2 \times 10^{-6}\, s^{-1}$, púrpura; Brammer and Thorncroft, 2015) y los percentiles 25, 50 y 75.

La Figura 161 ilustra la distribución espacial de las trayectorias de las ondas tropicales (OT) a través del Atlántico Norte tropical y África Occidental durante 1991-2021. La densidad de las vías se calcula en una cuadrícula de 0,25°, con colores que indican la frecuencia de paso de las ondas (en porcentaje) por cada punto de la cuadrícula. La mayor densidad de trayectorias (12-15 %) se concentra en una región centrada en torno a 10-15°N cerca de la costa occidental africana (aproximadamente 0-10°O), que coincide con la ubicación típica del chorro oriental africano (Thorncroft and Hodges, 2001). Este máximo corresponde a la región en la que las ondas tropicales suelen alcanzar su máxima amplitud (Reed et al., 1977).

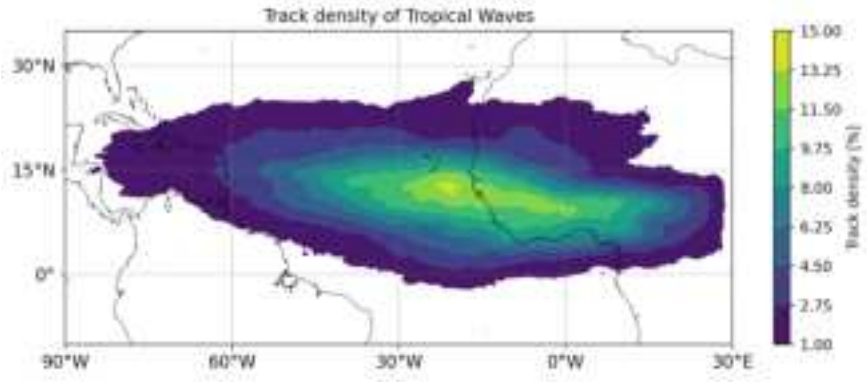


Figura 161: Densidad de seguimiento de las ondas tropicales sobre el Atlántico Norte y África Occidental durante 1991-2021, calculada en una cuadrícula de 0,5°. Los colores indican la frecuencia porcentual de aparición de olas en cada punto de la cuadrícula. Las densidades máximas (13-15 %) se observan sobre África Occidental alrededor de 10-15°N, con frecuencias decrecientes hacia el oeste a través de la cuenca atlántica. La distribución de las trayectorias muestra el recorrido característico de las OT desde su región de génesis cerca de la costa occidental africana hasta su disipación en el Atlántico occidental.

El patrón de densidad muestra una clara extensión hacia el oeste, con frecuencias que disminuyen gradualmente de este a oeste, formando un cinturón alargado entre 5-20°N. Este patrón de propagación hacia el oeste es coherente con los hallazgos de Hall et al. (2006), que documentó el movimiento característico hacia el oeste de las OT a través de la cuenca atlántica.

También existe una notable dispersión meridional en la densidad de la trayectoria, con valores que disminuyen tanto hacia el norte como hacia el sur de la región central. Esta estructura meridional refleja el efecto de guía de ondas del chorro oriental africano (AEJ), descrito por Hall et al. (2006). El límite norte de las trayectorias (alrededor de 25-30°N) y el límite sur (cerca de 5°N) definen el corredor primario a través del cual se propagan estas ondas. La densidad de las vías disminuye más rápidamente en la región del Caribe (80-60°O), donde las frecuencias caen por debajo del 3 %. Esta reducción de la actividad de las OT en el Atlántico occidental se ha atribuido a diversos factores, entre ellos la disipación de las olas y su transformación en otros sistemas meteorológicos, como documenta Serra et al. (2010).

Impactos de las ondas tropicales en el norte de Suramérica

A continuación, el estudio se centró en comprender los impactos de las OT en el norte de Sudamérica. Específicamente, se seleccionó una región sobre el norte de Colombia [80W-70W, 5N-15N] para realizar un análisis compuesto de las OT que atraviesan el área delimitada. Examinando el comportamiento de estas ondas, se tuvo como objetivo comprender mejor su influencia sobre las condiciones atmosféricas, los patrones de precipitación y la variabilidad meteorológica regional.

La Figura 162 muestra una densa agrupación de trazas de ondas tropicales en esta zona, lo que indica una frecuente actividad de las ondas. La mayoría de las ondas siguen una trayectoria hacia el oeste desde el Océano Atlántico hacia el Caribe y el norte de Sudamérica, lo que concuerda con los patrones típicos de propagación de las OT. Esta visualización proporciona una visión general de la variabilidad estacional y la distribución espacial de las ondas tropicales.

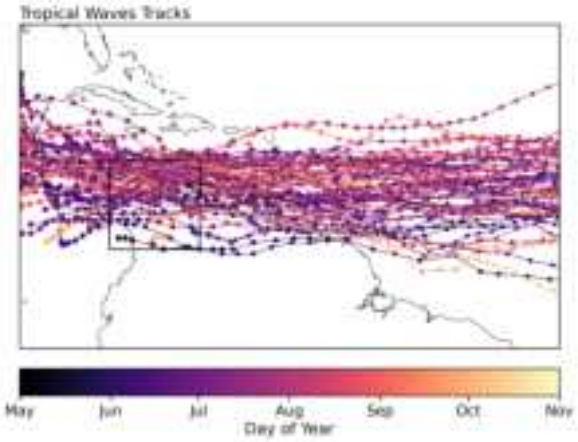


Figura 162: Trayectorias de las ondas tropicales identificadas que pasaron sobre la región delimitada sobre el norte de Colombia [80W-70W, 5N-15N]. Los distintos colores denotan el día de inicio del año en que se originó la respectiva OT. El recuadro negro sobre el norte de Sudamérica (Colombia) resalta la región de estudio seleccionada, donde se realizó el análisis compuesto.

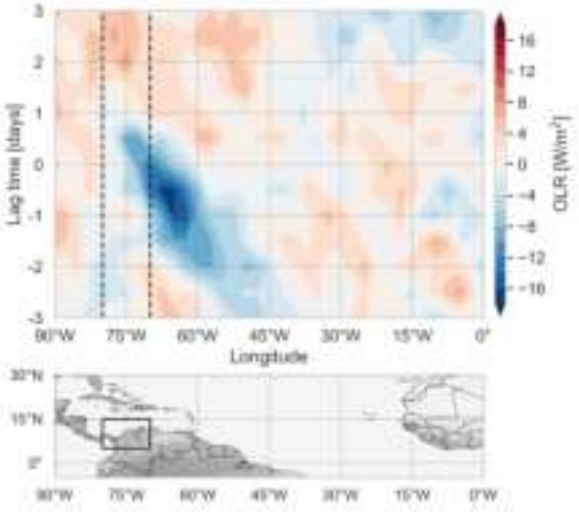


Figura 163: Diagrama de Hovmöller de las anomalías compuestas de la radiación de onda larga saliente (OLR) para las ondas tropicales que pasan sobre la región seleccionada en Colombia (región comprendida entre -72 ° E a -78 ° E y 5 ° N a 15 ° N). El eje x representa la longitud, mientras que el eje y representa el rezago en días respecto al paso de la onda. El sombreado azul indica anomalías OLR negativas (convección profunda), mientras que el sombreado rojo representa anomalías positivas (convección reducida).

Al analizar el promedio de las anomalías de la radiación de onda larga saliente (OLR, Figura 163) para las ondas tropicales seleccionadas que se desplazan sobre la región delimitada, se observa una anomalía OLR negativa pronunciada cerca de 60°O alrededor del día de rezago 0. Esto sugiere un aumento de la actividad convectiva y nubosidad asociada al paso de ondas tropicales sobre la región. Los mapas compuestos de OLR (Figura 164) indican una mayor afectación de las OT seleccionadas sobre la región Caribe, la cual experimenta los cambios más significativos, con valores de OLR que descienden hasta alrededor de -16 W/m^2, lo que indica un aumento de la nubosidad y de las posibles precipitaciones. La región en recuadro experimenta un ciclo completo que va de anomalías neutras a anomalías negativas intensas y viceversa. Los valores de OLR más bajos sugieren cimas nubosas más altas o convección intensa, lo que indica el paso de la OT tropical moviéndose a través de la región.

La evolución dinámica de las OT Figura 165 muestra un claro patrón ondulatorio con alternancia de centros de vorticidad positivos (rojo) y negativos (azul), mostrando una propagación típica hacia el oeste. Los valores máximos de vorticidad oscilan entre aproximadamente $-5,4 \times 10^{-6} s^{-1}$ y $5,4 \times 10^{-6} s^{-1}$. La evolución temporal revela un centro inicial de vorticidad positiva alrededor de 60°O a las -72 horas, intensificándose y desplazándose hacia el oeste a las -36 horas, alcanzando la máxima amplitud a las 0 horas, y debilitándose gradualmente a las +36 y +72 horas. El campo de vientos muestra una circulación ciclónica alrededor de los centros de vorticidad positiva y un flujo anticiclónico alrededor de las regiones de vorticidad negativa, lo que indica una intensidad moderada de las ondas tropicales. Espacialmente, las OT muestran una inclinación de suroeste a noreste, con el recuadro negro destacando la principal región de interés donde las olas suelen tener su mayor impacto.

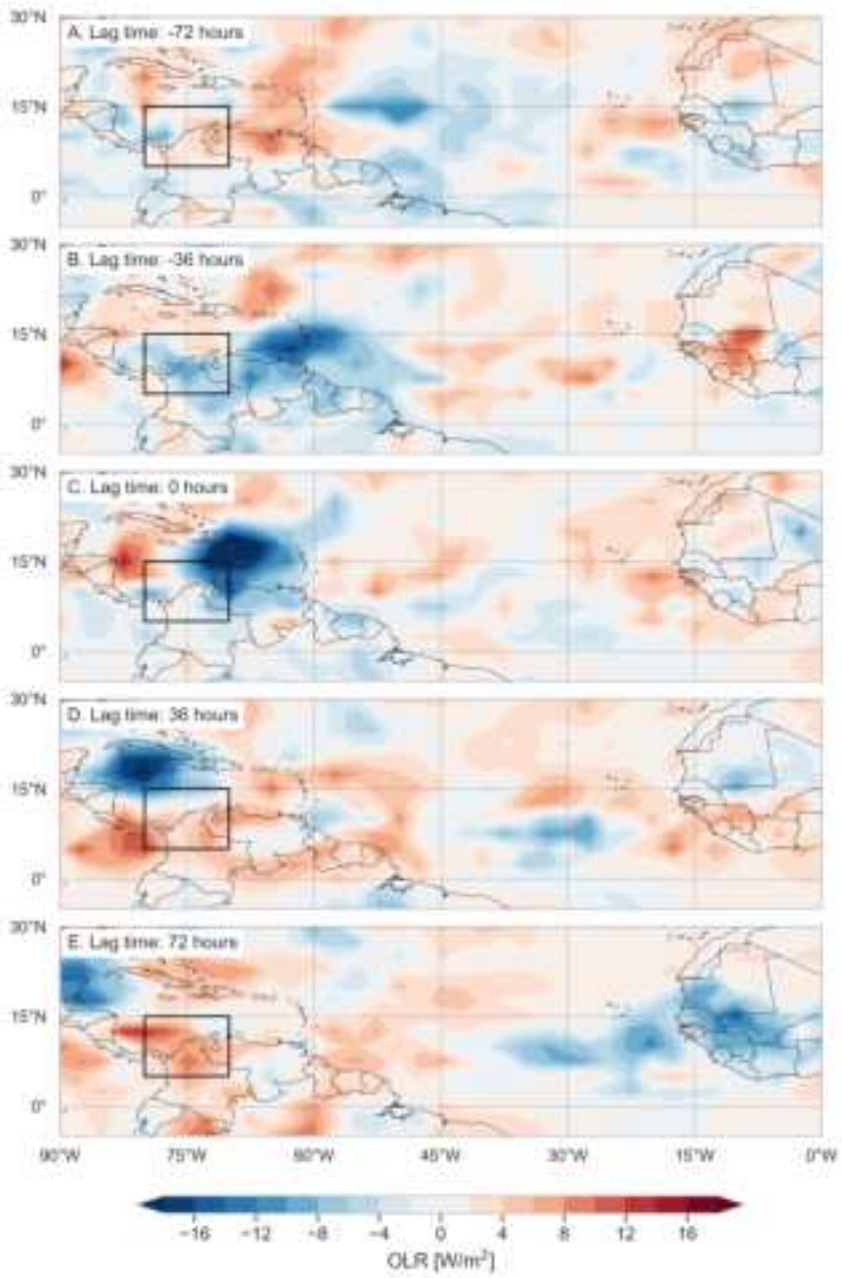


Figura 164: Evolución temporal de las anomalías de Radiación de Onda Larga Saliente (OLR) sobre el Caribe y el norte de Sudamérica de -72 a +72 horas del paso de las OTs sobre la región delimitada. Los tonos azules indican anomalías negativas de OLR (aumento de la convección/nubosidad), mientras que los rojos muestran anomalías positivas (supresión de la convección/cielos más despejados). El recuadro negro destaca la región focal donde se desarrolla un fuerte sistema convectivo que se propaga hacia el oeste durante el periodo de 144 horas. Los valores se expresan en W/m^2.

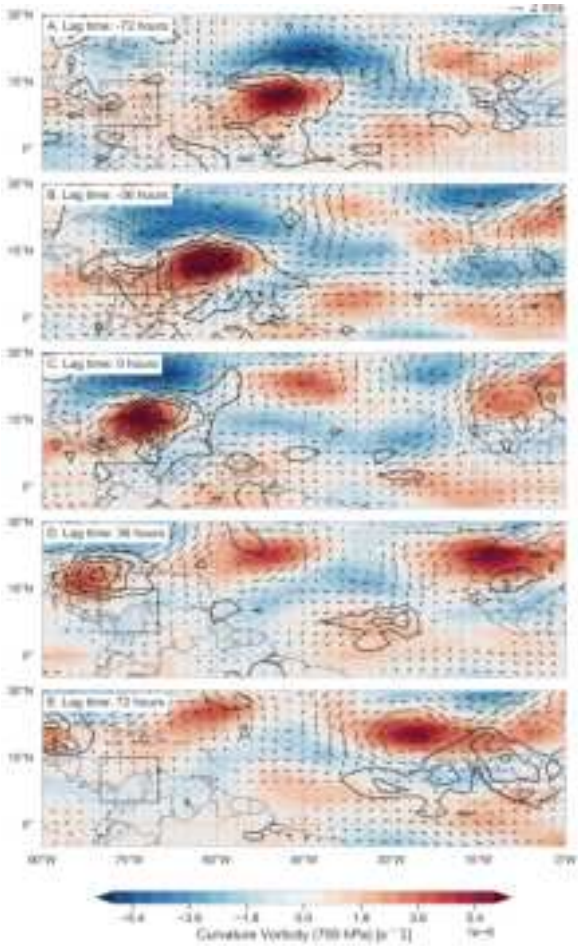


Figura 165: Evolución compuesta de las Ondas Tropicales de -72 a +72 horas sobre el Caribe y el norte de Sudamérica. El sombreado muestra la Vorticidad de Curvatura (CV) a 700 hPa ($\times 10^{-6}$ s^{-1}), los vectores representan el campo de vientos a 700 hPa (escala: 2 m/s), y los contornos indican anomalías negativas de Radiación de Onda Larga Saliente (OLR) a intervalos de 5 W/m^2. El recuadro negro resalta la región focal donde se rastrearon las Ondas Tropicales. Los paneles A-E muestran la evolución temporal a intervalos de 36 horas.

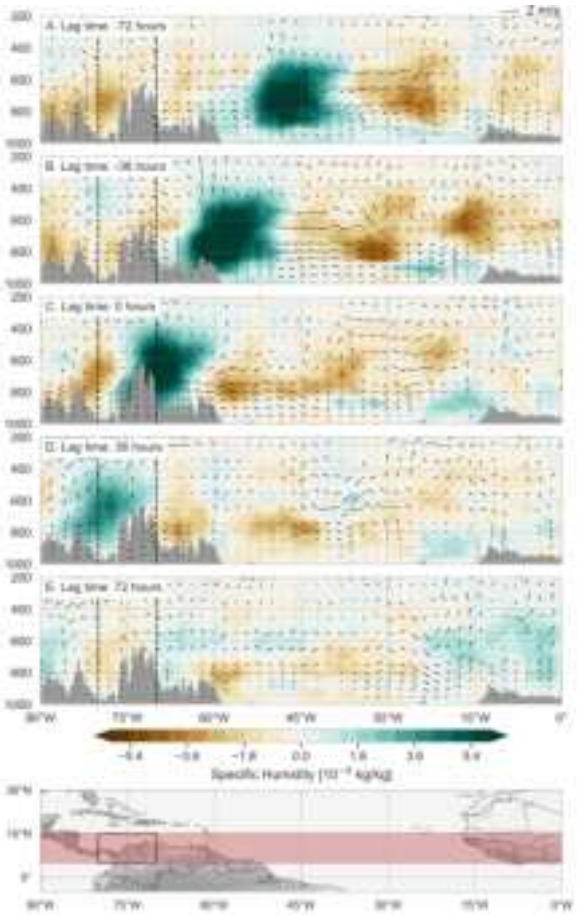


Figura 166: Sección transversal presión-longitud de las anomalías compuestas de humedad específica ($\times 10^{-6}$ kg/kg, sombreado) durante el paso de las ondas tropicales de -72 a +72 horas. Los vectores representan los campos combinados de viento zonal y movimiento vertical (omega×-30) (escala: 2 m/s). La sección transversal se promedia sobre la banda de latitud 5°N y 15°N (sombreado rosa). El sombreado gris indica la topografía.

La evolución del perfil vertical de la OT entre 5°N y 15°N (Figura 166) muestra una clara propagación hacia el oeste del patrón de humedad a lo largo del tiempo, con fuertes anomalías positivas de humedad (verde) que indican un mayor contenido de humedad y anomalías negativas (marrón) que sugieren condiciones más secas. Los vectores de viento ilustran el movimiento combinado zonal y vertical escalado, con movimiento ascendente asociado a áreas de mayor humedad. La evolución temporal revela una fuerte anomalía de humedad centrada alrededor de 45°O a -72 horas, que se mueve hacia el oeste e intensifica a -36 horas, alcanzando el máximo de humedad cerca de 60°O a 0 horas con fuerte movimiento vertical. La

anomalía continúa hacia el oeste con cierto debilitamiento a +36 horas y se desorganiza a +72 horas. Las anomalías de humedad son más fuertes en la troposfera media (400-800 hPa), con movimientos verticales que sugieren actividad convectiva profunda asociada a la onda. El patrón muestra una inclinación típica con la altura, característica de las estructuras de ondas tropicales. Esta visualización captura efectivamente la estructura tridimensional y la evolución de la humedad asociada a las ondas tropicales en esta región.

WP1.2.2. (Inundaciones, Sequías, Av. Torrenciales, Mov. Masa, Incendios) Optimización de los modelos hidrológicos e hidráulicos usados en el SIATA

La optimización de modelos hidrológicos e hidráulicos que se realiza en esta actividad permitirá identificar los modelos más apropiados para usar en las diferentes cuencas del territorio, insumo que podrá usarse para la evaluación de diferentes amenazas (y riesgos asociados) que afectan el territorio: inundaciones, sequías, avenidas torrenciales, movimientos en masa e incendios.

Parte I: Comparación de modelos hidrológicos en el Valle de Aburrá

Introducción

Con el objetivo de evaluar la aplicabilidad de los modelos hidrológicos usados en el proyecto SIATA, se realizó un ejercicio de comparación de resultados de diferentes modelos en las distintas cuencas del Valle de Aburrá. Para el ejercicio de comparación se emplearon los modelos hidrológicos SWAT, SAC-SMA y TETIS en las estaciones ubicadas a lo largo del rio Aburrá-Medellín que cuentan con curva de estimación de caudales.

Metodología y resultados

A continuación se describe la metodología empleada para realizar el ejercicio de comparación de modelos:

- Ejercicio de calibración a escala de 15 minutos con información actualizada hasta junio 2025. Las series simuladas con todos los modelos fueron comparadas en conjunto respecto a los registros observados en cada estación. En la Tabla 17 se presenta el desempeño de los modelos calculados con el criterio Kling-Gupta Efficiency (KGE). En las Figuras 167, 168, y 169 se presentan las comparaciones gráficas de las simulaciones para una estación de ejemplo (Est 93. R. Medellín - Puente 33). Estas incluyen las series de tiempo, ciclos anuales y diurnos, y las curvas de duración, respectivamente.

Tabla 17: Desempeño de caudales observados respecto a los simulados, según el KGE, en las estaciones del río Aburrá-Medellín, para los tres modelos usados.

Estación	SAC-SMA	SWAT	TETIS
91. R. Medellin - Metro Sabaneta	-0.23		-3.12
93. R. Medellin - Puente 33	0.23	0.021	0.33
94. R. Medellin - Puente La Aguacatala		-0.02	0.20
99. R. Medellin - Aula Ambiental	0.40	-0.52	-0.86
106. R. Medellin - Parque 3 Aguas	0.23	0.25	-1.21
124. R. Medellin - Unidad Deportiva Caldas	0.26		-0.36
140. R. Medellin - Puente Fundadores	0.09	-0.16	0.35
169. R. Medellin - La Clara	0.23	0.20	-2.6
179. R. Medellin - La Inmaculada	0.34	0.05	-1.74
342. R. Medellin - Santa Marta	0.09	-0.04	0.22
346. R. Medellin - Puente Machado	0.09	0.07	0.20

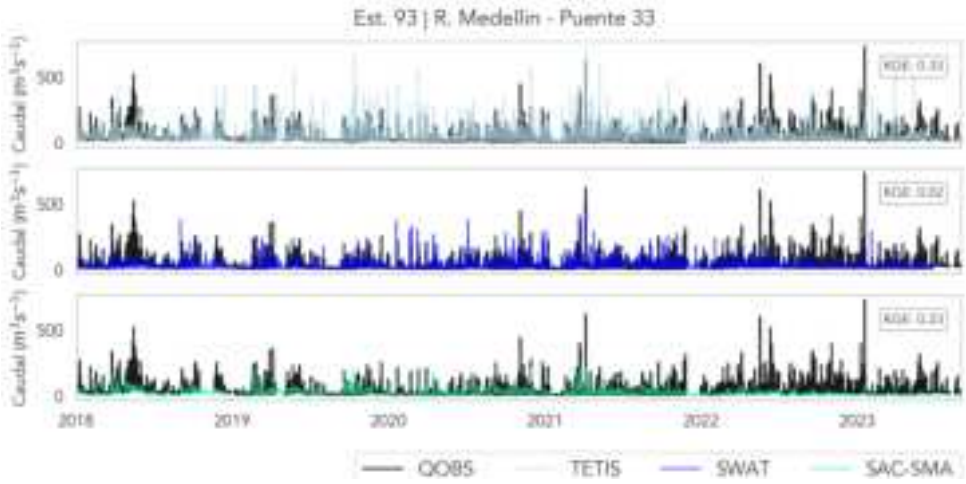
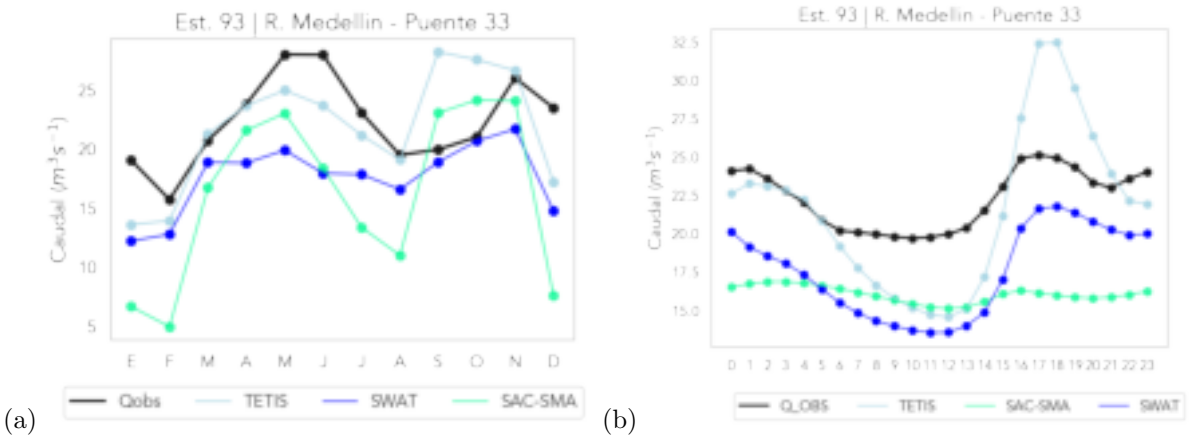


Figura 167: Comparación de series de tiempo simuladas por los 3 modelos, respecto a los observados, a escala 15minutal, para la estación 93 — R. Medellín - Puente 33.



(a) (b)

Figura 168: Comparación de las ciclos anuales (a), y diurnos (b) calculados a partir de las simulaciones de los 3 modelos, respectoa los obtenidos con los caudales observados, para la estación 93 — R. Medellín - Puente 33.

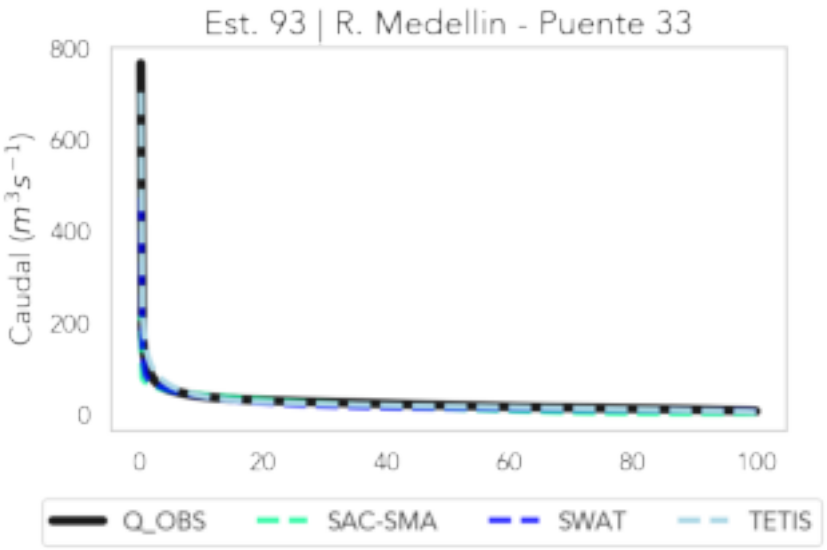


Figura 169: Comparación de las curvas de duración de los caudales simulados por los 3 modelos, vs. los observados, para la estación 93 — R. Medellín - Puente 33.

- Comparación de los resultados de simulación separados por temporada de mayor lluvia (mayor cantidad de crecientes) y temporada de menos lluvia (sequía). Esta comparación se realiza con el objetivo de evaluar el desempeño de los modelos bajo diferentes regímenes hidrológicos, y explorar las ventajas y desventajas que estos pudieran tener en cada uno de ellos. En la Figura 170 se presentan comparaciones para eventos de creciente escogidos como piloto, en algunas estaciones del río; mientras que en la Figura 171 se presentan comparaciones en algunas temporadas secas.

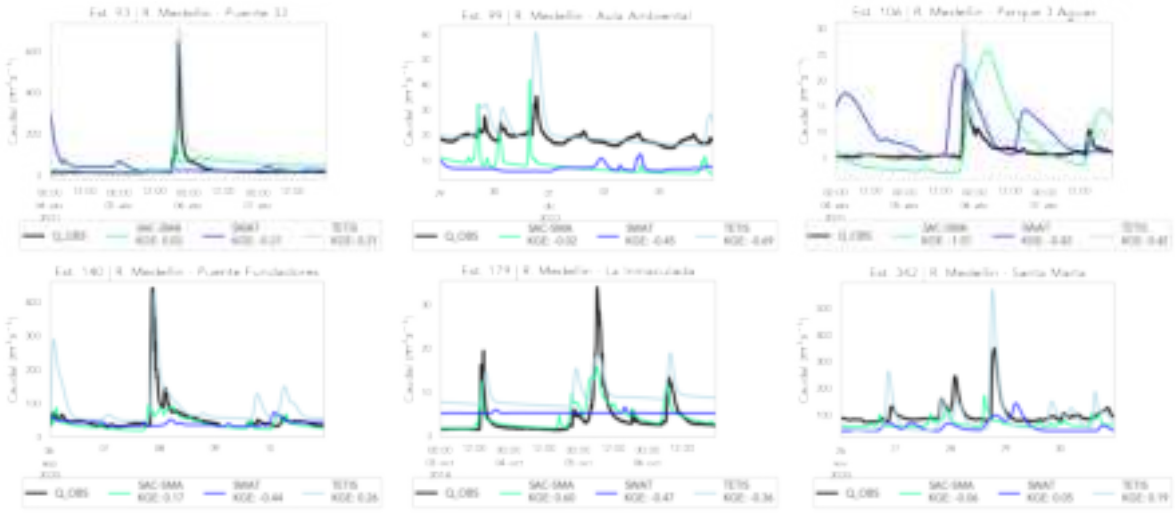


Figura 170: Comparación de series de tiempo para algunos eventos de creciente, en algunas estacines sobre el río Aburrá - Medellín

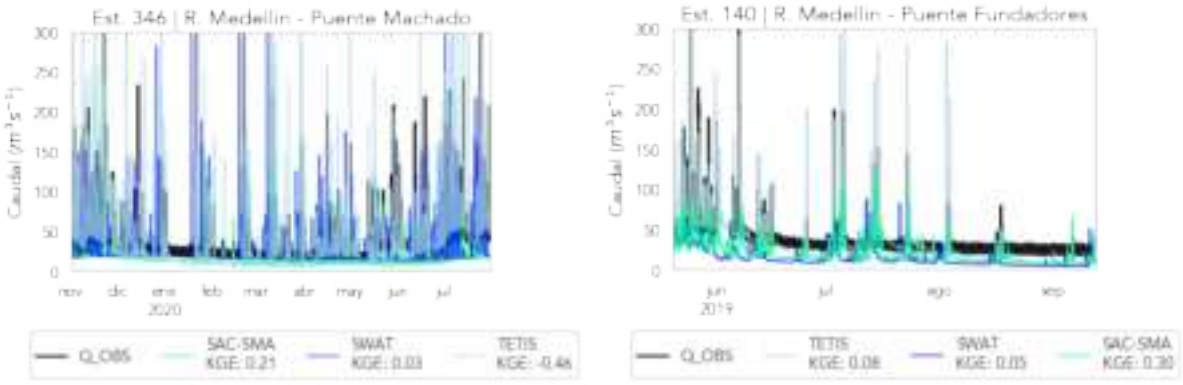


Figura 171: Comparación de series de tiempo para algunos temporadas secas, en algunas estaciones sobre el río Aburrá - Medellín

- Comparación de los resultados obtenidos con los modelos hidrológicos (SAC-SMA, TETIS, y SWAT) en simulaciones de largo plazo empleando la historia de registros completa para cada estación. La evaluación del rendimiento fue estimado por medio del criterio Kling-Gupta Efficiency (KGE), ver mapa con la ubicación de estaciones consideradas en la Figura 172.

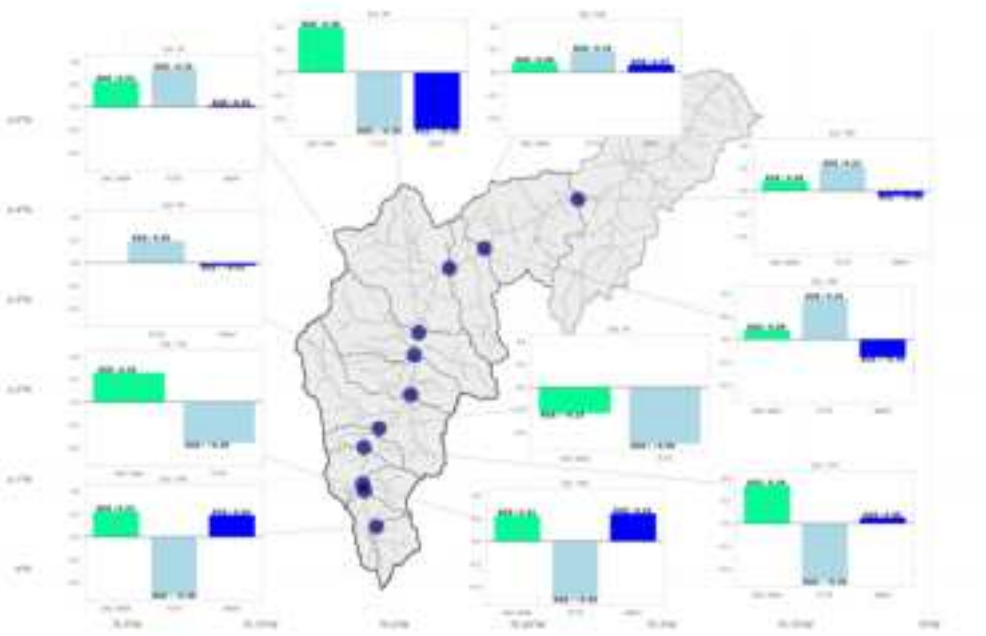


Figura 172: Mapa de comparación espacial de las eficiencias de cada modelo.

- Clasificación de las subcuencas del Valle de Aburrá a partir de sus características morfométricas. Para esta clasificación se usó el Análisis de Componentes Principales (ACP) considerando las siguientes variables: área de la cuenca, longitud del cauce principal, pendiente de la cuenca (S cuenca), pendiente del cauce (S cauce), y porcentaje del área impermeable. A partir de la reducción de variables que permite el ACP, se resumió el 80 % de la variabilidad de todo el conjunto inicial en las primeras dos componentes, ver Figura 173.

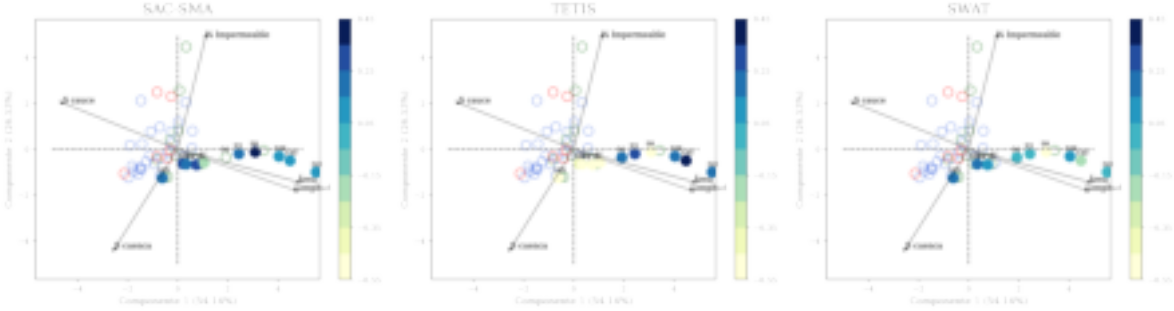


Figura 173: Comparación de los rendimientos obtenidos con la aplicación de ACP (Análisis de Componentes Principales). En la escala de colores se indica el valor de rendimiento para el indice KGE (Kling-Gupta Efficiency

Conclusiones

- La eficiencia de los modelos hidrológicos se evaluó mediante el criterio de eficiencia Kling-Gupta Efficiency (KGE). Los resultados muestran una variabilidad significativa entre estaciones, destacándose la estación 93 (Río Medellín - Puente La 33) con el mejor desempeño promedio entre los modelos. Los modelos TETIS y SAC-SMA alcanzaron valores de KGE superiores 0.20 en cinco estaciones, mientras que el modelo SWAT en dos estaciones. El mejor desempeño del modelo SAC-SMA fue en la estación 99. R. Medellin - Aula Ambiental (KGE= 0.40), para el modelo TETIS en la esatción 140. R. Medellin - Puente Fundadores (KGE= 0.35) y para el modelo SWAT en la 106. R. Medellin - Parque 3 Aguas (KGE= 0.25). Igualmente se realizó un análisis con el diagrama de Taylor para seleccionar el mejor modelo basándose en tres parámetros estadísticos: desviación estándar, coeficiente de correlación y error cuadrático medio. El análisis confirmó que SAC-SMA y SWAT ofrecen un mejor ajuste para la mayoría de estaciones que el modelo TETIS.

- De acuerdo al comportamiento de las series de tiempo y curvas de duración, se evidencia que los tres modelos simulan valores muy cercanos al rango de las observaciones; los caudales pico más altos son mejor representados por el modelo TETIS, los más bajos por el SAC-SMA, y es el modelo SWAT el que representa mejor los valores de caudal intermedios. Lo anterior sugiere que de acuerdo al rango de caudales que sea de interés para la modelación (caudales altos, medios o bajos), se recomienda la utilización de alguno de los modelos empleados en el proyecto SIATA para las estaciones sobre el río Medellín.

- En términos del ciclo anual, puede notarse que los modelos perciben la bimodalidad presente en las variaciones estacionales del caudal en el área de estudio, siendo las del SAC-SMA y SWAT, las más y menos pronunciadas, respectivamente; y las del TETIS las más cercanas a los valores observados. En cuanto al ciclo diurno, se observa que los modelos representan en alguna medida las variaciones a lo largo del día; en este caso TETIS ofrece las variaciones más pronunciadas, y el SAC-SMA las menos ajustadas, mientras que el SWAT muestra la mejor representación de la oscilación, a pesar de las diferencias relevantes en la magnitud.

- En cuanto al rendimiento particular de cada modelo, se destaca que el modelo SAC-SMA (Sacramento) -el cual asume la cuenca de manera agregada- presenta el mejor desempeño en el mayor número de estaciones. Por su parte, el modelo TETIS resultó ser muy sensible a la calidad de la curva de estimación de caudales, presentando mejor rendimientos para simulaciones con la curva de calibración anterior, la cual fue construida con registros de nivel hasta diciembre de 2024. Este comportamiento sugiere que la estimación de caudales incorpora incertidumbre a los modelos y recalca la necesidad de continuar con ejercicios de construcción de curvas apra estimación de caudales.

- Se realizaron comparaciones entre las curvas de duración obtenidas con datos de caudales observados y caudales simulados con los modelos hidrológicos (SAC-SMA y SWAT). Las curvas de duración organizan de menor a mayor los caudales con valores que se expresan como probabilidad de excedencia en porcentaje, en donde un porcentaje de excedencia de 0 % indica el caudal más alto registrado mientras que el 100 % el caudal más bajo. Por lo cual, es una herramienta útil para realizar una comparación de la eficiencia del modelo para simular caudales altos, caudales medios y mínimos por estación. Se realizó la comparación calculando el KGE de los caudales que exceden el 25 % (caudales altos), el 75 % (caudales bajos) y el intervalo entre 25 % y 75 % (caudales medios). En general, se evidencian mayores deficiencias del modelo SWAT en comparación con el modelo SAC-SMA para simular caudales mínimos.

- Evaluando el rendimiento de los tres modelos de acuerdo al área de la cuencas, se encuentra que las estaciones en las que el TETIS presentan el mejor desempeño coinciden con las de áreas mayores a 270 km^2, mientras que las de menor desempeño coinciden con las de áreas menores a ese valor. Por

su parte, los modelos SAC-SMA y SWAT presentan una relación menos marcada con el tamaño del área, sin embargo, el modelo SAC-SMA presenta mayores valores (KGE > 0.22) en las estaciones asociadas a áreas menores a 470 km^2.

En el mismo sentido, el Análisis de Componentes Principales (ACP) se encontró que los modelos SAC-SMA y TETIS tienen relación directa entre la eficiencia de las simulaciones y el tamaño de las cuencas, siendo el SAC-SMA el describe mejor la respuesta hidrológica de las cuencas pequeñas, y el TETIS de las más grandes. Por su parte, las eficiencias logradas por el modelo SWAT se muestran indiferentes a todos los parámetros.

- En cuanto a la representatividad de los modelos en temporadas secas, el SAC-SMA es el que presenta mejores valores de KGE. Sin embargo, son los caudales base del TETIS las que más se asemejan a la tendencia decreciente observada en estos periodos. Se considera necesario realizar comparaciones más exhaustivas de los modelos, usando una cantidad más representativa de eventos de creciente o sequías para profundizar mas en este análisis.

Parte II: Implementación del modelo WRF-Hydro en el Valle de Aburrá

Introducción

El modelo WRF-Hydro fue desarrollado por el *National Center for Atmospheric Research* (NCAR) como la extensión hidrológica del modelo atmosférico *Weather Research and Forecasting Model* (WRF). Este modelo representa una arquitectura de acoplamiento que permite vincular procesos hidrometeorológicos en múltiples escalas gracias a la integración de modelos atmosféricos, modelos unidimensionales de superficie terrestre y módulos de transporte hidrológico para representar la distribución del agua superficial, subsuperficial, flujo base y transporte en canales, mejorando la representación de los procesos de lluvia-escorrentía.

La implementación del modelo WRF-Hydro tiene como objetivo desarrollar procesos de investigación aplicada en el Valle de Aburrá y las regiones vecinas como herramienta para mejorar los pronósticos hidrometeorológicos y para apoyar la gestión del recurso hídrico desde un punto de vista regional. El modelo WRF-Hydro tiene el potencial de generar variables que no son consideradas en los modelos hidrológicos previamente implementados por el equipo de hidrología del SIATA a una resolución espacial y temporal fina. Entre ellas se incluyen la variación de humedad en el suelo a diferentes profundidades, la temperatura del suelo, la evapotranspiración y los flujos de calor latente y sensible, entre otras; lo cual es una ventaja para la aplicación del modelo en la predicción de inundaciones e incendios forestales, la evaluación de impactos hidroclimáticos regionales, la gestión del recurso hídrico y estudio de los procesos superficie-atmósfera.

Metodología: configuración inicial del modelo

En el proceso de aplicación del modelo WRF-Hydro en el Valle de Aburrá se llevaron a cabo los procesos que se describen a continuación.

Definición del dominio de simulación modelo WRF-Hydro

Para la creación de los archivos de entrada que se requieren en la configuración del modelo se definió un dominio en alta resolución empleando el Modelo de Elevación Digital (DEM) de ALOS PALSAR con una resolución espacial de 30 m. En la Figura Figura 174 se presentan algunos ejemplos de la información



espacial generada después de realizar el preprocesamiento con el dominio de resolución espacial de 2.5 km y con los enrutamientos hidrológicos en una cuadrícula con resolución más fina de 250 m. La red de drenaje obtenida del preprocesamiento se validó con la red de drenaje obtenida con un DEM de 90 m y uno de 12.5 m (Figura 175). Se evidencia que el cauce principal del río Medellín y sus principales afluentes como la Q. Doña María, Q. La Iguaná, Q. La Santa Elena y Q. La Presidenta se definen adecuadamente.

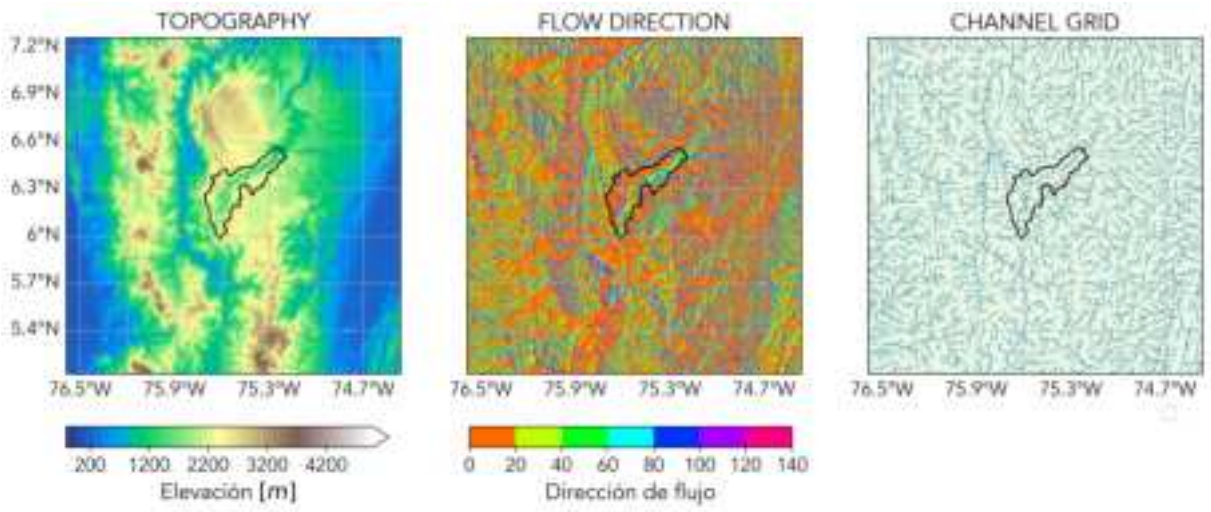


Figura 174: Ejemplos de la información geoespacial de salida después de realizar el preprocesamiento. Topografía en resolución de 250 m (*izquierda*), direcciones de flujo (*centro*), red de canales (*derecha*).

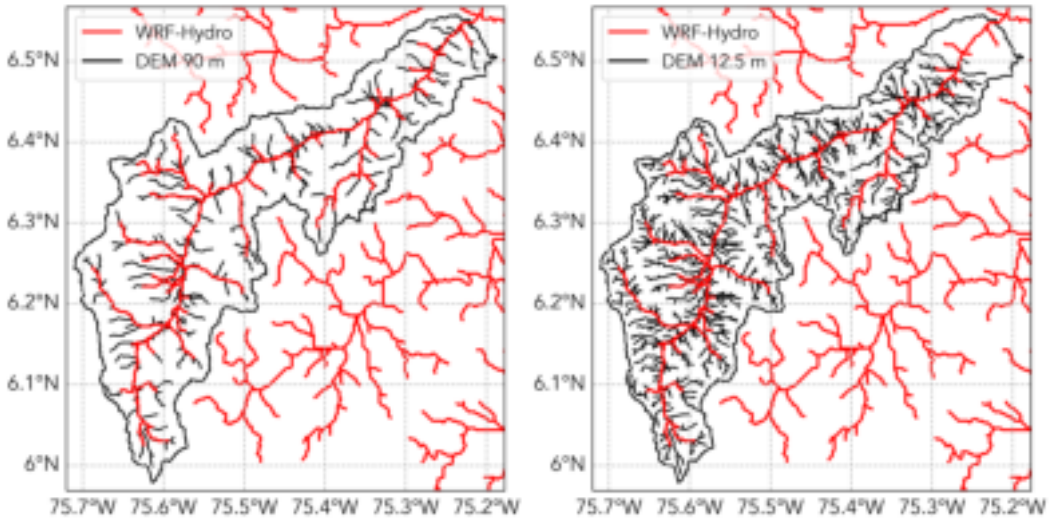


Figura 175: Comparación de la red de drenaje generada en el preprocesamiento de datos (línea roja) y generada con los DEM de 90 m y 12.5 m (línea negra).

En la Figura 176 se presenta el dominio de simulación definido para el modelo WRF-Hydro y que abarca la cobertura del radar meteorológico, lo que permite incorporar esta información en la evaluación del modelo.

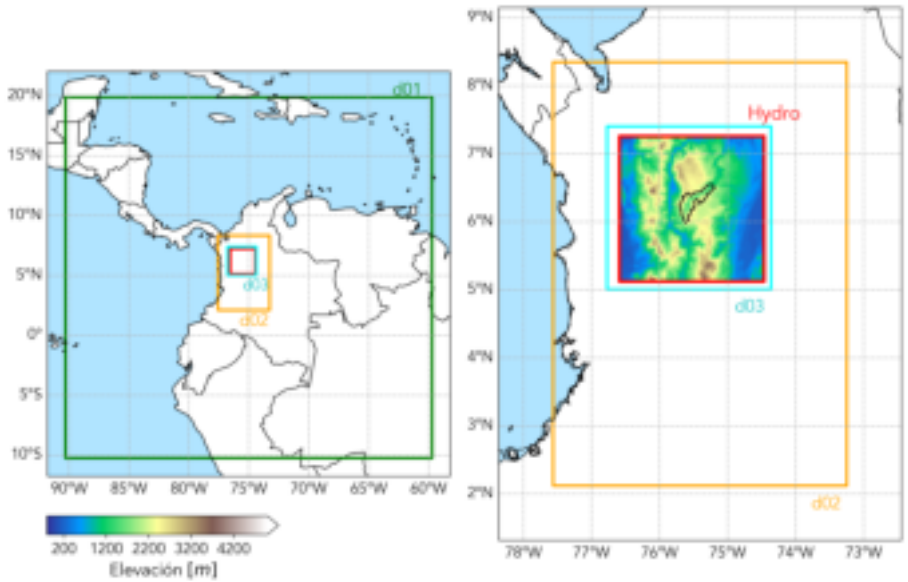


Figura 176: Dominio de estudio seleccionado para el modelo WRF-Hydro (recuadro rojo) de acuerdo a la cobertura del radar meteorológico.

Definición de coberturas del suelo

El preprocesamiento de la información requerida incluyó el cambio de coberturas que tiene el modelo WRF-Hydro por defecto provenientes del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) a las coberturas del producto MODIS, representando 20 categorías (Figura 177) que tienen mayor representatividad de las condiciones reales del uso del uso en el dominio de aplicación del modelo.

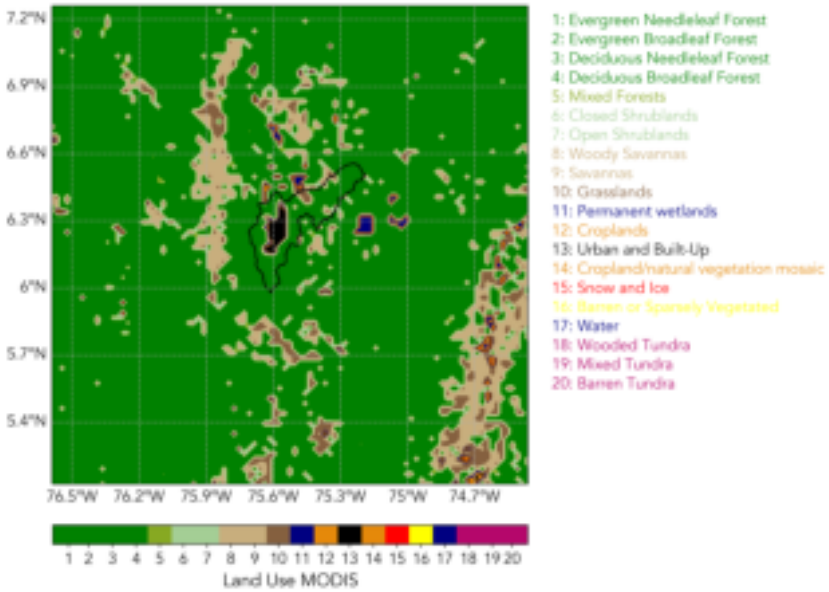


Figura 177: Coberturas de suelo en el dominio de estudio seleccionado para el modelo WRF-Hydro.

Resultados

Simulaciones empleando forzamientos de WRF

A partir de la información de forzamientos meteorológicos del modelo WRF se generó una simulación que comprende el periodo entre los meses de agosto de 2022 y junio de 2023, a partir de la cual se generan archivos de reinicio del modelo que permiten llevar a cabo simulaciones enfocadas en eventos de inundación de interés (Figura 178).

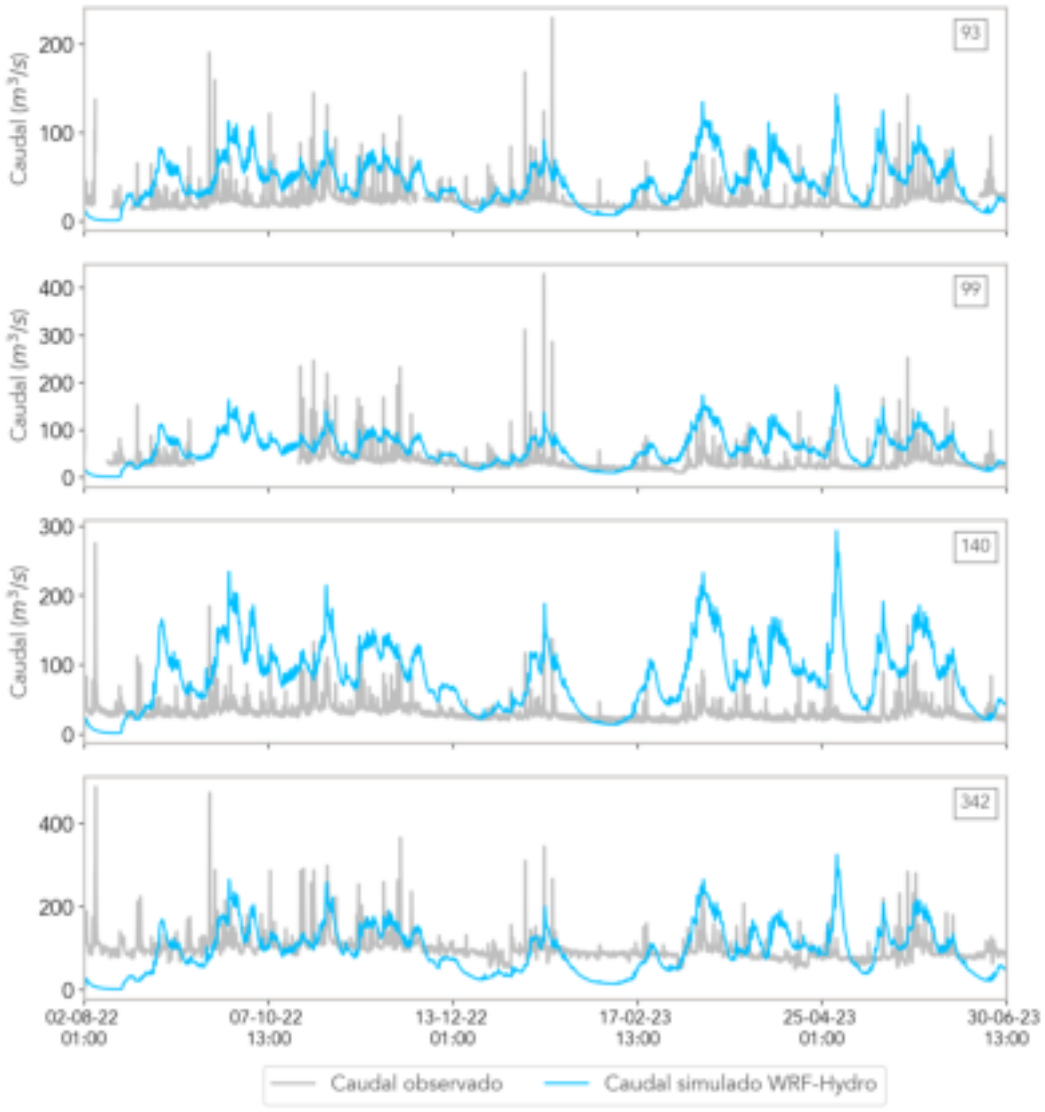


Figura 178: Caudales simulados en los puntos de control ubicados en la cuenca del río Aburrá-Medellín, a partir del nuevo dominio definido para WRF-Hydro.

i) Análisis de caudales

Con los resultados de caudal obtenidos se aplica el método de mapeo por cuantiles para la corrección de sesgos en la distribución de datos simulados a partir de datos observados. Para emplear este método primero se realizó una calibración para un periodo de 6 meses (2023-01-01 a 2023-06-27) con las series de caudales simulados y observados. Posteriormente, se realizó una evaluación o validación para el periodo comprendido entre 2022-10-15 y 2022-12-31. Se emplearon tres funciones diferentes para formar la relación cuantil-cuantil con el fin de compararlas. En la Figura 179 se presentan las tres series simuladas producto de la corrección y diferenciadas de acuerdo con su relación cuantil-cuantil. Comparando con la serie de caudal observado, se evidencia que con el método de corrección de mapeo cuantiles se logra mejorar la representación de la variabilidad y la magnitud de los caudales. Además, la distribución de los datos simulados corregidos se ajusta a la distribución de los datos observados (Figura 180).

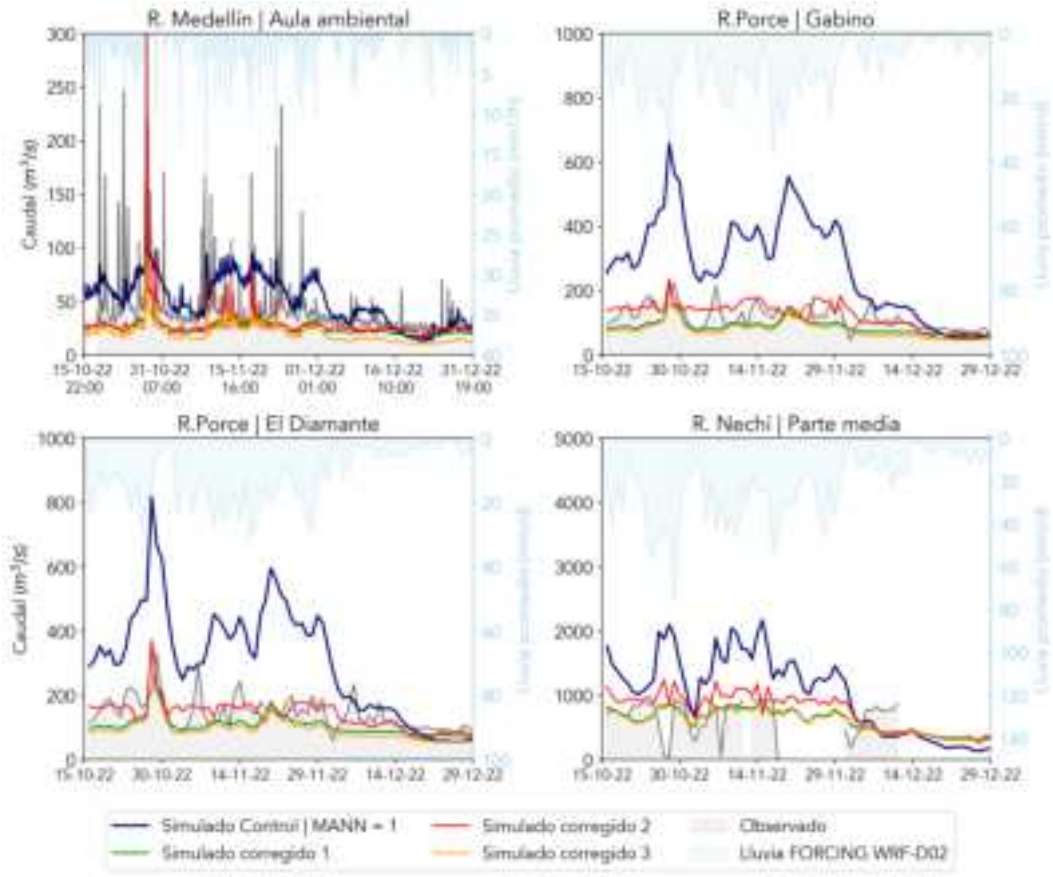


Figura 179: Serie de caudal simulada con el modelo WRF-Hydro para 4 puntos de control localizados en las cuencas de interés (línea azul) y series simuladas corregidas con el método de mapeo de cuantiles (línea roja, verde y naranja) comparado con la serie de caudal observado (línea gris).

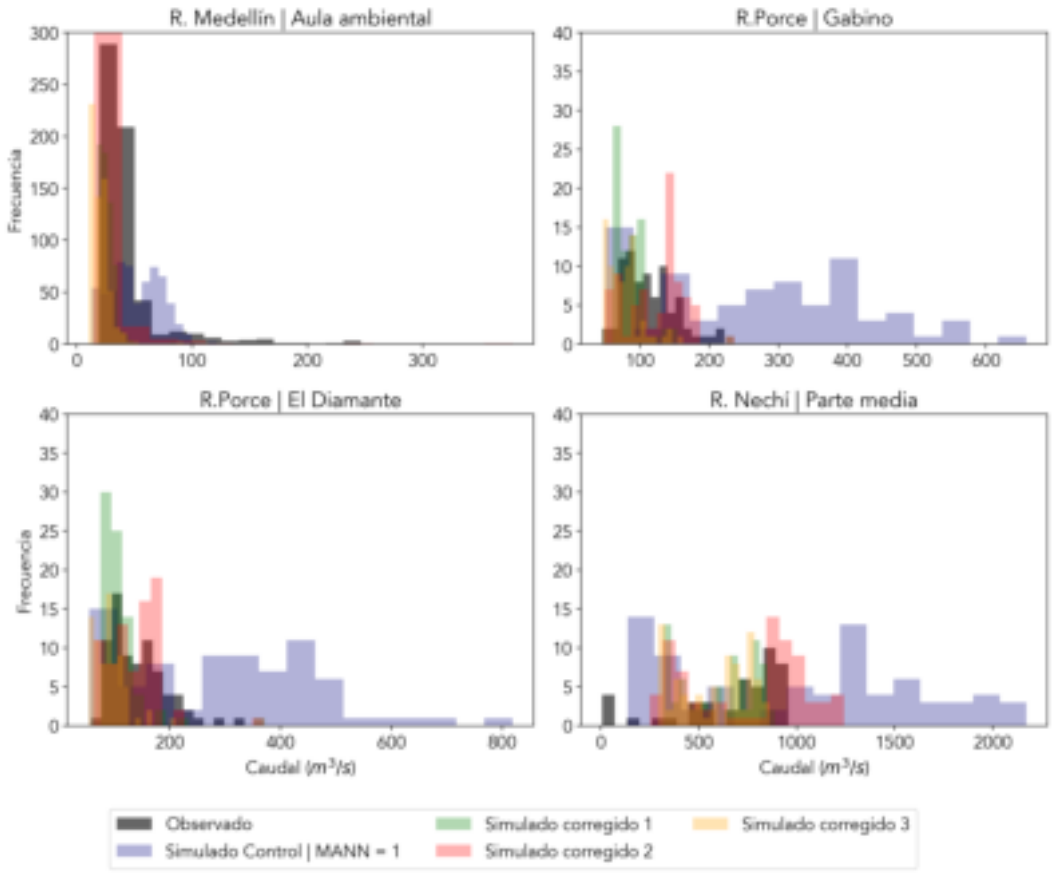


Figura 180: Histograma de caudales simulados con el modelo WRF-Hydro para 4 puntos de control (azul) y series simuladas corregidas con el método de mapeo de cuantiles (rojo, verde y naranja) comparado con el histograma de caudal observado (negro).

ii) Análisis de evapotranspiración

Con los resultados de evapotranpiración, que corresponden a la variable de salida *Accumulated total evapotranspiration (mm)*, se realizó un análisis comparativo con el producto *MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)* con resolución espacial de 500 m y resolución temporal de 8 días de acumulado. De acuerdo a esto, se realizó un pre-procesamiento de la información con el fin de tener las dos bases de datos en la misma resolución espacial y temporal. En la Figura 181 y Figura 182 se presentan algunos acumulados espaciales semanales simuladas por el modelo WRF-Hydro y obtenidas por MODIS, respectivamente.

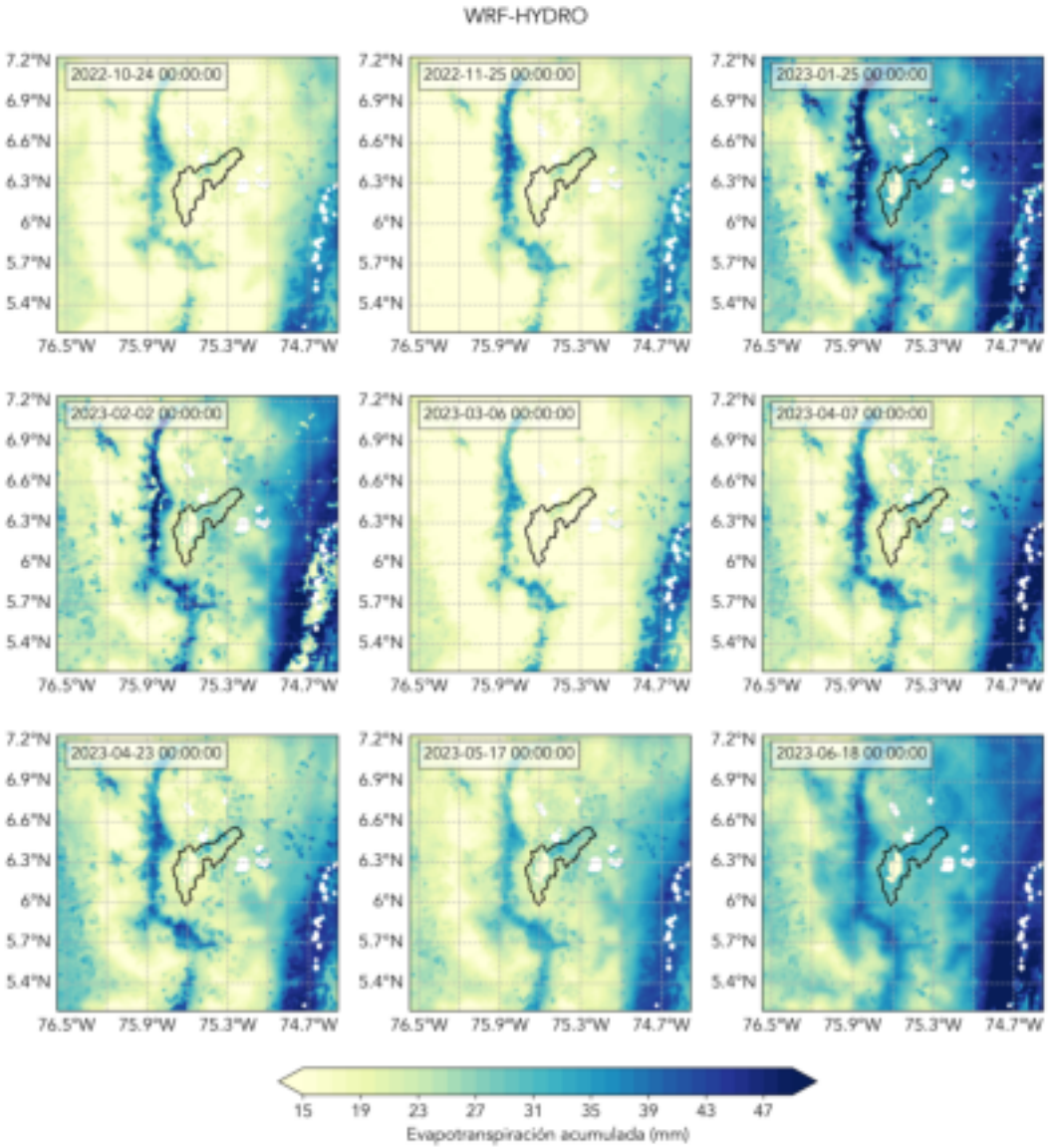


Figura 181: Evapotranspiración acumulada para algunas semanas del año 2022 y 2023 simulada con el modelo WRF-Hydro.

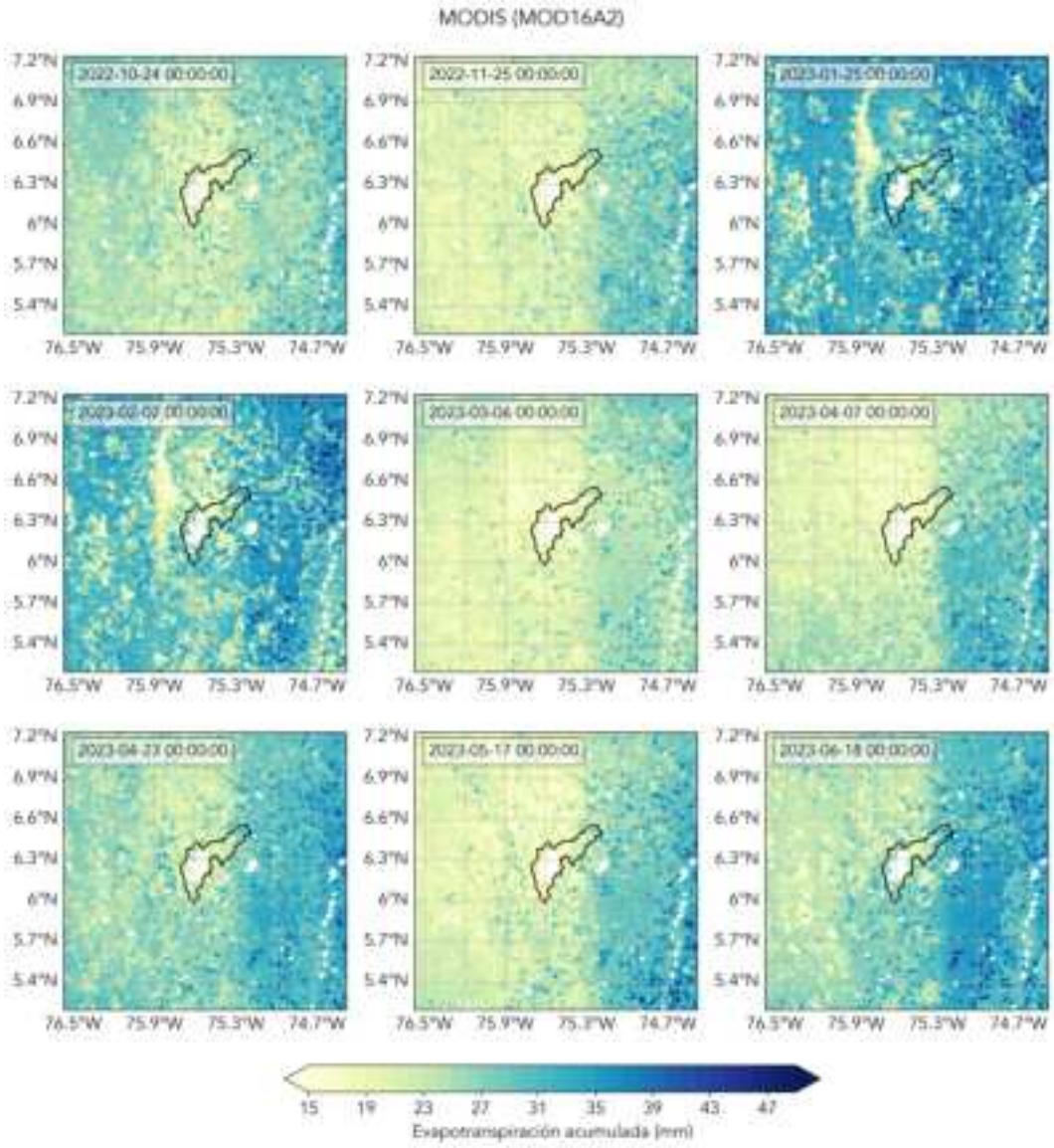


Figura 182: Evapotranspiración acumulada para algunas semanas del año 2022 y 2023 obtenida por MODIS.

Posteriormente, se realizó el cálculo de métricas espaciales: la raíz del error cuadrático medio (RMSE), la diferencia o el sesgo (BIAS) y el coeficiente de correlación de pearson (r) con el fin de comparar la evapotranspiración simulada (WRF-Hydro) y observada (MODIS) (Figura 183). Se evidencia que las mayores diferencias se encuentran en las regiones de menor elevación, específicamente en el valle del río Cauca y en el valle del Magdalena, con valores de diferencia de hasta 24 mm/8 días. En el Valle de Aburrá el coefiente de correlación de pearson (r) presenta valores de 0.5 mientras que en el oriente y occidente de Antioquia valores menores a 0.3.

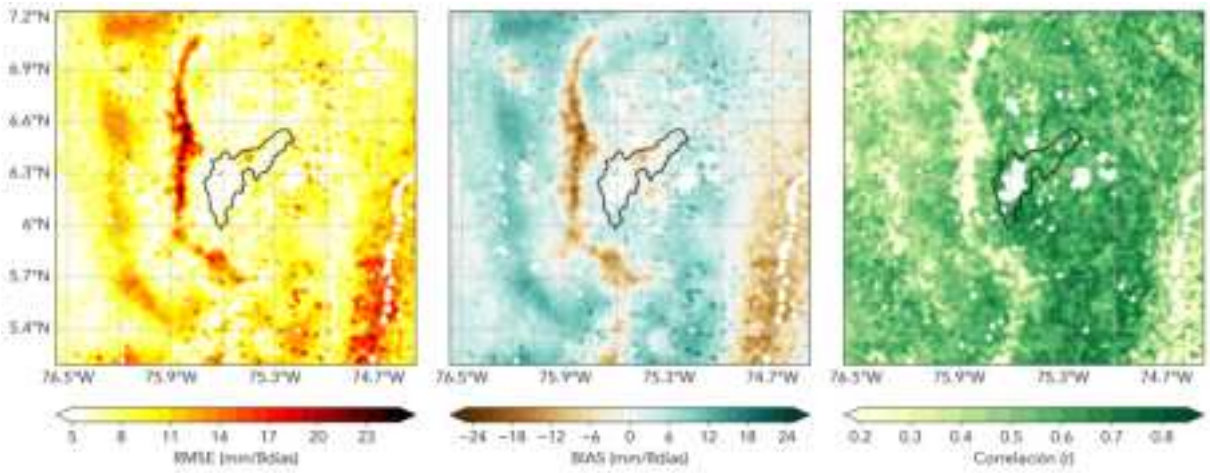


Figura 183: Cálculo de métricas de desempeño RMSE, BIAS y correlación de Pearson (r).

En la Figura 184 se muestra la comparación del promedio espacial para todo el dominio de la evapotranspiración simulada (WRF-Hydro) y observada (MODIS). Se evidencia una representación adecuada de la varibilidad y la magnitud de esta variable para las semanas evaluadas. Además, en la Figura 185 se presentan las series en 6 celdas con ubicaciones diferentes (río Porce, sur del Valle de Aburrá, oriente de Antioquia, occidente de Antioquia, suroeste de Antioquia y norte del Valle de Aburrá). Se evidencian las mayores diferencian en magnitud en las celdas ubicadas en occidente y oriente.



Figura 184: Promedio espacial de la evapotranspiración acumulada 8 días para el modelo WRF-Hydro (línea verde) y MODIS (línea negra).

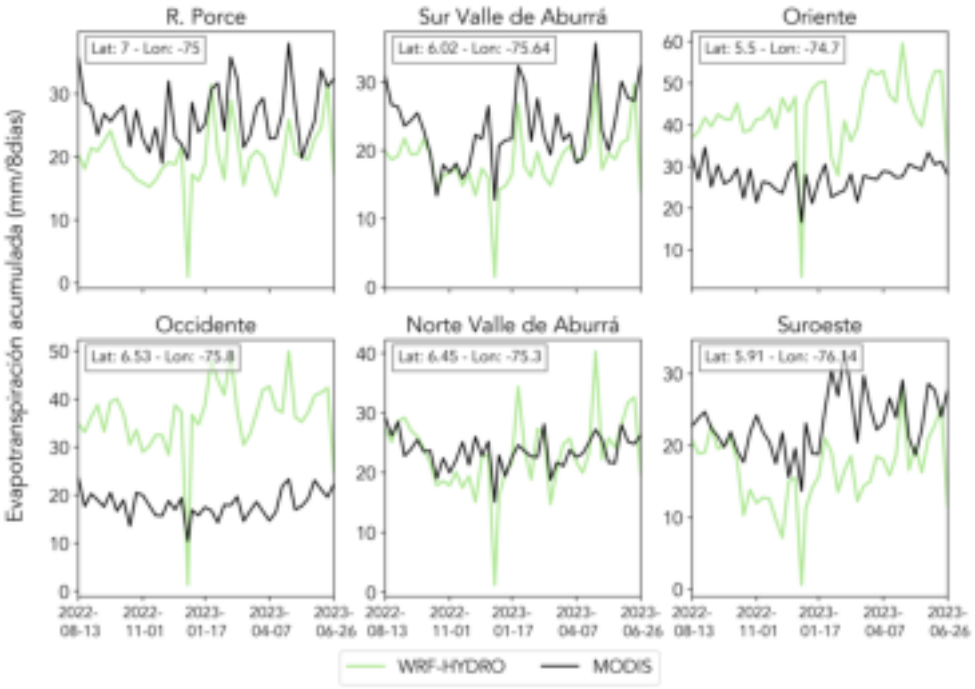


Figura 185: Serie de tiempo de la evapotranspiración acumulada 8 días para el modelo WRF-Hydro (línea verde) y MODIS (línea negra) para algunos pixeles seleccionados en el dominio de simulación.

Simulaciones empleando forzamientos de GPM IMERG

Para este ejercicio de simulación se incluye un cambio en la configuración del modelo, en este caso, la información de precipitación es suministrada desde el producto (*WRF format with specified precipitation*) con resolución espacial de 0.1° x 0.1°. Los demás datos de forzamiento meteorológico requeridos por el modelo siguen siendo proporcionados por el WRF.

El modelo WRF-Hydro requiere la información de entrada en la misma resolución espacial (2.5 km) definida para el modelo de superficie terrestre NoahMP, por tanto, se debe realizar el proceso de *regridding* o reagrupación, el cual es un proceso de interpolación de un conjunto de datos con resolución espacial de origen hacia una resolución espacial de destino. Para este proceso se utilizó el método de interpolación bilinear para pasando de información de WRF e IMERG. En Figura 186 se presenta la comparación de las series temporales promedio para el dominio con la información de *GPM IMERG Final Precipitation* y WRF. Se evidencian que las mayores diferencias se encuentran en las magnitudes, en donde WRF tiende presentar valores mayores con respecto a IMERG; sin embargo se presentan similitudes en la variabilidad temporal de ambas series.

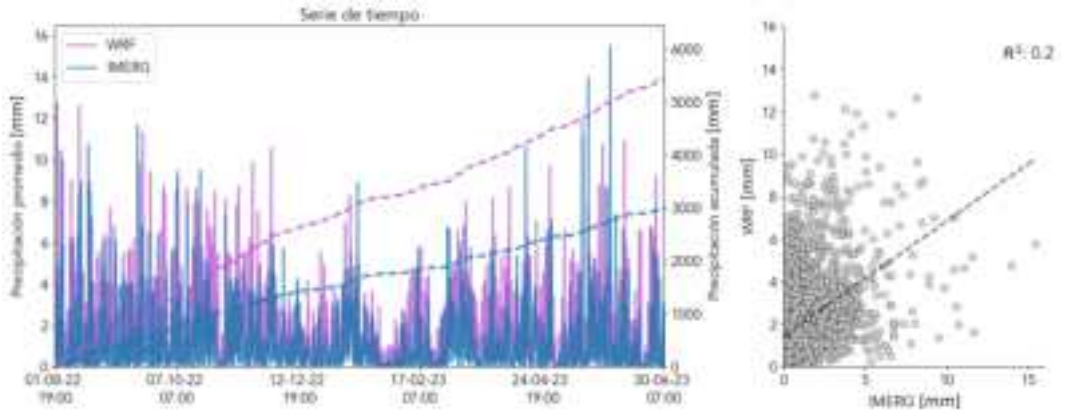


Figura 186: Comparación entre la serie de lluvia promedio en el dominio de estudio para WRF e IMERG.

Adicionalmente, en la Figura 187 y la Figura 188 se presentan los acumulados mensuales de precipitación para algunos de los meses presentes en el periodo de simulación. Para todos los meses se encuentran diferencias en las magnitudes, con mayores acumulados para los meses con información de WRF. Sin embargo, para ambos productos los meses de temporada seca (diciembre, enero y febrero) coinciden con menores acumulados y mayores acumulados en los meses de temporada de lluvia (noviembre, marzo y abril).

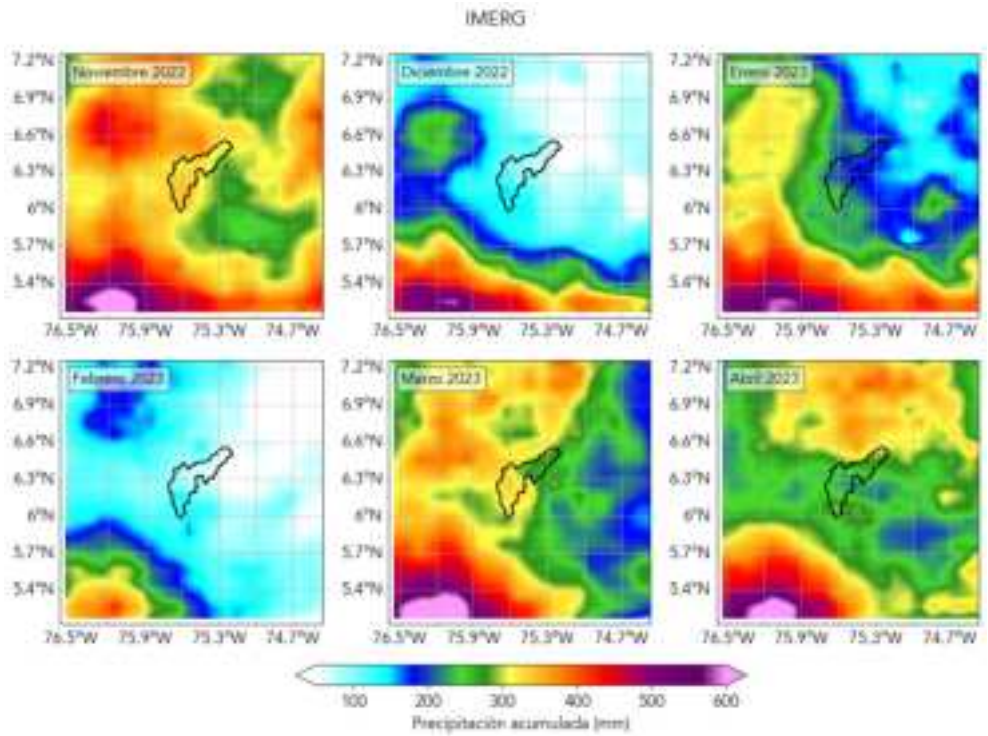


Figura 187: Acumulados mensuales obtenidos con el producto IMERG para algunos meses evaluados en el periodo de simulación.

De acuerdo con la representación de la variabilidad espacial de la precipitación, se presentan las mayores diferencias en el occidente y oriente (cuenca del río Nare) del dominio, para las cuales IMERG presenta diferencias en los acumulados mensuales de alrededor de 500 mm con respecto a WRF. En general, para el Valle de Aburrá se presentan menores diferencias en los acumulados mensuales, con correlaciones mayores a 0.7 entre estas dos fuentes de información.

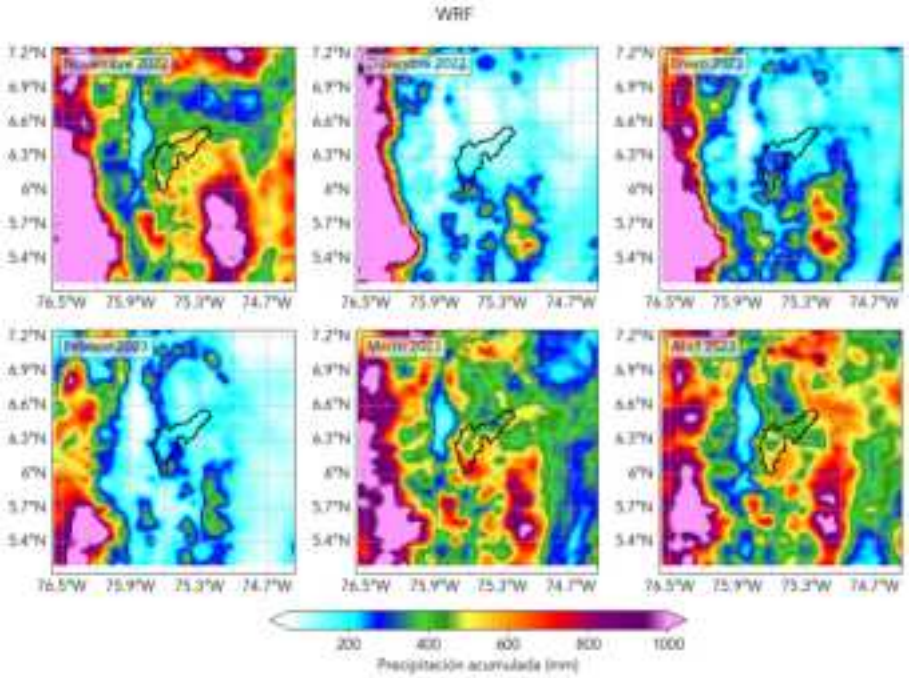


Figura 188: Acumulados mensuales obtenidos con el modelo WRF para algunos meses evaluados en el periodo de simulación.

A partir de la información procesada de IMERG para la variable precipitación, se realizó la simulación del modelo WRF-Hydro para el periodo comprendido entre agosto de 2022 y enero de 2023. La comparación entre los caudales simulados y observados se encuentra en la Figura 189, donde se representan los caudales generados por el modelo con los forzamientos meteorológicos de WRF y aquellos obtenidos con el cambio de la precipitación de IMERG. Es importante notar que, con la variación de la precipitación, el modelo requiere un mayor tiempo de calentamiento o *spin-up*, razón por la cual en los primeros meses de simulación no se observa una correcta representación del comportamiento del caudal en los distintos puntos de control definidos en el modelo. Posterior a esto, se observan diferencias en la variabilidad temporal de los caudales y menores magnitudes simuladas a partir del uso de IMERG.

Adicionalmente, se realizó la evaluación del evento de precipitación que tuvo lugar entre 2022-09-15 19:15:00 y 2022-09-16 08:05:00 (click aquí para ver reporte operacional). Este evento fue registrado por la lluvia de IMERG y representado de manera aceptable por el modelo WRF-Hydro (Figura 190), contrario a la simulación realizada con la información de lluvia de WRF. Además, se exploraron otros archivos de salida del modelo WRF-Hydro para este evento, en la Figura 191 se presenta la red de drenaje de las cuencas del río Nare, río Aburrá-Medellín y río Porce con el tránsito del caudal obtenido para la hora máxima del evento blue(click aquí para ver animación).

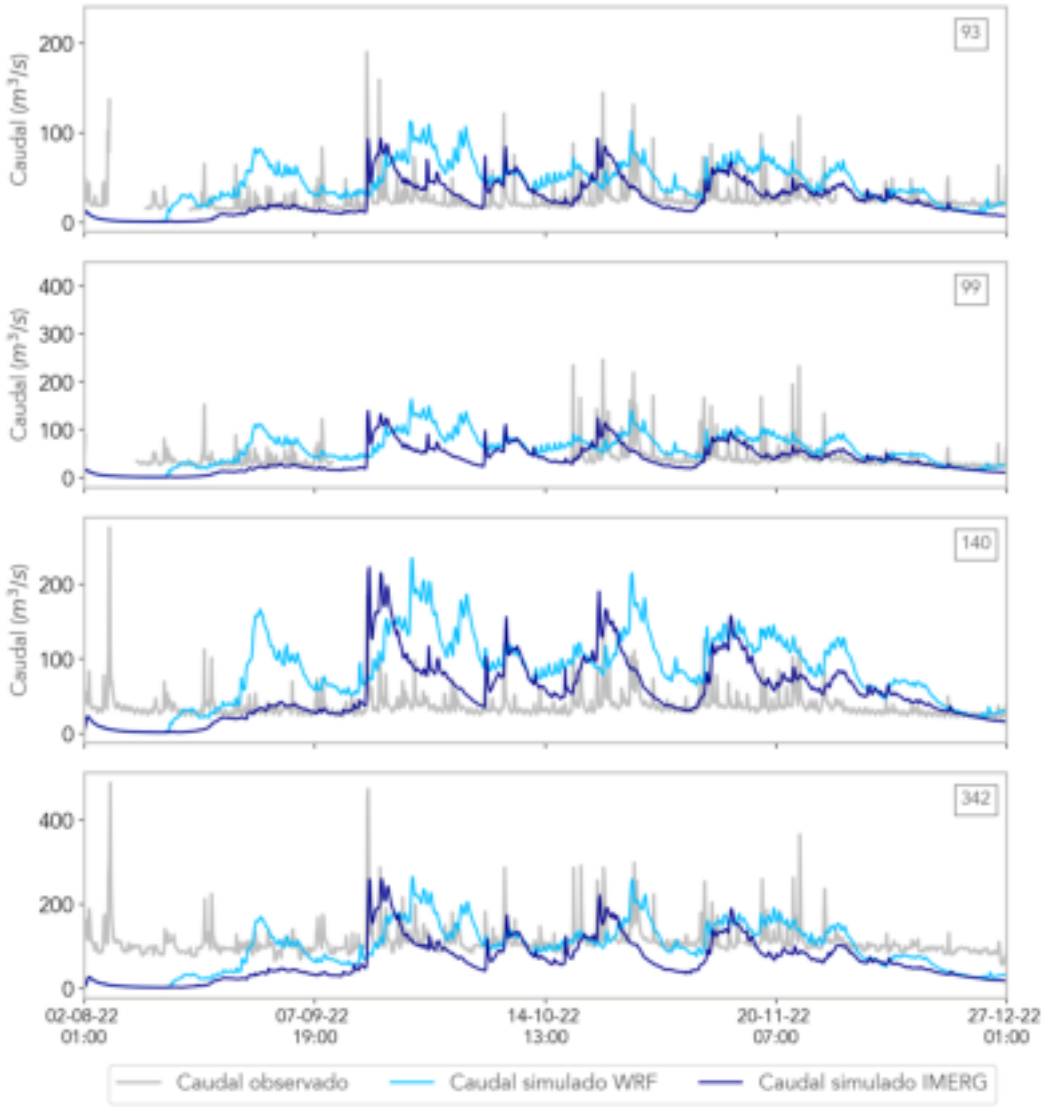


Figura 189: Series de caudales observados y simulados con la información de lluvia de IMERG (línea azul oscura) y WRF (línea azul clara) para el periodo completo de simulación (agosto de 2022 - enero 2023) y en los puntos de control ubicados a lo largo del río Aburrá-Medellín.

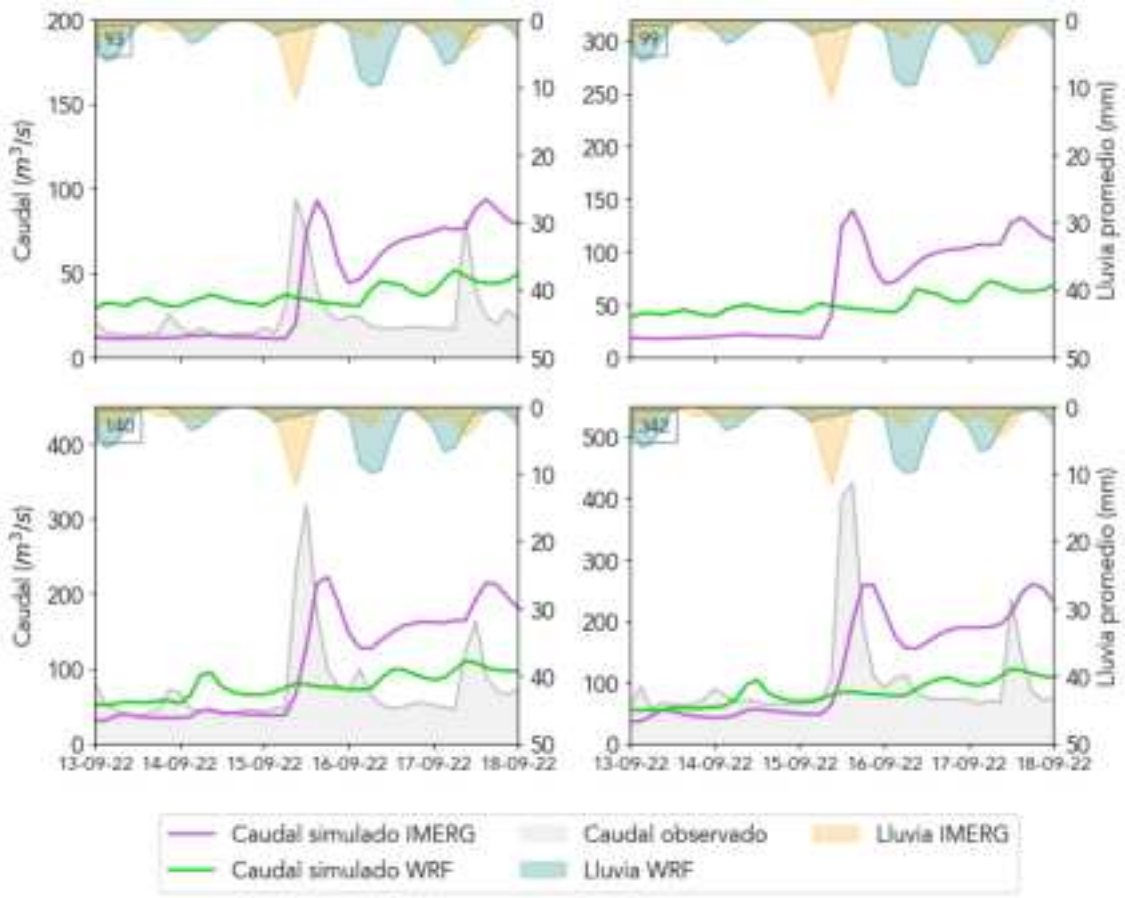


Figura 190: Series de caudales observados y simulados con la información de lluvia de IMERG (línea morada) y WRF (línea verde) para el evento de lluvia registrado el 16 de septiembre de 2022.

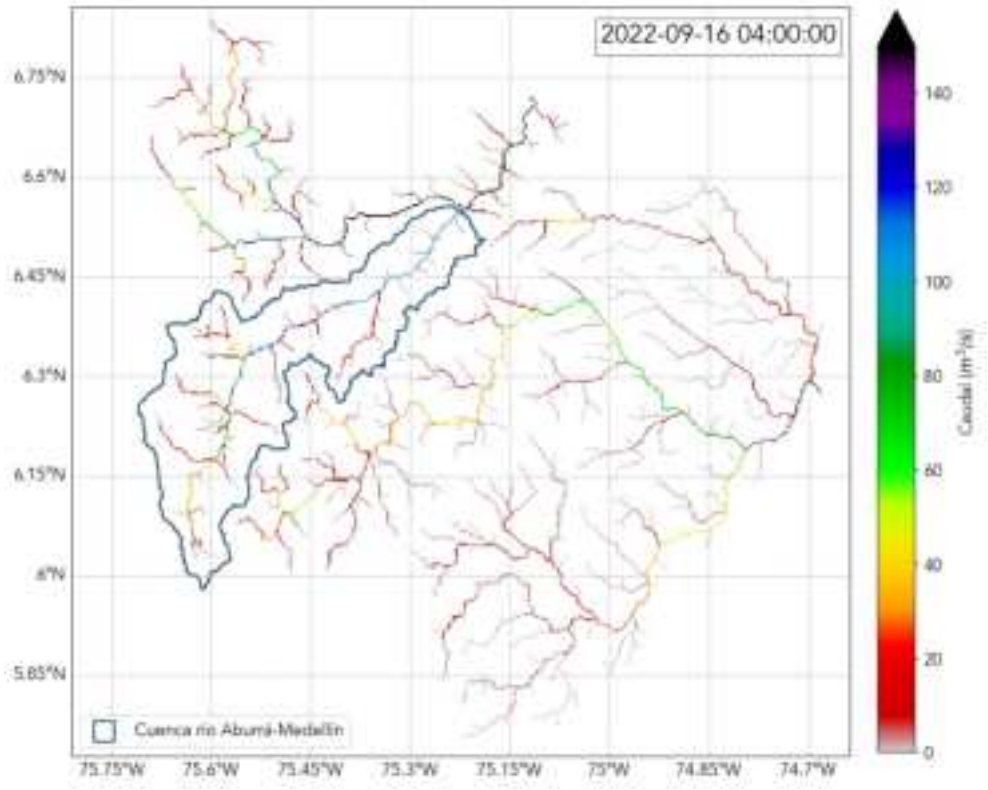


Figura 191: Tránsito del caudal simulado con el modelo WRF-Hydro en la red de drenaje de las cuencas del río Nare, río Porce y río Aburrá-Medellín.

Simulaciones empleando forzamientos de radar meteorológico

Para este ejercicio de simulación se incluye un cambio en la configuración del modelo, en este caso, la información de precipitación es suministrada desde el radar meteorológico del Valle de Aburrá, el cual tiene resolución espacial de origen de 120 metros aproximadamente. Los demás datos de forzamiento meteorológico requeridos por el modelo siguen siendo proporcionados por el WRF.

A partir de la información de entrada se realizó una comparación entre la precipitación obtenida por WRF, IMERG y el radar meteorológico. En Figura 192 se presenta la comparación de las series temporales promedio para el dominio de estudio, en donde se evidencian mayores magnitudes y acumulados para la lluvia generada por el modelo WRF y valores menores para la lluvia obtenida con IMERG y el radar meteorológico. De acuerdo con la distribución espacial de la lluvia, para las tres bases de datos los meses de temporada seca (diciembre, enero y febrero) coinciden con menores acumulados y mayores acumulados en los meses de temporada de lluvia (noviembre, marzo y abril). Sin embargo, el radar meteorológico presentan los menores acumulados de precipitación (Figura 193).

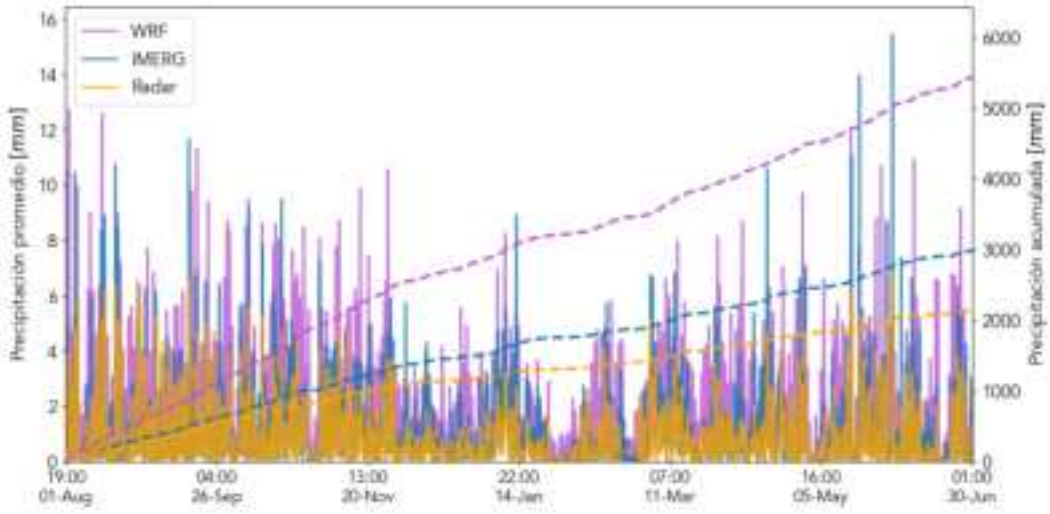


Figura 192: Comparación entre la serie de lluvia promedio en el dominio de estudio para WRF, IMERG y radar meteorológico

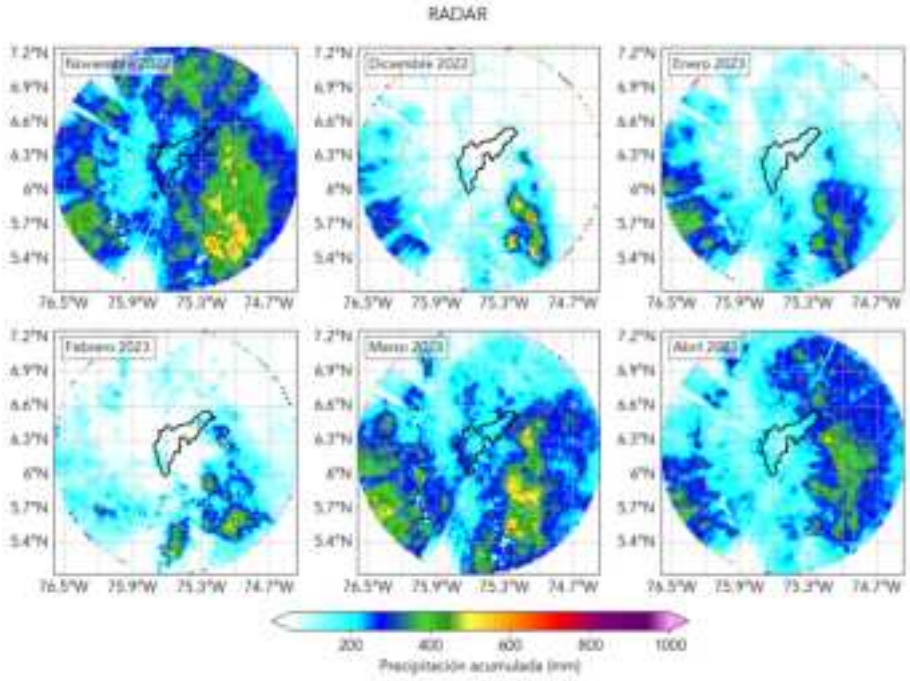


Figura 193: Acumulados mensuales obtenidos a partir del radar meteorológico para algunos de los meses evaluados en el periodo de simulación.

Adicionalmente, al igual que con la base de datos IMERG, se presentan las mayores diferencias en el occidente y oriente (cuenca del río Nare) del dominio de simulación, regiones para las cuales el radar meteorológico presenta diferencias en los acumulados mensuales mayores a 500 mm con respecto al modelo WRF.

i) Análisis de caudales

La comparación de los caudales se realizó para los puntos de control que cuentan con datos observados provenientes de SIATA, IDEAM o EPM para el periodo de simulación (Tabla 18). Para las estaciones de SIATA, se actualizaron las curvas de calibración para la estimación de caudales y los valores obtenidos se presentan en la Figura 194. Es posible observar que con esta actualización, las magnitudes de los caudales observados disminuyen, por lo tanto, se observa una mayor concordancia respecto al rango de valores obtenidos a partir de las distintas simulaciones.

Tabla 18: Puntos de control definidos para el dominio de modelación.

Longitud	Latitud	Código - Nombre	Corriente	Fuente
-75.577	6.239	93 - R. Medellín Puente 33	Aburrá-Medellín	SIATA
-75.572	6.264	99 - R. Medellín Aula ambiental	Aburrá-Medellín	SIATA
-75.393	6.412	342 - R. Medellín Hatillo	Aburrá-Medellín	SIATA
-75.498	6.358	140 - R. Medellín Puente fundadores	Aburrá-Medellín	SIATA
-74.673	6.276	230 - Canteras	Nare	IDEAM
-74.938	5.998	231 - La Garrucha	Samaná-Norte	IDEAM
-75.206	6.561	736 - Gabino	Porce	EPM
-75.113	6.723	802 - Diamante	Porce	EPM

Asimismo, se evaluó el desempeño de las simulaciones en términos de los valores del índice *Kling-Gupta Efficiency* (KGE) para cada serie simulada en los diferentes puntos de control. El KGE es un índice ampliamente utilizado para estimar la eficiencia a partir de la sumatoria de las diferencias al cuadrado de los valores observados y simulados. Además, tiene en cuenta la correlación entre las series evaluadas. Presenta valores de 0 a 1, en donde valores cercanos a 0 indican simulaciones deficientes y cercanos a 1 indican simulaciones ideales. En la literatura, clasifican el KGE de acuerdo a la siguiente escala:

- Valores menores a 0.2 o negativos: simulación deficiente.
- Valores entre 0.2 y 0.5: simulación aceptable.
- Valores mayores a 0.5: simulación satisfactoria.

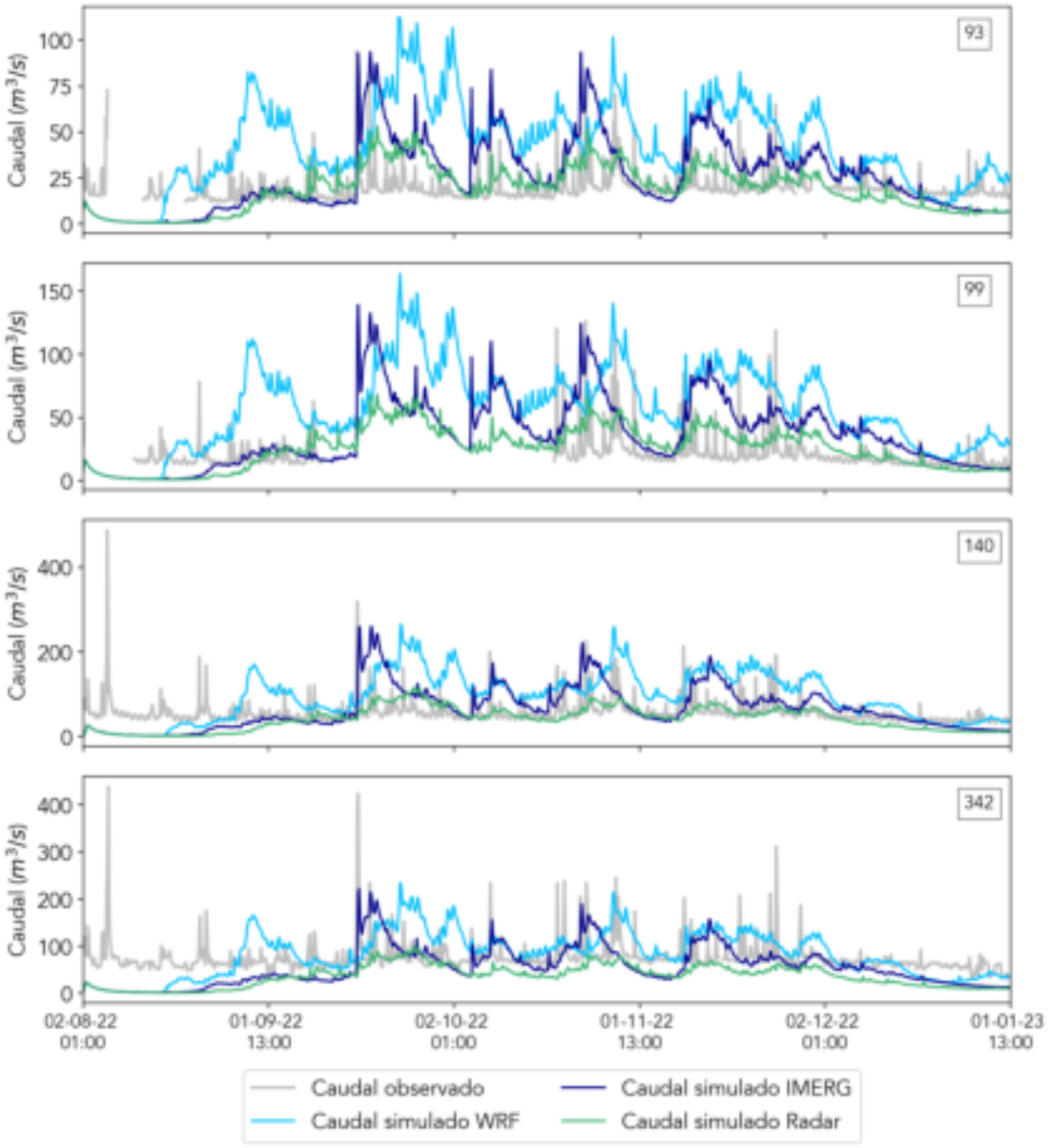


Figura 194: Series de caudales observados y simulados con la información de lluvia del radar meteorológico (línea verde), IMERG (línea azul oscura) y WRF (línea azul clara) para el periodo completo de simulación (agosto de 2022 - enero 2023) y en los puntos de control ubicados a lo largo del río Aburrá-Medellín.

En la Figura 195 se presentan los valores de KGE obtenidos para cada punto de control a partir de las simulaciones realizadas con lluvia de WRF, radar e IMERG. Se evidencian valores aceptables de KGE para la simulación realizada con lluvia de radar en los puntos de control ubicados en el río Aburrá-Medellín y el río Nare, mientras que la simulación realizada con WRF presenta valores de KGE deficientes o negativos para los puntos de control ubicados en el río Aburrá-Medellín y el río Porce. La simulación

realizada con lluvia de IMERG presenta valores de KGE aceptables para dos puntos de control ubicados en la parte baja de la cuenca del río Aburrá-Medellín. En términos de KGE, el mejor desempeño del modelo en los puntos de control se obtiene para la simulación realizada con la precipitación de radar. Adicionalmente, se realizó una comparación de las tres simulaciones a partir del diagrama de Taylor para seleccionar la mejor simulación basándose en tres parámetros estadísticos: la desviación estándar, el coeficiente de correlación y el error cuadrático medio (RMSE) (Figura 196). De manera similar, la simulación relizada con la información estimada del radar meteorológico presentó el mejor rendimiento para todos los puntos de control debido a que sus valores se ubican más cerca al arco y punto rojo que indica el caudal observado, lo cual representa una menor desviación estándar, mayor correlación en la mayoría de los casos y un menor RSME.

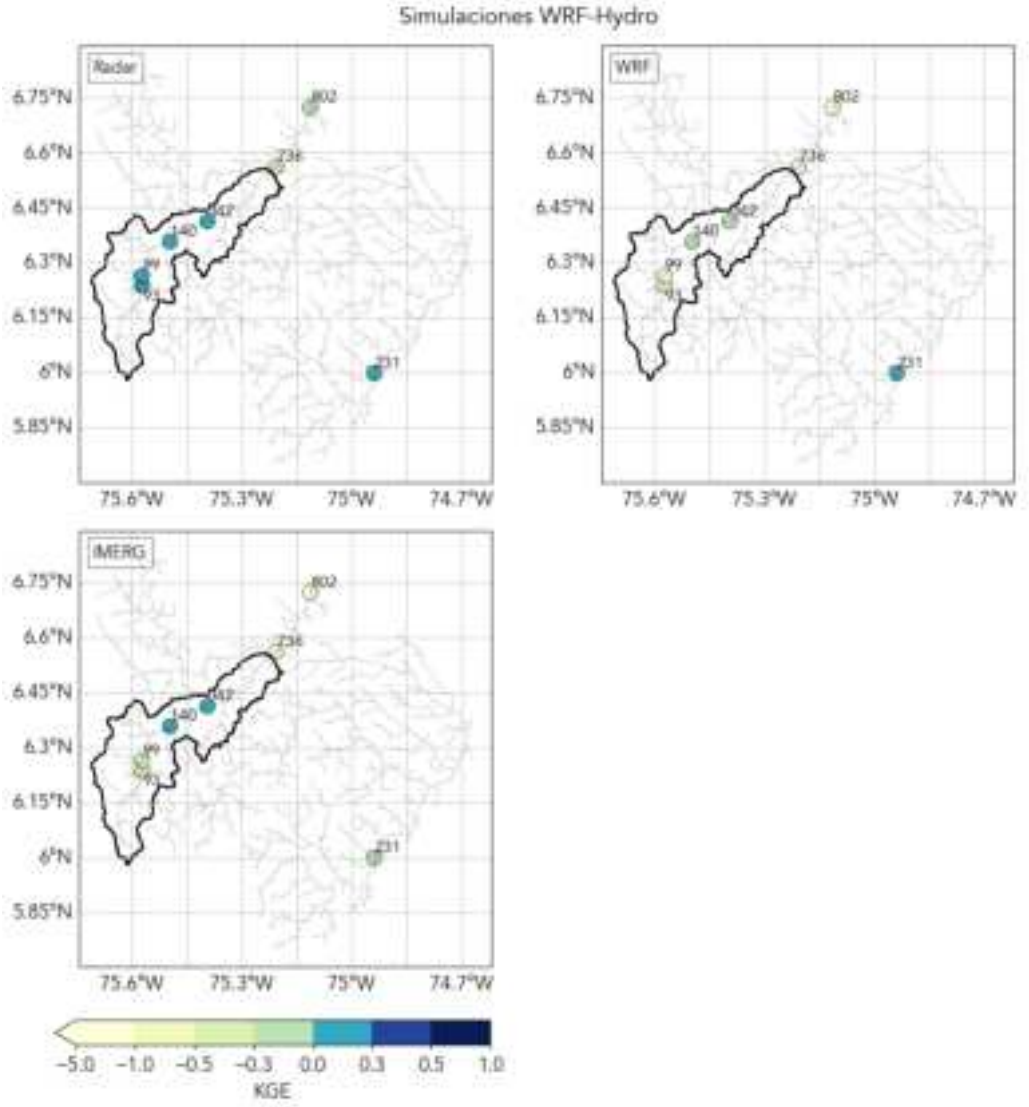


Figura 195: Distribución espacial de los valores de KGE a partir de las simulaciones realizadas con la lluvia de radar, WRF e IMERG para los distintos puntos de control.

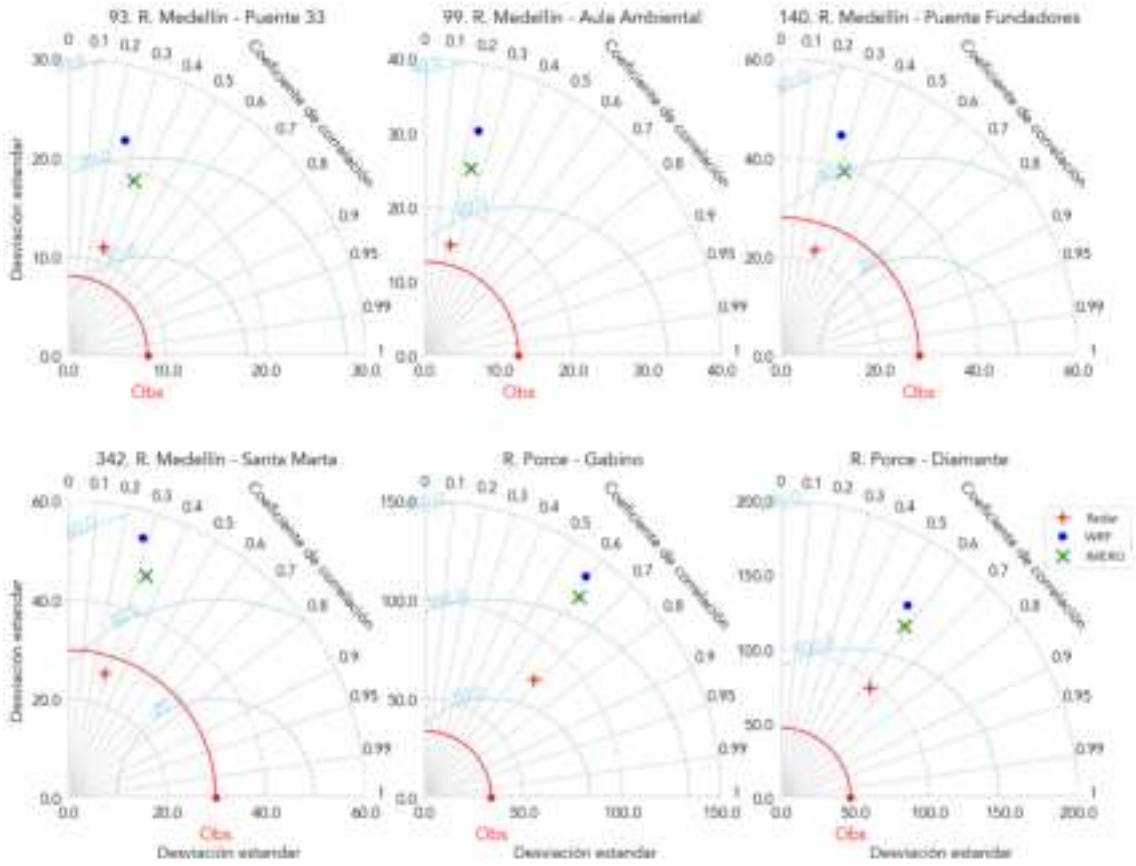


Figura 196: Diagrama de Taylor obtenido con las series simuladas de caudal con información de precipitación de radar, WRF e IMERG. La línea punteada azul claro indica la métrica RMSE.

ii) Análisis de evapotranspiración y humedad del suelo

A partir de la variable de salida *Accumulated total evapotranspiration (mm)* del modelo WRF-Hydro, se realizó la comparación con el producto *MODIS Global Evapotranspiration Project (MOD16)*, el cual tiene una resolución espacial de 500 m y una resolución temporal de 8 días de acumulado. Primero, se realizó un pre-procesamiento de la información con el fin de tener las dos bases de datos en la misma resolución espacial y temporal. En la Figura 197 se muestra la comparación del promedio espacial para todo el dominio de la evapotranspiración observada (MODIS) y simulada a partir de las tres fuentes de precipitación, en donde se evidencian similitudes en la representación de la variabilidad para el periodo de simulación y mayores diferencias en las magnitudes obtenidas. De manera espacial, la evapotranspiración obtenida con el producto IMERG presenta correlaciones menores a 0.5 en la parte baja del río Aburrá-Medellín (ver Figura 197), mientras que con los forzamientos de lluvia de WRF y de radar las correlaciones son superiores a un valor de 0.6. Igualmente, se evidencian menores correlaciones (menores a 0.5) con los datos de IMERG en la parte occidental del dominio. Para las tres simulaciones se presentan las mayores diferencias en las magnitudes en el valle de la cuenca del río Cauca y en el oriente, con valores mayores a 15mm/8 días.



Figura 197: Promedio espacial de la evapotranspiración acumulada 8 días para MODIS (línea negra) y el modelo WRF-Hydro con forzamientos de precipitación de radar (línea verde), IMERG (línea azul) y WRF (línea naranja).

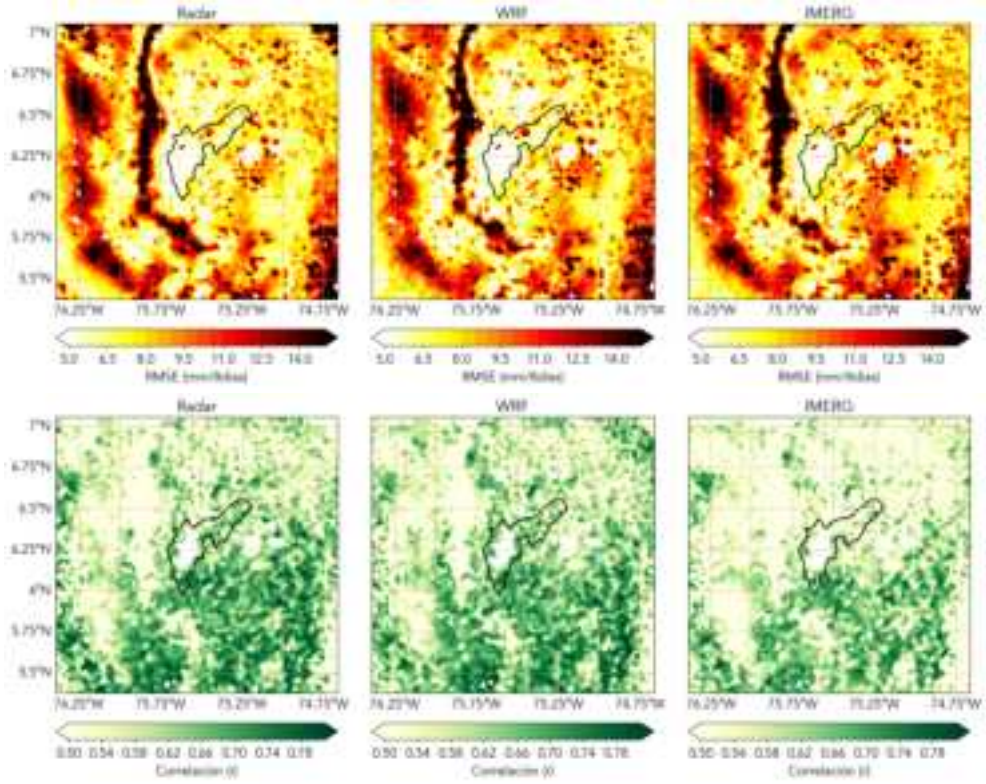


Figura 198: Cálculo de métricas de desempeño RMSE (superior) y correlación de Pearson (r) (inferior) entre la evapotranspiración del producto MODIS y la evapotranspiración estimada con el modelo WRF-Hydro con los diferentes forzamientos de lluvia (radar, IMERG, WRF).

Como información de salida del modelo WRF-Hydro, específicamente del componente relacionado con el modelo de superficie terrestre Noah-MP, se tiene la variable *Soil moisture* (m^3/m^3), la cual se encuentra

distribuida en las cuatro capas de suelo que representa el modelo en profundidades de 0.10, 0.30, 0.60 y 1.0 m respectivamente. Como exploración inicial de esta variable, se tomó como referencia la simulación realizada con la precipitación del modelo WRF como forzamiento y en la Figura 200 se presenta la distribución espacial de la humedad del suelo promedio durante el periodo de simulación en las cuatro capas del suelo. Es de anotar que a mayor profundidad se observa el mayor contenido de humedad del suelo y se identifican aquellas zonas que corresponden con cuerpos de agua (embalses y ríos).

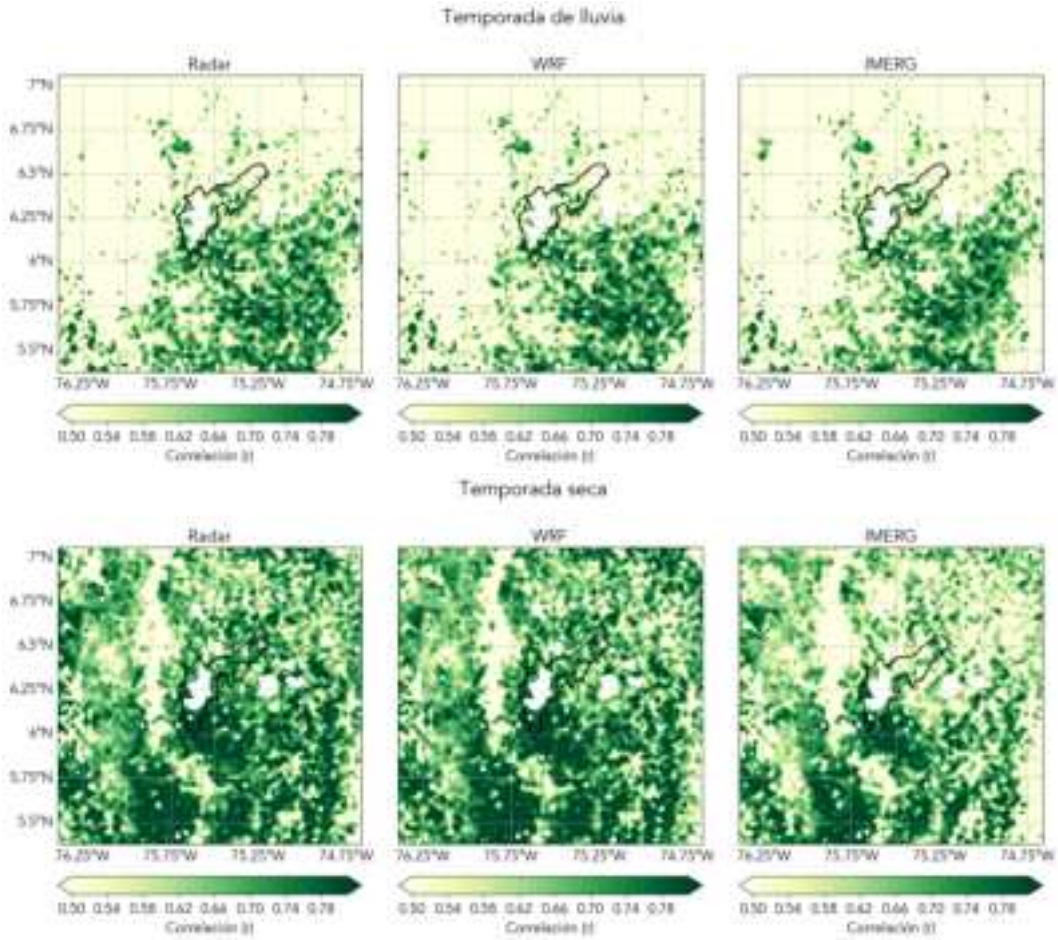


Figura 199: Cálculo de correlación de Pearson (r) para los meses de temporada seca (inferior) y temporada de lluvias (superior) entre la evapotranspiración del producto MODIS y la evapotranspiración estimada con el modelo WRF-Hydro con los diferentes forzamientos de lluvia (radar, IMERG, WRF).

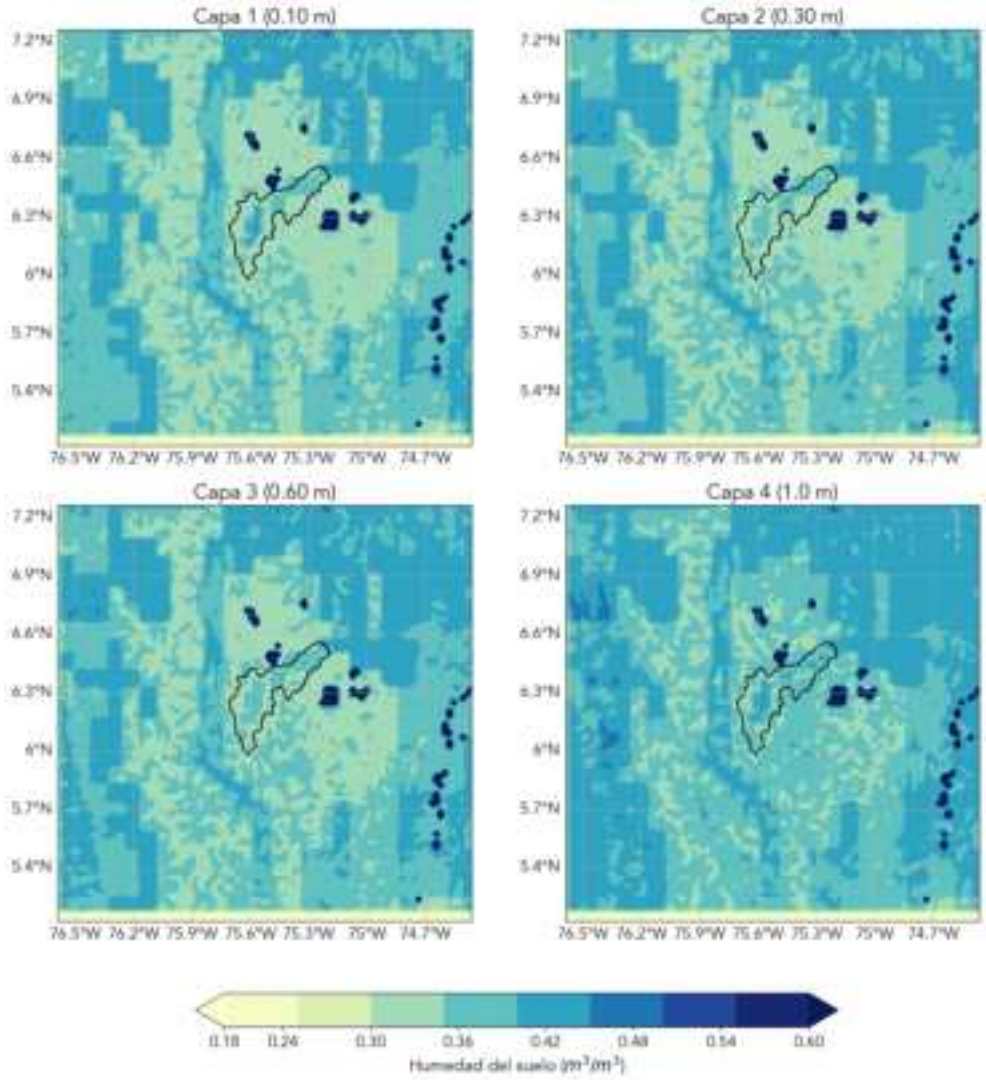


Figura 200: Distribución espacial de la humedad del suelo promedio en las cuatro capas del suelo representadas en el modelo WRF-Hydro, a partir de la simulación con la lluvia de WRF.

En la Figura 201 puede observarse la evolución temporal de la humedad del suelo promedio en el dominio de simulación. Se puede notar que el modelo requiere un tiempo de calentamiento o *spin-up* para la representación física de esta variable y posteriormente se observa concordancia entre el comportamiento de la precipitación y de la humedad del suelo, regulando la variabilidad de las magnitudes simuladas. Además, se observan ligeros aumentos de humedad del suelo a medida que aumenta la profundidad de cada capa y esto se hace más notable en la capa 4, la más profunda, donde las magnitudes difieren en mayor medida asociadas con un mayor contenido de humedad.

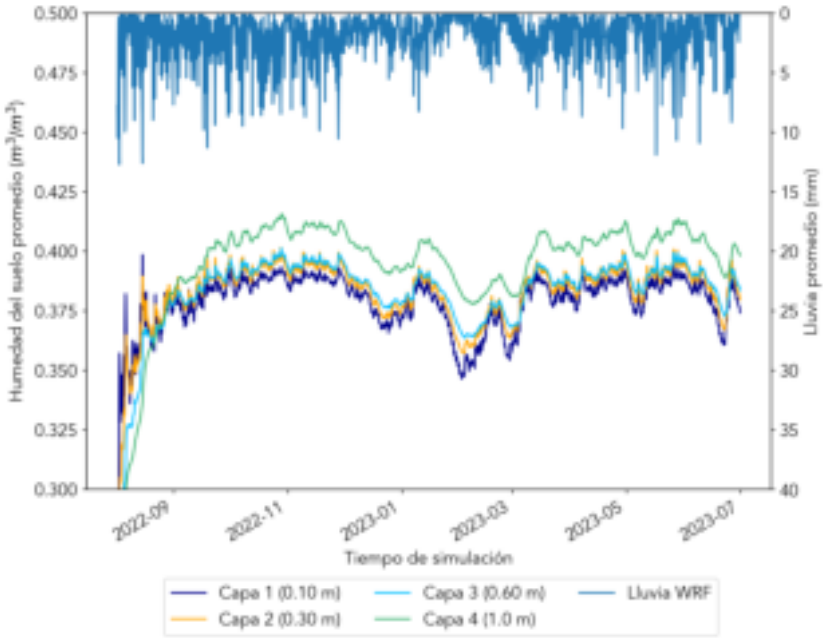


Figura 201: Serie de tiempo de la humedad del suelo promedio en las cuatro capas del suelo representadas en el modelo WRF-Hydro, a partir de la simulación con la lluvia de WRF.

Parte III: Determinación de zonas de inundación por medio de simulación hidráulica (manchas de inundación)

Introducción

La modelación hidráulica en dos dimensiones es empleada en el proyecto SIATA para simular los procesos dinámicos del agua en su flujo por la red de drenaje.

Para las simulaciones hidráulicas en el proyecto SIATA se implementó el modelo de libre acceso llamado IBER 2D. IBER es un modelo matemático bidimensional para la simulación de flujos en ríos y estuarios desarrollado por el Centro de Estudios Hidrográficos del CEDEX, Dirección General del Agua de España, y en colaboración con el Grupo de Ingeniería del Agua y del Medio Ambiente, GEAMA (de la Universidad de A Coruña UDC), el Grupo Flumen (de la Universitat Politècnica de Catalunya UPC y de la Universitat de Barcelona UB) y el Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE (vinculado a la Universitat Politècnica de Catalunya UPC). IBER consta de un módulo hidrodinámico que permite la simulación bidimensional de cauces, un segundo módulo de turbulencia y un tercer módulo de transporte de sedimentos para la cuantificación de la evolución de la carga sólida, tanto por arrastre de fondo como en suspensión. (`https://www.iberaula.es`). Las aplicaciones de la simulación hidráulicas están enfocadas en alguno de los siguientes objetivos:

- Determinación de áreas de inundación: simulación hidráulica para un tramo de cauce con longitud aproximada entre 1 y 5 kilómetros, en el cual se consideran escenarios de caudal asociados a eventos extremos, y cuyos resultados son empleados para delimitar las áreas de inundación en zonas asociadas a Sistemas de Alerta Temprana Comunitaria (SATC). Este producto aportan a la definición de rutas de evacuación y lugares de encuentro.

- Estimación de tiempos de viaje: simulación hidráulica en un tramo de cauce para estimar el tiempo que se tarda una creciente para transitar desde un punto inicial hasta un punto final. Para este análisis se consideran caudales de entrada, que estén asociados a los niveles de riesgo, de modo que los resultados del modelo puedan ser de utilidad para la labor del equipo Operacional del proyecto SIATA.
- Determinación y validación de niveles de riesgo en la red de nivel del proyecto SIATA: por medio de las simulaciones hidráulicas se rectifican o determinan los niveles de riesgo en una estación de nivel, de modo que estos niveles representen las condiciones del tramo y no de las condiciones locales de la ubicación del sensor.

Metodología

La metodología para calcular áreas de inundación en los tramos de interés de los afluentes del Valle de Aburrá se basa en el uso del modelo numérico Iber 2D. El análisis de amenaza se estructura a partir de la simulación de distintos escenarios hidráulicos que representan el comportamiento del cauce ante situaciones reales, con base en datos históricos, y situaciones esperadas, definidas mediante modelos hidrológicos y curvas IDF que incorporan criterios de cambio climático.

El proceso inicia con la identificación de tramos prioritarios en quebradas que presentan condiciones geomorfológicas homogéneas. Se recopila la topografía a partir de cartografía existente o mediante sobrevuelos con dron, y se complementa con información de batimetría, rugosidad del terreno y depuración de la malla para la construcción del modelo. Con el modelo calibrado, se simulan distintos caudales máximos para estimar variables hidráulicas como profundidad y velocidad. Las áreas de inundación resultantes son validadas mediante registros históricos, datos de estaciones de monitoreo y retroalimentación comunitaria, y luego georreferenciadas para su análisis y divulgación. Este proceso, además de fortalecer la respuesta ante eventos extremos, contribuye a una mejor definición de los niveles de amenaza asociados a sensores de nivel, brindando información técnica clave para las entidades de gestión del riesgo y las comunidades del Área Metropolitana.

Resultados

Durante esta vigencia se realizaron 24 simulaciones hidráulicas, la mayoria en el municipios de Medellín (14), Sabaneta (3), Bello y Copacabana (2), Girardota, Barbosa y Envigado (1).

En el río Medelllín se realizaron simulaciones hidráulicas para estimas los tiempos de viajes, en la Tabla (19) se presentan las estimaciones realizadas en todo su recorrido, tomando como puntos de control las estaciones de la red de nivel del proyecto SIATA.

Tabla 19: Tiempos de viaje entre estaciones para crecientes sobre el río Aburrá-Medellín. Las estimaciones fueron realizadas a partir de simulación hidráulica. Tiempo 1 (*): asociado a eventos con nivel de riesgo rojo, Tiempo 2 (**): asociado a eventos con nivel de riesgo amarillo.

Estación inicial	Estación final	Tiempo 1 (*) (minutos)	Tiempo 2 (**) (minutos)
169. La Clara	124. U. Deportiva Caldas	55	100
124. U. Deportiva Caldas	106. Parque 3 Aguas	11	19
106. Parque 3 Aguas	179. La Inmaculada	33	72
179. La Inmaculada	331. Ancón Sur	12	21
331. Ancón Sur	91. Estación Sabaneta	5	10
91. Estación Sabaneta	584. Metro Ayurá	16	32
584. Metro Ayurá	94. Puente Aguacatala	5	9
94. Puente Aguacatala	93. Puente La 33	19	42
93. Puente La 33	99. Aula Ambiental	13	23
99. Aula Ambiental	520. Metro Acevedo	20	35
520. Metro Acevedo	346. Puente Machado	23	42
346. Puente Machado	140. Puente Fundadores	21	42
140. Puente Fundadores	472. Puente Girardota	51	60
472. Puente Girardota	342. Hatillo Santa Marta	90	160
TOTAL		6.2 horas	11.2 horas

Parte IV: Monitoreo de niveles fréaticos para la optimización de modelos hidrológicos

Introducción

Con la implementación de los modelo hidrológicos empleados en el Valle de Aburrá, se obtienen resultados que permiten hacer seguimiento a las condiciones de cada uno de los procesos hidrológicos que se conceptualizan en ellos. En ejercicios anteriores se han evaluado los resultados de los modelos para el agua superficial por medio de los caudales monitoreados con la red de nivel, y para el agua subsuperfical por medio de las mediciones de humedad del suelo. Para complementar el análisis, en esta vigencia se incluye el monitoreo de aguas subterráneas a través del nivel fréatico, esto con la intención de evaluar los resultados de los modelos en el componente representativo del acuífero.

Para esto se ha venido fortaleciendo una red de aguas subterráneas, que al final de esta vigencia cuenta con 15 estaciones de monitoreo para la medición de nivel freático, localizadas en los municipios de Caldas (1), La Estrella (1), Sabaneta (1), Envigado (1), Medellín (8), Bello (1), Copacabana (1) y Barbosa (1). En la Tabla 20 se presenta la información asociada a cada estación y en la Figura 202 se muestra su ubicación. Se resalta que las estaciones 702, 705, 722, 737 y 752 se instalaron durante la presente vigencia.

Tabla 20: Estaciones de monitoreo red de aguas subterráneas SIATA.

Código	Nombre	Latitud	Longitud	Altura	Municipio
597	Herrajes Gaher	-75.592300	6.193180	1546.80	Medellín
600	Parqueadero Caritrans	-75.521500	6.339660	1444.70	Copacabana
629	Restaurante Chuscalito	-75.552840	6.215480	1820.90	Medellín
673	Lavapres	-75.572080	6.225840	1482.00	Medellín
676	Jardin Botánico	-75.563280	6.269200	1490.02	Medellín
681	Ferrocortes	-75.585589	6.201151	1505.00	Medellín
682	Industrias Roca	-75.580800	6.232700	1478.00	Medellín
683	Villa Torcoroma	-75.669100	6.184400	2141.00	Medellín
700	Inversiones Siderense	-75.643412	6.160497	1806.90	La Estrella
701	La Valeria	-75.643195	6.091417	1781.00	Caldas
702	Planta Tratamiento Barbosa	-75.32547	6.43059	1414.00	Barbosa
705	Bellanita Group	-75.563170	6.345138	1451.00	Bello
722	Sotrames	-75,624071	6,14992	1611.00	Sabaneta
737	Sotrames Envigado	-75.60183	6.16202	1642.00	Envigado
752	Eafit	-75.5787	6.198177	1580.00	Medellín

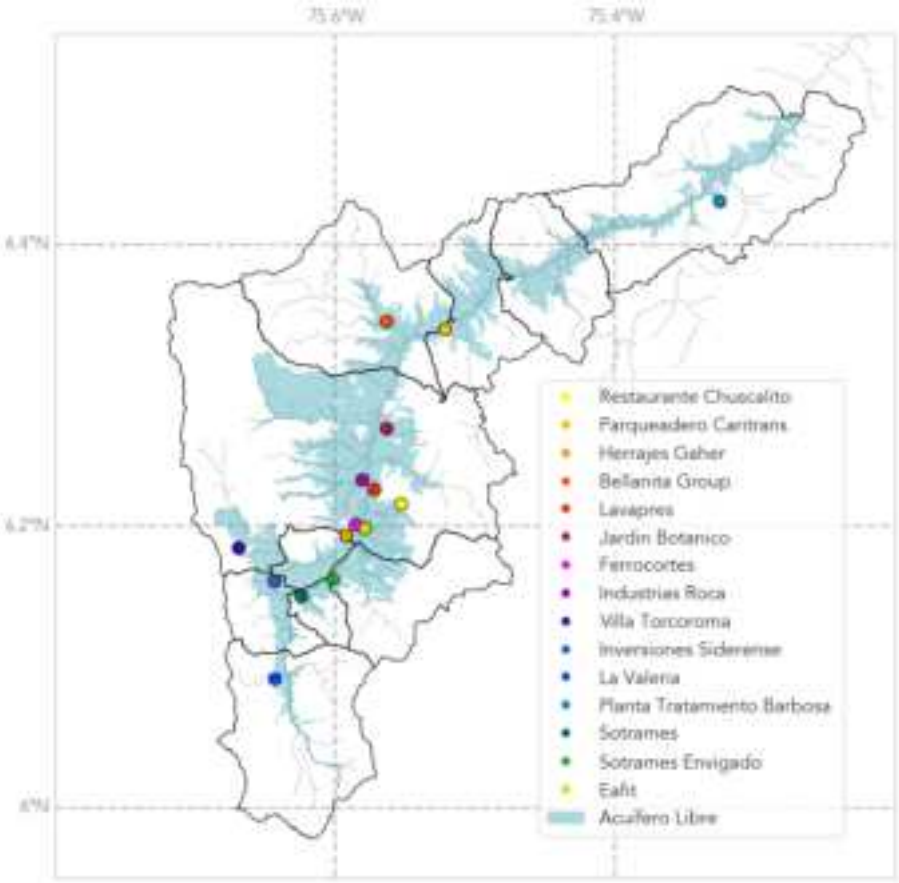


Figura 202: Ubicación estaciones de monitoreo red de aguas subterráneas SIATA

Metodología y resultados

Relación entre niveles freáticos y precipitación

Con la finalidad de estudiar como es el comportamiento mensual de los niveles freáticos y su correlación con la lluvia, se obtuvieron los promedios mensuales para cada estación, donde se resalta que, en general, los niveles más altos se presentaron durante los meses de mayo, junio y noviembre, por el contrario, los más bajos, se registraron durante febrero, marzo y agosto (Figura 203 (arriba)), como una respuesta al régimen de lluvias bimodal en la cuenca, donde se destaca que se presenta un desfase entre los registros de datos medidos para ambas variables (Figura 203 (abajo)).

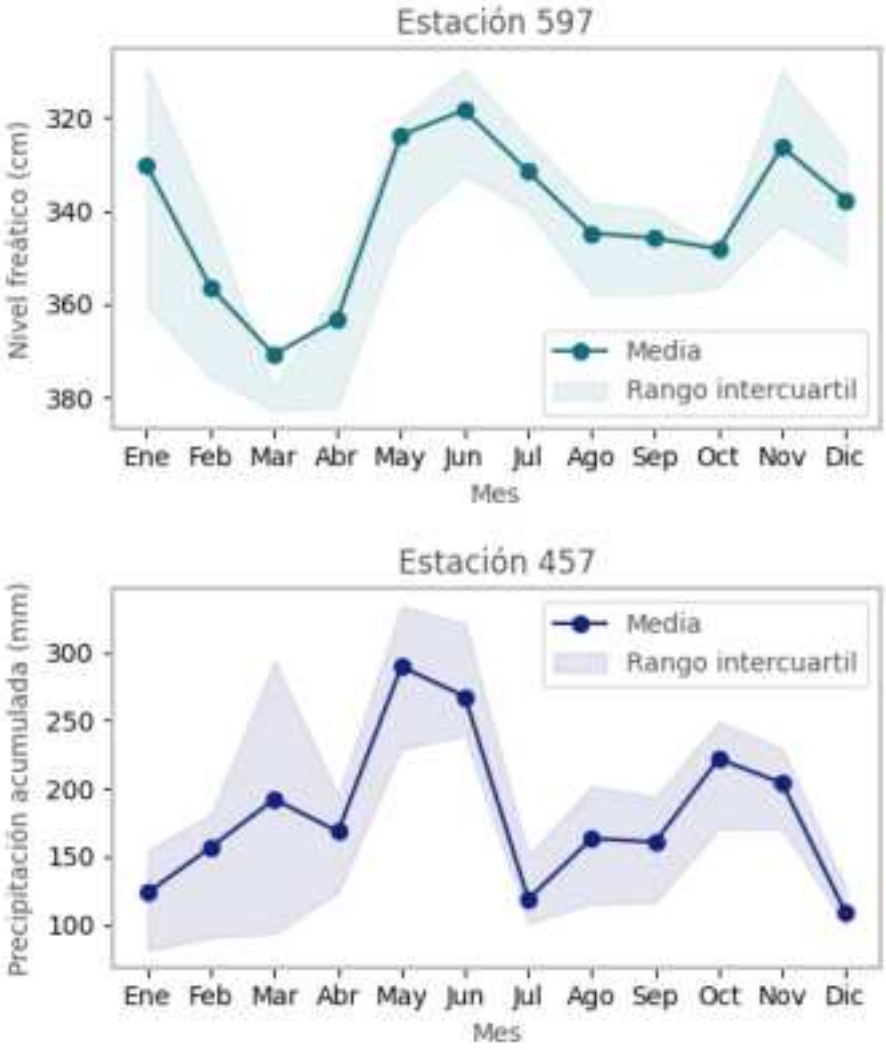


Figura 203: Ciclos anual de nivel freático (arriba) y precipitaciones (abajo) para dos estaciones de monitoreo cercanas.

Con la finalidad de explorar la relación entre ambas variables, se seleccionaron los pluviómetros ubicados en un radio de 1 Km a los piezómetros, ubicados dentro de la misma subcuenca y en la zona de recarga directa al acuífero libre del Valle de Aburrá. En ese sentido, se analizó la relación entre el nivel freático promedio y la precipitación acumulada, a escala mensual, a través de correlación de Spearman. Adicionalmente, también se implementaron correlaciones cruzadas, con rezagos entre 1 y 3 meses para la precipitación acumulada. Adicionalmente, se realizaron pruebas t para los análisis de correlación para evaluar la significancia estadística. Los coeficientes de correlación observados evidenciaron que los niveles freáticos se relacionaron de manera inversa con los acumulados de lluvia de cero a dos meses antecedentes, se resalta que para tres meses de rezago los coeficientes de correlación fueron menores a -0.45 y predominaron valores-p mayores a 0.05 (Figura 204).

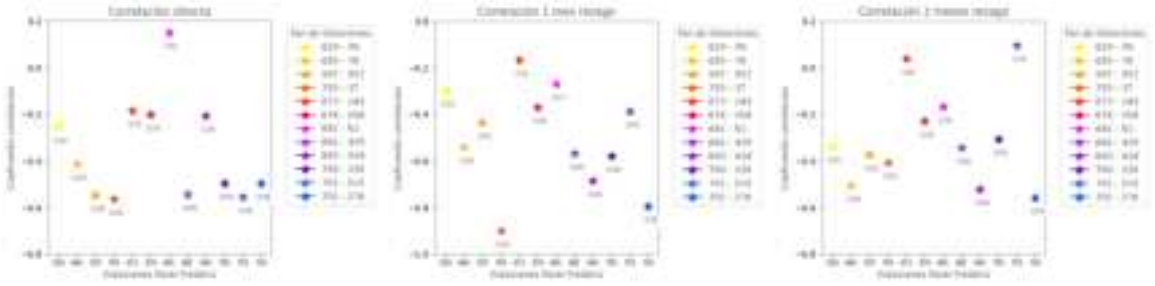


Figura 204: Correlación directa entre nivel freático y precipitación empleando rezago temporal de un mes.

Para profundizar en la relación entre la precipitación y el nivel freático, se calculó la correlación entre la precipitación acumulada para periodos de tiempo de 15, 30, 45 y 60 días y los niveles freáticos promedios diarios con rezagos de 30 días, implementando la prueba t para evaluar la significancia estadística. Los resultados evidenciaron que los coeficientes de correlación variaron para los periodos de tiempo acumulados,así como para los días de rezago considerados,lo que puede indicar que la variabilidad observada en los niveles freáticos puede vincularse con otros factores, además de la precipitación acumulada dependiendo del tamaño de la ventana de resolución usada, lo que evidencia que es un proceso con un rango de influencia de días a meses (Figura 205 y Figura 206).



Figura 205: Correlación con rezago 2 meses nivel freático y precipitación



Figura 206: Correlación con rezago 2 meses nivel freático y precipitación

WP1.2.3. (Inundaciones) Desarrollo e implementación de un piloto para cuantificar y evaluar el riesgo por inundaciones

En esta actividad se busca cuantificar las afectaciones por inundaciones (riesgo por inundaciones) para las cuencas de La Doctora y La Sabanetica, en el municipio de Sabaneta. En este piloto se define la amenaza mediante manchas de inundación para diferentes periodos de retorno, y se consideran las características de las edificaciones en la zona de inundación y su propensión al daño cuando se materializa una amenaza.

Introducción

Para llevar a cabo esta actividad se plantea la metodología que se describe a continuación y que se presenta en el esquema de la Figura (207).

- Inicialmente, se evaluaron los objetivos del WP1.2.3, enfocados en desarrollar e implementar un piloto para la cuantificación y evaluación del riesgo por inundaciones. Este piloto busca comprender el impacto de eventos extremos en la infraestructura y la población.
- Posteriormente, se revisaron artículos y metodologías existentes sobre la cuantificación del riesgo de inundación, entre los cuales destacó el estudio de la Universidad de los Andes (Yamin et al. (2013)), titulado Modelación Probabilista Para La Gestión del Riesgo de Desastre.
- Definición de criterios para elaborar inventarios de edificaciones e infraestructura expuesta a fenómenos peligrosos, analizar la exposición general, evaluar la vulnerabilidad de los distintos componentes de infraestructura y estimar el riesgo en términos de daños físicos, pérdidas económicas y efectos sobre la población. No obstante, en este estudio no se considerará la evaluación de pérdidas económicas.
- En este contexto, el riesgo se relaciona con la probabilidad de que se produzcan efectos adversos y consecuencias desfavorables en los ámbitos material, social y ambiental. Por lo tanto, su evaluación implica estimar el impacto potencial de una amenaza determinada sobre los elementos expuestos, como edificaciones, infraestructuras, población y el entorno natural.

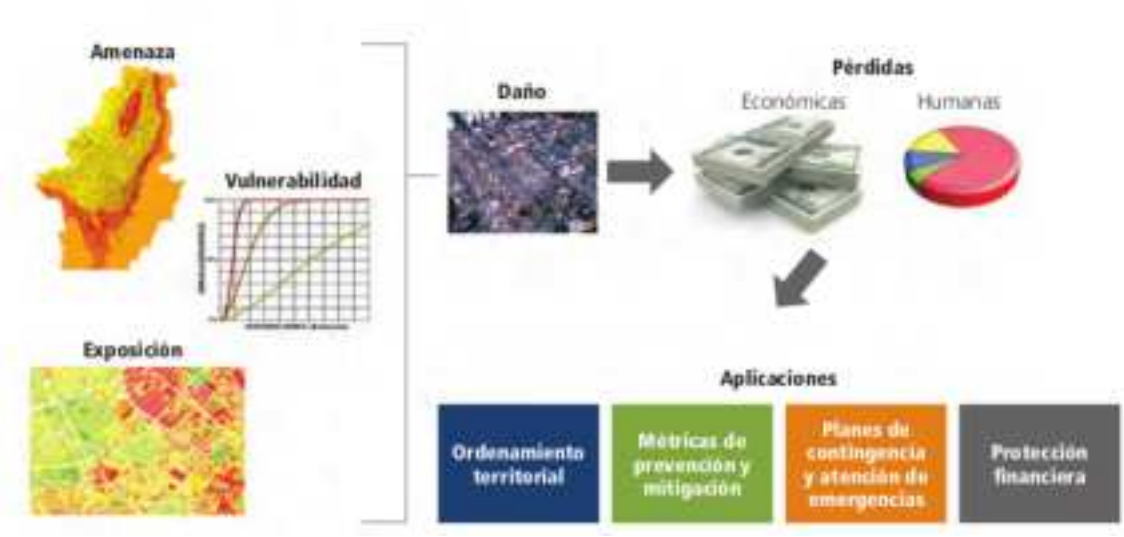


Figura 207: Esquema del proceso para la evaluación rigurosa del riesgo. Tomado de: Yamin et al. (2013)

Metodología: amenaza por inundación

Área de estudio

La elección del área de estudio fue una de las etapas más complejas, ya que requería una gran cantidad de información detallada y de difícil acceso para la evaluación del riesgo. Entre estos datos se incluye información catastral georreferenciada con detalles sobre el proceso de construcción, materiales utilizados y número de pisos. Asimismo, fue necesario recopilar datos geomorfológicos de la cuenca, imágenes obtenidas mediante sobrevuelos o satélites, y el modelo digital de elevación del tramo analizado.

Con base en lo anterior, se seleccionó como área de estudio la confluencia de las quebradas La Doctora y Sabanetica, en el municipio de Sabaneta. Como puntos de referencia se tomaron las estaciones 109 (Q. La Doctora) y 406 (Q. La Sabanetica - Plebiscito), debido a su disponibilidad de registros históricos del sensor de nivel y la información geomorfológica existente (Figura 208).



Figura 208: Localización de la zona de estudio en el municipio de Sabaneta, cuencas de las quebradas La Doctora y La Sabanetica.

Modelación hidráulica

Una vez determinado el área de estudio, se inició la modelación hidráulica empleando el software libre Iber2D. Con la simulación se obtienen valores de profundidad y velicidad, es decir se cuantifica la amenaza por inundación. El software IBER 2D requiere como insumos un modelo digital de elevación (DEM) del área de interés y datos de caudales para distintos escenarios. Para obtener estos caudales, se llevó a cabo un estudio hidrológico basado en la metodología de curvas IDF y datos de estaciones pluviométricas de EPM.

El DEM, suministrado por el AMVA con una resolución espacial de 2 metros por píxel, fue ajustado para resaltar las edificaciones y mejorar la definición del canal de los afluentes. Esto permitió corregir estrechamientos inexactos originados por errores en el modelo digital de elevación original.

Posteriormente, se siguieron los parámetros del estudio "*Modelación Probabilista Para la Gestión del Riesgo de Desastres*"de la Universidad de los Andes para la definición de la amenaza por inundación. Dicho estudio establece los niveles de amenaza alta, media y baja con base en la modelación hidrológica para periodos de retorno de 10 y 100 años (Tabla 21). Como resultado, se obtuvo el mapa de amenaza para la confluencia de las quebradas Sabanetica y La Doctora (Figura 209), el cual se delimitó utilizando el área de inundación correspondiente a un periodo de retorno de 250 años.

Tabla 21: Parámetros para la determinación de las zonas de amenaza de inundación. Tomado de Yamin et al. (2013).

Nivel de amenaza	Periodo de retorno	Efectos	Prob. de ocurrencia
Alta	<= 10 años	Graves	>= 0.10
Media	10 - 100 años	Moderados	0.01 - 0.10
Baja	>= 100 años	Leves	<= 0.01

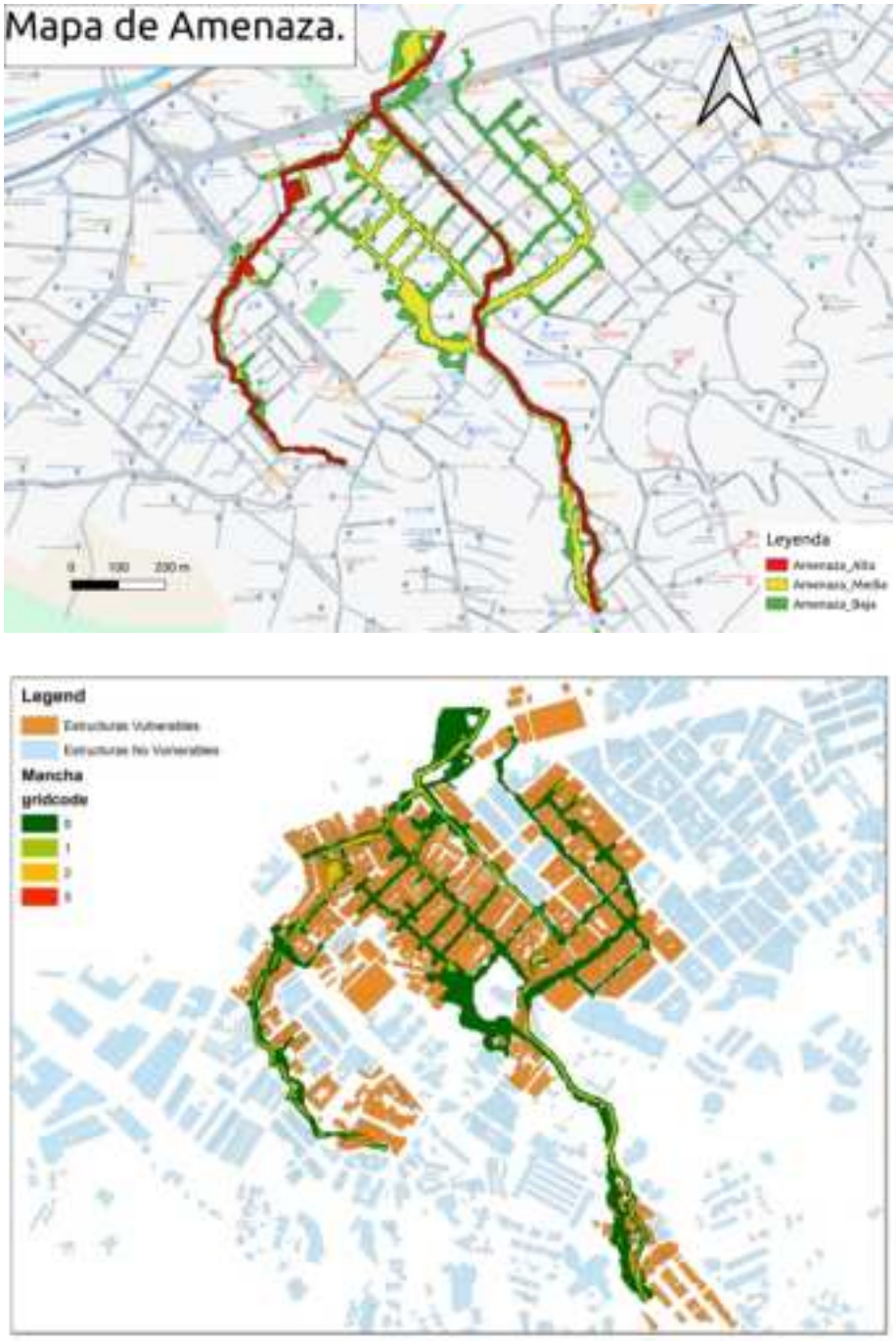


Figura 209: Mapas de amenaza y exposición obtenidos en la zona de estudio

Exposición y vulnerabilidad por inundación

Para la exposición, se empleó la base de datos catastral del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) de 2016, mientras que la espacialización de las infraestructuras se obtuvo del Portal Geográfico Metropolitano del AMVA.

Para definir la vulnerabilidad de la infraestructura ante eventos de creciente, se emplearon las curvas propuestas en la base de datos del CAPRA `https://ecapra.org/topics/ern-vulnerability`, en las cuales se definen porcentajes de daño en la estructura asociadas a distintas magnitudes de nivel de agua.

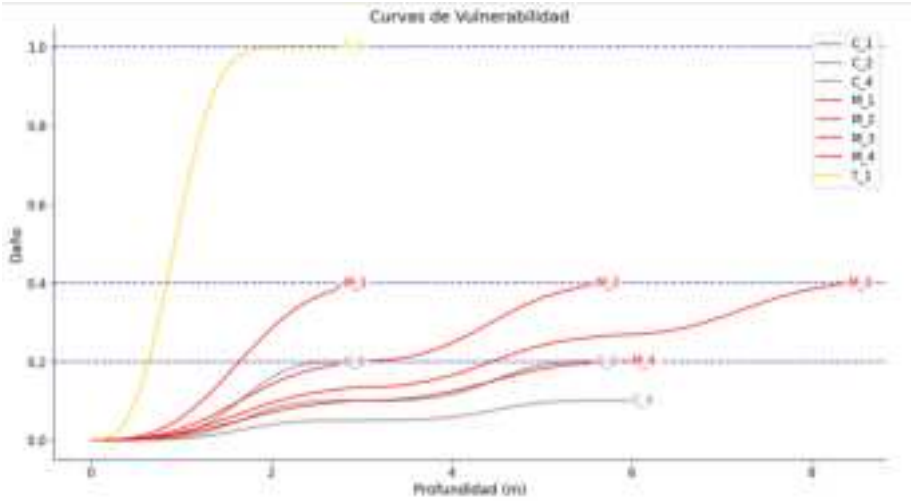


Figura 210: Curvas de Vulnerabilidad - CAPRA (Fuente propia con datos obtenidos de la base de datos CAPRA)

Resultados

En las primeras evaluaciones, se superpusieron las tres áreas de inundación simuladas para tiempos de retorno de 10, 100 y 250 años con las estructuras de la base de datos catastral. Esto permitió identificar las edificaciones susceptibles a ser afectadas, obteniendo como resultado la cantidad de infraestructuras impactadas por cada escenario evaluado, como se muestra en la Figura 211.

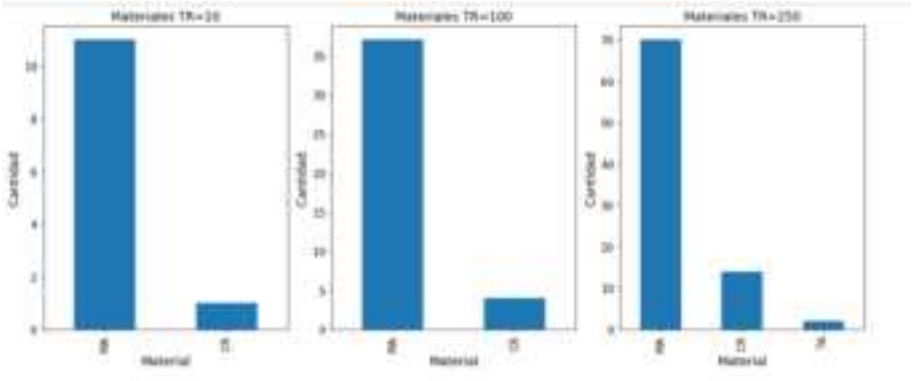


Figura 211: Cantidad de infraestructuras afectadas

Además, se georreferenciaron las estructuras en riesgo para cada uno de los periodos de retorno modelados, como se muestra en la Figura 212.

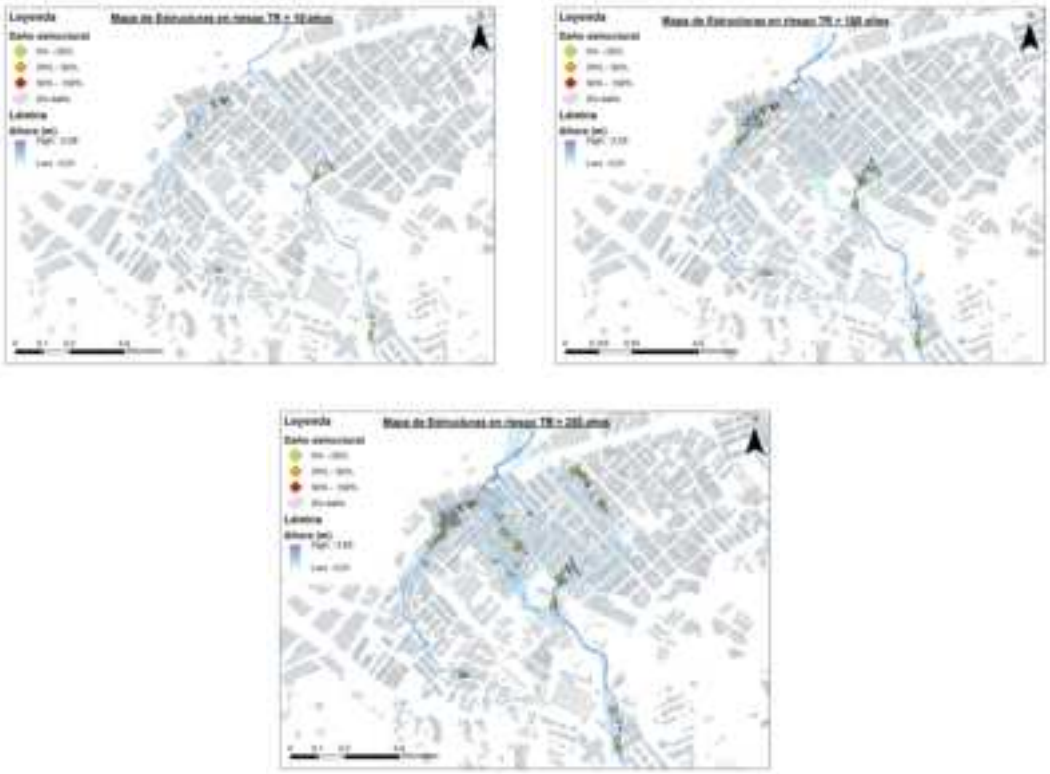


Figura 212: Infraestructuras en riesgo según el área de inundación modelada.

Además, se llevó a cabo un análisis de riesgo por inundación para personas y vehículos, basado en los estudios experimentales de Martínez-Gomariz et al. (2016) y Martínez-Gomariz et al. (2019). Estos estudios establecen una relación crítica entre la altura de la lámina de agua y la velocidad del flujo, factores clave para la estabilidad. Según sus hallazgos, el umbral de estabilidad para las personas se define cuando el producto de velocidad y altura (VH) es menor a 0.22, mientras que para los vehículos, el valor crítico es VH menor a 0.67.

Con base en estos criterios, se evaluó el riesgo en el municipio de Sabaneta a partir de tres escenarios de modelación (ver Figuras 213, 214 y 215). En cada tiempo de retorno, la imagen de la izquierda representa en azul las zonas seguras para las personas, mientras que las áreas inestables se destacan en rojo. De manera análoga, la imagen de la derecha muestra las zonas seguras e inestables para los vehículos siguiendo el mismo esquema de colores.

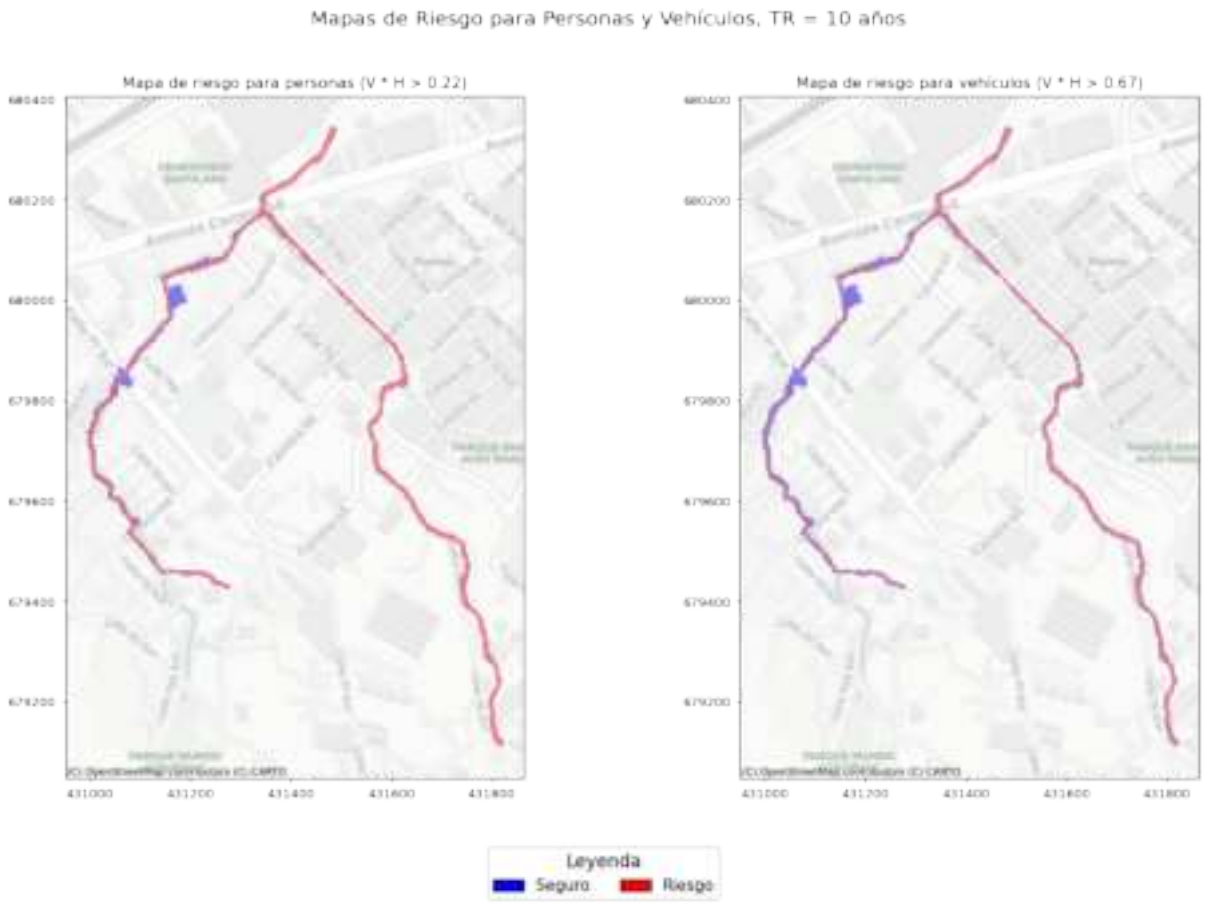


Figura 213: Área de inundación para tiempo de retorno (TR) de 10 años.

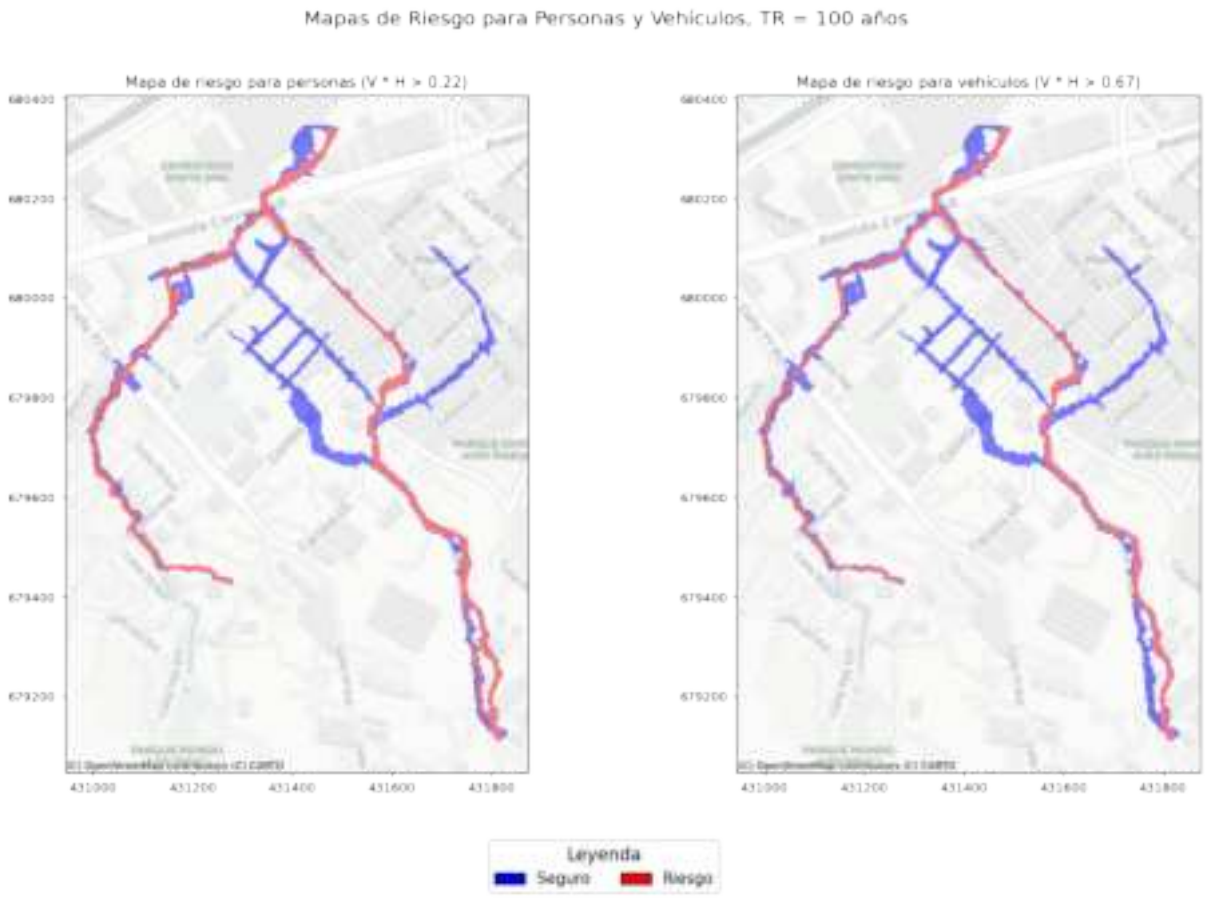


Figura 214: Área de inundación para tiempo de retorno (TR) de 100 años.

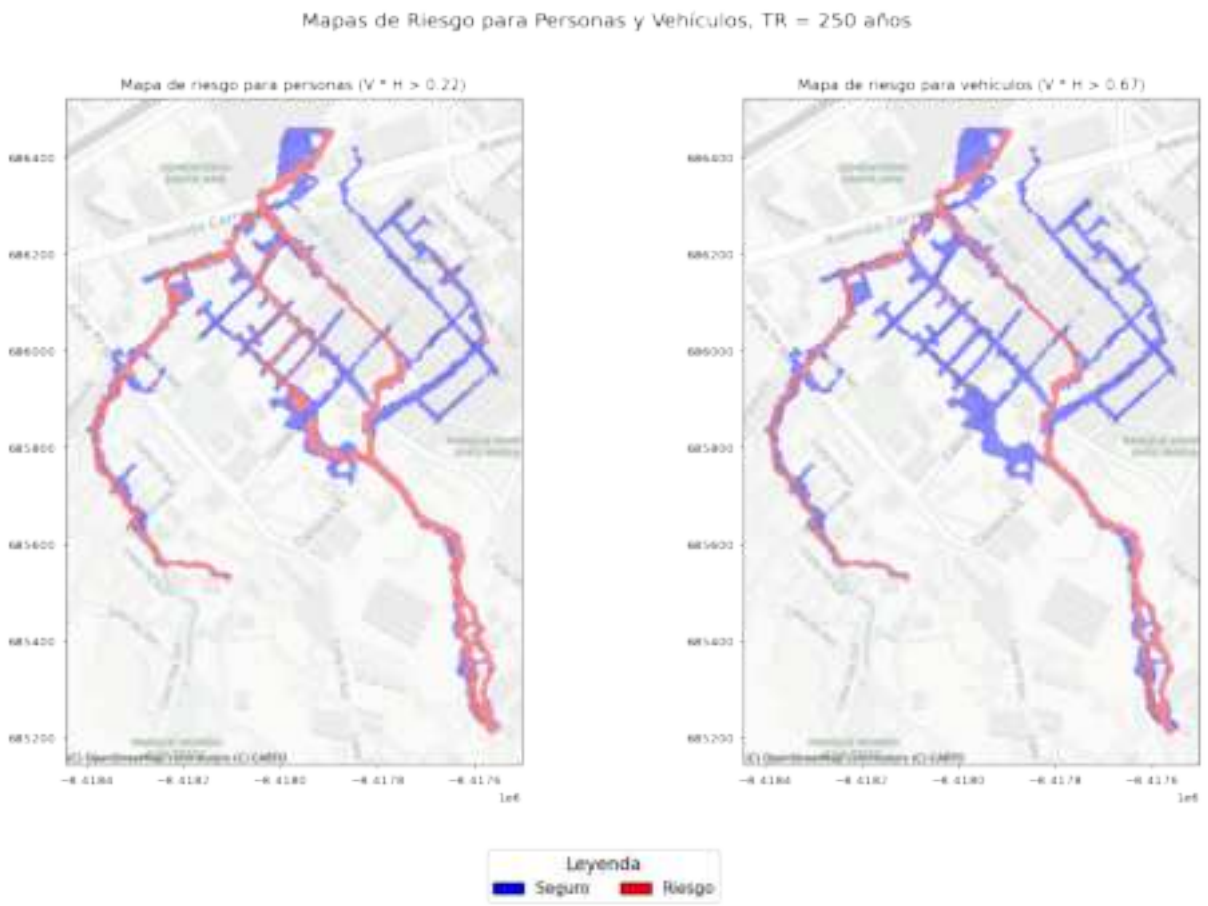


Figura 215: Área de inundación para tiempo de retorno (TR) de 250 años.

WP1.2.4. (Sequías, Mov. Masa) Monitoreo y evaluación de movimientos en masa y cambios en el paisaje, con herramientas de teledetección

Durante el presente contrato se implementó una metodología integral para la automatización del monitoreo y detección de movimientos en masa, combinando tecnologías satelitales de radar (InSAR) y ópticas multiespectrales. Esta estrategia permitió avanzar en la identificación temprana de zonas inestables, aportando a la vigilancia en el territorio.

La versión completa de esta investigación, que incluye el detalle metodológico, resultados intermedios, mapas de deformación y análisis complementarios, se presenta como anexo al presente informe y puede ser consultado en el enlace: Anexo WP1.2.4

Principales logros y resultados

- Se aplicó la técnica *SBAS-InSAR* (Small Baseline Subset) sobre datos de Sentinel-1 para construir series temporales de desplazamiento y generar mapas de deformación del terreno.
- Se automatizó el flujo de descarga y procesamiento de datos interferométricos mediante la plataforma *HyP3*, integrando correcciones atmosféricas y topográficas con el software *MintPy*.
- Se identificaron 22 zonas con anomalías de desplazamiento, de las cuales:
  - 10 fueron validadas como movimientos en masa activos o potenciales mediante visitas de campo, imágenes ópticas de alta resolución y datos de instrumentación geotécnica.
  - 3 zonas adicionales estuvieron asociadas a actividades de minería a cielo abierto.
- Se fortaleció el análisis multiespectral con imágenes Sentinel-2, implementando un enfoque basado en índices espectrales (NDVI, BSI) para detectar cambios de cobertura vegetal compatibles con remociones en masa.
- Se desarrollaron herramientas de clasificación periódica y detección multipunto automatizada, útiles para la priorización de zonas críticas.

Productos desarrollados y herramientas disponibles

- **Código para clasificación de coberturas vegetales con imágenes Planet (3m)**: Modelo basado en *Machine Learning*, entrenado para el área de Medellín, permite la generación de mapas de coberturas con alta resolución.
- **Herramienta para seguimiento de puntos críticos con índices espectrales (Sentinel-2)**: Permite seleccionar zonas específicas vía *GeoJSON*, calcular indicadores como NDVI y BSI, y visualizar variaciones temporales y espaciales por clústeres.
- **Análisis regional InSAR del Valle de Aburrá**: Cobertura regional del valle con mapas de desplazamientos y deformaciones detectadas con imágenes SAR de Sentinel-1.
- **Metodología automatizada para solicitud de datos SAR con HyP3**: Código funcional para agilizar la adquisición de productos interferométricos desde plataformas abiertas, habilitando su uso en análisis InSAR posteriores.



WP1.2.5. (Av. Torrenciales) Evaluación de metodologías y modelos para el análisis de avenidas torrenciales

Esta actividad aporta a la cuantificación de la amenaza por avenidas torrenciales (amenaza hidrológica), insumo que puede usarse junto con modelos de exposición y vulnerabilidad para la cuantificación del riesgo por estos eventos. en particular, en este estudio se estableció una metodología base para la identificación y evaluación del riesgo por avenidas torrenciales en el Valle de Aburrá, combinando análisis regionales con modelación detallada en cuencas prioritarias.

La versión ampliada de esta investigación, que incluye mapas de simulación, criterios de clasificación y resultados por subcuenca, se presenta como anexo al presente informe y puede ser consultado en el enlace: Anexo WP1.2.5

Principales logros y resultados

Mediante el uso de índices morfométricos (como el Índice de Melton y la Relación de Relieve), se clasificaron más del 95 % de las cuencas del Valle de Aburrá como susceptibles a flujos torrenciales. Esta información permite priorizar intervenciones en un contexto territorial, optimizando recursos.

La implementación del modelo *Flow-R* en dos (2) casos de estudio —quebradas La Manguala (Distrito de Medellín) y El Chocho (Municipio de Barbosa)— permitió simular trayectorias probables de flujos y estimar el impacto potencial sobre edificaciones existentes. En La Manguala se identificaron 647 construcciones en riesgo, mientras que en El Chocho se encontraron tres (3) edificaciones que podrían ser afectadas, validando la aplicabilidad del enfoque para la gestión urbana y la planificación del uso del suelo.

Adicionalmente, se desarrolló una caracterización detallada de la cuenca La Despensa, integrando parámetros geomorfológicos, disponibilidad de sedimentos y cobertura del suelo, con apoyo de técnicas avanzadas de clasificación mediante aprendizaje automático. Los resultados permiten definir zonas críticas y fortalecer la base técnica para futuras modelaciones hidrodinámicas.

Este trabajo ofrece insumos estratégicos para:

- Priorización de cuencas y focalización de recursos.
- Identificación de infraestructura crítica expuesta.
- Planificación territorial con enfoque en reducción del riesgo.
- Desarrollo futuro de Sistemas de Alerta Temprana.

La metodología es escalable, replicable y representa una oportunidad para decisiones relacionadas con la protección de vidas, infraestructura y territorio.

Productos desarrollados y herramientas disponibles

- **Análisis de susceptibilidad por avenidas torrenciales**: Caracterización de la susceptibilidad asociada a diferentes categorías de avenidas torrenciales para las subcuencas del Valle de Aburrá.

- **Análisis basado en impacto de avenidas torrenciales**: Análisis de las afectaciones potenciales que pueden ocurrir si se presenta una avenida torrencial, integrando modelos de tránsito y exposición de infraestructura.



WP1.2.6. (Av. Torrenciales, Mov. Masa, Sismos) Implementación de metodologías para la caracterización del ruido sísmico

Esta actividad busca correlacionar señales detectadas por equipos de la red sismológica con fenómenos como microsismicidad, movimientos en masa, avenidas torrenciales y/o actividad antrópica. Esta subactividad, de caracter investigativo, comprende la base inicial para el desarrollo e implementación de monitoreo en campo con sensores sísmicos para la caracterización y monitoreo de avenidas torrenciales en el futuro.

En el Anexo WP1.2.6 se presenta de manera detallada los resultados y desarrollo de las actividades de este paquete de trabajo.

Este paquete de trabajo, de caracter investigativo, comprende la base inicial para el desarrollo e implementación de monitoreo en campo con sensores sísmicos para la caracterización y monitoreo de avenidas torrenciales. A continuación, se resumen los resultados y descubrimientos más relevantes.

- Se evaluaron señales sísmicas generadas por fenómenos morfodinámicos como movimientos en masa y avenidas torrenciales ocurridos entre 2021 y 2023 dentro del valle de Aburrá, utilizando datos de microsismicidad registrados por la red sismológica del proyecto SIATA, con el objetivo de plantear una metodología preliminar para la identificación, análisis y caracterización de patrones sismológicos no convencionales que permitan la integración hacia sistemas de alerta temprana con la detección oportuna de eventos morfodinámicos y el entendimiento de su amenaza para el territorio.
- La implementación de esta metodología permitió detectar señales coincidentes en tiempo y espacio respecto a eventos morfodinámicos. Estos eventos fueron extraídos de dos bases de datos: la base de datos de llamados al 123 por movimientos en masa del Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres en Medellín (DAGRD), con datos hasta 2023, y el inventario de avenidas torrenciales del Semillero Geohazards de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín (`https://geohazards.com.co/visor-geohazard.html`). La mayor limitación encontrada en las bases de datos fue la alta imprecisión de los tiempos asociados a la ruptura o detonación de los fenómenos de interés y el bajo número de sensores remotos dentro de las áreas de influencia estudiadas.
- Con el fin de aprovechar información de eventos de interés recientes y con tiempos de ocurrencia más precisos, es importante que reportes obtenidos desde otros frentes, como los del equipo de Geotecnia, en su activa labor de apoyo a emergencias asociadas a movimientos en masa y avenidas torrenciales, complemente un ejercicio piloto de instrumentación sísmica robusta.
- Para el análisis de los eventos de interés,se descartó la implementación de algoritmos de detección para señales sísmicas (como STA/LTA). Se evidenció que un análisis en el dominio de la frecuencia es más adecuado por la naturaleza del fenómeno.
- En particular, se identificaron limitaciones que demuestran la necesidad de replantear logísticamente el enfoque de esta investigación, como la necesidad de conocer con mayor exactitud los tiempos de ocurrencia de los fenómenos morfodinámicos y contar con una mayor cantidad de sensores para evaluar la evolución de los fenómenos de interés en el tiempo.

WP1.2.7. (Mov. Masa) Evaluación de umbrales de lluvia como detonantes de movimientos en masa

Mediante el uso de información histórica de lluvia de alta resolución, se pretende definir niveles de acumulación de precipitación que están asociados a la ocurrencia de movimientos en masa en la región metropolitana. El trabajo desarrollado durante la vigencia se enfocó en la evaluación de umbrales críticos de lluvia como desencadenantes de movimientos en masa en el Valle de Aburrá. Esta investigación responde a la necesidad del territorio de fortalecer los sistemas de alerta temprana a nivel regional para reducir la amenaza por movimientos en masa.

La versión completa de esta investigación que incluye análisis técnicos detallados, resultados por zonas, curvas de umbrales y criterios de validación, se presenta como anexo al presente informe y puede ser consultado en el enlace: Anexo WP1.2.7

Principales logros y resultados

- **Identificación y evaluación de umbrales críticos de lluvia**: Se definieron umbrales basados en lluvias antecedentes de corto y largo plazo, con una precisión mayor al 80 % en la detección de eventos críticos. Las combinaciones 1 día vs. 90 días y 7 días vs. 90 días se adoptaron para operación en tiempo real por su alta capacidad predictiva y fácil monitoreo.
- **Análisis de percentiles**: El análisis de percentiles sobre la serie histórica de la red pluviométrica permitió clasificar la lluvia antecedente en baja, media y alta. Los acumulados de 2 y 20 días se identificaron como óptimos para anticipar eventos críticos, incrementando la fiabilidad de las alertas.
- **Base de datos de movimientos en masa**: Se implementó una base en *PostgreSQL* que consolida los registros históricos de deslizamientos con su localización espacio-temporal, insumo clave para la calibración continua de los umbrales y otros estudios.
- **Análisis radar meteorológico**: La información de radar, combinada con el inventario de deslizamientos, reveló patrones espaciales de precipitación y permitió derivar umbrales únicamente a partir del radar; no obstante, su desempeño aún no es suficiente para uso operativo.
- **Análisis de interpolación**: Se compararon diferentes técnicas de interpolación para fusionar la lluvia de la red de pluviómetros con la del radar, con el fin de espacializar los umbrales en todo el valle. Kriging Simple con Medias Locales ofreció los mejores resultados y se generó un mapa de precipitación acumulada con incertidumbre aceptable.

Se establecieron umbrales críticos de precipitación basados en lluvia antecedente de corto y largo plazo y, gracias a la fusión de datos de pluviómetros y radar, se construyó un mapa espacial de acumulados antecedentes válido para todo el Valle de Aburrá. Este mapa permite evaluar los umbrales de forma integral e identificar zonas críticas, acercando la implementación de un sistema de alerta que ayude a los tomadores de decisión a priorizar medidas de mitigación y protección.

Productos desarrollados y herramientas disponibles

- **Definición umbrales de lluvia Reciente–Antecedente**: Análisis y definición de umbrales de lluvia para movimientos en masa mediante modelos estadísticos basados en lluvia antecedente de

corto y largo plazo.

- **Análisis de percentiles de lluvia que puede detonar movimientos en masa**: Evaluación de percentiles históricos de la red pluviométrica y su contraste con inventario de movimientos en masa; clusterización por zonas y definición de percentiles críticos por duración de lluvia antecedente.
- **Base de datos inventario de movimientos en masa**: Implementación de base *PostgreSQL* para almacenar registros geo-temporales de deslizamientos, alimentada con reportes de entidades de gestión del riesgo y trabajo de campo.
- **Análisis de lluvia de Radar y movimientos en masa**:Identificación de patrones espaciales de precipitación radar y su relación con deslizamientos; definición de umbrales de lluvia basados únicamente en radar.
- **Análisis metodologías de interpolación de mapas de lluvia a partir de Pluviómetros y Radar**: Evaluación comparativa de técnicas de interpolación para fusionar datos de pluviómetros y radar y generar mapas de lluvia.
- **Histórico archivos horarios del Radar Meteorológico**: Código para calcular la lluvia acumulada horaria del radar meteorológico para el Valle de Aburrá en coordenadas cartesianas.
- **Modelo de Alertas**: Código automatizado que calcula la probabilidad de deslizamientos por lluvia crítica usando acumulados de radar y pluviómetros; genera mapas, gráficas y tablas de resumen.

WP1.2.8. (Mov. Masa, Incendios) Evaluación de umbrales de humedad en el terreno como detonantes de eventos

Esta investigación logró caracterizar de manera integral la dinámica de la humedad del suelo en el Valle de Aburrá, articulando información proveniente de sensores instalados en campo y productos satelitales. Este esfuerzo buscó fortalecer la comprensión del papel que desempeña la humedad en la ocurrencia de movimientos en masa, especialmente como condición antecedente crítica.

La versión ampliada de esta investigación, que incluye el desarrollo metodológico, análisis detallado y productos generados, se presenta como anexo al presente informe y puede ser consultado en el enlace: Anexo WP1.2.8

Principales logros y resultados

- Se diseñó una metodología generalizada para el tratamiento de las series temporales de humedad medidas por los sensores de la red SIATA. Esta incluyó filtrado físico y estadístico, imputación de datos faltantes y transformación a unidades de porcentaje de saturación, lo que permite comparar sitios con características distintas.
- A través de análisis frecuenciales se evidenció una marcada estacionalidad y se destacó la influencia directa de factores climáticos y de las condiciones locales del suelo sobre los niveles de humedad observados.
- Se validaron y compararon diferentes estrategias de espacialización de la humedad del suelo, resaltando el uso del satélite SMAP como fuente de información casi diaria. Mediante técnicas de *smart downscaling*, se mejoró su resolución espacial a 1 kilómetro, logrando una buena correspondencia con los datos de sensores en superficie.
- El análisis de más de 1.300 eventos históricos de movimientos en masa mostró que el 94 % estuvieron precedidos por lluvias fuertes o muy fuertes y niveles de saturación del suelo superiores al 50 %. Este resultado refuerza la importancia de esta variable como insumo para sistemas de alerta.
- A partir de estos hallazgos se desarrolló un modelo bayesiano bivariado que estima la probabilidad de ocurrencia de deslizamientos, integrando la información de humedad del suelo y características de la lluvia (como intensidad y acumulados).
- Como productos derivados de esta actividad se generaron: mapas espaciales de humedad del suelo, series temporales clasificadas por percentiles y bases de datos que relacionan eventos de precipitación (de leves a intensos) con niveles de saturación del suelo.

Estos resultados constituyen un aporte clave para el fortalecimiento de la vigilancia, la modelación y la toma de decisiones en la gestión del riesgo por movimientos en masa. La versión ampliada de esta investigación, que incluye el desarrollo metodológico, análisis detallado y productos generados, se presenta como anexo al presente informe.

WP1.2.9. (Mov. Masa, Sismos) Modelación de la estabilidad de laderas

Esta actividad combinó trabajo en campo, análisis estadístico y modelación física para mejorar el entendimiento de los deslizamientos superficiales en el territorio. A continuación, se destacan los principales avances:

La versión ampliada de esta investigación y los resultados específicos, se presenta como anexo al presente informe y puede ser consultado en el enlace: Anexo WP1.2.9

Principales logros y resultados

- **Implementación del modelo SHALSTAB**, una herramienta utilizada para analizar la estabilidad del terreno ante lluvias intensas. Este modelo se aplicó de manera exploratoria en dos niveles: por píxel (muy detallado) y por unidades de ladera (agrupando zonas con características similares).
- **Construcción de unidades geotécnicas homogéneas**, integrando resultados de laboratorio y análisis estadístico, lo cual permitió:
  - Eliminar valores atípicos que podrían distorsionar los resultados.
  - Definir zonas con propiedades del suelo más consistentes.
  - Generar modelos físicos más confiables y reducir la incertidumbre, un reto histórico en este tipo de análisis.
- **Evaluación de estabilidad del terreno**, clasificando las zonas como estables, inestables o en condiciones límite, y calculando cuánta lluvia sería necesaria para que ocurran deslizamientos.
- **Incorporación de escenarios probabilísticos**, considerando la variabilidad natural de los suelos. Se generaron más de 120 escenarios para representar posibles condiciones futuras, y se construyeron mapas que muestran la probabilidad de falla por zonas.
- **Uso de inteligencia artificial**, mediante un modelo de clasificación que logró más del 90 % de precisión en la identificación de zonas susceptibles, utilizando variables relacionadas con la forma del terreno y su ubicación.

WP1.2.10. (Mov. Masa, Sismos) Actualización y/o generación de insumos para el cálculo del riesgo sísmico

Para la evaluación del riesgo sísmico (cuantificación de las afectaciones por sismos) se requieren modelos de amenaza (intensidades generadas por los sismos), exposición (descripción de la infraestructura) y vulnerabilidad (propensión al daño de los elementos expuestos). En esta actividad se recopila y analiza información que permite actualizar y/o generar los insumos necesarios para la evaluación del riesgo sísmico. El conocimiento de la amenaza sísmica, además, es un insumo necesario para el análisis de movimientos en masa detonados por sismos.

En el Anexo WP1.2.10 se presenta de manera detallada los resultados y desarrollo de las actividades de este paquete de trabajo.

Este paquete de trabajo, de manera permanente presentó la información más relevante obtenida del monitoreo sísmico del proyecto SIATA en sus redes de campo (acelerógrafos y sismógrafos). Esta información correspondió a la caracterización de la amenaza sísmica, que es una de la componentes fundamentales para el cálculo de riesgo sísmico: en su conjunción con la exposición (personas, edificaciones, infraestructura) y la vulnerabilidad (la propensión al daño de los elementos expuestos). En la Figura 216 se presenta la distribución de eventos sísmicos que desde el 8 de febrero de 2024 y el 8 de julio de 2025 fueron registrados por la red acelerográfica del valle de Aburrá (RAVA).

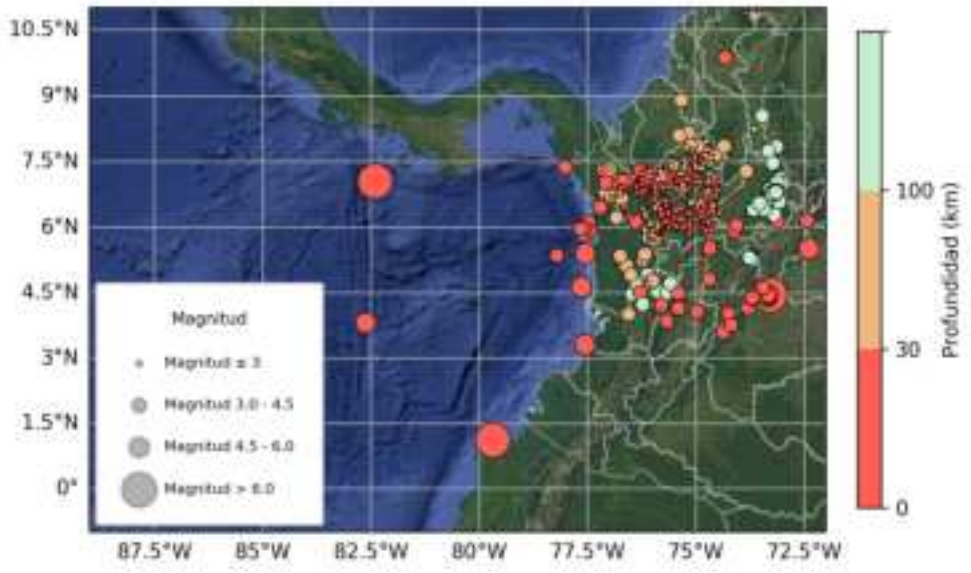


Figura 216: Eventos sísmicos registrados por la red acelerográfica del valle de Aburrá (RAVA) desde el 8 de febrero de 2024 y el 8 de julio de 2025.

A continuación, se listan algunos datos relevantes de este periodo de monitoreo sísmico:

- Entre el 8 de febrero de 2024 y el 8 de julio de 2025 se registraron 519 eventos sísmicos en la red acelerográfica del valle de Aburrá (RAVA).

- De los 519 eventos sísmicos registrados, el 90 % de estos fueron de magnitudes iguales o menores a 4.2.
- De los 519 eventos sísmicos registrados, 137 tuvieron magnitudes entre 0 y 1.9, 295 presentaron magnitudes entre 2.0 y 3.9, 84 eventos tuvieron magnitudes entre 4.0 y 6.0, y 3 con magnitudes mayores a 6. En la Figura 217 se presenta la distribución espacial de los eventos mostrados en la Figura 216.

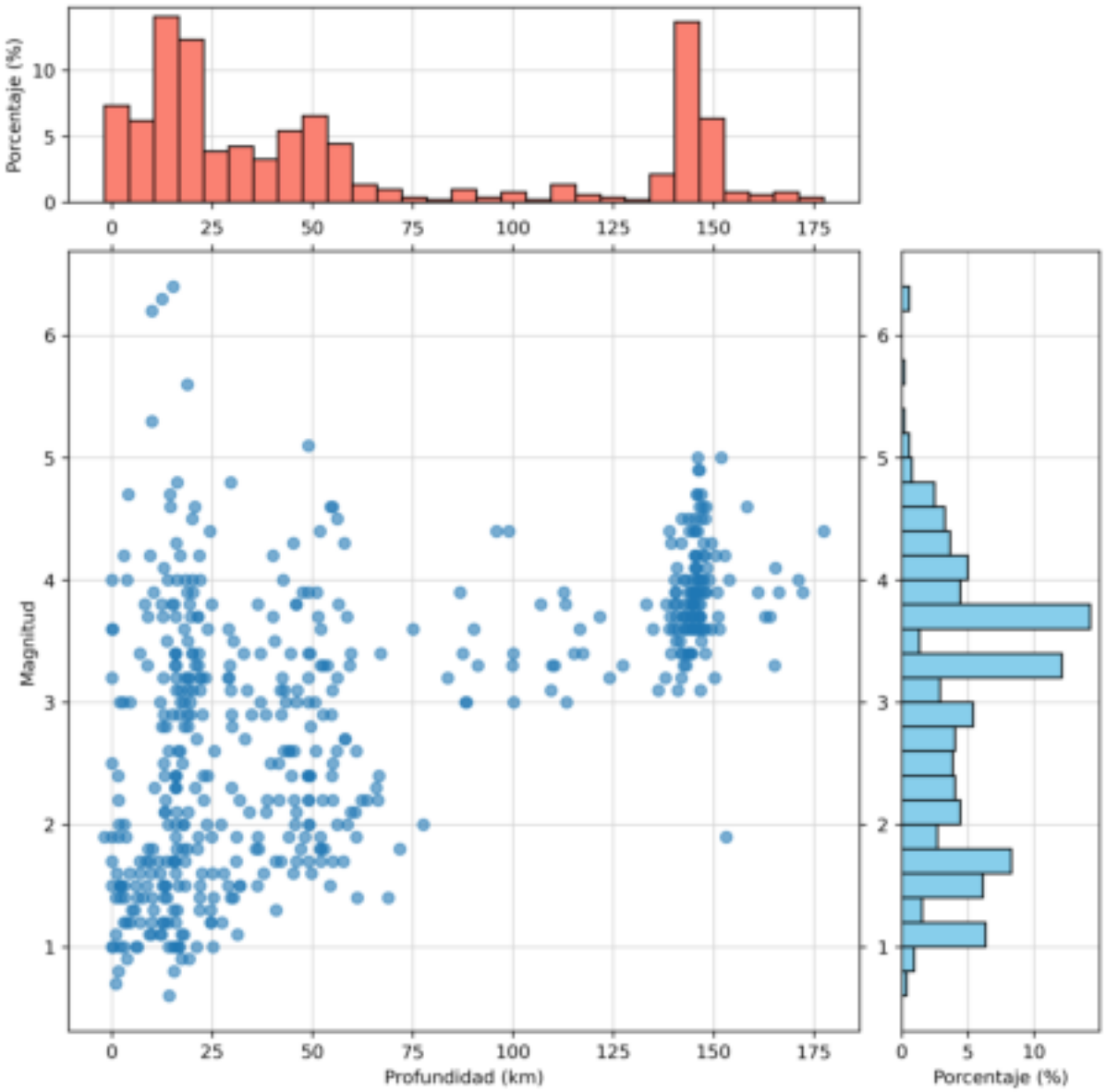


Figura 217: Distribución de magnitudes (superior) y profundidades (derecha) de eventos sísmicos registrados por la red acelerográfica del valle de Aburrá.

- De los 519 eventos sísmicos registrados, el 50 % de estos fueron de profundidades iguales o menores a

39 km. El valor promedio de profundidad fue de 60 km. En la Figura 217 se presenta la distribución de profundidades de los eventos mostrados en la Figura 216.

- La mayor aceleración registrada por la red de acelerógrafos fue de 65.9 cm/s^2 en la estación BEL (Bello - Antioquia) generada por el evento del 28 de febrero de 2024 a las 07:05:13 UTC originado en Bello (Antioquia) con magnitud Mw 4.0. Este sismo superó los máximos históricos de aceleración en casi todas las estaciones de la red y se realizó reporte para redes sociales sobre el mismo (ver Figura 218). El rango de aceleraciones fue de 0.07 a 65.9 cm/s^2, con un valor promedio de 0.66 cm/s^2 y una mediana (cuantil 50 %) de 0.12 cm/s^2.

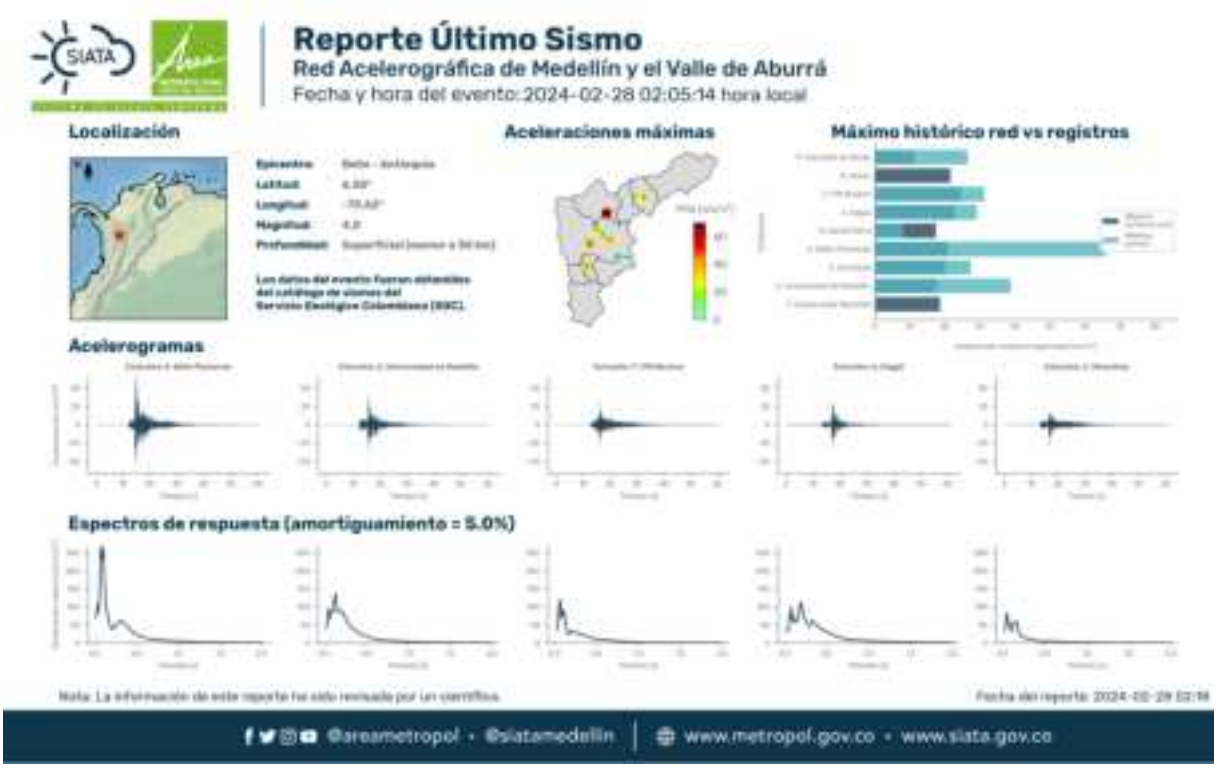


Figura 218: Reporte de último sismo generado para el evento ocurrido el 28 de febrero de 2024 a las 07:05:13 UTC originado en Bello (Antioquia) con magnitud Mw 4.0.

- En promedio, se registraron 30 sismos por mes, con un valor mínimo de 18 y un máximo de 37. Semanalmente, en promedio ocurrieron 7 sismos.
- En términos de los reportes de "Último sismo", de manera automática se generaron 262 reportes (como el mostrado en la Figura 218). No obstante, la mayoría no fueron compartidos considerando su baja o nula percepción del público del valle de Aburrá.
- De 515 eventos sísmicos registrados hasta el cierre del mes de junio de 2025, 445 eventos fueron percibidos por la red de sismógrafos del valle de Aburrá. La mayor velocidad registrada por estos sensores fue de 1.84 m/s, en la estación GIR (Girardota - Antioquia) generada por el evento del 24 de diciembre de 2024 a las 20:33:33 UTC originado en Maceo (Antioquia) con magnitud 4.6. Dicho sismo corresponde al evento con la segunda mayor aceleración registrada por la RAVA para esta vigencia (23.7 cm/s^2).

- Solo 11 eventos sísmicos presentaron aceleraciones por encima de 5 cm/s^2, el 98 % de los registros se ubican por debajo de este valor. En la Figura 219 se presenta la relación distancia-aceleración máxima para estos eventos. En la Figura 220 se muestra la relación distancia-magnitud para todos los 515 eventos registrados en este periodo.

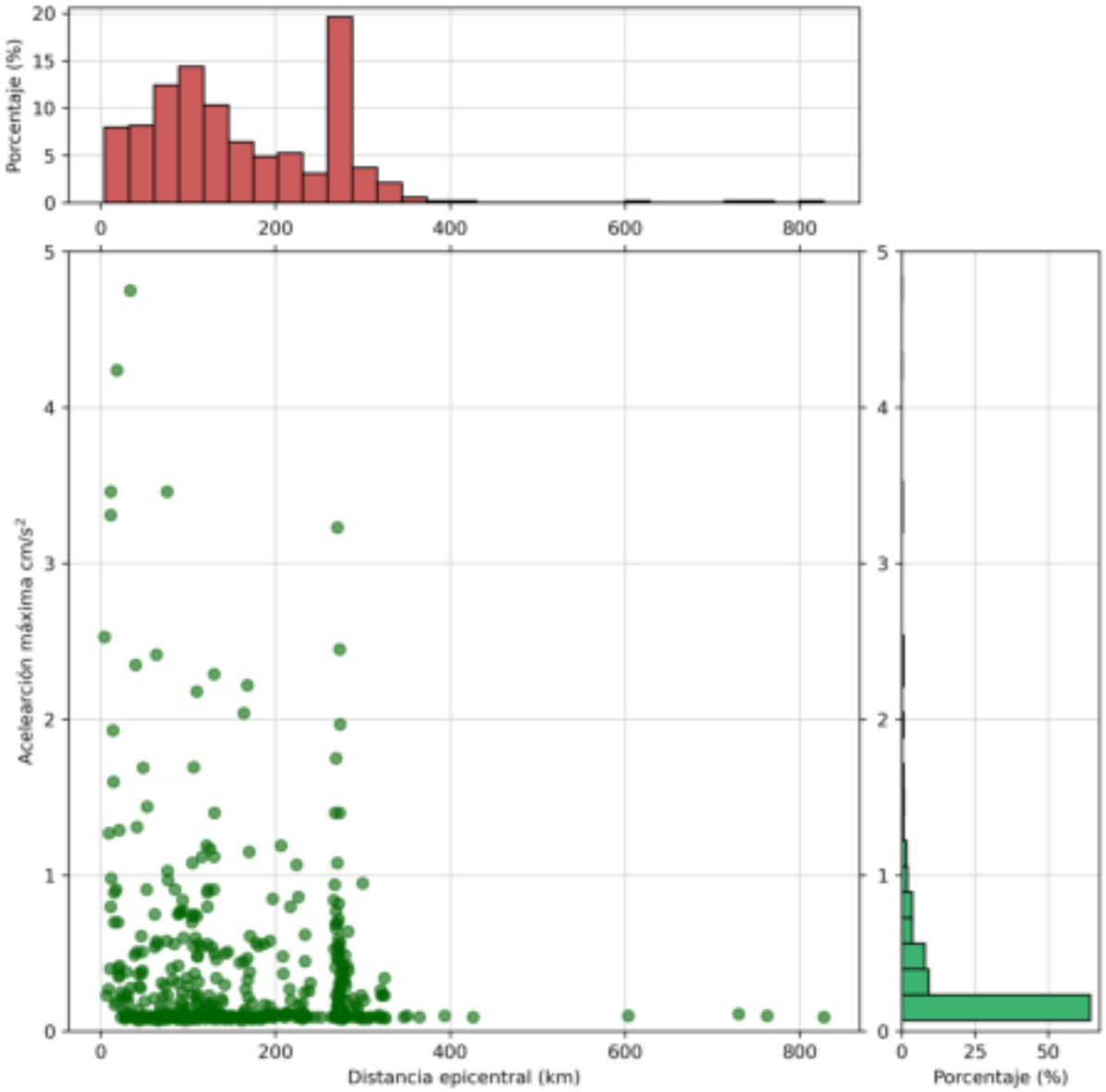


Figura 219: Distribución de distancias epicentrales (superior) y aceleraciones menores o iguales a 5 cm/s^2 (derecha) de eventos sísmicos registrados por la red acelerográfica del valle de Aburrá.

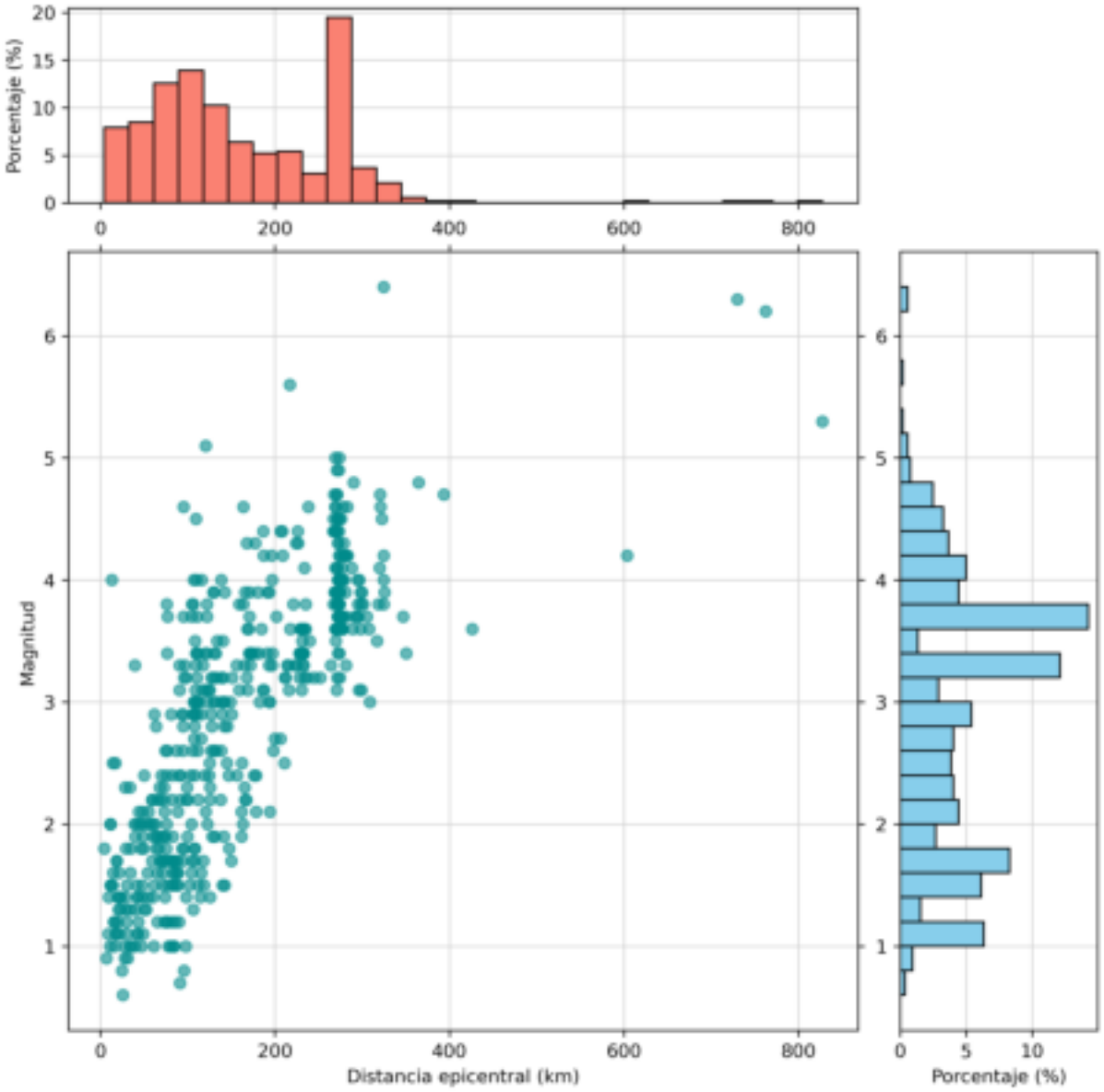


Figura 220: Distribución de distancias epicentrales (superior) y magnitudes (derecha) de eventos sísmicos registrados por la red acelerográfica del valle de Aburrá.

- El rango de distancias epicentrales fue entre 4 y 830 km. Esta distancia es medida con respecto al centroide geométrico del perímetro urbano del distrito especial de Medellín (longitud=-75.581775, latitud = 6.246631) y las coordenadas del epicentro de cada evento sísmico. En la Figura 220 se muestra la relación distancia-magnitud para todos los eventos registrados en este periodo. De manera general es posible identificar que los eventos de mayores magnitudes (mayor a 5), si bien pueden ocurrir a distancias inferiores a 200 km, al valle de Aburrá también llegaron ondas sísmicas de sismos lejanos con tales magnitudes (superiores a 600 km); por otro lado, se observa una concentración de datos aproximadamente a 280 km, que corresponde en efecto a la sismicidad de la mesa de los santos en el departamento de Santander.

- Los 5 municipios con mayor número de eventos sísmicos registrados fueron (en paréntesis el número de eventos): Los Santos, Santander (67); Zapatoca, Santander (25); Dabeiba, Antioquia (21); Lenguazaque, Cundinamarca (14). Excluyendo 13 eventos sísmicos con epicentro en el océano pacífico, estos 5 municipios abarcaron el 28 % del total de eventos reportados en esta vigencia (519). Los 5 departamentos con mayor número de eventos sísmicos registrados fueron (en paréntesis el número de eventos): Antioquia (290), Santander (116), Cundinamarca (28), Chocó (24) y Valle del Cauca (16); estos 5 departamentos representan aproximadamente el 94 % del total de eventos reportados en esta vigencia (519). De lo anterior, es posible resaltar que el departamento de Antioquia es sísmicamente activo y reune espacialmente diferentes fuentes que generan sismos que viajan hasta el valle de Aburrá, así mismo, otro sitios de Colombia también son preponderantes a la hora de estudiar la propagación de ondas sísmicas del territorio.
- Los sismos registrados por las redes (acelerógrafos y sismógrafos) son en eventos tal que su forma coincide con la firma de un registro sísmico convencional de acuerdo con la literatura, donde la señal sísmica fuera de al menos tres veces más grande que el ruido base.
- Los detalles más importantes de los eventos registrados en las redes de monitoreo sísmico se pueden encontrar en los Reportes mensuales de eventos sísmicos para la vigencia CCT-016.

De igual forma, aquí fueron integradas dos actividades, cuyos avances, resultados y aplicaciones fueron reportados mes a mes. A continuación, se presenta resumidamente los descubrimientos y aplicaciones futuras identificadas de estos dos trabajos.

Se ha abordado un desafío crítico para la evaluación del riesgo sísmico: la actualización y generación de insumos que permitan cuantificar las afectaciones por sismos, especialmente aquellos relacionados con la expansión urbana del territorio.

- Se actualizó la información del modelo de exposición del municipio de Sabaneta -elegido como prueba piloto- desarrollado por AMVA & Universidad de los Andes (2019), incorporando información reciente de catastro y mejorando así la representación de los edificios presentes en el municipio.
- Se añadieron 1360 edificios de la zona urbana de Sabaneta que no se encontraban en el modelo de exposición de entrada, lo que representa un aumento del 31 % de estructuras nuevas y no consideradas originalmente.
- A partir de esta actualización, se observó que los hogares pueden llegar a ser los más afectados debido a que el 83 % de las edificaciones del municipio son de uso residencial. Además, el 76 % de los edificios tienen como material principal la mampostería, el cual en la mayoría de los casos está relacionado con sistemas de construcción vulnerables ante los sismos.
- La cantidad de edificios de más de 21 pisos se triplicó en proporción al modelo de entrada, siendo éstos los que tienen mayores exigencias constructivas y concentrando alto valor económico y humano por la cantidad de personas que albergan.
- Esta prueba piloto demostró no sólo su viabilidad técnica sino también que es necesario realizar una actualización periódica de los modelos de todos los municipios pues tienen información vital para la cuantificación del riesgo sísmico.

El desarrollo de esta investigación también permitió evaluar la calidad de la instrumentación sísmica de campo y su distribución en el valle de Aburrá, lo que afecta directamente el conocimiento de la amenaza sísmica en el territorio. Se aplicó entonces una metodología de valoración desarrollada en la vigencia CCT103-2023 que permite decidir -entre las 36 estaciones acelerográficas que han hecho parte

del monitoreo sísmico de la región durante 29 años- dónde es prioritario instalar los acelerógrafos de alta especificación que pueda adquirir el Área Metropolitana para el monitoreo sísmico de campo. Con ésta metodología se logró lo siguiente.

- Realizar seis (6) modificaciones a la distribución de las estaciones acelerográficas, entre las que se incluye la instalación de dos (2) sensores de alta especificación y la reubicación de sensores en estaciones que se encontraban disponibles.
- El 16 de julio de 2024 se realizó la instalación de un sensor TITAN-SMA en la estación Seminario Mayor (SEM), la cual ocupó el primer lugar en la aplicación de la metodología de valoración de sitios para la instrumentación sísmica con acelerógrafos de campo. Esta estación cuenta con un sistema de comunicación en tiempo real y fue debidamente señalizada como se muestra en la Figura 221. Adicionalmente, se evaluó la infraestructura de la estación Centro de Control EPM (ECC) para la instalación del sensor TITAN-SMA que se proyectó modernizar durante la vigencia CT 016.



Figura 221: Jornada de instalación del sensor TITAN-SMA en la estación Seminario Mayor (SEM) llevada a cabo el 16 de julio de 2024.

- El 30 de octubre de 2024 se realizó la instalación de un sensor TITAN-SMA en la estación Centro de Control (ECC) en la Subestación Colombia, Calasanz, Medellín, la cual ocupó el segundo lugar en la aplicación de la metodología de valoración de sitios para la instrumentación sísmica con acelerógrafos de campo. Esta estación cuenta con un sistema de comunicación en tiempo real y fue debidamente señalizada como se muestra en la Figura 222.



Figura 222: Jornada de instalación del sensor TITAN-SMA en la estación Centro de Control (ECC) llevada a cabo el 30 de octubre de 2024.

- Por inconvenientes asociados a la alimentación de energía en la estación Centro de Control (ECC) en la Subestación Colombia, Calasanz, Medellín, el sensor instalado el 30 de octubre de 2025 fue removido y reinstalado en la Estación de La Estrella (EST) donde actualmente se encuentra activo y funcionando en tiempo real. Lo anterior se realizó aplicando la metodología de valoración de sitios para la instrumentación sísmica con acelerógrafos de campo.
- De acuerdo con lo anterior, se definió un nuevo sitio para el sensor que albergaba la estación La Estrella, que aunque funcionaba en tiempo real, la importancia de esta estación (según los resultados de la metodología) y las mejores características del sensor TITAN-SMA, se consideró como la mejor opción. Así, el sensor liberado fue instalado en la estación Sabaneta (SAB) ya que permitía mantenerlo con comunicación en tiempo real y figuraba también como buen candidato para instrumentación de acuerdo con la metodología.
- El sensor liberado de la estación Sabaneta (SAB), aunque por su tecnología no es apto para transmitir datos en tiempo real, se instaló en la estación Caldas (CAL), la cual no se encontraba instrumentada. Así, se realizó un trabajo importante en la mejora de la instrumentación sísmica hacia el sur del valle de Aburrá.

WP1.2.11. (Sismos) Actualización y/o generación de insumos para el cálculo de afectaciones en edificios

Para cada edificio de la red de monitoreo estructural del proyecto SIATA, se tienen definidos umbrales para la emisión de alarmas cuando ocurren sismos en el territorio. En esta actividad se realiza una revisión y/o actualización de los umbrales a medida que nuevos eventos significativos son registrados por las redes de monitoreo del proyecto.

En el Anexo WP1.2.11 se presenta de manera detallada los resultados y desarrollo de las actividades de este paquete de trabajo.

En esta sub-actividad se presentaron los aspectos de mayor relevancia del monitoreo sísmico de las edificaciones instrumentadas por el proyecto SIATA: Edificio AMVA, Torre SIATA, Gobernación de Antioquia, torres Plaza de la Libertad y alcaldías de Medellín, Itagüí, Caldas y La Estrella, conocido usualmente como la red de Monitoreo Estructural (RME). Dicha estrategia consistía en una serie de sensores de bajo costo, cuyo valor es aproximadamente un 10 % del valor de los sensores de alta especificación, instalados en puntos estratégicos de cada una de las edificaciones mencionadas. Su aplicación ha servido para entender la respuesta de los edificios instrumentados, primordialmente ante eventos sísmicos.

A cierre de esta vigencia se llevó a cabo el ejercicio continuo de seguimiento, mantenimiento, tratamiento de los datos y densificación de esta red, con el objetivo primario de obtener información oportuna para el cálculo de afectaciones en las edificaciones a partir del monitoreo sísmico. **En particular, uno de los frutos principales de esta red fue el seguimiento permanente a la frecuencia natural de vibración de las estructuras, la cual puede actuar como indicador de deterioro estructural, logrando afirmar que en el tiempo del monitoreo no se identificaron cambios sustanciales que sugirieran deterioro estructural.** Estos resultados se corroboraron con equipos de altas especificaciones, donde además se observó que la capacidad para identificar estas propiedades con equipos de bajo costo es limitada, y está condicionada fuertemente por factores como los rangos de movimiento, rigidez de la estructura, configuración geométrica y propiedades elásticas de las estructuras, siendo incluso imposible en algunos casos captar efectivamente las frecuencias mencionadas.

Por otro lado, la ejecución de jornadas de vibración de corta duración permitió identificar que la evaluación de frecuencias puede ser un ejercicio puntual y no permanente, ya que la obtención de registros no estaría sujeta a la integridad total de los sistemas de alimentación eléctrica y de telemetría de las edificaciones ante un posible evento sísmico. El aspecto logístico ha sido crítico para el sostenimiento de esta red; la gestión de ingreso y demás particularidades en la infraestructura de telemetría interna de algunas edificaciones, ha hecho que el proceso de gestión sea tan complejo que en ocasiones afecta la continuidad de los registros y la toma oportuna de datos, encontrándose los sensores inactivos en ciertos periodos de tiempo (en los que puede ocurrir un evento sísmico importante).

Reconociendo el papel que deben ejercer las partes inmersas con relación a la normativa en lo que a instrumentación sísmica respecta, las limitaciones identificadas en el ejercicio de instrumentación ejecutado por el proyecto SIATA unilateralmente y el enfoque del equipo de Ingeniería Sísmica, los esfuerzos para la densificación de redes de monitoreo de alto y bajo costo serán reorientados al territorio en general. Sin embargo, se velará por el sostenimiento en el tiempo de los sensores ya instalados en edificaciones y se dispondrá toda la información registrada a solicitud de los propietarios interesados. Es importante recordar que la normativa sismorresistente establece que el monitoreo sísmico en edificaciones de acuerdo con unas condiciones de área y altura construida es fundamental, y que su ejercicio es vital para un mejor entendimiento de la amenaza sísmica una vez ésta se manifieste en el territorio, el cual deberá ser iniciativa de los propietarios y no una obligación primaria y aislada del proyecto SIATA.



WP1.2.12. (Calidad del aire) Seguimiento, caracterización y evaluación de variables de escala local y global relacionadas con la calidad del aire

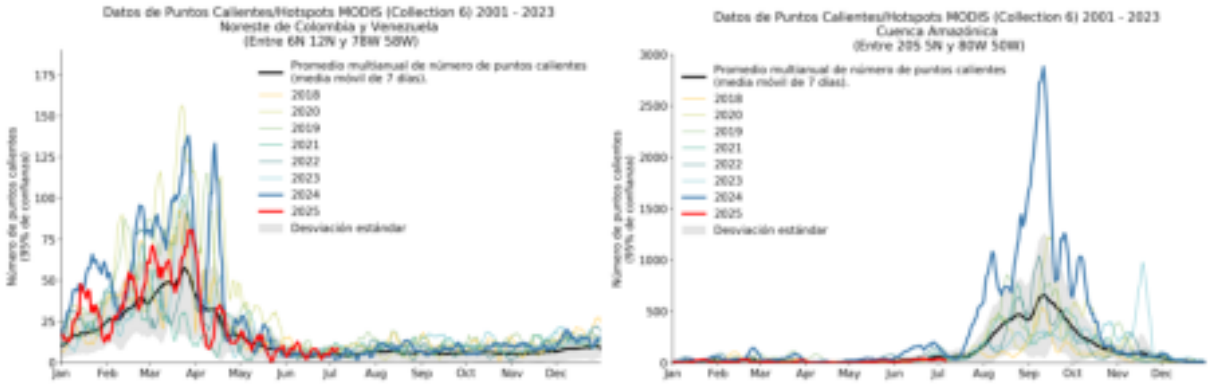
Esta actividad comprende el monitoreo de variables atmosféricas para un conocimiento detallado del estado de la calidad del aire, y con esto se favorezca el entendimiento de los procesos físicos que intervienen en su comportamiento espacial y temporal. El seguimiento continuo de los indicadores de calidad de aire del territorio es un insumo para la toma de decisiones oportunas, orientadas a la prevención, reducción y control de la emisión, así como evitar la exposición en caso de que los niveles de contaminación alcancen concentraciones que puedan afectar la salud de la población.

Aproximación a fuentes de contaminación atmosférica a partir de especies carbonáceas

La calidad del aire en el Valle de Aburrá puede verse impactada por el ingreso de masas de aire contaminadas, producto principalmente de incendios de cobertura vegetal ocurridos en regiones distantes. Estos eventos regionales, aunque no se desarrollen directamente en el territorio, favorecen el deterioro de las condiciones locales de calidad del aire, especialmente durante episodios críticos de contaminación atmosférica. Por esta razón, se hace necesario contar con herramientas de análisis y seguimiento que permitan comprender y anticipar los efectos derivados de este tipo de fenómenos atmosféricos.

En este contexto, y como parte de los productos desarrollados en el Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024, se establecieron metodologías para el seguimiento de incendios de cobertura vegetal y el análisis de las corrientes de viento que podrían transportar contaminantes hacia el Valle de Aburrá. Entre estos productos se destaca el seguimiento a incendios ocurridos en el noreste de Colombia, en Venezuela y en la cuenca del Amazonas. Este monitoreo se realizó mediante el análisis de observaciones satelitales de puntos calientes (hotspots) probablemente asociados a incendios de cobertura vegetal, captados por el sensor MODIS y disponibles a través de la plataforma Fire Information for Resource Management System (FIRMS).

Las observaciones satelitales utilizadas para este análisis fueron filtradas con un nivel de confianza del 95 %, con el objetivo de asegurar que los puntos calientes registrados correspondan efectivamente a incendios de cobertura vegetal. La Figura 223 (izquierda) presenta los ciclos multianuales de ocurrencia de incendios en la región del noreste de Colombia y Venezuela, mientras que la Figura 223 (derecha) muestra los ciclos correspondientes a la región que cubre gran parte de la cuenca del Amazonas. Estas dos regiones son de especial interés para el Valle de Aburrá, dado que históricamente se ha comprobado que la ocurrencia de incendios puede llegar a afectar la calidad del aire local mediante el transporte de contaminantes por corrientes de aire a gran escala. Durante el período analizado, entre el 02 de febrero de 2024 y el 07 julio de 2025, se identificó en la cuenca del Amazonas un pico muy por encima del promedio multianual durante los meses de agosto y septiembre de 2024, lo cual sugiere una temporada de incendios de cobertura vegetal particularmente intensa. Además, en la región del noreste de Colombia y Venezuela se evidenció un incremento sostenido de incendios durante los primeros cuatro meses de 2025, en comparación con el promedio histórico. Este comportamiento es consistente con los dos episodios críticos de contaminación atmosférica que habitualmente se presentan en la región.



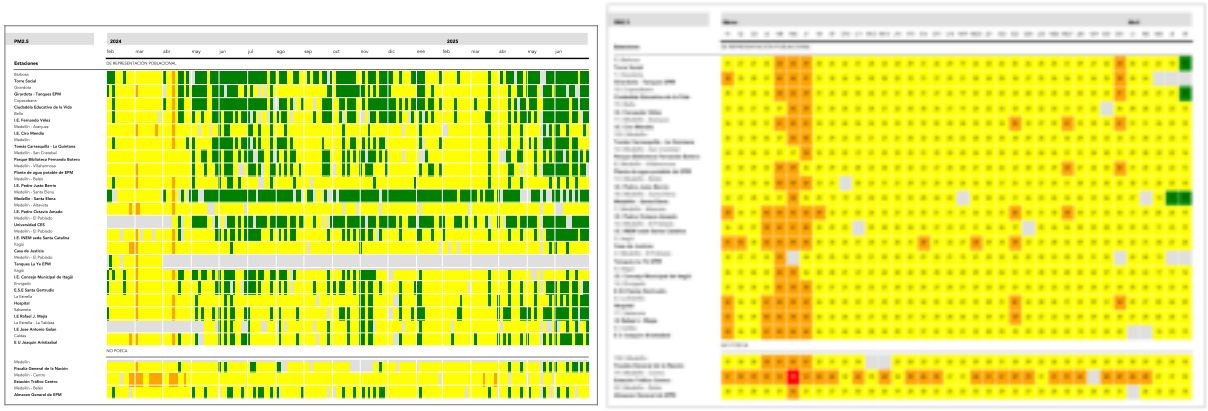
(a) (b)

Figura 223: Ciclos multianuales de la cantidad de puntos calientes detectados por MODIS con una confianza mayor al 95 % para las regiones del norte de Colombia y Venezuela (izquierda) y la cuenca del Amazonas (derecha).

La Figura 224 (izquierda) presenta el comportamiento del Índice de Calidad del Aire (ICA) diario para PM2.5 en las estaciones del Valle de Aburrá entre el 02 de febrero de 2024 y el 07 julio de 2025. En ella se destaca un episodio crítico de calidad del aire durante el mes de marzo de 2024, donde se evidencia un predominio de categorías Aceptable (ICA amarillo) y dañina para grupos sensibles (ICA naranja), con un registro puntual en la categoría dañina para la salud (ICA rojo), este último registrado puntualmente en la estación Tráfico Centro (CEN-TRAF), la cual está categorizada como una estación de tráfico vehicular. Este período coincide con el incremento en la ocurrencia de incendios de cobertura vegetal en el noreste de Colombia y Venezuela (Figura 223, izquierda), región que históricamente ha influido en la calidad del aire del Valle de Aburrá durante la primera temporada seca del año, particularmente cuando las condiciones atmosféricas favorecen el transporte de contaminantes desde esa zona hacia el norte del Valle. Así mismo, en la figura 224 (derecha) se amplía el análisis diario del ICA para marzo y principios de abril de 2024 donde se observa con mayor claridad las condiciones desfavorables para la calidad del aire en casi todas las estaciones de representación poblacional para la primera semana de marzo de 2024. Aunque los incendios forestales ocurridos en la cuenca del Amazonas durante septiembre de 2024 mostraron una magnitud superior al promedio multianual, su impacto en la calidad del aire local fue mucho más limitado, como se puede observar en los registros de ICA para PM2.5, en categoría Buena y Aceptable para ese período. Este contraste evidencia la importancia de la ubicación geográfica de la ocurrencia de los incendios de cobertura vegetal y las condiciones meteorológicas en la modulación de su efecto sobre la calidad del aire en el Valle de Aburrá.

Además del seguimiento a puntos calientes probablemente asociados a incendios de cobertura vegetal, se realizó el monitoreo de las trayectorias de las masas de aire que ingresaron al Valle de Aburrá, con el objetivo de identificar la procedencia de los vientos y la posible carga de contaminantes. Estos análisis se generaron de manera diaria utilizando datos de dirección y magnitud del viento provenientes de dos fuentes complementarias: el reanálisis de la Oficina Nacional de Administración Oceánica y Atmosférica (NOAA), conocido como NCEP-NCAR, y el Pronóstico Meteorológico Global GFS. Adicionalmente, se incorporó información sobre la columna total del espesor óptico de aerosoles (AOD, por sus siglas en inglés), un indicador que representa la cantidad total de aerosoles presentes en una columna vertical de la atmósfera, obtenida a través del Servicio de Monitoreo Atmosférico Copernicus (CAMS) de la Agencia Ambiental Europea (ESA).

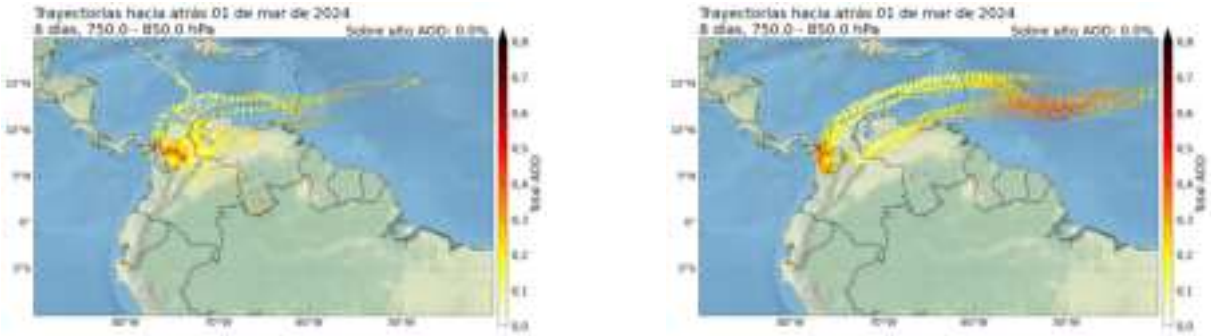
La Figura 225 muestra las retrotrayectorias calculadas a partir del reanálisis NCEP/NCAR y CAMS



(a) (b)

Figura 224: Comportamiento del Índice de Calidad del Aire (ICA) en el Valle de Aburrá para el período comprendido entre febrero de 2024 y julio de 2025 (Izquierda), y detalle del período entre marzo y abril de 2024 (Derecha)

para el 1 de marzo de 2024. En ellas se evidencia que una proporción significativa de las masas de aire que llegaron al Valle de Aburrá durante ese día tienen origen en el noreste de Colombia, el occidente de Venezuela y algunas zonas del Caribe. Estas rutas coinciden espacialmente con áreas que presentan valores elevados de Espesor Óptico de Aerosoles-AOD (de hasta 0.7), lo que sugiere que dichas masas de aire arrastraban consigo una carga importante de contaminantes atmosféricos.



(a) (b)

Figura 225: Retrotrayectorias que llegaron al Valle de Aburrá, el día 1 de marzo de 2024. Izquierda: Generado a partir de datos de GFS. Derecha: Generados a partir de datos de NCEP. Los colores de las trayectorias están relacionados con el espesor óptico de aerosoles.

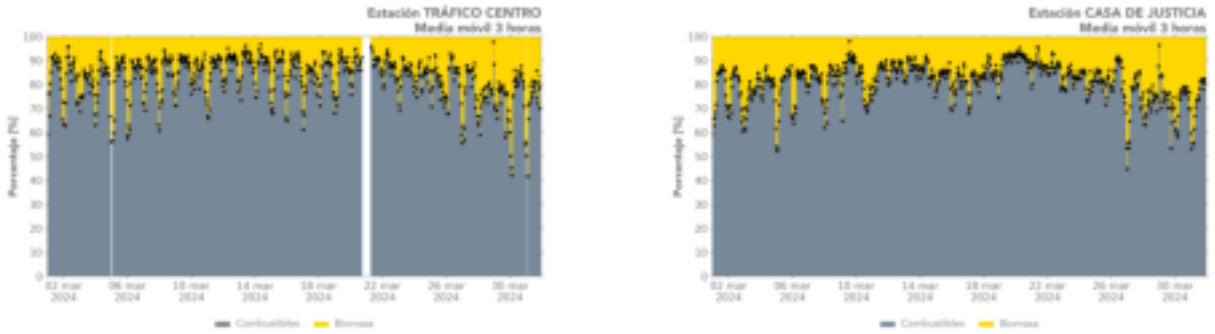
Por su parte, la Figura 226, basada en el pronóstico GFS, refuerza esta interpretación al mostrar trayectorias similares entre el 24 de febrero y el 1 de marzo de 2024. Además, incluye una rosa de vientos que indica que más del 70 % de las trayectorias ingresaron al Valle desde los cuadrantes Este y Sureste, trayendo consigo masas de aire potencialmente contaminadas desde regiones con alta actividad de incendios de cobertura vegetal. La distribución espacial del AOD superó valores de 0.6 en áreas cercanas a la región metropolitana, lo que confirma la presencia de aerosoles en la atmósfera asociados a procesos

de combustión. Esto sugiere que durante los primeros días de marzo de 2024, la calidad del aire en el Valle de Aburrá se vió afectada por el transporte regional de contaminantes, asociados a incendios de cobertura vegetal ocurridos en el noreste de Colombia y Venezuela.



Figura 226: Rosa de vientos de ingreso de masa de aire al Valle de Aburrá para el día 01 de marzo del 2024

Finalmente, para complementar el análisis de incendios de cobertura vegetal regionales y trayectorias de masas de aire, se realizó un seguimiento de la contribución de quema de biomasa y quema de combustibles fósiles al carbono negro (Figura 227), utilizando datos obtenidos por etalómetros ubicados en las estaciones Tráfico Centro en el Distrito de Medellín y Casa de Justicia en el municipio de Itagüí. Las gráficas muestran el comportamiento porcentual, permitiendo una caracterización detallada a lo largo del episodio crítico. En ambas estaciones se observó una predominancia clara de emisiones asociadas a quema de combustibles fósiles, típicamente vinculadas al tráfico vehicular, con proporciones que superan el 70 % en la mayoría de las horas analizadas. Sin embargo, se evidencian incrementos significativos en la fracción atribuible a quema de biomasa en algunos días del mes. Estos picos de biomasa, más notorios al inicio y al final del mes, son consistentes con los días en los que las retrotrayectorias indicaban ingreso de masas de aire desde el noreste de Colombia y Venezuela, coincidiendo con alta actividad de incendios de cobertura vegetal y valores elevados de espesor óptico de aerosoles (AOD).



(a) (b)

Figura 227: Porcentaje de contribución asociado a quema de combustibles fósiles y quema de biomasa, calculado a partir de mediciones del etalómetro en las estaciones Tráfico Centro (Izquierda) y Casa de Justicia (Derecha) durante marzo de 2024

Red de Micrometeorología

Rol de la turbulencia atmosférica durante el primer período de gestión de episodio de contaminación atmosférica de 2024

Introducción

La ocurrencia de eventos críticos de contaminación atmosférica está estrechamente relacionada con las condiciones meteorológicas subyacentes a escala local y regional (Pérez et al., 2020). A nivel local, por ejemplo, Herrera-Mejía and Hoyos (2019) y Roldán-Henao et al. (2020) analizaron el impacto de la altura de la capa límite atmosférica (CLA) y la precipitación, respectivamente, en la calidad del aire del Valle de Aburrá. Estas investigaciones destacaron el papel fundamental de la estabilidad atmosférica en la dispersión y acumulación de material particulado PM2.5 en el valle.

A escala regional, Henao et al. (2021) estudiaron el deterioro de la calidad del aire en el Valle de Aburrá debido al transporte regional de aerosoles. Además, el SIATA elaboró un informe detallado sobre el impacto de fuentes externas en la calidad del aire, identificando aerosoles provenientes de incendios de cobertura vegetal y polvo sahariano como contribuyentes significativos a la calidad del aire local (ver aquí). Sin embargo, los mecanismos físicos responsables de la formación y evolución de estos eventos críticos, desde la perspectiva de la turbulencia atmosférica, han sido poco explorados en el Valle de Aburrá. Dado que la turbulencia es el principal mecanismo de transporte y mezcla de masa, momento y energía en la CLA (Stull, 2012), su estudio es clave para comprender la dinámica de estos eventos.



Figura 228: Ubicación de sensores ultrasónicos que conforma la red de micrometeorología del Valle de Aburrá.

Por esta razón, el equipo de calidad del aire de SIATA durante la vigencia del contrato CCT016 de 2024 investigó la turbulencia superficial y la estructura vertical de la CLA durante episodios de alta contaminación inducidos por el transporte regional de aerosoles. Para ello, se utilizaron las mediciones del Radar Perfilador de Vientos y la red de micrometeorología COMPLEX (ver Figura 228), que operó desde el año 2020 hasta el 14 de febrero de 2025, y que tuvo como objetivo: analizar la turbulencia superficial en distintas condiciones de contaminación y fenómenos meteorológicos.

Resultados y análisis

Durante febrero de 2024, las concentraciones horarias de PM2.5 superaron en varias ocasiones los 50 $\mu g/m^3$. Además, la media móvil excedió el límite diario de 37 $\mu g/m^3$ establecido en la Resolución 2254 de 2017, especialmente hacia finales del mes, ver Figura 229. Este aumento estuvo posiblemente relacionado con el incremento en la proporción de Black Carbon asociado a la quema de biomasa (BC_{bm}), lo que sugiere intrusiones de aire contaminado por transporte regional de aerosoles, particularmente durante las noches del 24, 25, 27 y 28 de febrero, cuando las concentraciones de Black Carbon superaron el 25 %.

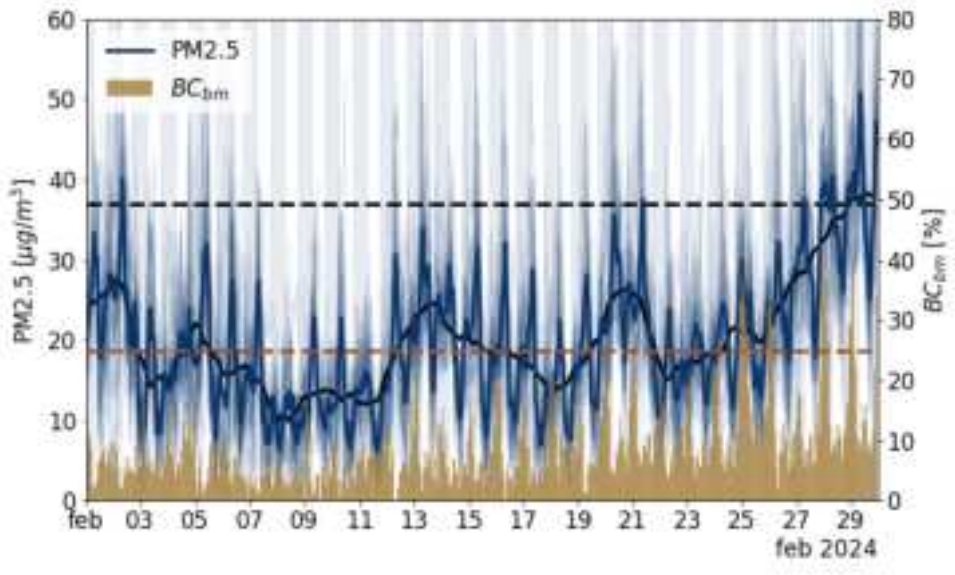
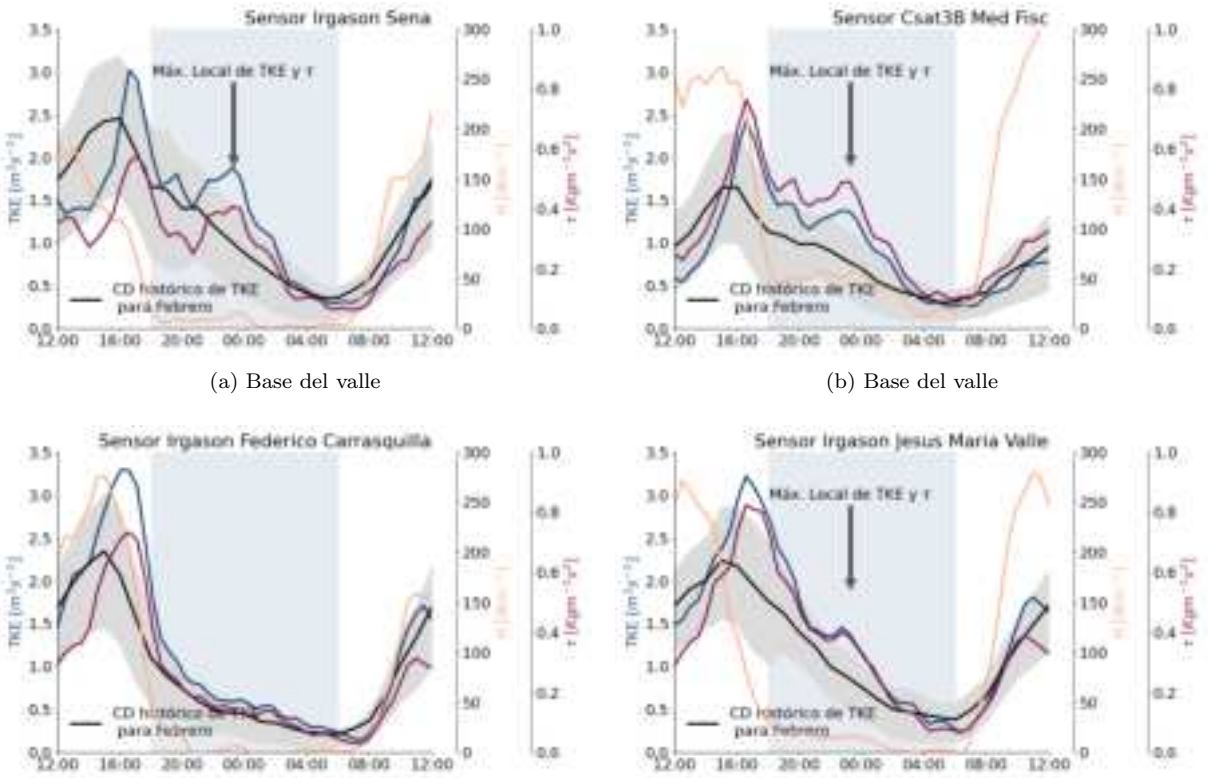


Figura 229: Concentraciones horarias y media móvil de 24 horas de material particulado PM2.5 (líneas azul y negra, respectivamente), y concentración porcentual de Black Carbon asociado a quema de biomasa (BC_{bm}) para el mes de febrero de 2024. Por otra parte, las líneas horizontales segmentadas negras y café localizadas en 37 $\mu g/m^3$ y 25 % son usadas como referencia de acuerdo a lo establecido en la resolución 2254 de 2017 y para identificar afectación en la calidad del aire por quemas de biomasa, respectivamente. Finalmente, las franjas verticales blancas y oscuras corresponden a las horas diurnas y nocturnas, respectivamente.

Las intrusiones de aire contaminado ingresaron al Valle de Aburrá desde el norte y se desplazaron en dirección norte-sur, siguiendo el eje del valle. Este patrón de transporte responde a la corriente de aire canalizado que se establece debido a la topografía de la región. Según Ramírez-Cardona and Jiménez Mejía (2023), esta corriente es el principal mecanismo físico responsable de la turbulencia atmosférica nocturna, promoviendo tanto el transporte advectivo como la dispersión vertical de aerosoles. En este contexto, la

red de micrometeorología del Valle de Aburrá juega un papel clave al proporcionar datos sobre flujos turbulentos superficiales, fundamentales para comprender la dinámica de estos episodios de contaminación.

La Figura 230 muestra el ciclo diurno histórico (desde 2020 a 2023) de TKE, junto con los promedios diurnos de TKE, los flujos de calor (H) y momentum (τ) durante las noches de intrusión, es decir, el 24, 25 y 28 de febrero de 2024. Se observó que la intensidad de turbulencia aumenta significativamente alrededor de la medianoche en comparación con los ciclos históricos. Además, estos incrementos están asociados a aumentos en los flujos de momentum y no en los de calor, lo que indica que el intercambio turbulento nocturno es predominantemente mecánico, impulsado por la corriente de aire canalizado. Adicionalmente, el signo positivo del flujo de momentum sugiere un transporte descendente de momentum hacia la superficie.



(a) Base del valle

(b) Base del valle

(c) Ladera oriental

(d) Ladera occidental

Figura 230: Ciclo diurno histórico de TKE (línea negra) y promedio de series de TKE (línea azul oscuro) y flujos verticales de calor sensible (H, línea amarilla clara) y momentum (τ, línea morada) durante días de intrusión de masas de aire contaminadas.

La Figura 231 presenta los perfiles verticales de la velocidad horizontal del viento y la cizalladura vertical, comparando valores históricos con los registrados durante las noches de intrusión, cuyos perfiles fueron obtenidos a partir del radar perfilador de vientos. Se evidenció un aumento en la velocidad del viento alrededor de los 250 m de altura en las noches con ingreso de aerosoles contaminantes. En consecuencia, la cizalladura del viento en este nivel fue significativamente mayor, lo que indica una producción intensa de turbulencia mecánica, cuyo resultado es coherente con lo registrado por la red de micrometeorología

(ver Figura 230).

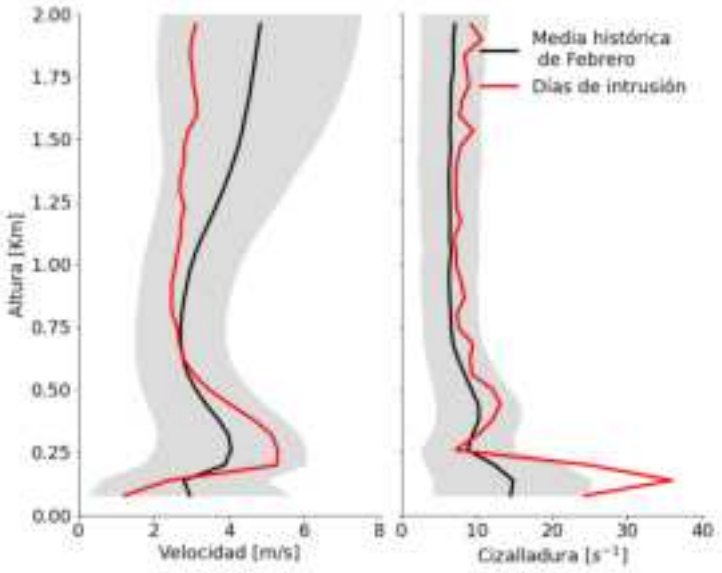


Figura 231: Perfiles históricos nocturnos de velocidad horizontal del viento y cizalladura vertical del viento (líneas negras) y promedios de perfiles de velocidad horizontal y cizalladura durante las noches de intrusión de masas de aire contaminadas (líneas rojas).

Investigación para CASAP 2025: Mezcla vertical nocturna de Ozono (O_3) en el Valle de Aburrá

Introducción

La Capa Límite Atmosférica (CLA) es la parte más baja de la atmósfera, influenciada por forzamientos térmicos y dinámicos debido a su contacto con la superficie terrestre (Stull, 2012). Estos forzamientos generan turbulencia, un proceso clave en la mezcla de momentum, masa (gases y contaminantes) y energía, definiendo la estructura dinámica y termodinámica de la CLA (Stull, 2012; Venkatram and Schulte, 2018). La Energía Cinética de Turbulencia (TKE) es una variable fundamental en la micrometeorología, ya que mide la intensidad de la turbulencia y, por tanto, determina la magnitud del intercambio turbulento suelo-atmósfera (Stull, 2012).

La turbulencia térmica está relacionada con la flotabilidad y el calentamiento adiabático del aire, mientras que la turbulencia mecánica se origina por la cizalladura vertical del viento, la cual resulta del arrastre por fricción con la superficie y sus elementos rugosos (Stull, 2012). Investigaciones han identificado los flujos de aire de bajo nivel como una fuente clave de producción de turbulencia mecánica cercana a la superficie, debido a la cizalladura del viento (Chen et al., 2022; Sarchosidis and Klöwer, 2016; Wei et al., 2023).

Como se mostró en la sección anterior, la turbulencia mecánica en períodos donde incrementa los niveles de concentración de PM2.5 y Black Carbon asociados a quema de biomasa (BC_{bm}) en el Valle de Aburrá se estudió considerando los datos del Radar Perfilador de Vientos y la Red de Micrometeorología. Los

resultados mostraron un aumento de la turbulencia mecánica durante los períodos de incrementos en la contaminación atmosférica, asociado a un incremento en la velocidad del flujo de aire nocturno, canalizado por la topografía del valle, lo que intensificó la cizalladura del viento y favoreció la acumulación de contaminantes en la superficie. Este fenómeno coincidió con intrusiones de aire contaminado proveniente de la Región Norte de Suramérica, donde se registraron incendios de cobertura vegetal, reflejados en el aumento de puntos calientes detectados en la zona.

A continuación se buscó profundizar en el impacto de la turbulencia nocturna en la calidad del aire del Valle de Aburrá, considerando las concentraciones de ozono (O_3). Diversos estudios han encontrado que la turbulencia nocturna, generada por la cizalladura vertical del viento en la capa límite estable, contribuye al incremento de O_3 cerca de la superficie terrestre mediante el transporte turbulento descendente (ej. Hu et al., 2013; Wei et al., 2020). Como ejemplo, la Figura 232 muestra la evolución nocturna de $PM_{2,5}$ y O_3 en una ciudad en China, donde encontraron que el desarrollo de un chorro de bajo nivel (LLJ) incrementó la cizalladura del viento, promoviendo la mezcla descendente de aire pobre en $PM_{2,5}$ y rico en O_3, lo que redujo la concentración de material particulado y aumentó la concentración de ozono cerca de la superficie.

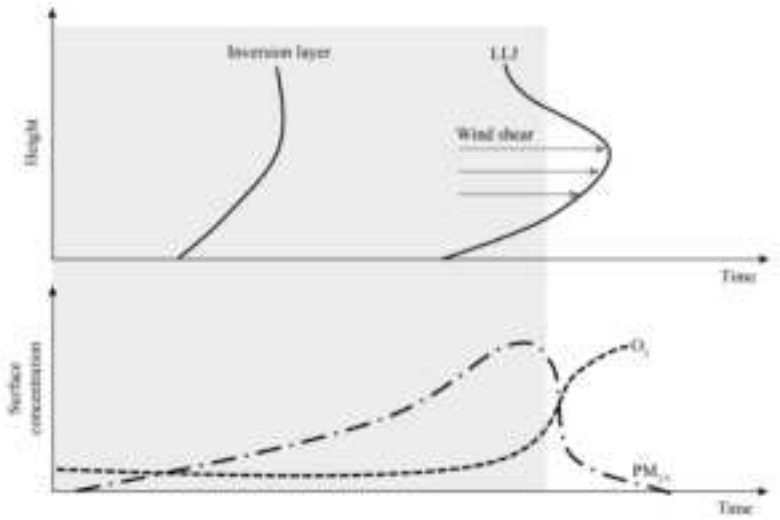


Fig. 9. Schematic of the effect of intermittent turbulence on $PM_{2.5}$ dispersion (shaded areas refer to the periods of accumulation).

Figura 232: Aumento en la cizalladura vertical del viento reduce el material particulado PM2.5 e incrementa la concentración de ozono cerca de la superficie terrestre. Figura tomada de Wei et al. (2020).

Resultados y análisis

Para analizar la relación entre la turbulencia mecánica y la dinámica de la capa límite atmosférica nocturna en el Valle de Aburrá, se seleccionó la estación de monitoreo MED-FISC, ubicada en la base del valle. Esta estación fue elegida porque cuenta con monitor de O_3 y está próximo a los sensores de la Red de Micrometeorología. Se analizaron las concentraciones nocturnas de O_3 (20:00-04:00 hora local) en función de la velocidad del viento superficial, utilizando datos entre el 1 de febrero y el 31 de octubre de 2024. Para evitar la influencia de la precipitación, sólo se consideraron registros con acumulaciones horarias menores a 0.1 mm (Li et al., 2024). Los resultados indican que las mayores concentraciones de ozono nocturnas tienden a registrarse con velocidades de viento elevadas (ver Figura 233).

Para examinar la influencia de la turbulencia en la acumulación de O_3, los datos se agruparon en tres cuadrantes según los percentiles 25 y 75, de la velocidad del viento y la concentración de ozono. El cuadrante 1 representa noches con alta turbulencia mecánica y elevadas concentraciones de O_3, el cuadrante 2 corresponde a condiciones típicas con valores medios, y el cuadrante 3 refleja noches de estabilidad atmosférica con mínima producción de turbulencia. Posteriormente, las series fueron alineadas a la medianoche para obtener promedios representativos de cada cuadrante, permitiendo evaluar la estructura dinámica de la CLA y la turbulencia superficial mediante datos del Radar Perfilador de Vientos y la Red de Micrometeorología.

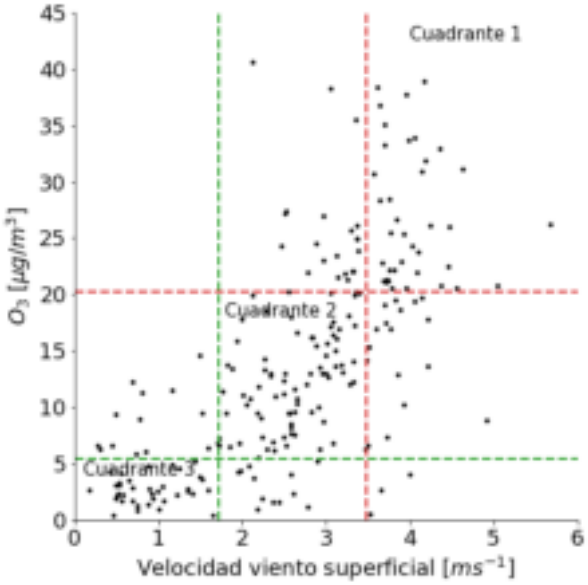


Figura 233: Gráfico de dispersión entre las mediciones nocturnas de la velocidad del viento superficial y ozono, tomadas en el punto de monitoreo MED-FISC. Las líneas segmentadas rojas y verdes corresponden al percentil 75 y 25 para dichas variables, respectivamente.

Los resultados muestran diferencias significativas en la evolución nocturna de las concentraciones de ozono (O_3) según la intensidad de la turbulencia mecánica. En el cuadrante con alta velocidad del viento (cuadrante 1), se observó un aumento notable en las concentraciones de O_3 desde las 9:00 p.m., alcanzando un pico superior a 30 μgm^{-3} alrededor de la 1:00 a.m. En contraste, en el cuadrante con condiciones atmosféricas estables (cuadrante 3), no se evidenciaron cambios significativos en la concentración de O_3 (ver Figura 234). La estructura dinámica de la Capa Límite Atmosférica (CLA) mostró que, en noches con mayor concentración de O_3, el flujo de aire canalizado alcanzó velocidades de 5 ms^{-1} a 250 m de altura, generando una cizalladura de viento superior a 1 s^{-1} y favoreciendo la mezcla turbulenta descendente de ozono hacia la superficie. Por el contrario, en el cuadrante 3, la ausencia de flujo de aire canalizado sugiere una atmósfera estable con vientos estancados, lo que inhibió la producción de turbulencia y evitó la acumulación de O_3 en la superficie (ver Figura 235).

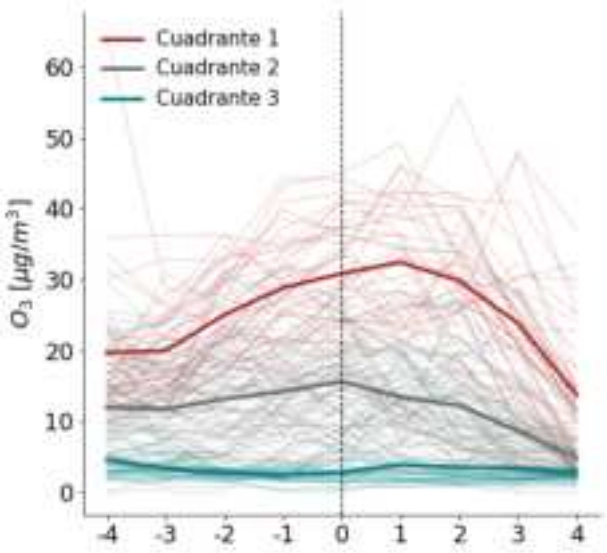


Figura 234: Compuesto de concentraciones de ozono medidos 4 horas antes y después de la medianoche en la estación MED-FISC, considerando los puntos en los cuadrantes 1, 2 y 3 (ver Figura 233).

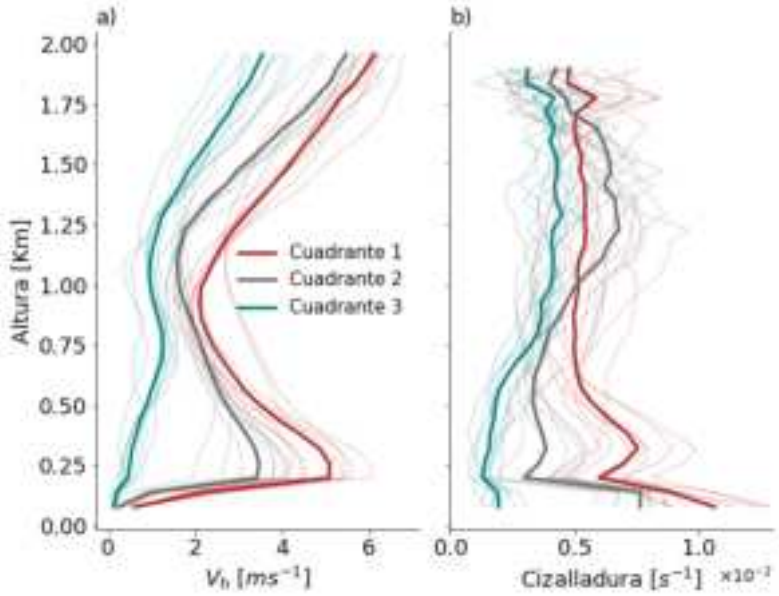
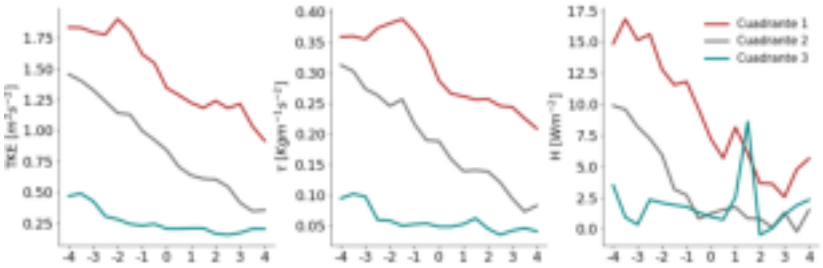
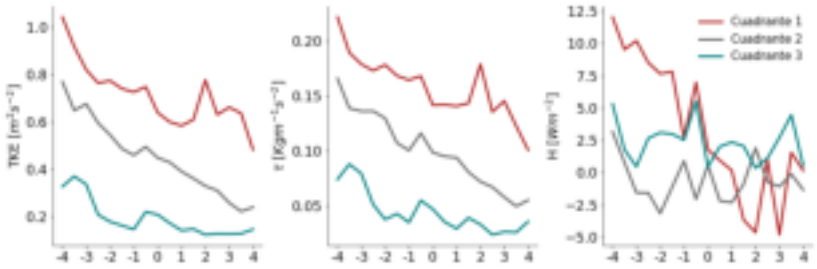


Figura 235: Compuesto de perfiles verticales de (a) la velocidad horizontal (V_h) y (b) la cizalladura vertical de viento, considerando los puntos en los cuadrantes 1, 2 y 3 (ver Figura 233).

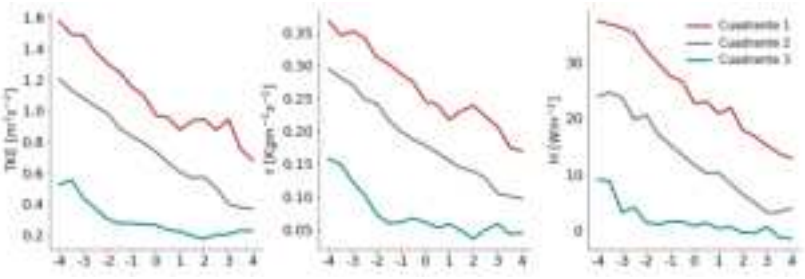
Los análisis de Energía Cinética de Turbulencia (TKE) y flujos turbulentos en diferentes puntos del Valle de Aburrá confirmaron que la actividad turbulenta fue mayor en el cuadrante 1, indicando una mayor mezcla atmosférica durante estas noches (ver Figura 236). En la estación SENA, la TKE y el flujo de momentum aumentaron tres horas antes de la medianoche, coincidiendo con el incremento en la concentración de O_3. Sin embargo, en las estaciones ubicadas en las laderas, este aumento ocurrió durante la madrugada, sugiriendo un proceso físico complejo aún no comprendido completamente. En el cuadrante 3, la turbulencia fue mínima en todos los puntos monitoreados, reafirmando que la atmósfera más superficial se mantuvo estable y sin intercambio significativo de ozono con niveles superiores de la atmósfera. Estos resultados coinciden con estudios previos (Hu et al., 2013; Wei et al., 2020), que evidencian la relación entre la cizalladura del viento y la mezcla turbulenta descendente de ozono.



(a) IRGASON SENA (Base del Valle)



(b) IRGASON Federico Carrasquilla (Ladera oriental)



(c) IRGASON CASD 20M (Ladera occidental)

Figura 236: Compuesto de energía cinética de turbulencia (TKE), flujo vertical de momentum y flujo vertical de calor sensible para los puntos de monitoreo (a) SENA (base del valle), (b) I.E. Federico Carrasquilla (ladera oriental) y (c) I.E. CASD (ladera occidental), considerando los puntos en los cuadrantes 1, 2 y 3 (ver Figura 233).

Investigación de Mecanismos Físicos Atmosféricos a partir de Simulaciones de Alta Resolución con el Modelo WRF (Weather Research and Forecasting Model)

Introducción

Recientemente, distintos estudios alrededor del mundo se han centrado en el estudio del transporte regional de contaminantes, debido a la importancia que estos tienen para desencadenar eventos de contaminación en distintas ciudades (Xiao et al., 2020; Hu et al., 2022; Zhang et al., 2021). Hu et al. (2022) muestran que en China Central el transporte regional de contaminantes estuvo presente en un 65 % de los eventos fuertes de contaminación por PM2.5. Este estudio mostró además que ciertas condiciones sinópticas como cambios en la presión y los patrones de circulación a escala regional, influyen en los episodios de transporte regional. De forma similar, Xiao et al. (2020) caracterizan las condiciones sinópticas en momentos en los que se presenta un transporte regional de contaminantes, identificando gradientes de presión que favorecen el transporte desde zonas más contaminadas. Además, identifican momentos en los que se presenta una advección de masas de aire con mayor temperatura en niveles medios, potenciando la estabilización de la atmósfera y limitando la dispersión vertical de contaminantes. Por su parte, en un estudio reciente, Jia et al. (2024) resaltaron además que las condiciones de transporte regional también limitan el ingreso de radiación solar, favoreciendo la acumulación de contaminantes en superficie.

A pesar de que se han estudiado en gran medida estas condiciones de escala regional, aún se desconocen las condiciones dinámicas y termodinámicas que se presentan en la capa límite atmosférica cuando se presentan este tipo de eventos, las cuales podrían también favorecer los eventos de contaminación del aire. Por ejemplo, Lv et al. (2020) utilizaron simulaciones numéricas para estudiar las condiciones locales para momentos contaminados y no contaminados a partir de simulaciones numéricas. Los autores muestran que el decaimiento de la capa límite atmosférica está asociado con reducciones en la velocidad de los vientos horizontales en superficie y con aumentos en humedad relativa, y sugieren además que las condiciones desfavorables para la dispersión de contaminantes se acompañan de una mayor formación de aerosoles secundarios. Por su parte, Zhang et al. (2021) realizaron una modelación numérica del transporte regional de aerosoles, e identificaron que la altura de la pluma de contaminación durante el período de afectaciones se encontraba entre 500 y 1500 metros sobre el nivel del suelo. No obstante, la presencia de barreras orográficas en regiones como el Valle de Aburrá, dificulta el ingreso de estas masas de aire contaminadas, por lo que deben existir otros mecanismos que favorezcan este ingreso, como un transporte descendente a través de la capa límite atmosférica (e.g., Jia et al., 2024). En este sentido, se hace necesario avanzar en la identificación y análisis de patrones regionales y locales relacionados con el transporte regional de contaminantes y su afectación en el Valle de Aburrá, y principalmente los asociados con quema de biomasa en el noroeste del continente.

A partir del funcionamiento y la operación de la Red de Micrometeorología del proyecto SIATA, se han encontrado resultados relevantes que demuestran que la atmósfera presenta condiciones diferenciales durante eventos de transporte regional de aerosoles que derivan en afectaciones a la calidad del aire en el Valle de Aburrá. Específicamente, los resultados de la red de micrometeorología han permitido la identificación de incrementos en la energía cinética turbulenta y en los flujos descendentes de momentum, durante las noches y madrugadas en las que se registra un ingreso de masas de aire contaminadas al Valle de Aburrá. Este comportamiento, característico durante períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica, sugiere que la atmósfera del Valle de Aburrá tiene unas condiciones dinámicas y termodinámicas particulares que se presentan cuando se tiene la influencia de contaminación externa al Valle de Aburrá. Incluso, es probable que estas condiciones físicas no solamente estén presentes sino que, además, favorezcan la ocurrencia de episodios de contaminación atmosférica en la región. En este sentido, los avances en el entendimiento de estas condiciones, así como en el estudio de las implicaciones que estas tienen sobre los fenómenos de contaminación atmosférica, permitirían avanzar en el entendimiento de la

calidad del aire en la región metropolitana.

De forma consistente con los resultados obtenidos a partir de la red de micrometeorología, Jia et al. (2024) identifican un transporte descendente de aerosoles hacia la superficie desde el tope de la capa límite a partir de observaciones y simulaciones. Durante el período de transporte regional, los autores destacan incrementos en la energía cinética turbulenta (TKE), lo que resulta en un incremento rápido en las concentraciones de PM2.5 en superficie. Además, estudios recientes en distintas regiones de China han destacado la presencia de condiciones de inestabilidad atmosférica durante eventos de transporte regional de PM2.5 (Jiang et al., 2022; Sun et al., 2023). Asimismo, estos estudios destacan la ocurrencia de condiciones de estabilidad atmosférica durante períodos más limpios. Estos resultados sugieren que el intercambio de materia, momentum y energía durante condiciones de inestabilidad atmosférica fue fundamental para determinar la afectación por fuentes externas en las regiones de interés.

En este sentido, en el marco del contrato CCT 016 de 2024 se propuso una investigación titulada .ᴱᵛaluación de mecanismos físicos durante episodios de alta contaminación en el Valle de Aburrá"mediante la cual se busca expandir el conocimiento en torno a los hallazgos reportados previamente a partir de la red de micrometeorología. A partir de esta investigación se buscó estudiar los mecanismos y las condiciones dinámicas y termodinámicas, tanto regionales como locales, que están asociadas con el transporte e ingreso de masas de aire contaminadas al Valle de Aburrá.

Metodología

Con el fin de analizar los mecanismos atmosféricos que favorecen el ingreso de contaminantes al Valle de Aburrá durante episodios de calidad del aire, se realizaron simulaciones meteorológicas de alta resolución con el modelo Weather Research and Forecasting (WRF). Este modelo ha sido ampliamente utilizado en estudios de dinámica atmosférica y calidad del aire, y permite capturar las complejas interacciones entre la topografía y la atmósfera, fundamentales para el estudio de la calidad del aire en una región como el Valle de Aburrá.

Las simulaciones se implementaron usando tres dominios anidados centrados en el Valle de Aburrá, con resoluciones espaciales de 9 km, 3 km y 1 km, y una configuración vertical de 51 niveles, asegurando al menos 10 niveles por debajo de 1 km de altura para representar adecuadamente los procesos al interior de la capa límite. Se tomaron condiciones iniciales y de frontera del reanálisis ERA5, lo que reduce la incertidumbre en la representación de las condiciones de gran escala durante los eventos de interés.

Previo al desarrollo de las simulaciones, se realizó un análisis de sensibilidad en el que se compararon los resultados del modelo al usar las coberturas del suelo por defecto (con una resolución espacial de 1 km) y al usar las provistas por el producto Copernicus Land Cover (con una resolución espacial de 300 metros). Esto permitió seleccionar la base de datos más adecuada para representar la cobertura del suelo en la región. Posteriormente, se llevaron a cabo las simulaciones de alta resolución (1 km) para los meses de febrero y marzo de los años 2020, 2021, 2022, 2023 y 2024, coincidiendo con el primer período de gestión de episodios de contaminación atmosférica del año.

Para llevar a cabo los análisis, se realizó una selección de días con afectación a la calidad del aire por incendios de cobertura vegetal, regionales. Esta selección se basó en la identificación de intrusiones nocturnas de masas de aire contaminadas, definida como aquellas noches (entre las 8:00 p.m. y las 4:00 a.m.) en las que el porcentaje de Black Carbon asociado a quema de biomasa superó el 30 % durante al menos una hora, de acuerdo con las mediciones del equipo de Black Carbon ubicado en la estación CEN-TRAF. Posteriormente, se analizan las condiciones atmosféricas particulares durante estos días con afectación a la calidad del aire local, y se comparan con las condiciones promedio durante los meses de febrero y marzo.

A partir de los archivos de salida de WRF, se extrajeron e interpolaron variables meteorológicas clave en distintos niveles de la atmósfera. Posteriormente, se calcularon ciclos diurnos promedio y anomalías durante los eventos con afectación a la calidad del aire local, para variables como: velocidad y dirección del viento, humedad específica, temperatura potencial, energía cinética turbulenta (TKE), cizalladura vertical y gradiente térmico. Esta información permitió caracterizar las condiciones dinámicas y termodinámicas tanto en los eventos como en el comportamiento promedio durante los meses de febrero y marzo.

Los análisis se realizaron a distintas escalas espaciales:

- Los dominios 1 (9 km) y 2 (3 km) se usaron para estudiar condiciones regionales, incluyendo el norte de Colombia, la región Caribe y el Valle del Magdalena.
- El dominio 3 (1 km) se utilizó para estudiar las condiciones locales del Valle de Aburrá, permitiendo analizar en detalle las dinámicas dentro del sistema montañoso.

Evaluación del modelo

El modelo WRF (Weather Research and Forecasting) es una herramienta ampliamente utilizada para la investigación y el pronóstico meteorológico en diversas regiones del mundo. No obstante, en entornos urbanos complejos, su desempeño puede depender significativamente de la representación adecuada de variables superficiales, como las coberturas del suelo, particularmente en lo que respecta a zonas urbanizadas.

Con el fin de evaluar el impacto de una representación más realista de estas coberturas, se realizaron dos simulaciones entre el 20 de febrero y el 1 de marzo de 2022, utilizando datos meteorológicos del proyecto SIATA como referencia. En la primera simulación se emplearon las coberturas urbanas por defecto del modelo (LowRes, resolución de 1 km), mientras que en la segunda se integraron coberturas urbanas actualizadas a partir del producto de alta resolución (HighRes, 300 m) del programa Copernicus Land Cover Classification System (LCCS).

La Figura 237 muestra las diferencias entre ambas representaciones de cobertura urbana, así como la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para la evaluación. Estas estaciones fueron seleccionadas en píxeles donde HighRes clasifica como área urbana, pero LowRes no lo hace, con el fin de maximizar la sensibilidad a este cambio en las condiciones superficiales. La evaluación se centró en tres variables meteorológicas de interés: temperatura, velocidad y dirección del viento, utilizando las métricas de error cuadrático medio (RMSE), sesgo (BIAS) y coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados se presentan en la Figura 238.

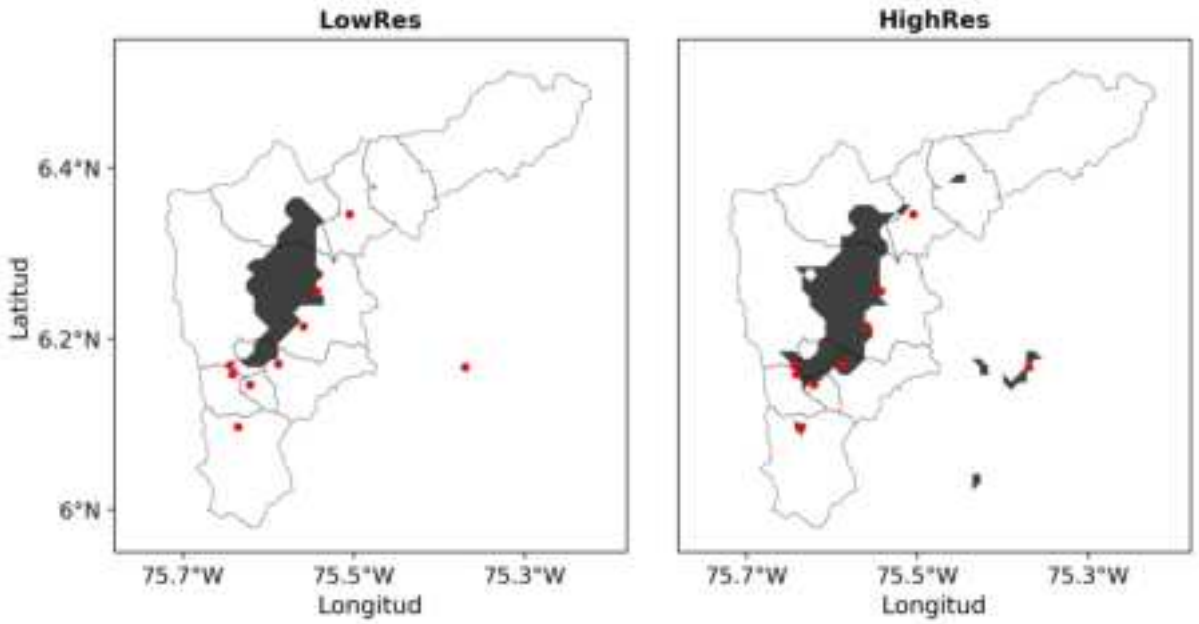


Figura 237: Área urbana representada en el modelo WRF (región gris) usando las coberturas por defecto (LowRes) y las coberturas actualizadas (HighRes). Los puntos rojos muestran la ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas para la evaluación.

En términos generales, ambas simulaciones mostraron una subestimación de la temperatura y una sobreestimación de la velocidad del viento, lo cual es consistente con hallazgos previos en entornos urbanos cuando no se implementa el módulo WRF-Urban. A pesar de estas limitaciones estructurales del modelo, la simulación con coberturas actualizadas (HighRes) mostró un mejor desempeño en la mayoría de las estaciones y variables analizadas, aunque con variabilidad entre las distintas estaciones analizadas. Las estaciones COP-CVID e ITA-CONC presentaron mejoras en las tres métricas de evaluación al utilizar HighRes, mientras que en SAB-RAME el desempeño fue ligeramente inferior con las coberturas actualizadas, lo que sugiere una posible compensación de errores en la versión LowRes que no ocurre con HighRes.

Estos resultados evidencian la importancia de representar adecuadamente las áreas urbanas en modelos meteorológicos de alta resolución. Si bien la actualización de las coberturas representa una mejora sustancial, los resultados también indican que es posible seguir afinando la simulación de procesos locales mediante la inclusión del módulo urbano de WRF y ajustes en los esquemas de parametrización.

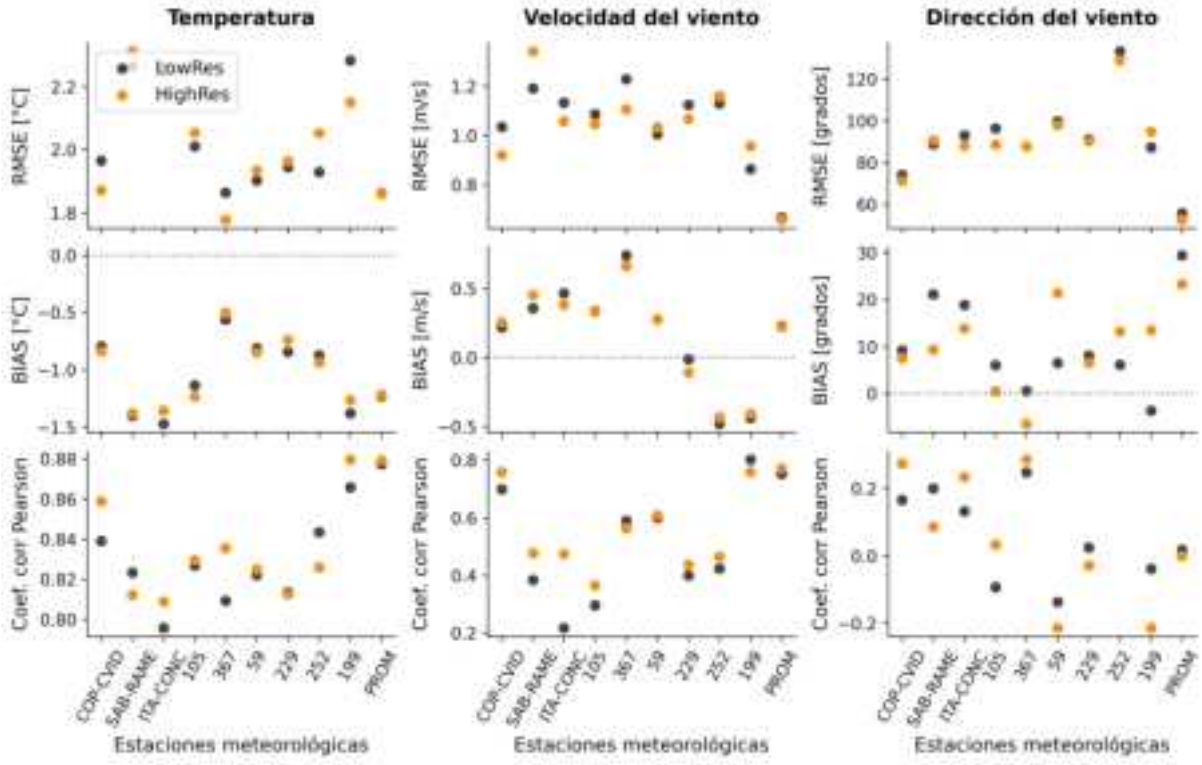


Figura 238: Métricas de desempeño para distintas estaciones meteorológicas usando las dos configuraciones de dominios. Los paneles superiores muestran los resultados para el error medio cuadrático (RMSE), los paneles del medio muestran el sesgo (BIAS) y los paneles inferiores muestran el coeficiente de correlación de Pearson. De izquierda a derecha se presentan los resultados para las variables de interés: la temperatura, la velocidad del viento y la dirección del viento, respectivamente. La línea horizontal en los paneles del centro denota el valor de referencia a partir del cual se sobreestiman-subestiman las observaciones.

Condiciones regionales

En esta sección, se resumen las condiciones particulares de escala regional que se identificaron durante la investigación. Estos resultados están basados en los dominios 1 (9 km) y 2 (3 km) de las simulaciones con el modelo WRF, los cuales tienen una mayor extensión espacial. En la Figura 239 se presenta la humedad relativa y los vientos a 500 hPa (aproximadamente 5500 metros sobre el nivel del mar) en el dominio 1 de simulación. En el primer panel se muestra el promedio para los días seleccionados con afectación a la calidad del aire por fuentes externas, en el segundo panel se muestra el promedio para los días sin afectación, y el tercero presenta la diferencia entre ambos.

Durante los días con afectación se observa una masa de aire más seca sobre la región Norte de Suramérica, incluyendo gran parte de la región Andina colombiana. Esta condición se asocia a vientos más intensos provenientes del Caribe, donde además se evidencia una estructura anticiclónica. Este patrón sinóptico podría favorecer la reducción de precipitaciones, aumentar la ocurrencia de incendios de cobertura vegetal, y facilitar el transporte de aerosoles a escala regional. El entendimiento y estudio de estos fenómenos podría contribuir a una mejor capacidad predictiva de los eventos de contaminación asociados a fuentes

externas en la región metropolitana.

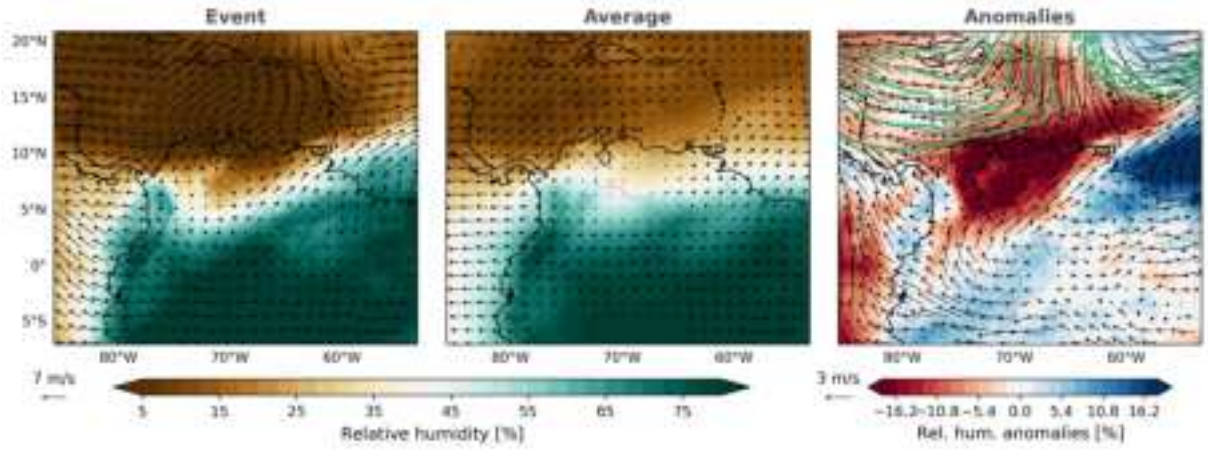


Figura 239: Humedad relativa en 500 hPa en promedio para los días seleccionados por afectación de fuentes externas y para el resto de días. El tercer panel presenta la diferencia entre ambas.

Con el fin de conectar las señales de gran escala previamente identificadas con patrones meteorológicos en la región Caribe y el valle del Magdalena. La Figura 240 muestra el comportamiento de los vientos de bajo nivel y la humedad específica a 925 hPa. Durante los días con afectación, los vientos presentan una componente sureste más marcada, evidenciando un incremento en el transporte desde el Caribe hacia el valle del Magdalena. Adicionalmente, se observa una anomalía de humedad específica negativa, es decir, una masa de aire más seca, que también podría estar relacionada con condiciones favorables para incendios de cobertura vegetal en el norte de Colombia (Velásquez-García et al., 2024).

Posteriormente, para examinar el transporte potencial de contaminantes hacia el Valle de Aburrá, se realizaron dos cortes transversales (ver Figura 241), uno en el norte y otro en el centro del valle del Magdalena. En estos cortes se analizaron los campos tridimensionales del viento. En el norte del valle (Figura 242), se simulan vientos más intensos valle arriba, con transporte de aire desde el Caribe hasta los 2000 msnm. En el centro del valle (Figura 243), se observan vientos del Este que podrían facilitar el transporte de contaminantes hacia el Valle de Aburrá.

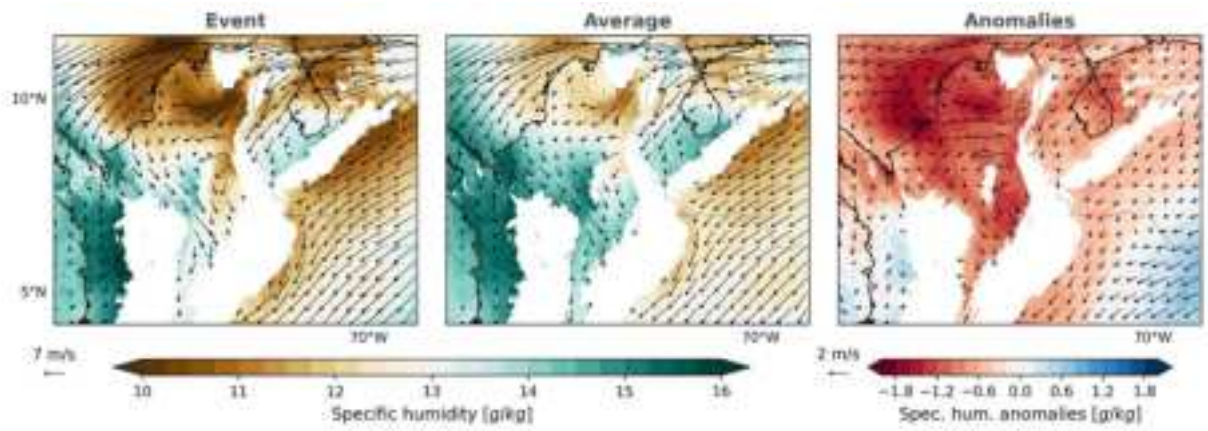
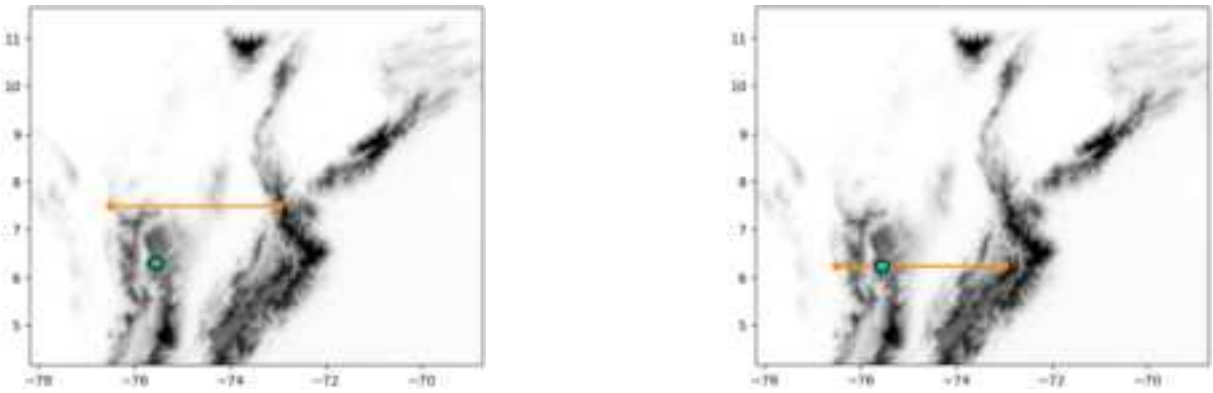


Figura 240: Vientos (flechas) y humedad específica (contornos de colores) a una altura de 925 hPa (aproximadamente 700 msnm) simuladas por el modelo WRF a escala regional. De izquierda a derecha, los paneles muestran los campos promedio durante los días con afectación a la calidad del aire por fuentes externas (panel izquierdo; event), los campos promedio durante febrero y marzo (panel del centro; average), y las diferencias entre los eventos y los campos promedio (panel derecho; anomalies).



(a) Corte al norte del Valle del Magdalena.

(b) Corte en el centro del Valle del Magdalena.

Figura 241: Ubicación de los cortes transversales realizados a través del valle del Magdalena (líneas y puntos naranja). El punto azul muestra la ubicación del Valle de Aburrá respecto a los cortes realizados.

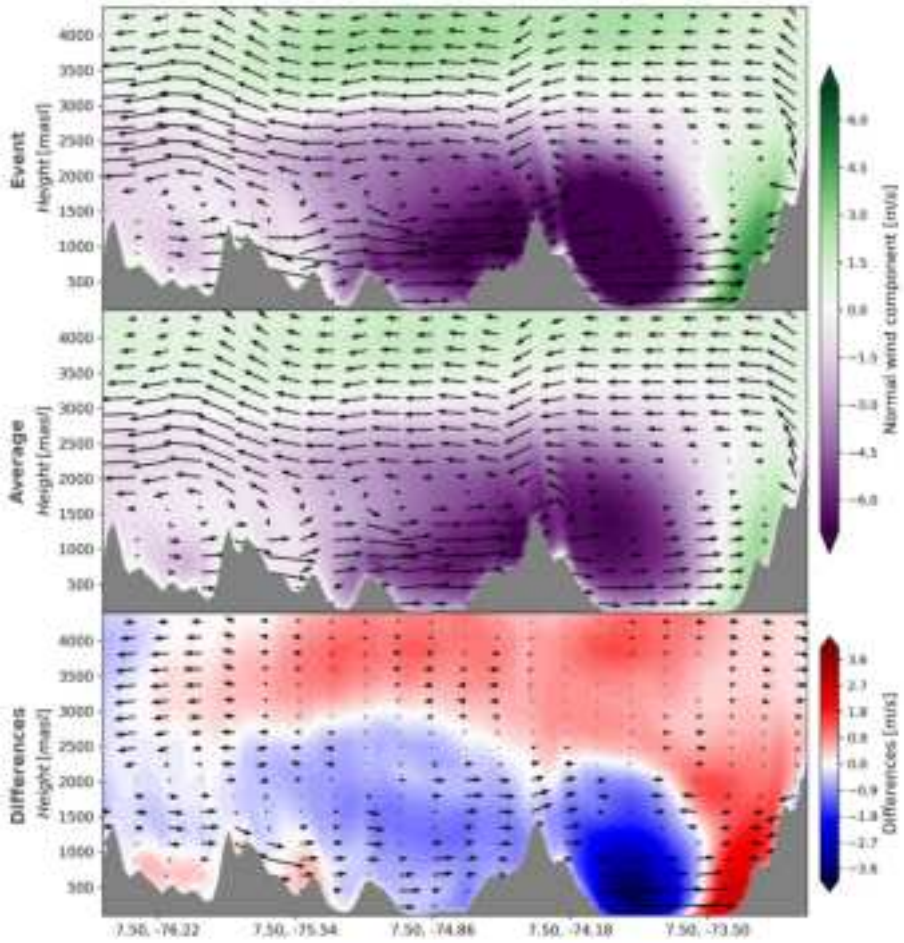


Figura 242: Vientos verticales y zonales (flechas) y vientos meridionales (contornos de colores) en un corte transversal al Norte del Valle del Magdalena (ver panel superior en Figura 241a). De arriba a abajo, los paneles muestran los campos promedio durante los días con afectación a la calidad del aire por fuentes externas (panel superior), los campos promedio durante febrero y marzo (panel del centro), y las diferencias entre los eventos y los campos promedio (panel inferior).

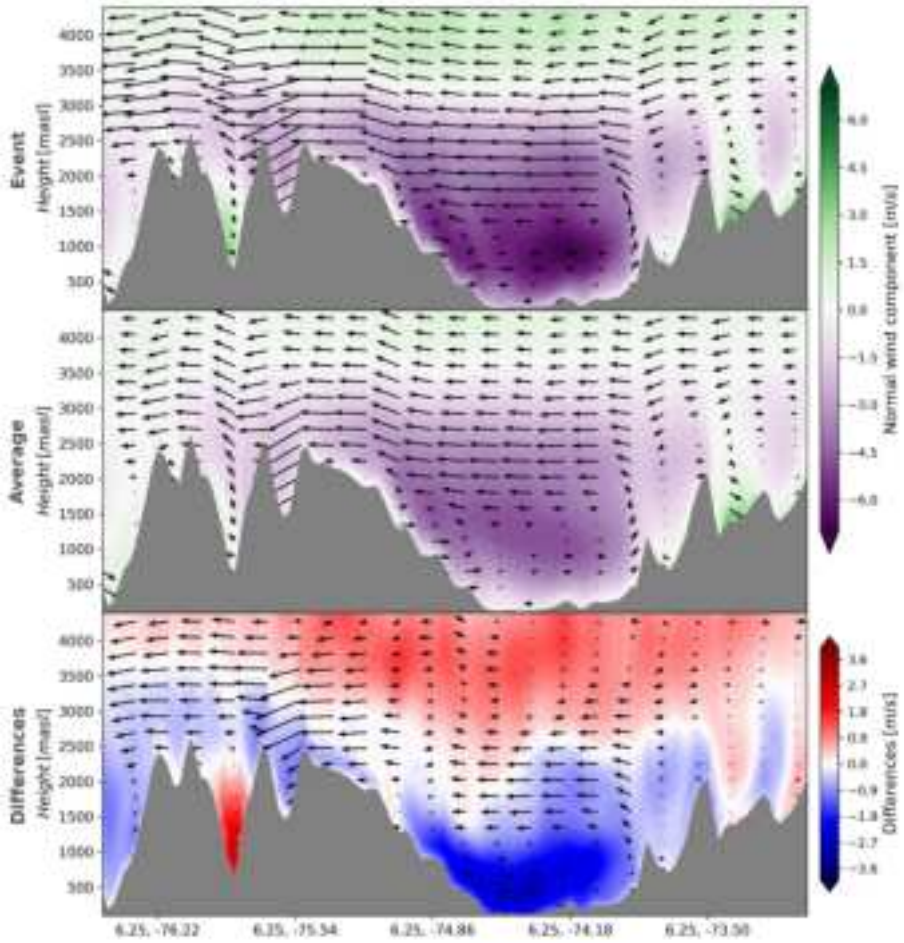


Figura 243: Similar a la Figura 242 pero para un corte transversal en el Centro del Valle del Magdalena (ver panel inferior en Figura 241b).

Con el fin de conectar el Valle de Aburrá con las dinámicas de los vientos descritas para el Valle del Magdalena, la Figura 244 presenta los vientos promedio simulados a 750 hPa y 600 hPa durante los días con afectación a la calidad del aire por incendios de cobertura vegetal a escala regional. A 600 hPa, se puede apreciar un flujo uniforme desde el oriente con velocidades de aproximadamente 2.2 m/s. Las anomalías, calculadas respecto al promedio de febrero y marzo de cada año, muestran que tanto la magnitud como la dirección de este flujo están altamente relacionadas con los patrones particulares durante los eventos de contaminación atmosférica. Por su parte, a 750 hPa, los vientos provienen principalmente del nororiente y se identifica una reducción en las anomalías hacia el valle, lo que podría estar asociado con patrones de convergencia, especialmente en Medellín y su ladera occidental.

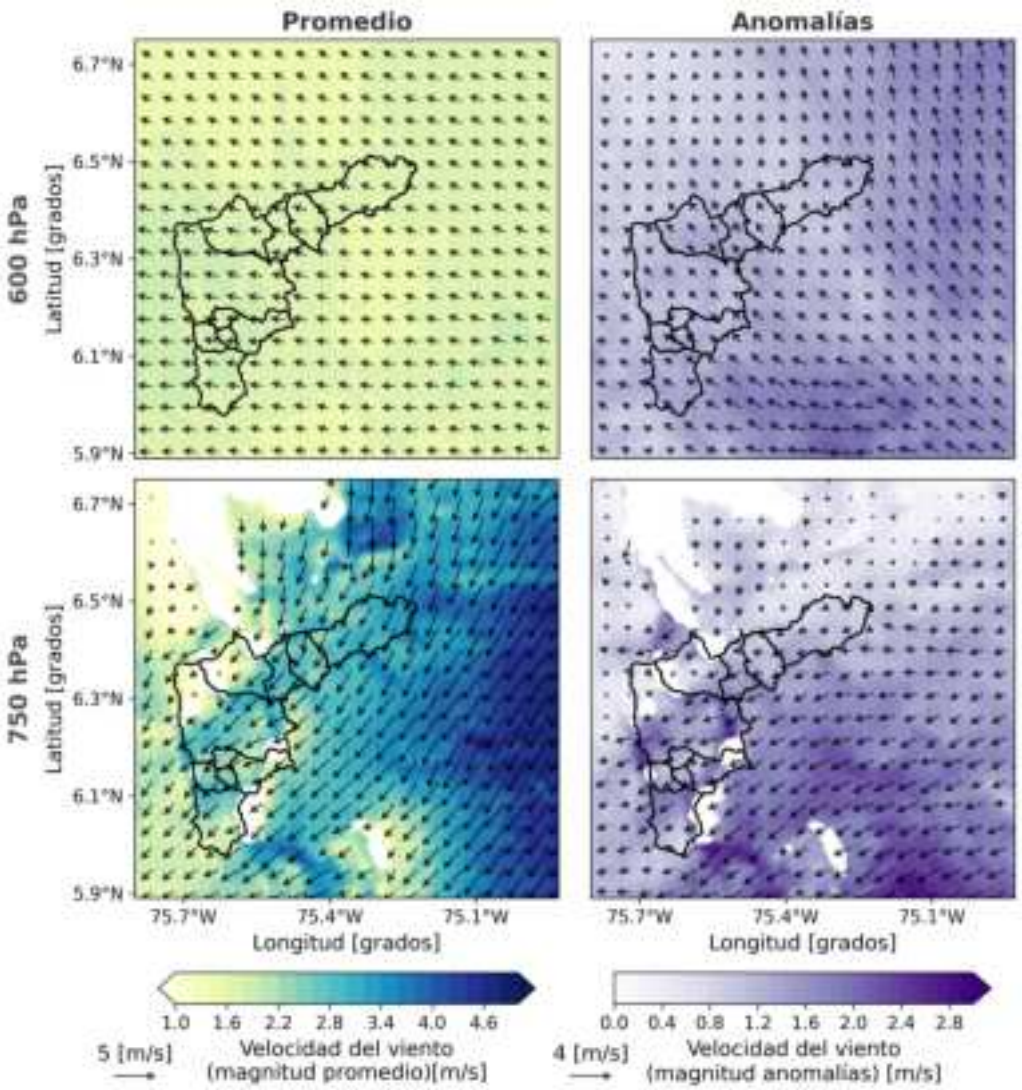


Figura 244: Vientos (flechas) y velocidad del viento (contornos) promedio para dos niveles en la vertical (paneles de la izquierda) y anomalías (derecha) durante las noches (8 p.m. a 4 a.m.) en las que posiblemente se presentaron afectaciones a la calidad del aire local por incendios de cobertura vegetal regionales.

Por último, la Figura 245 muestra los promedios y anomalías de precipitación simulada por el modelo WRF durante los días con afectación a la calidad del aire, por fuentes externas de contaminación. Se observa una reducción significativa en la lluvia en las regiones norte, oriente y suroriente del dominio durante los días con afectación. Esto es especialmente relevante considerando que el ingreso de masas de aire contaminadas desde estas regiones es más efectivo en ausencia de precipitación, condición que favorecería el transporte de contaminantes hacia el Valle de Aburrá.

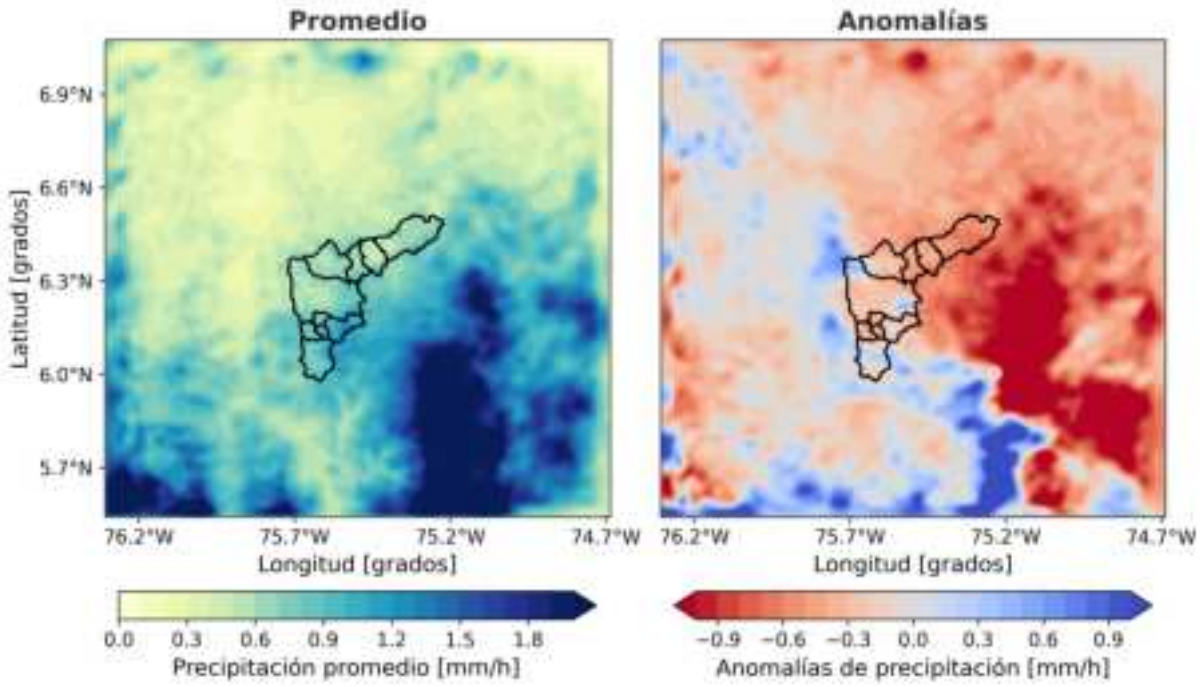


Figura 245: Precipitación promedio durante el período de simulación (izquierda) y anomalías de precipitación (derecha) durante las noches (8 p.m. a 4 a.m.) en las que posiblemente se presentaron afectaciones a la calidad del aire local por incendios de cobertura vegetal regionales.

Condiciones locales

En esta sección, se resumen las condiciones particulares de escala local que se identificaron durante la investigación. Los resultados están basados en las salidas de las simulaciones con el modelo WRF para el dominio 3, el cual cuenta con una mayor resolución espacial (1 km).

La Figura 246 presenta la cizalladura promedio y las anomalías para noches con afectación a la calidad del aire por aerosoles provenientes de incendios de cobertura vegetal a escala regional, así como el índice de estabilidad atmosférica promedio y las anomalías correspondientes. Los resultados se presentan en distintos niveles de la vertical, buscando representar el nivel por debajo de la altura de las laderas del Valle (más cerca a la superficie- entre 30 y 200 msnm.), el nivel de transición entre el Valle y la altura máxima de las laderas (500 y 1000 msnm.), y la atmósfera sobre este nivel (1500 y 2000 msnm.).

Los valores de cizalladura son positivos para los tres niveles analizados, indicando que la magnitud de la velocidad del viento incrementa con la altura para cada nivel. Además, los valores de cizalladura son más elevados mientras más se asciende en la vertical. Particularmente para el nivel entre 30 y 200 msnm., los valores de cizalladura son más bajos para todo el Valle de Aburrá y la zona suroccidental del dominio, mientras que en los otros niveles, los valores son en general más consistentes en todo el dominio. Para las diferencias asociadas a las noches con afectación, en los niveles de 30 y 20 msnm. así como en los niveles de 1500 y 2000 msnm. se identifica que las noches con afectación presentan valores de cizalladura más elevados sobre el Valle de Aburrá, la zona oriental y en general, sobre casi todo el dominio.

Similar a lo descrito para la cizalladura, el índice de estabilidad atmosférica promedio exhibe un incre-

mento en los valores a medida que se asciende en la vertical. Por su parte, el nivel más cercano a la superficie presenta valores cercanos a cero, con algunas zonas con valores que harían referencia a inestabilidad atmosférica, principalmente para el Distrito de Medellín. Para los dos niveles restantes los valores son positivos, indicando estabilidad atmosférica. Para el nivel más elevado, entre 1500 y 2000 msnm. los valores son más elevados indicando un gradiente de temperatura más marcado, y teniendo en cuenta los valores, indicaría una capa atmosférica más estable. En el caso de las diferencias asociadas a las noches con afectación a la calidad del aire, en el nivel entre 30 y 200 msnm. se ve un patrón interesante con disminuciones en el índice de estabilidad atmosférica para la zona suroriente (i.e. menos estable en las noches con afectación), en donde se encontraron incrementos de los vientos (principalmente en 750 hPa) y la precipitación para las noches con afectación. Por su parte, se identifican aumentos en la mayor parte del Valle, es decir, las noches con afectación a la calidad del aire son más estables en esta capa entre 30 y 200 msnm. En el segundo nivel, entre 200 y 1000 msnm. se presentan disminuciones en el índice de estabilidad atmosférica en todo el Valle de Aburrá, así como en la zona al oriente de Valle, indicando que las noches con afectación a la calidad del aire en este nivel serían menos estables. Finalmente, en el nivel entre 1500 y 2000 msnm. se tienen incrementos en el índice de estabilidad atmosférica para las noches con afectación a la calidad del aire, indicando mayor estabilidad en este nivel.

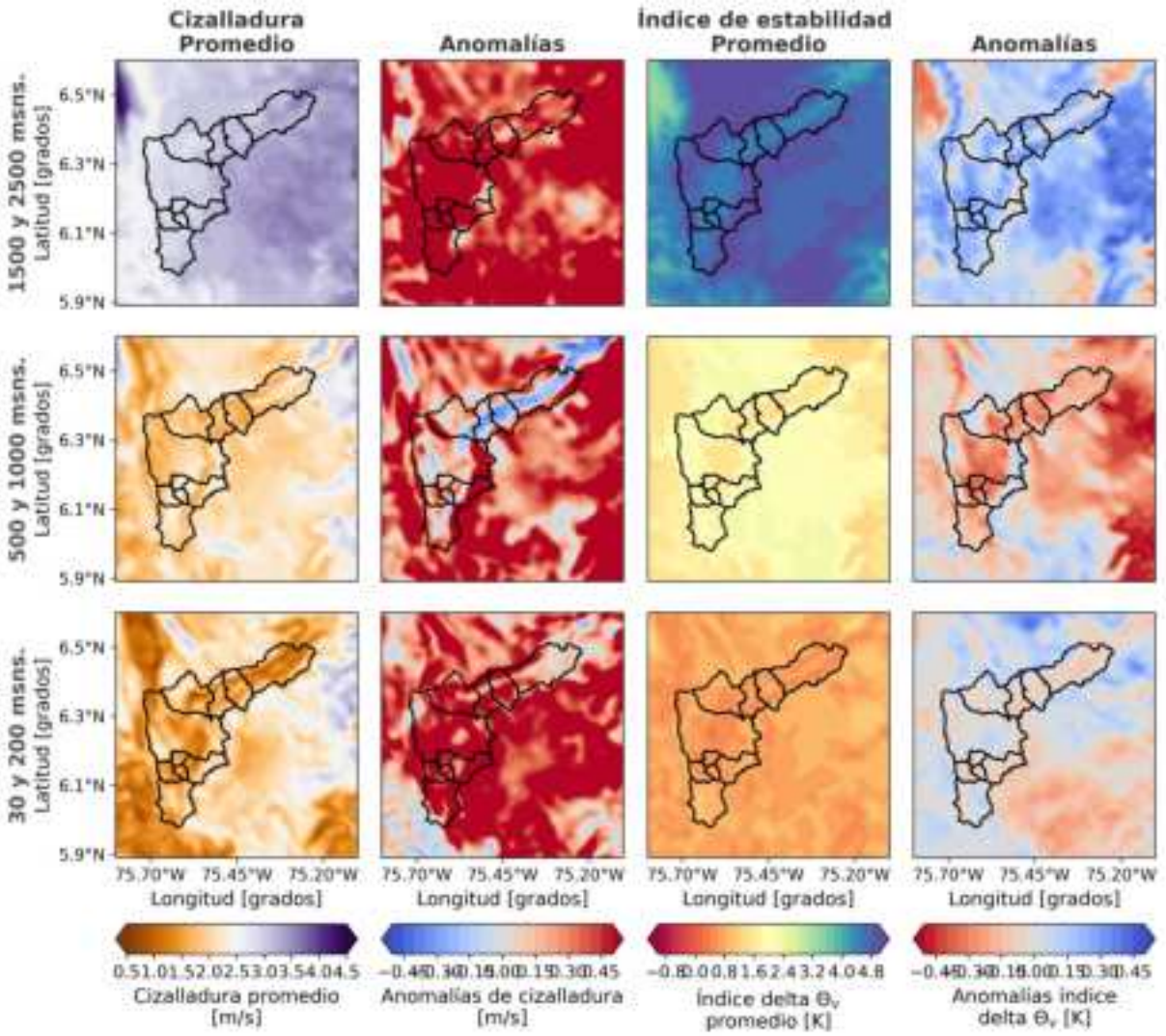
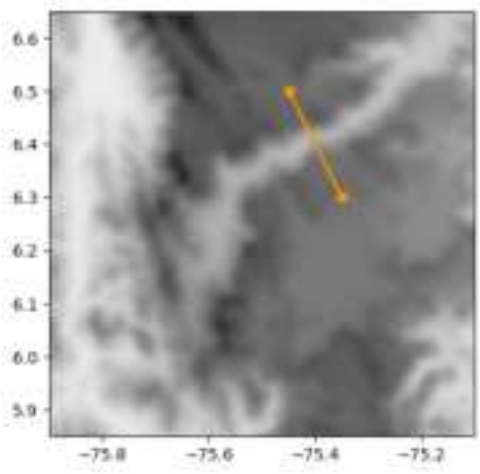
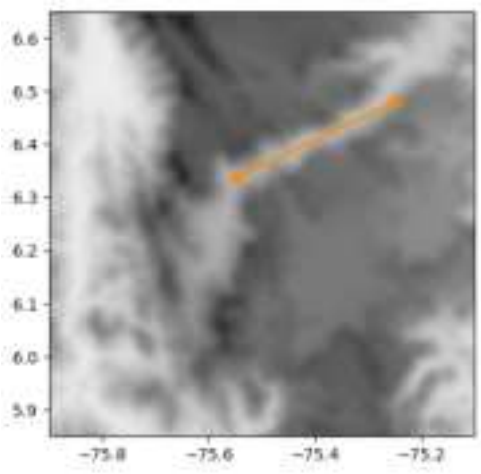


Figura 246: De izquierda a derecha: cizalladura promedio durante el período de simulación, anomalías de cizalladura, índice de estabilidad atmosférica promedio y anomalías del índice de estabilidad atmosférica. Las anomalías fueron obtenidas durante las noches (8 p.m. a 4 a.m.) en las que posiblemente se presentaron afectaciones a la calidad del aire local por incendios de cobertura vegetal regionales.

Para analizar la respuesta de la atmósfera local a los patrones de forzamiento de escala regional que se reportaron previamente, se realizaron nuevos cortes verticales para la región metropolitana. Los cortes se realizaron al norte del Valle de Aburrá, de acuerdo con la dirección en la que predominantemente ingresan las masas de aire externas a la región metropolitana. La Figura 247 presenta los cortes realizados, donde el panel a) muestra un corte a través del valle (transversal) y el panel b) presenta un corte a lo largo del eje del valle (longitudinal). Los resultados obtenidos se presentan a continuación.



(a) Corte transversal al norte del Valle de Aburrá.



(b) Corte a lo largo del eje al norte del Valle de Aburrá.

Figura 247: Ubicación de los cortes transversales realizados al norte del Valle de Aburrá (líneas y puntos naranja). Los contornos grises denotan la topografía de la región.

La Figura 248 muestra los resultados obtenidos para el corte transversal realizado el norte del Valle de Aburrá. Durante los días con afectación (Event) se puede apreciar un incremento notable de los vientos que fluyen hacia el interior del valle (colores morados más intensos), con diferencias más marcadas (azules más intensos) en horas de la tarde. Adicionalmente, en la tarde se observan vientos hacia la superficie (flechas hacia abajo) ligeramente más intensos, mientras que en la noche se observa un incremento en los vientos por encima de los 2500 msnm., que proporcionan un ambiente con mayor cizalladura.

Por su parte, la Figura 249 presenta el comportamiento de los vientos para el corte longitudinal (a lo largo del eje del valle). Nuevamente, durante los días con afectación (Event) se observan vientos más intensos que fluyen hacia el centro del valle (flechas hacia la izquierda y morados más intensos) tanto para las horas de la tarde como de la noche. Estas diferencias son más marcadas al interior del valle (entre 1500 y 2500 msnm), especialmente en horas de la tarde. No obstante, durante las noches con afectación se presentan incrementos en los vientos superficiales (por debajo de los 2000 msnm), los cuales se encuentran visiblemente más acoplados con dinámicas de mayor escala. Es importante notar que el comportamiento de estos vientos podría favorecer el transporte advectivo de contaminantes hacia el interior del valle durante noches con afectación.

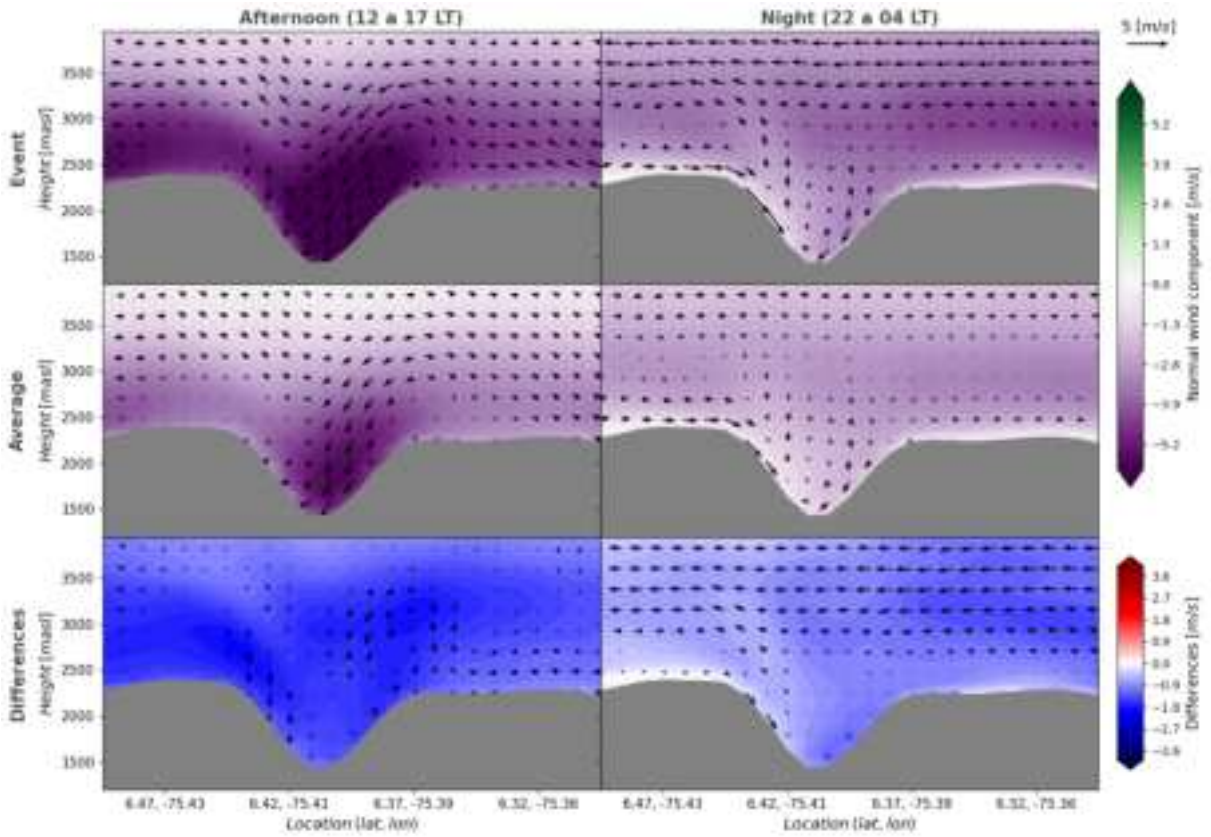


Figura 248: Vientos verticales y tangenciales (flechas) y vientos normales (contornos de colores) a un corte transversal al Norte del Valle de Aburrá (ver panel superior en Figura 247a). De arriba a abajo, los paneles muestran los campos promedio durante los días con afectación a la calidad del aire por fuentes externas (panel superior), los campos promedio durante febrero y marzo (panel del centro), y las diferencias entre los eventos y los campos promedio (panel inferior).

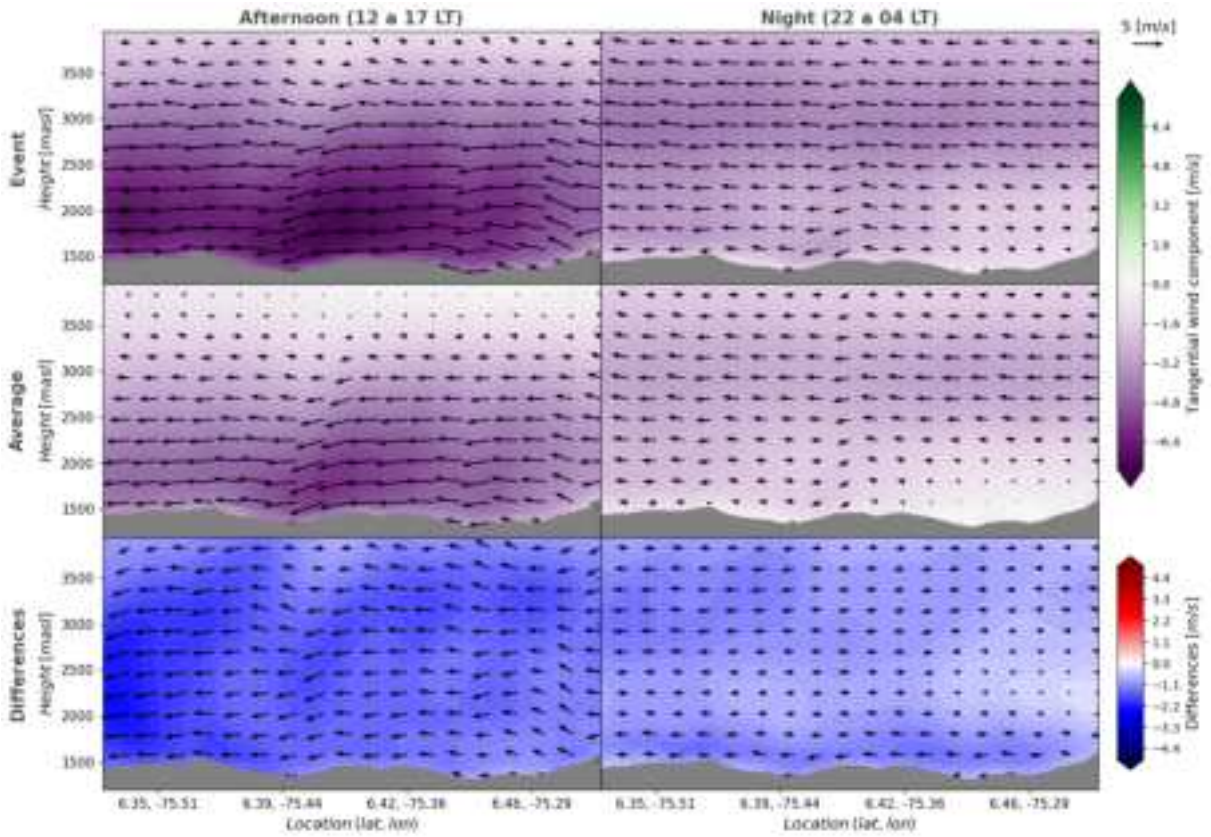


Figura 249: Vientos verticales y tangenciales (flechas) a un corte a lo largo del eje al Norte del Valle de Aburrá (ver panel superior en Figura 247b). Los contornos de colores denotan el comportamiento de los vientos tangenciales (a lo largo del eje del valle). De arriba a abajo, los paneles muestran los campos promedio durante los días con afectación a la calidad del aire por fuentes externas (panel superior), los campos promedio durante febrero y marzo (panel del centro), y las diferencias entre los eventos y los campos promedio (panel inferior).

Los resultados obtenidos destacan la importancia de continuar investigando y monitoreando el comportamiento vertical de la atmósfera en el norte del Valle de Aburrá. Dado que estos hallazgos se basan en simulaciones con modelos atmosféricos, contar con observaciones in situ sería fundamental para validar y mejorar el desempeño de estas herramientas en esta zona del valle.

Esta investigación sienta una base para identificar los mecanismos atmosféricos que favorecen el transporte regional de aerosoles, así como los procesos locales que modulan el ingreso y acumulación de contaminantes atmosféricos en el Valle de Aburrá. Estos análisis no solo aportan al conocimiento científico, sino que también fortalecen las capacidades predictivas y las estrategias de gestión de la calidad del aire en la región.

Seguimiento y monitoreo de aerosoles carbonáceos

La Red de Monitoreo de Calidad de Aire del Valle de Aburrá, durante el contrato CCT 016 de 2024, contó con 2 analizadores de carbono total Magee TCA08 ubicados en la estación Tráfico Centro en el Distrito de Medellín y en la Casa de Justicia en el municipio de Itagüí (Figura 250). Estos analizadores de Carbono Total TC, acoplados a etalómetros (instrumento para la medición del Black Carbon equivalente-BCe, que es un estimativo del Carbono Elemental, EC), apoya la caracterización de partículas carbonáceas del PM2.5. La materia carbonácea contenida en el PM2.5, incluye el Carbono Orgánico (OC) y el Carbono Elemental (EC). El Carbono Orgánico (OC), es una mezcla de cientos de compuestos orgánicos que no absorben la luz visible, formados por reacciones químicas o mecanismos de adsorción, entre el carbono, hidrógeno y otros elementos como oxígeno, O_2; azufre, S; nitrógeno, N; fósforo, P, y cloro, Cl. El Carbono Elemental (EC), es una forma de carbono esencialmente puro. El carbono total (TC) es la suma del OC y el EC medidos. Diferentes estudios científicos informan sobre rangos de valores de la relación OC/EC, los cuales permiten inferir fuentes tales como quema de biomasa (5.1 – 16.7), emisiones vehiculares (principalmente asociados a diésel y gasolina) con valores entre 1 y 4.2, combustión de carbón (2.7 – 3.0), combustión diésel (0 - 1), combustión a gasolina (2.05 – 2.36) y emisiones de cocción de alimentos (4.3 – 7.7) (Pani S.K., 2019).

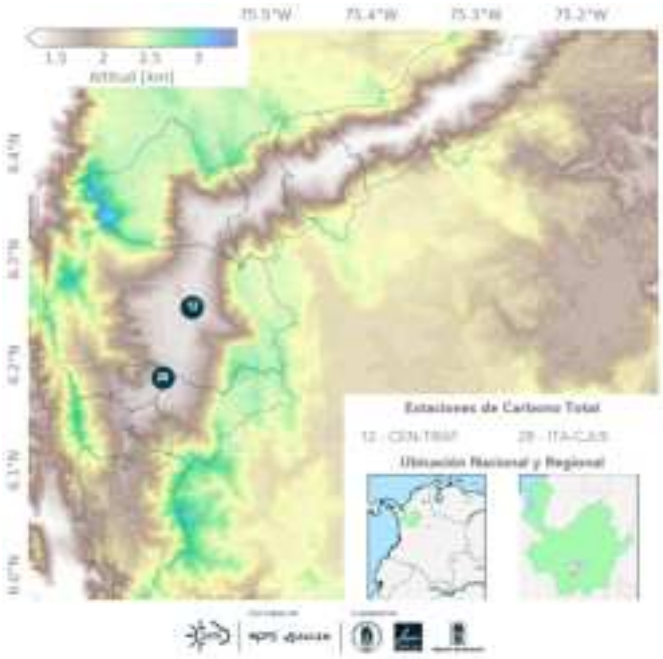


Figura 250: Ubicación de las estaciones de carbono total que operaron durante el Contrato CCT 016 de 2024.

El equipo ubicado en la estación Tráfico Centro (CEN-TRAF) operó durante toda la vigencia del contrato CCT 016 de 2024. Los resultados de este equipo han sido fundamentales para avanzar en el conocimiento de la caracterización del material carbonáceo presente en el material particulado PM2.5 en la estación Tráfico Centro (CEN-TRAF). Por su parte, el equipo ubicado en la estación Casa de Justicia (ITA-CJUS) presentó problemas técnicos que impidieron el registro de datos válidos hasta el 1 de abril de 2024. A partir de esta fecha operó con normalidad hasta el 27 de mayo de 2025, cuando presentó una falla en uno

de los actuadores encargados de direccionar el flujo a través de las dos cámaras de medición. Debido a esta situación, el equipo finalizó la vigencia del contrato sin registrar datos, quedando a la espera de ser reparado. Los resultados obtenidos durante su período de funcionamiento permitirán estimar el aporte del material carbonáceo presente en el material particulado PM2.5 en esta estación.

En la Figura 251 se presenta el ciclo diurno de la relación OC/EC para cada mes en la estación Tráfico Centro (CEN-TRAF). Se observa que la relación OC/EC alcanza sus valores más altos entre las 21:00 y las 03:00 horas. Este pico sugiere una mayor influencia de la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOC), posiblemente favorecida por procesos de acumulación nocturna. Por el contrario, los valores más bajos se presentan entre las 05:00 y las 08:00 horas, y nuevamente entre las 14:00 y las 18:00 horas, lo que indica una mayor proporción de carbono elemental asociada a emisiones primarias, principalmente de origen vehicular. Estos períodos coinciden con los momentos de mayor actividad en la movilidad urbana, típicos del inicio y cierre de la jornada laboral y académica en el Valle de Aburrá. Es importante mencionar que los meses de marzo, junio y julio presentan las relaciones OC/EC más elevadas durante la madrugada y en horas de la noche.

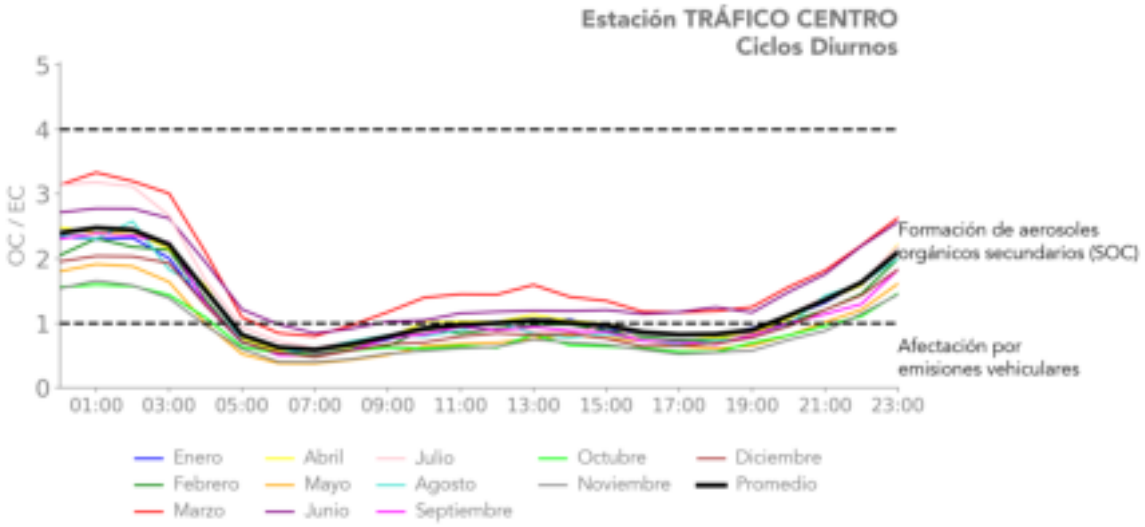


Figura 251: Ciclo diurno de la relación OC/EC de la estación Tráfico Centro durante el Contrato CCT 016 de 2024.

En la Figura 252, se presenta el ciclo diurno de la relación OC/EC para cada mes de operación en la estación Casa de Justicia (ITA-CJUS). Se observa que durante todo el día la relación OC/EC se mantiene por encima de 1, lo cual indica una influencia combinada de emisiones vehiculares y de procesos de formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOC). Los resultados anteriores sugieren que en la estación Casa de Justicia, la cual está considerada como una estación poblacional en el marco del Plan Operacional para enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica -POECA-, son importantes los procesos que dan lugar a la generación de aerosoles orgánicos secundarios y que pueden estar asociados a las dinámicas locales del punto de medición o al transporte atmosférico propio del Valle de Aburrá. Los valores más altos de la relación OC/EC se registran en dos intervalos principales: entre las 22:00 y las 04:00 horas, y entre las 11:00 y las 16:00 horas. En estos períodos, se observa que la principal fuente de aerosoles carbonáceos proviene fundamentalmente de la formación de aerosoles orgánicos secundarios, además de sugerir afectaciones por quemas de biomasa, ya que cuando esta relación alcanza valores cercanos a 4, se consideran importantes estos aportes. En las horas de la madrugada, los valores elevados pueden estar

asociados a procesos de acumulación de emisiones locales y posiblemente al transporte de contaminantes. Ademas, se destaca el mes de septiembre, con relaciones OC/EC notablemente altas, algunas muy cercanas a 4, lo cual sugiere eventos de afectación por quemas de biomasa o incendios de cobertura vegetal, así como posibles aportes industriales asociado a la quema de combustibles.

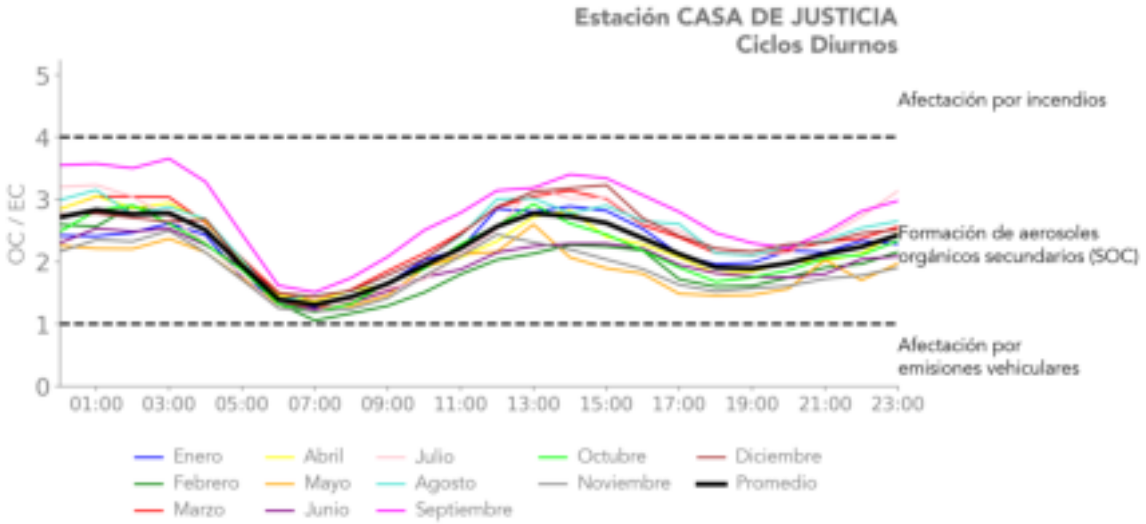


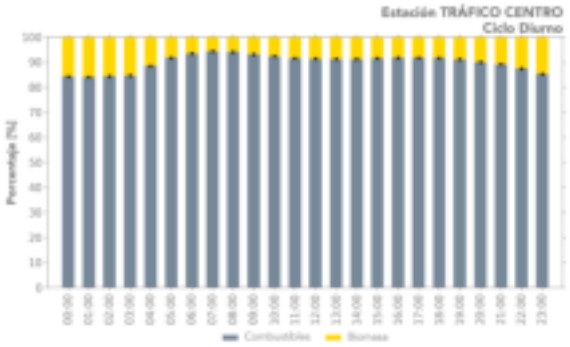
Figura 252: Ciclo diurno de la relación OC/EC de la estación Casa De Justicia durante el Contrato CCT 016 de 2024.

Por otra parte, y con el objetivo de complementar las mediciones de carbono orgánico (OC) y carbono elemental (EC), durante el Contrato CCT 016 de 2024 se realizó seguimiento a las concentraciones de black carbon (carbono negro), principalmente aquel asociado a la quema de biomasa. Esto se llevó a cabo mediante mediciones con equipos que monitorean el black carbon con resolución minutal. Durante la vigencia del contrato, la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá contó con tres etalómetros Aethalometer AE33 en operación, ubicados en las estaciones Tráfico Centro (CEN-TRAF), Casa de Justicia (ITA-CJUS) y Parque de las Aguas (BAR-PDLA). Estos equipos permiten estimar la contribución relativa de la quema de combustibles fósiles y quema de biomasa en el contenido de black carbon presente en la atmósfera, constituyendo una herramienta fundamental para identificar la influencia de los incendios de cobertura vegetal en la calidad del aire de la región.

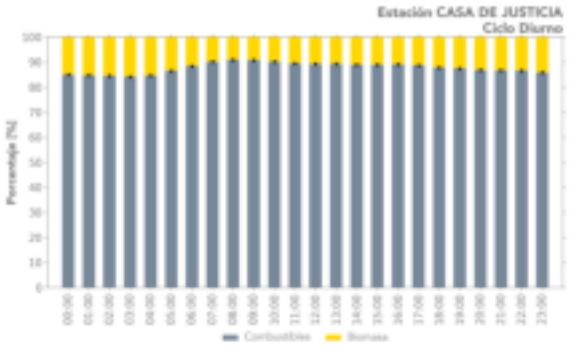
Gracias a las mediciones realizadas por estos equipos, es posible estimar el aporte relativo del Black Carbon proveniente de la quema de combustibles fósiles (principalmente emisiones vehiculares) y de la combustión de biomasa, incluyendo incendios forestales regionales o quemas locales. La Figura 253 muestra el ciclo diurno del aporte porcentual horario de ambas fuentes al Black Carbon, para el período comprendido entre el 01 de febrero de 2024 y el 07 de julio de 2025. Se incluyen datos de tres estaciones: Tráfico Centro (CEN-TRAF) (a), Casa de Justicia (ITA-CJUS) (b) y Parque de las Aguas (BAR-PDLA) (c).

En general, en las tres estaciones se observa que el Black Carbon asociado a quema de combustibles fósiles representa la mayor proporción durante todo el día, superando en promedio el 85 %. No obstante, se identifican patrones horarios en los que el aporte relativo a la quema de biomasa se incrementa, principalmente entre las 22:00 y las 04:00 horas. Este comportamiento sugiere la influencia de eventos de quema en horas nocturnas, tanto por fuentes externas como por fuentes locales. Específicamente, las

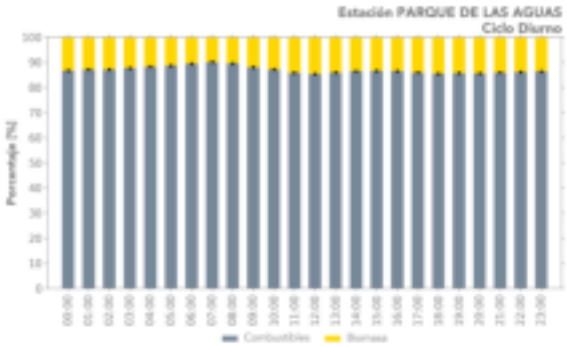
estaciones CEN-TRAF e ITA-CJUS presentan una franja nocturna más marcada de aporte por quema de biomasa, mientras que en BAR-PDLA el patrón se mantiene más uniforme, aunque también con un leve incremento en las horas mencionadas. Estos resultados reflejan cómo tanto las condiciones locales como las fuentes externas influyen en la composición del Black Carbon observado en cada estación.



(a) Estación CEN-TRAF.



(b) Estación ITA-CJUS.



(c) Estación BAR-PDLA.

Figura 253: Ciclo diurno de la contribución porcentual en las concentraciones de black carbon asociada a quema de combustibles fósiles y a quema de biomasa en las estaciones CEN-TRAF, ITA-CJUS y BAR-PDLA.

Análisis de la variabilidad espacio-temporal del PM2.5 en las concentraciones del Valle de Aburrá, a partir de las mediciones de la Red de Ciudadanos Científicos en bicicleta

Ciudadanos Científicos es una estrategia de ciencia, tecnología y educación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, operada por el Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá SIATA la cual, a través del desarrollo, ensamble, calibración e instalación de sensores, permite a la ciudadanía hacer seguimiento a la calidad del aire, mediante sensores fijos o móviles, y al ruido ambiental, para el caso de las Nubes fijas. De esta manera, la estrategia de Ciudadanos Científicos busca despertar la conciencia de las comunidades acerca de su papel y responsabilidad para contribuir al cuidado y mejoramiento de la calidad del aire en la región, fortaleciendo su capacidad de participación en los espacios de gobernanza y

enriqueciendo investigaciones con los datos obtenidos como aporte a la construcción de políticas públicas para cuidar la salud de la población.

Algunos de los sensores que hacen parte de la Red de Ciudadanos Científicos, se instalan en las bicicletas de los ciudadanos que acogieron de manera voluntaria un sensor móvil de bajo costo desarrollado por el proyecto SIATA. Esta información está disponible a través del enlace `https://siata.gov.co/biciscc/`. Tanto sensores como aplicativos han sido desarrollados por el equipo de profesionales del proyecto SIATA, reafirmando su apuesta por la ciencia y la innovación local. Los sensores transmiten datos de concentración de material particulado de 2.5 micrómetros o menos cada 10 segundos y tienen instalado un GPS.

En esta sección se presentan los resultados a partir de los sensores instalados en bicicletas, del monitoreo de PM2.5 durante la vigencia del contrato 016 de 2024, comprendida entre el 1 de febrero del 2024 y el 7 de julio del año 2025. En este período se obtuvieron datos de 39 sensores, considerando aquellos que enviaron datos al menos una vez durante el mes. Para los análisis presentados de los sensores que enviaron datos, se consideraron como válidos aquellos que fueron medidos en rutas significativas, es decir que sólo se tuvieron en cuenta los recorridos continuos de cada sensor con distancias de recorridos iguales o superiores a 300 m, que corresponden a aproximadamente a tres cuadras.

La Figura 254 presenta el número de viajes y número de sensores activos para todos los meses durante el tiempo de vigencia del contrato. Esta variación es calculada teniendo en cuenta los sensores con recorridos superiores a los 300 m y que operaron durante el período de análisis en los diferentes municipios del Valle de Aburrá y el Distrito de Medellín. En total, se registraron 1685 viajes correspondientes a los 39 sensores activos, con un total de 15982 km recorridos.

Se observa que el período con mayor actividad tanto con respecto a los sensores activos como el número de viajes corresponde a la primera mitad del año 2024 y que paulatinamente se han ido reduciendo ambos hasta alcanzar valores relativamente constantes a partir de octubre del mismo año, lo cual sugiere el compromiso de los usuarios con la estrategia.



Figura 254: Serie mensual de número de viajes y número de sensores activos para los sensores instalados en bicicletas de la Red de Ciudadanos Científicos.

Por otra parte, en la Figura 255 se presenta la relación entre el número de viajes y el número de sensores activos cada mes. Esta relación permite observar la frecuencia del uso de cerca de los 50 sensores asignados

y puede interpretarse como un indicador de la constancia que tienen los ciudadanos cada mes, con el uso del sensor. Se evidencia que este parámetro permite un análisis desde el cual se observa que si bien en el año 2025 se han reducido el número de sensores activos, éstos han sido usados en mayor cantidad de recorridos (tal es el caso de los meses de marzo, abril y junio del presente año) mostrando un índice igual o mayor con respecto a los mismos meses del año pasado.

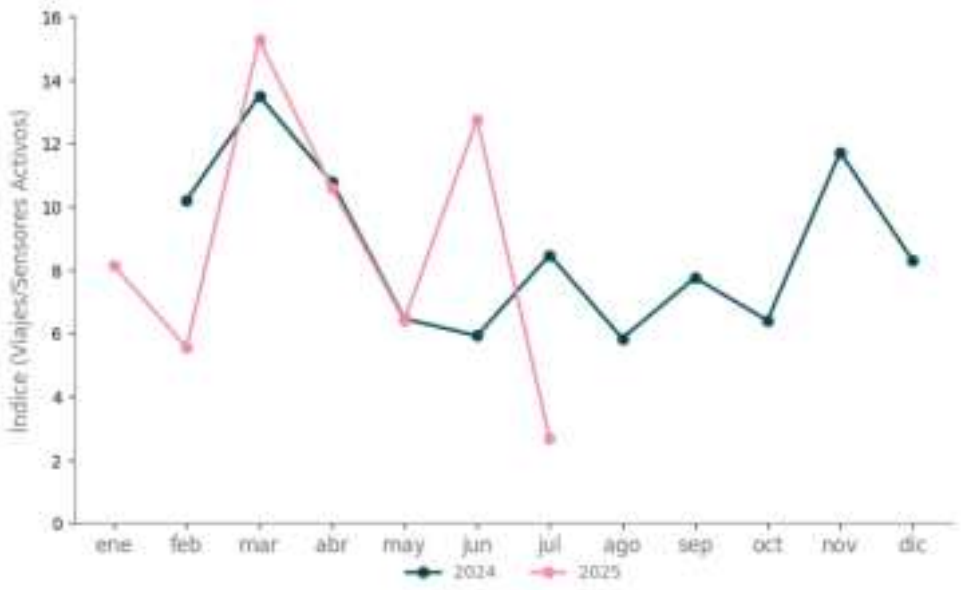


Figura 255: Relación entre número de viajes y número de sensores activos para los dispositivos instalados en bicicletas de la Red de Ciudadanos Científicos.

Durante el período de ejecución del contrato 016 de 2024, se analizaron los viajes por franjas horarias. De esta manera, la Figura 256 presenta la variación mensual promedio de PM2.5 de todos los recorridos considerados en el análisis, teniendo en cuenta diferentes períodos de tiempo (06:00 - 09:00, 09:00 - 12:00, 12:00 - 15:00, 15:00 - 18:00, 18:00 - 21:00 y 21:00 - 23:00). Cabe recordar que los cálculos presentados solo consideran los sensores instalados en bicicleta con recorridos superiores a los 300 m, que enviaron datos dentro de los límites físicos considerados válidos desde el equipo de Calidad del Aire y que operaron en los diferentes municipios del Valle de Aburrá.

Si bien se observan picos altos para todos los rangos horarios - si se tomase, por ejemplo, como límite el cuartil 85 de cada rango por día, se encuentra que los períodos en los que la concentración supera este límite son principalmente de 6:00 a 9:00 horas y de 15:00 a 18:00 horas. Este incremento es característico en el Valle de Aburrá- , y corresponde al primer pico del día en el cual se reportaron mayor cantidad de datos (28.79 %) además de la mayor concentración promedio, 22.58 $\mu g/m^3$, seguido del rango 15:00 a 18:00 con un 19.95 %.

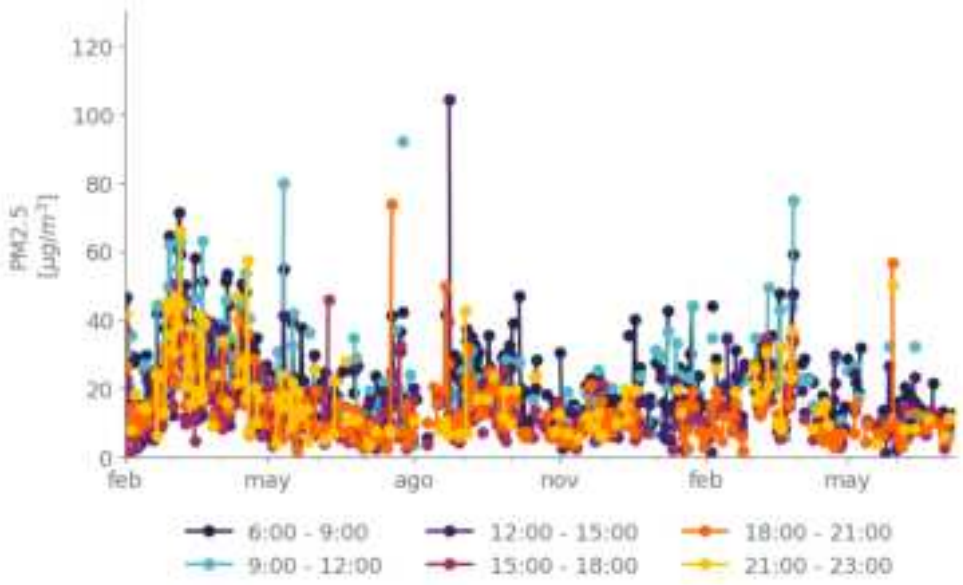


Figura 256: Serie diaria de PM2.5 para los sensores instalados en bicicleta de la red de Ciudadanos Científicos que operaron durante la vigencia del contrato 016 de 2024 en el Valle de Aburrá, en rangos horarios.

A partir de los viajes considerados válidos para el análisis, la Figura 257 muestra el ciclo diurno de las concentraciones de PM2.5 para el período previamente estipulado, tanto para las estaciones oficiales de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire como para los sensores de Ciudadanos Científicos en Bicicleta, evidenciando varios picos durante el día. Los valores de concentración más altos obtenidos en el período de medición se presentan en las horas de la mañana de 06:00 a 12:00 y 18:00 a 21:00. La Figura también muestra que este incremento en las concentraciones de PM2.5 es usual en el área metropolitana del Valle de Aburrá, lo cual permite concluir que los ciclistas están expuestos a la misma variabilidad diurna en las concentraciones de PM2.5, registrados en la red oficial, lo cual podría estar asociado a que los recorridos en bicicleta se hacen, en general, por las ciclorrutas disponibles y por las vías de tráfico vehicular y no por vías alternas.

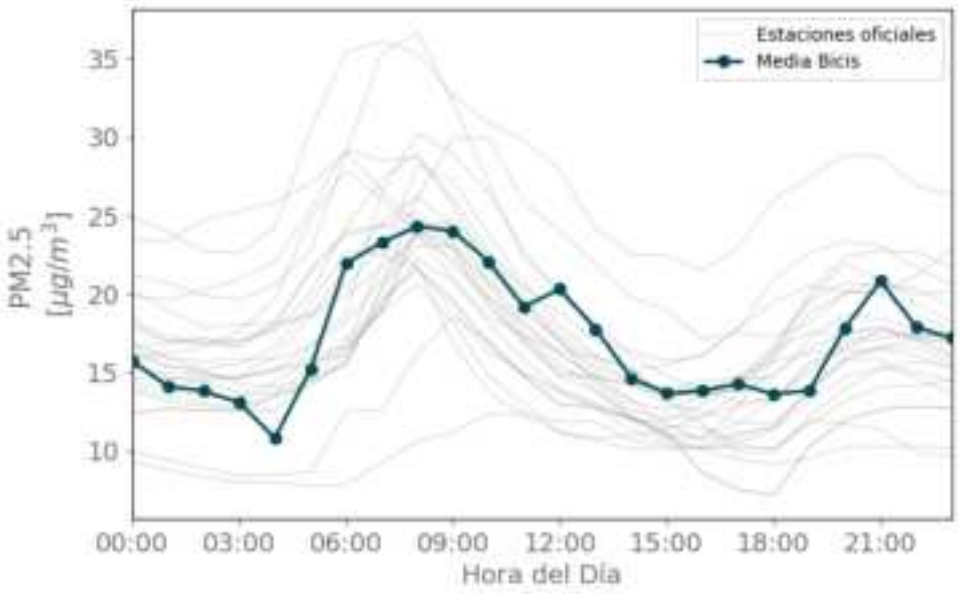


Figura 257: Ciclo diurno promedio de PM2.5 para los sensores instalados en bicicleta, de la red de Ciudadanos Científicos calculado para el período de la vigencia del contrato 016 de 2024

El resumen de las concentraciones de PM2.5 promedio obtenidas a partir de la Red de Ciudadanos Científicos en Bicicleta durante el período de vigencia del contrato 016 de 2024, se muestra en la Figura 258. Se incluye la distribución de las concentraciones en las principales rutas de los ciudadanos en bicicleta y el mapa de calor relacionado con el número de registros de viaje. En este último, el gradiente de la distribución está asociado al número de datos por ubicación y la magnitud de la concentración de PM2.5. La variación del color es la intensidad y explica cómo los viajes y la concentración de PM2.5 se agrupan y varían en el espacio. El color rojo en la Figura de la derecha representa mayor número de datos en esa ubicación. Estos puntos de calor sugieren que un mayor número de personas en bicicleta pasan por esa ubicación y están expuestas a mayor concentración de PM2.5.

De acuerdo con el análisis de resultados, se concluye finalmente que las rutas en las cuales se midieron mayores concentraciones de PM2.5 y en donde además estos valores se encontraron en la mayoría de horas durante el día son las siguientes: Avenida Carrera 48, Calle 12 Sur, Carrera 55, Calle 44, Carrera 65, Calle 72, Carrera 62, Carrera 80, Carrera 53, Calle 37, Calle 50, Carrera 63, Calle 58, Carrera 51, Carrera 48, Carrera 42 y Carrera 57. Todas las vías anteriores corresponden al Distrito de Medellin

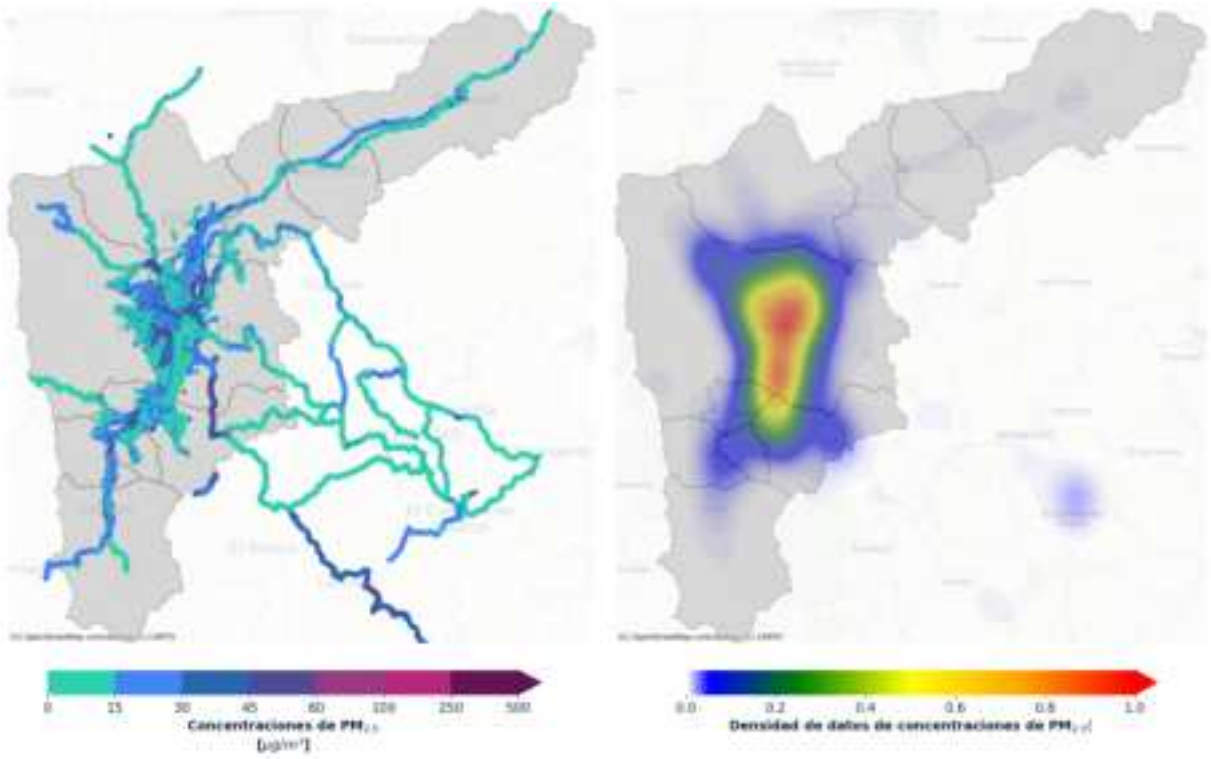


Figura 258: Resumen de las concentraciones de PM2.5 obtenidas a partir de los sensores activos instalados en bicicletas de la red de Ciudadanos Científicos que operaron durante la vigencia del contrato 016 de 2024 en el Valle de Aburrá. El panel de la izquierda muestra la distribución de las concentraciones de PM2.5 mientras que el panel de la derecha muestra el mapa de calor, donde el gradiente de la distribución está asociado al número de datos por ubicación y la magnitud de la concentración de PM2.5; la variación del color es la intensidad y explica cómo los viajes y la concentración de PM2.5 se agrupan y varían en el espacio.

Estudio de la formación de PM2.5 secundario en el Valle de Aburrá

En el Valle de Aburrá, el PM2.5 es el contaminante más crítico que afecta la calidad del aire, al presentar históricamente concentraciones que pueden poner en riesgo la salud de la población (AMVA (2024)). Adicionalmente, debido a su composición química puede tener otros impactos en salud, en función de la toxicidad de sus componentes (AMVA (2018)). Las fuentes del PM2.5 pueden ser de origen primario o secundario, el primero se debe principalmente a la combustión de combustibles fósiles y quemas de biomasa, mientras que el segundo se debe a la interacción química de contaminantes primarios en la atmósfera, favoreciendo la producción de aerosoles, que pueden tener una composición orgánica o inorgánica (Gao et al. (2020)). Los aerosoles orgánicos secundarios (SOA) adicional a los procesos de condensación en la interfase acuosa en la atmósfera, también se forman a partir de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (VOC) (con origen antropogénico y biogénico) y la partición o segmentación subsecuente de compuestos orgánicos semivolátiles desde la fase gaseosa hacia la fase aerosol o sobre partículas pre-existentes (Alam et al. (2024)).

Basado en lo expuesto previamente, durante la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024, se inició con el estudio del conocimiento del PM2.5 de origen secundario. Por lo anterior, se propuso como metodología en una primera fase, estudiar en detalle los mecanismos de reacción fotoquímica de contaminantes primarios, tales como el SO_2 y el NO_x, que son precursores de la formación del PM2.5 secundario, con el objetivo de analizar variables relevantes que contribuyen a la formación de aerosoles secundarios, tales como parámetros meteorológicos. Posteriormente, una segunda fase del estudio, se realizará a partir de datos satelitales de diferentes fuentes de información y otras investigaciones, en torno a la estimación de los perfiles verticales de contaminantes atmosféricos.

Durante la vigencia del CCT 016 de 2024 se avanzó en la primera fase de la investigación planteada, iniciando con la revisión de la información que permitiera entender los mecanismos de reacción química mediante los cuales se da la formación de aerosoles secundarios. Si se desea buscar mayor detalle de la investigación realizada y otros resultados, se puede remitir al documento en extenso del Anexo D. Estudio de la formación de PM2.5 secundario en el Valle de Aburrá. A continuación, se presentan los modelos que facilitaron acercarse a este conocimiento.

Revisión en la literatura de los mecanismos de reacción de los Modelos de Transporte Químico de Calidad del Aire

Los modelos de calidad del aire actualmente son usados para estimar las concentraciones de contaminantes criterio o especiales, los cuales simulan o representan las dinámicas y los procesos físicos, químicos y radiativos en la atmósfera. Sin embargo, es necesario comprender que estos modelos poseen incertidumbres asociadas a la calidad de los datos de entrada y al conocimiento limitado para la descripción de ciertos fenómenos (Gavidia-Calderon et al. (2024)). A continuación, se exponen las características de reacción más relevantes, tales como especies químicas y reacciones principales, que brindarán detalles de la dinámica de formación atmosférica, fundamentalmente de los aerosoles secundarios, para su estudio en el Valle de Aburrá.

Modelo de transporte químico Isorropía

Isorropía es un modelo de equilibrio termodinámico de aerosoles inorgánicos multifásico, donde el mecanismo de reacción química propuesto ha sido usado para alimentar diferentes modelos químicos computacionales de calidad del aire, que estiman las concentraciones y el estado físico de aerosoles atmosféricos

inorgánicos, a partir de la información de inventarios de emisiones tanto a escala local como global (Nenes et al. (1998, 1999)).

Las especies analizadas por el modelo Isorropía son los aerosoles compuestos por sodio, amonio, cloro, sulfatos, nitratos y agua, en las fases sólida, líquida y gaseosa. En la fase sólida se consideran principalmente las sales de estos elementos, en la fase líquida se analizan los cationes, aniones y agua y por último en la fase gaseosa están el amoníaco, el ácido nítrico, el ácido clorhídrico y el agua. Estas especies están involucradas en un set de 15 reacciones en equilibrio (Nenes et al. (1999)). La clasificación de los aerosoles del modelo Isorropía han evidenciado la relevancia del azufre en la tipología de diversos aerosoles, permitiendo inferir la importancia de entender la actividad química del azufre en las dinámicas atmosféricas.

El modelo de Isorropía (Nenes et al. (1998, 1999)) menciona el concepto de la delicuescencia química que es una propiedad de un compuesto, especialmente sales, para atraer o captar humedad del aire y formar una disolución acuosa. La anterior propiedad, es relevante en el análisis termodinámico para la estabilidad de las fases acuosa y gaseosa de los aerosoles, en un sistema multicomponente o individual, ya que el modelo estima el estado de disolución de los aerosoles en función de la humedad relativa del sistema, siendo esta propiedad, de las más representativas en el proceso de formación de PM2.5 secundario.

Modelo de transporte químico RAQMS

El RAQMS es un modelo euleriano tridimensional tipo esfera y con un sistema coordenado sobre el terreno (Li et al. (2021a)). Este modelo evalúa los principales procesos químicos y físicos tanto de los gases como de los aerosoles en la tropósfera, incluidos el movimiento advectivo, la difusión, la deposición y la química multifase. Emplea el mecanismo de reacción CBM-IV (mecanismo carbon bond IV) que es usado para representar las reacciones químicas en fase gaseosa y ha sido modificado al incluir especies orgánicas y reacciones de oxidación para producir productos orgánicos condensables. En este modelo se toman en cuenta además, 9 reacciones químicas entre el polvo mineral y otros gases y 3 reacciones entre sal marina y gases, adicionalmente se complementa con las reacciones que proporciona el modelo de Isorropía para el equilibrio termodinámico de aerosoles inorgánicos. Acorde al mecanismo CBM-IV, las emisiones totales de compuestos orgánicos volátiles-VOC fueron clasificadas en alcanos, alquenos, tolueno, xileno, formaldehido y acetaldehido. Por otro lado, es importante destacar que el modelo incorpora un mecanismo de reacción en medio acuoso considerando los compuestos orgánicos primarios semivolátiles (SVOC) e intermedios (IVOC) para la formación de SOA. De los SVOC e IVOC se resaltan tanto el glioxal como el metilglioxal, los cuales se consideran precursores claves en la formación de SOA, mediante absorción acuosa que se producen a partir de fuentes primarias y oxidación química tanto de especies aromáticas como del isopreno.

Los anteriores modelos resaltan la necesidad e importancia de estudiar los compuestos intermedios de reacción secundaria y los procesos de oxidación de estas especies.

En la actividad de investigación fue abordado el análisis particular de diferentes estudios en relación con la influencia de especies de interés en la formación de aerosoles secundarios. Se destaca la fotooxidación tanto del tolueno como del isopreno (Chen et al. (2019b); Kirkby et al. (2019)). Los estudios relacionados con la oxidación de especies químicas se realizan normalmente en cámaras cerradas para llevar a cabo experimentos de formación de aerosoles secundarios a partir de la fotooxidación de diferentes concentraciones de precursores.

Análisis del comportamiento de las concentraciones de los precursores (con registros en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá) y otras especies químicas constituyentes del PM2.5 secundario

De acuerdo con la literatura, se puede inferir para el análisis del comportamiento diurno de los óxidos de nitrógeno, que en las horas de la mañana el dióxido de nitrógeno (NO_2) reacciona con los radicales OH de la atmósfera para producir ácido nítrico que posteriormente reacciona con el amonio para formar nitrato de amonio en un proceso de fraccionamiento gas-partícula en una fase acuosa (Wang et al. (2023); Xu et al. (2020)). Por otro lado, en las horas de la noche, el NO_2 reacciona con el ozono remanente que se formó en el día produciendo nitratos (NO_3). Este último mediante reacciones de equilibrio térmico con el NO_2 da como resultado el pentaóxido de dinitrógeno, N_2O_5 y, secuencialmente, forma nitratos acuosos, siendo éste una fuente de radicales de nitrato en la formación de SOA y nitratos orgánicos a partir de la oxidación de BVOC, (Wang et al. (2023)).

Con base en lo expuesto, se realizó el análisis del comportamiento de las concentraciones de los contaminantes PM2.5, NO_2, NO, SO_2 y OC en 3 estaciones ubicadas en el Distrito especial de Medellín (CEN-TRAF), en el municipio de Itagüí (ITA-CJUS) y en el municipio de Girardota (GIR-EPM).

En las estaciones CEN-TRAF e ITA-CJUS se muestran adicionalmente las mediciones de carbono orgánico (OC), el cual es una de las fracciones del carbono total que componen la concentración del PM2.5, siendo el OC el que está constituido de diferentes especies químicas orgánicas enlazadas al elemento de carbono y puede tener origen tanto primario como secundario.

Evaluación del comportamiento de aerosoles carbonáceos absorbentes de luz (Brown Carbon-BrC), en las estaciones de monitoreo de calidad del aire

Los aerosoles secundarios poseen propiedades ópticas características asociadas a la absorción de luz. Aquellos aerosoles carbonáceos orgánicos que absorben radiación solar en el espectro visible, se engloban dentro del brown carbon (BrC) el cual afecta directamente al forzamiento radiativo, contribuyendo con el cambio climático (Jiang et al. (2018)). El BrC proviene tanto de emisiones primarias como de reacciones secundarias en la atmósfera, en los que están involucrados los compuestos orgánicos volátiles. La fuente de origen primario de mayor importancia del BrC es la quema de biomasa (Yan et al. (2018)). De acuerdo con lo anterior y debido a las diferentes fuentes de emisión, el BrC posee una compleja composición química.

Los estudios de caracterización química del PM2.5 realizados en el Valle de Aburrá, muestran un aporte significativo (aporte porcentual entre el 30 y 60) asociado a la materia carbonácea expresada como carbono elemental (EC) y carbono orgánico (OC) (AMVA (2019)). Teniendo en cuenta que el brown carbon (BrC) es un constituyente importante del OC Yan et al. (2018), se analizan los patrones mensuales de las concentraciones del BrC en la estación CEN-TRAF para el año 2022. Estos análisis se realizaron considerando al tolueno como precursor del BrC en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_X). El tolueno como compuesto orgánico volátil, es aportado por la quema de combustibles fósiles así como también por la quema de biomasa y es un contaminante que es monitoreado desde la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá (medición de BTEX en la estación CEN-TRAF), lo cual favorece la evaluación de la información, conjuntamente con lo que se podría evaluar con los resultados de los equipos etalómetro y de carbono total (TCA), ubicados en la misma estación.

En la Figura 475 se observan los ciclos diurnos promedio mensuales del carbono orgánico (OC), el Brown Carbon (BrC) y el tolueno para el año 2022. El BrC a lo largo del año tiene un comportamiento bimodal, con los mayores picos alrededor de las 06:00 y a las 20:00 horas. Se logra apreciar además, que los meses de

febrero y marzo alcanzan valores más altos en comparación al resto del año, asociado probablemente a la afectación por el ingreso de material particulado transportado desde regiones en el norte del país, donde se reportan, típicamente para estos meses, un alto número de puntos calientes probablemente asociados a incendios de cobertura vegetal.

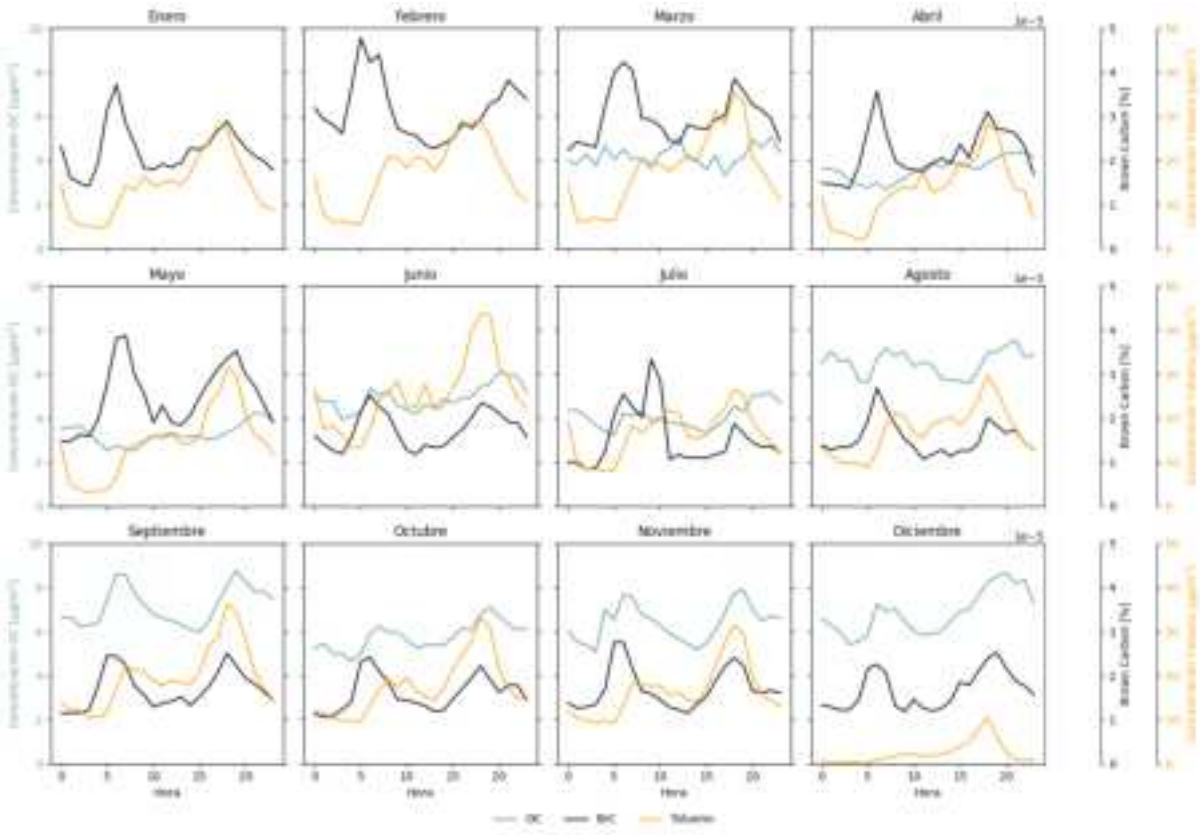


Figura 259: Comportamiento mensual de los compuestos de brown carbon (BrC), tolueno y carbono orgánico en la estación CEN-TRAF en el año 2022.

El BrC tiene un origen primario principalmente debido a la quema de biomasa, lo que podría explicar las altas concentraciones en el primer trimestre del año, para el segundo semestre las altas concentraciones pueden estar relacionadas con procesos de reacción química donde se forman contaminantes secundarios en la atmósfera. Diferentes investigaciones han mostrado que el aporte de la fotooxidación del tolueno al BrC es significativo (Lin et al. (2015)). Lo anterior se puede observar con mayor claridad en el mes de febrero, donde el comportamiento promedio del tolueno de la Figura 475, indica el pico máximo nocturno entre las 15:00 y 20:00 horas, y le sigue a una degradación al final del día coincidiendo con un pico de BrC. Esta reducción en las concentraciones de tolueno, durante los primeros cinco meses del año, coinciden también con el primer pico o máximo del BrC desplazado a la derecha, en las horas de la mañana. Para el segundo semestre del año los picos de tolueno superan los picos de BrC en las horas de la tarde, lo cual puede estar asociado a temperaturas mas altas que inciden en la volatilización de este compuesto, manteniéndolo en su forma gaseosa. El tolueno también reacciona con otros compuestos orgánicos volátiles presentes en la atmósfera, favoreciendo la formación de aerosoles orgánicos. Por otro lado, se presenta un comportamiento bimodal del OC en el último cuatrimestre del año, indicando que,

probablemente, las condiciones meteorológicas favorecen la formación de aerosoles orgánicos secundarios en este período. Se aclara que la medición que permite obtener el valor de OC inició a partir del mes de marzo de 2022.

Evaluación de la dependencia entre las concentraciones de contaminantes atmosféricos y la meteorología en la estación ITA-CJUS

En la estación ubicada en la Casa de Justicia (ITA-CJUS) en el municipio de Itagüí, se evaluó el efecto de las variables de la temperatura y humedad relativa sobre las concentraciones del PM2.5 y el carbono orgánico (OC), para el segundo semestre del 2024 (entre el 1 de julio y el 30 de noviembre).

En la Figura 476 se presenta el ciclo diurno de la humedad relativa y de las concentraciones de PM2.5 y OC para el período de análisis. El comportamiento de las 3 variables muestra un comportamiento bimodal a lo largo del día, con un pico máximo alrededor de las 07:00 horas y un segundo máximo aproximadamente a las 20:00 horas, asociado principalmente a las condiciones de movilidad típicas del Valle de Aburrá. Cabe destacar que las concentraciones de PM2.5 y OC exciben el mismo comportamiento en función de la variabilidad de la humedad relativa, con excepción en las últimas horas del día luego de las 20:00 horas, que en el caso de la humedad relativa tiende a aumentar progresivamente hasta un valor máximo del otro día, mientras que las concentraciones de PM2.5 y OC tienden a disminuir durante la noche y empiezan a aumentar desde las 04:00 horas aproximadamente.

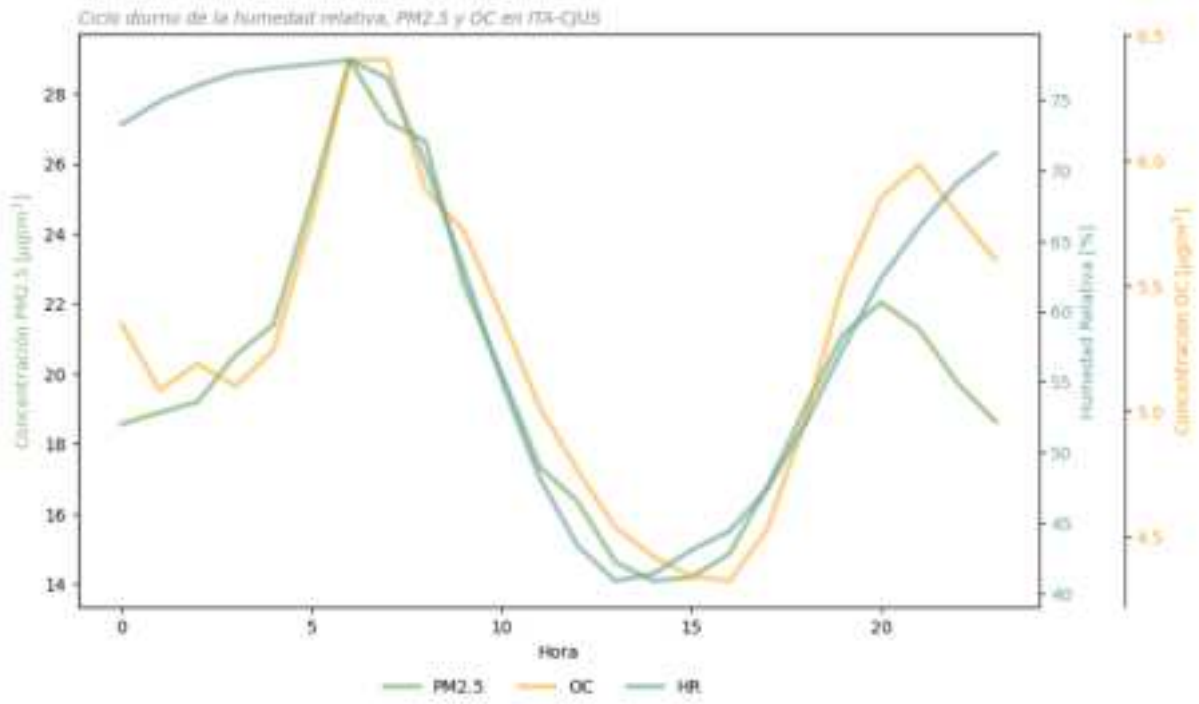


Figura 260: Ciclo diurno de la humedad relativa y de las concentraciones de PM2.5 y OC en la estación ITA-CJUS en el segundo semestre del 2024

De la Figura 476 se puede observar que las máximas concentraciones tanto de PM2.5 como del OC coin-

ciden con el registro máximo de la humedad relativa así como también de los respectivos mínimos de cada variable. Para verificar la anterior dependencia, en la Figura 477 se puede observar el comportamiento de las concentraciones del PM2.5 y el OC en función del valor de la humedad relativa. En esta figura se puede observar claramente cómo las concentraciones de PM2.5 aumentan con el aumento de la humedad relativa, con mayores registros en un rango de humedad relativa entre el 60 y el 80 % aproximadamente, mientras que para el OC las concentraciones tienen un comportamiento ligeramente constante a humedades mayores al 40 %. Cabe destacar que, las concentraciones más bajas en el período de evaluación en términos generales, se presentaron a bajos valores de humedad relativa (menor al 35 %).

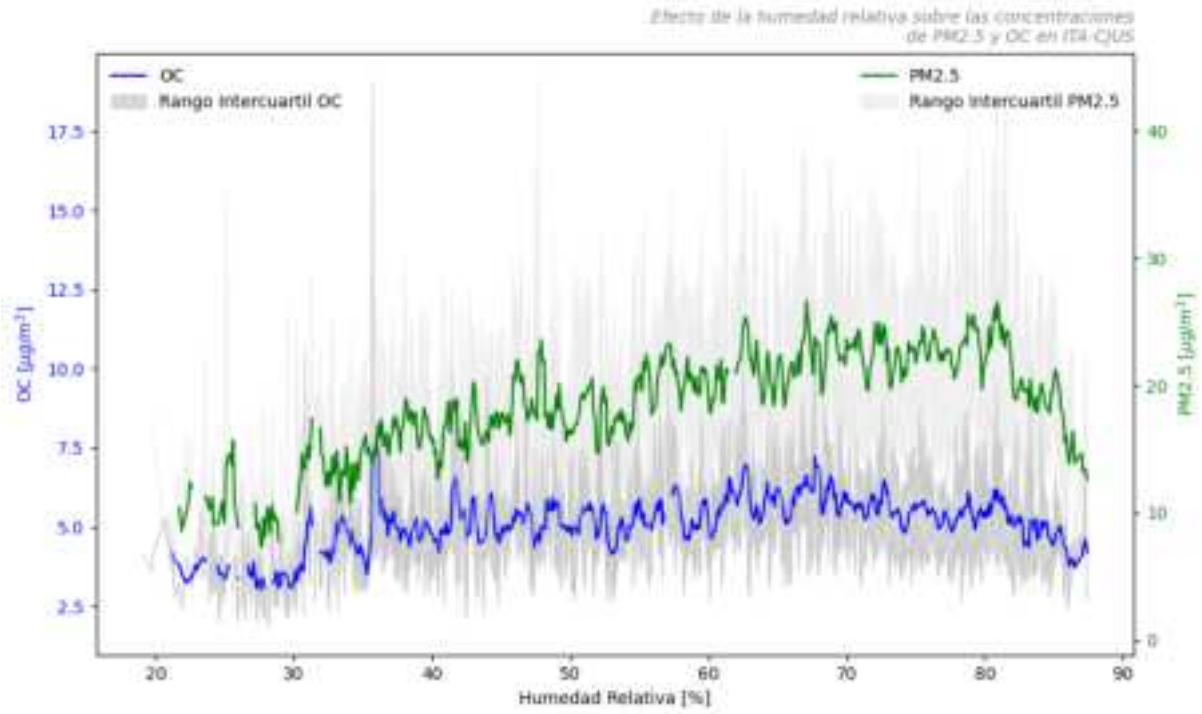


Figura 261: Efecto de la humedad relativa sobre las concentraciones de PM2.5 y el OC en la estación ITA-CJUS en el segundo semestre del 2024

El perfil de concentración del OC en función de la humedad relativa en la estación ITA-CJUS no muestra un indicio a la formación de aerosoles secundarios bajo condiciones húmedas. Comportamiento opuesto a lo esperado, dado que teóricamente la humedad relativa afecta la partición de las fases gas-partícula de los compuestos orgánicos semivolátiles menos oxigenados y facilita la química de ambas fases lo que se traduce en un aumento de SOA (Luo et al. (2024)), sin embargo, algunos estudios han reportado comportamientos opuestos, como lo es el efecto negativo para la producción química de SOA bajo condiciones de humedad relativa alta, dejando a los procesos fotoquímicos como principal medio para su formación (Liang et al. (2019); Liu et al. (2019)).

Análisis de las concentraciones de especies secundarias a partir de una campaña de caracterización química en el Valle de Aburrá

En el Valle de Aburrá se han realizado campañas de caracterización química a cargo del Politécnico Jaime Isaza Cadavid, en convenio con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las cuales han cuantificado las fracciones orgánica y elemental del PM2.5, en las estaciones correspondientes a MED-BEME, MED-SELE, MED-PJIC, MED-LAYE, GIR-SOSN e ITA-CJUS (AMVA (2019)). Adicionalmente, se han identificado los elementos que componen las fracciones mayoritaria, minoritaria, trazas y ultratrazas, así como también los cationes y aniones tales como fluoruros, cloruros, nitratos y sulfatos.

Con el objetivo de acercarnos al comportamiento diurno de iones constituyentes principales del PM2.5 como sulfatosy nitratos se realizó una campaña de caracterización química en 2 puntos del Valle de Aburrá.

Los puntos seleccionados para la campaña de caracterización química de PM2.5, fueron las estaciones de monitoreo ubicadas en los municipios de Girardota (GIR-EPM) e Itagüí (ITA-CJUS), realizando las mediciones con una escala temporal de cada 3 horas los días 1 y 7 de noviembre de 2024. Cabe aclarar que para el día viernes 1 de noviembre, el período de medición fue de 12 horas, mientras que para el día jueves 7 de noviembre se realizó una medición continua durante 24 horas desde las 06:00 horas. Por lo anterior, es importante mencionar que los valores de las concentraciones de iones (sulfatos y nitratos) reportadas, corresponden a lo recolectado tres horas previas al registro. A continuación, se presentan los resultados más relevantes y relaciones con otras variables de importancia en la formación de aerosoles secundarios en el Valle de Aburrá.

Tasas de oxidación de azufre y nitrógeno en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM

Los resultados de la campaña mostraron una variabilidad de las concentraciones de los aniones (sulfatos y nitratos) a lo largo del día, evidenciando dinámicas de reacción partículares. Por lo anterior, es importante determinar las razones de oxidación tanto de nitrógeno como de azufre, dado que estas relaciones brindan información de la capcidad oxidativa de la atmósfera para la obtención de estos compuestos (Wang et al. (2005)), adicionalmente ayudan a describir el aporte por tipo de fuentes de emisión (móviles o fijas). Las ecuaciones D.1 y D.2 definen las razones de oxidación de azufre (SOR) y nitrógeno (NOR), respectivamente.

$$SOR = \frac{n - SO_4^{2-}}{(n - SO_4^{2-} + n - SO_2)} \tag{8.9}$$

$$NOR = \frac{n - NO_3^{-}}{(n - NO_3^{-} + n - NO_2)} \tag{8.10}$$

Donde $n - SO_4^{2-}$, $n - SO_2$, $n - NO_3^{-}$ y $n - NO_2$ son las concentraciones molares de sulfatos, dióxido de azufre, nitratos y dióxido de nitrógeno, respectivamente. Cuando los valores de las razones de oxidación de azufre y nitrógeno son mayores a 0.1, algunas investigaciones sugieren que puede indicar procesos de transformación secundaria, favoreciendo la oxidación fotoquímica de especies gaseosas tales como el SO_2 y el NO_2, siendo precursores de aerosoles secundarios (Wang et al. (2005)).

En las Figuras 490 y 491 se muestran las variaciones horarias de las razones de SOR y NOR, así como también de las concentraciones de sulfatos y nitratos, en las estaciones de ITA-CJUS y GIR-EPM, respectivamente.

De forma general, se puede observar cómo las razones de SOR en ambas estaciones son mayores a las de NOR a lo largo del día, lo que indicaría que la formación secundaria de nitratos a partir de NO_2 es débil en comparación a la conversión de sulfatos. Adicionalmente, se destacan los valores de SOR mayor a 0.1 a las 12:00 y 03:00 en ambos puntos de monitoreo, sugiriendo una mayor actividad oxidativa de la atmósfera a estas horas, favoreciendo la formación de aerosoles secundarios especialmente de sulfatos.

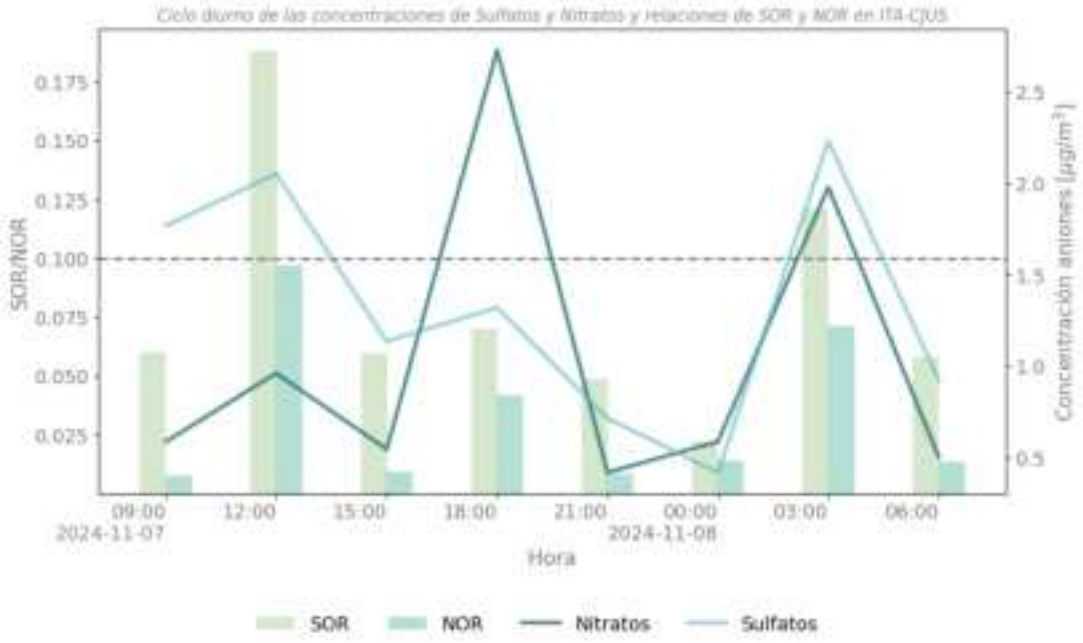


Figura 262: Razones de oxidación de sulfatos y nitratos en la estación ITA-CJUS el 07 y el 08 de noviembre de 2024.
Nota: La línea punteada corresponde al límite donde las tasas de oxidación sugieren una atmósfera reactiva para la formación de aerosoles secundarios.

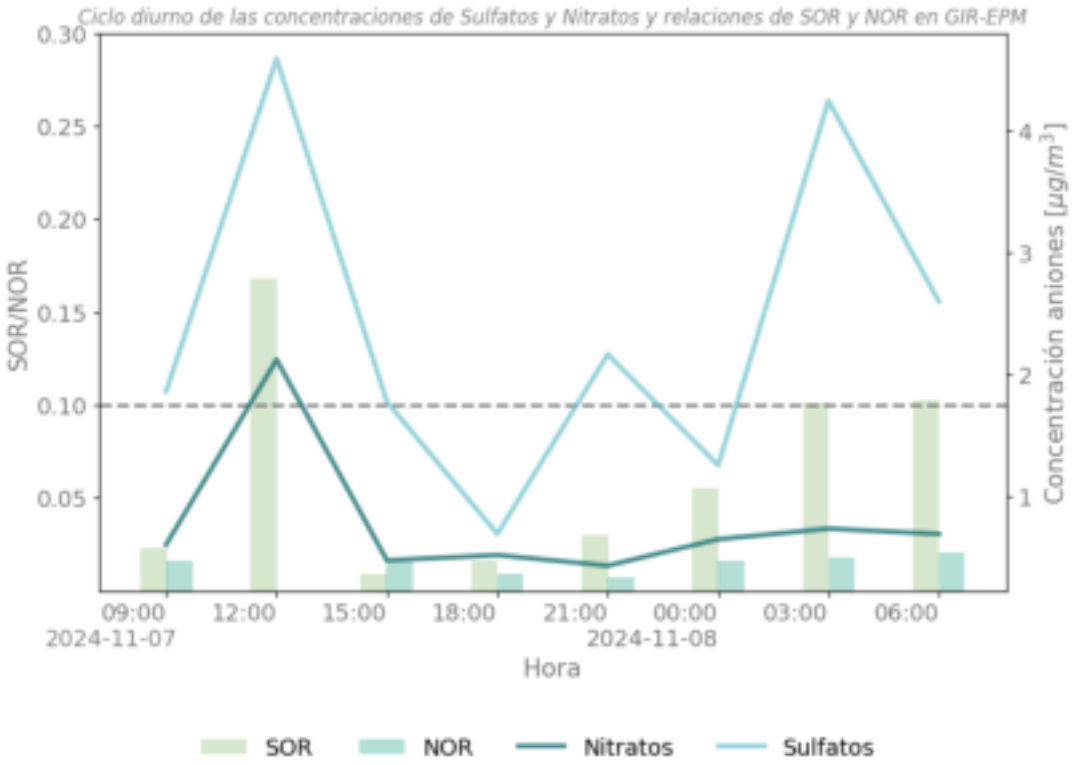


Figura 263: Razones de oxidación de sulfatos y nitratos en la estación GIR-EPM el 07 y el 08 de noviembre de 2024.
Nota: La línea punteada corresponde al límite donde las tasas de oxidación sugieren una atmósfera reactiva para la formación de aerosoles secundarios.

El comportamiento observado en la tasas de oxidación de azufre (SOR) en las estaciones de ITA-CJUS y GIR-EPM, estaría altamente afectadas por el contenido de agua de los aerosoles y la temperatura ambiente (Wei and Tahrin (2024)). Estos factores habrían favorecido que la higroscopicidad de las partículas aumentara la concentración de sulfatos, principalmente en las primeras horas del día (alrededor de las 03:00).

Conclusiones

I. En la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024 se propuso la investigación para el estudio de la formación del PM2.5 secundario, en la cual se planteó el objetivo de *realizar un estudio que permitiera aproximarnos a los perfiles verticales de concentración del PM2.5, SO_2 y NO_X principalmente, y realizar un acercamiento a la evaluación de los compuestos orgánicos volátiles*. Para el desarrollo de este objetivo se sugirieron como actividades estudiar en detalle los mecanismos de reacción fotoquímicos de los aerosoles primarios, tales como el SO_2 y el NO_x, además del uso de datos satelitales para la estimación de los perfiles verticales de contaminantes atmosféricos.

II. En el transcurso de la investigación fueron analizados, mediante revisión secundaria, los mecanismos

de reacción química, considerando tanto los procesos como las especies químicas involucradas. En este análisis se identificó la necesidad de emplear herramientas matemáticas como los modelos computacionales que permiten solucionar un sistema complejo y extenso de una serie de ecuaciones. Desde el SIATA se viene trabajando en la implementación del modelo WRF-Chem para el Valle de Aburrá, el cual permitiría acercarnos al conocimiento de los mecanismos de reacción química; sin embargo, éste aún está en su fase de implementación, por lo que actualmente no es posible evaluar los perfiles verticales de especies químicas a partir de este modelo. No obstante lo anterior, se utilizarán los resultados del modelo CAMx publicados por la Universidad Pontificia Bolivariana a través de los convenios suscritos con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Los resultados de este modelo permitirán estimar el perfil vertical de las concentraciones de contaminantes atmosféricos; sin embargo, es importante tener en cuenta que la configuración disponible de CAMx para el Valle de Aburrá no considera el aporte de fuentes externas en la calidad del aire de esta región, lo cual afecta los perfiles verticales que se esperan analizar.

III. En concordancia con los hallazgos de las caracterizaciones químicas realizadas en el Valle de Aburrá, en los modelos evaluados como el de Isorropía, se resalta la importancia de los iones sulfatos y nitratos como iones mayoritarios constitutivos del PM2.5, por lo que reconocer los mecanismos de formación de éstos, a partir de los óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre y otras variables meteorológicas que inciden en esa formación, es fundamental para direccionar las acciones de gestión para mejorar la calidad del aire.

IV. La revisión bibliográfica realizada sobre los mecanismos de formación secundaria de aerosoles, permitió identificar la complejidad de los factores que inciden en la formación de éstos, siendo necesario continuar profundizando en su análisis, teniendo en cuenta variables meteorológicas tales como la temperatura, precipitación, radiación solar y humedad relativa, así como las dinámicas estacionales y espaciales.

Consideraciones para trabajos futuros

I. Teniendo en cuenta la necesidad de ajustar los modelos locales de calidad del aire asociados al WRF-Chem que se están implementando para el Valle de Aburrá desde el proyecto SIATA, se hace necesario realizar una evaluación de los coeficientes de reacción más relevantes que permitan incorporar los cambios que estos modelos requieren para el territorio, para lo cual, se propone, además del análisis integral de la información histórica asociada al comportamiento de las concentraciones de contaminantes criterio, la realización de campañas de medición de otros compuestos intermedios.

II. Basado en las apreciaciones con respecto al efecto de los procesos de oxidación en la atmósfera, se da la necesidad de monitorear las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles intermedios (destacándose el glioxal y el metilglioxal por su alta reactividad) en el Valle de Aburrá y estimar las concentraciones de iones hidroxilo, las cuales permitirán estudiar las condiciones aproximadas de oxidación propias del territorio facilitando la estimación del aporte de aerosoles orgánicos a la calidad del aire y sus potenciales fuentes de emisión permitiendo la actualización de planes de gestión.

III. Se hace necesario evaluar el comportamiento de las concentraciones de NO_X, SO_2 y de VOC tales como el tolueno, formaldehido (destacando su origen principalmente por la quema de biocombustibles), eteno entre otros, en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá, tratando de obtener relaciones de interés con las mediciones de PM2.5, en casos o escenarios particulares tales como los períodos de gestión de episodios, teniendo en cuenta la reactividad de estos contaminantes como precursores de SOA.



iv. Evaluar la influencia de parámetros meteorológicos tales como la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa en los procesos de formación de ozono troposférico, considerando períodos de gestión de episodios por contaminación atmosférica y otros escenarios, lo cual facilitaría no solo el entendimiento en la formación de este contaminante sino también de otros aerosoles secundarios.

v. Evaluar además del ciclo diurno de constituyentes del PM2.5 secundario, el tiempo o envejecimiento de estas especies químicas en la atmósfera.

vi. Los resultados presentados anteriormente evidencian la necesidad de continuar con el estudio y caracterización de especies secundarias en el Valle de Aburrá, con el objetivo de generar conocimiento en la formación de aerosoles orgánicos e inorgánicos, lo que puede brindar apoyo en la actualización de los planes de gestión por la autoridad ambiental, para el seguimiento y control a fuentes de emisión, tales como son los Planes Individuales de Reducción de Emisiones (PIR) del sector industrial. Así mismo, se resalta la necesidad de continuar con los ejercicios de caracterización química, adicionando el amonio como aerosol secundario y analizar el comportamiento con respecto a los iones sulfatos y nitratos en otros puntos de medición.



WP1.2.13. (Inundaciones, Sequías, Av. Torrenciales, Mov. Masa, Sismos, Incendios) Desarrollo de metodologías para la clasificación de coberturas de suelo

El conocimiento de las coberturas del suelo es un insumo importante en la evaluación de ciertas amenazas, así como el desarrollo de modelos que caractericen la infraestructura del territorio (modelos de exposición). Dichos modelos permiten, a su vez, una posible evaluación del riesgo por fenómenos naturales tales como los hidrológicos (avenidas torrenciales, movimientos en masa húmedos), geofísicos (sismos, movimientos en masa secos) y climatológicos (movimientos en masa húmedos, incendios, sequías). En el transcurso del contrato se adelantaron algunos análisis encaminados a la clasificación de coberturas del suelo en distintos puntos del Valle de Aburrá. Los análisis estuvieron centrados principalmente en la generación de insumos para la caracterización y aplicación de modelos relacionados con incendios forestales, siendo esta una de las amenazas que mas impacto genera en la alteración de los usos del suelo. A continuación se describen algunos procesos en los cuales la clasificación de coberturas tiene un papel relevante en el entendimiento de los fenómenos.

Parte I: Mapa de coberturas

Introducción

Los *sistemas de aeronaves no tripuladas* (UAS) han revolucionado la teledetección de muy alta resolución, ofreciendo vuelos ad hoc y series temporales densas que superan las limitaciones de los sensores satelitales tradicionales (Alvarez-Vanhard et al., 2021). Entre las múltiples aplicaciones, la *clasificación de usos y coberturas del suelo* (LULC) resulta crucial para la planificación urbana, la gestión agrícola y el monitoreo forestal (Hamad, 2020; Alshari and Gawali, 2021).

Sin embargo, trasladar los flujos de trabajo convencionales (pensados para píxeles satelitales de 10–30 m) a ortoimágenes con *Ground Sample Distance* (GSD) ≤ 5 cm exige rediseñar la segmentación, la selección de atributos y la estrategia de validación:

- La variabilidad radiométrica generada por sombras, brillos especulares y heterogeneidad intra-objeto incrementa la confusión espectral.
- El gran volumen de datos (decenas de GB km^{-2}) encarece el entrenamiento y la inferencia.
- Los objetos de interés presentan escalas muy dispares: piscinas de 20 m^2 conviven con masas forestales de varias hectáreas.

La literatura reporta que la *Object-Based Image Analysis* (OBIA) suele superar a los métodos puramente basados en píxeles (PBIA) gracias a que incorpora forma, contexto y textura (Ye et al., 2023). Sin embargo, la segmentación —paso crítico en OBIA— puede consumir hasta 70 % del tiempo total de procesamiento. Con el fin de aportar lineamientos operativos, este estudio compara tres metodologías (OBIA, PBIA y reclasificación por umbrales) empleando datos capturados el 12 de julio de 2024 en Copacabana (Antioquia, Colombia). Se analizan: (i) la contribución de capas derivadas —stdnDSM, índice ExG y texturas Haralick—, (ii) la robustez espacial de los modelos y (iii) la relación entre precisión y coste computacional.

Metodología

Datos de entrada y pre-procesamiento

Con un *WingtraOne* equipado con sensor Sony RX1R II se obtuvieron 638 imágenes aéreas, procesadas en Pix4D para generar:

I. Ortofoto RGB (0.043 m px^{-1}), 8 bits.

II. Modelo Digital de Superficie (DSM, 0.043 m px^{-1}), 32 bits.

III. Modelo Digital de Terreno (DTM, 0.219 m px^{-1}), 32 bits.

A partir de estos productos se derivaron:

- **stdnDSM**: normalización de alturas que mejora la separación vertical de coberturas (Zhou et al., 2019).
- **Índice Exceso de Verde (ExG)**: discrimina vegetación cuando no se dispone de NIR (Jiménez-Jiménez et al., 2020; Marcial-Pablo et al., 2019).
- **Texturas ASM e IDM**: homogeneidad y contraste local calculados con `r.texture` de GRASS GIS usando la matriz de co-ocurrencia de Haralick (Haralick et al., 1973).

Diseño experimental

Se ejecutaron 14 experimentos:

- **OBIA** (6 combinaciones de capas) siguiendo el flujo semi-automatizado de Wyard et al. (2021); segmentación con `i.segment` (umbral 0.25, área mínima 10 m^2) y clasificación *Random Forest* (500 árboles).
- **PBIA** (6 combinaciones) adaptando el cuaderno de Neteler (2022); 2,400 píxeles etiquetados, balance de clases y los mismos hiperparámetros para aislar el efecto de las capas.
- **Umbrales** (2 órdenes de superposición) definidos tras análisis de dispersión multibanda (ExG, stdnDSM, bandas RGB).

Validación y transferencia

Sobre 24.64 ha se digitalizó cartografía de referencia a escala 1:500. Se calcularon matrices de confusión, precisión, recall y exactitud global. Para evaluar la generalización, los mejores modelos se aplicaron a cinco sitios adicionales (0.12–3.07 km^2) con fechas 2017–2024.

Resultados

Área de entrenamiento

El experimento **PBIA RGB+stdnDSM+ExG+texturas** obtuvo la mayor exactitud global (83.7 %) y redujo la confusión vegetación-urbano. El OBIA con stdnDSM+ExG logró 98 % de precisión en cuerpos



de agua, aunque su recall fue bajo al omitir gran parte del río. El método de umbrales clasificó vegetación alta con rapidez (¡5 min) pero mostró menor rendimiento en agua y suelo desnudo.

Transferencia espacial

En cuatro de cinco áreas externas, el PBIA superó a OBIA y umbrales, manteniendo exactitudes globales de 70–77 %. La pérdida de desempeño fue menor en PBIA debido al balance de clases y a la selección automática de atributos.

Coste computacional

- **OBIA**: 9–14 h por escena; la segmentación representa 70 % del tiempo.
- **PBIA**: 45–60 min por escena; extracción de variables topográficas es el cuello de botella.
- **Umbrales**: $<$ 5 min; útil para cartografía exploratoria.

Recomendaciones

I. Combinar stdnDSM y ExG es imprescindible; añadir texturas aporta 2–4 puntos porcentuales de exactitud.

II. Emplear PBIA para extensiones ¿2 km^2; reservar OBIA a análisis detallados donde la topología de objetos sea crítica.

III. Ampliar el entrenamiento con muestras multitemporales para mejorar la generalización.

IV. Explorar arquitecturas CNN tipo U-Net que fusionen DSM para evitar la costosa segmentación OBIA.

Una descripción más profunda del desarrollo de esta investigación se documenta en el enlace blueClasificación de LULC por

Parte II: Modelos de propagación de incendios forestales

Introducción

Algunos de los incendios forestales ocurridos en el Valle de Aburrá han generado impactos negativos en los ecosistemas, las comunidades y altos costos de supresión, debido a su extensión y duración. Comprender el comportamiento de los incendios forestales es importante para la toma de decisiones en la prevención y manejo del fuego (Ager et al., 2011). Los incendios forestales dependen de complejas interacciones entre los combustibles, la topografía y las condiciones atmosféricas. Estas interacciones determinan los factores más importantes en el comportamiento de los incendios forestales como lo es por ejemplo, la tasa de propagación de incendios (Cardil et al., 2021).

En diferentes lugares del mundo se han desarrollado modelos de propagación del fuego usando aproximaciones empíricas, físicas y matemáticas. Estos modelos se han diseñado para predecir la profesión espacial y temporal del fuego. Sin embargo, existen dificultades en la predicción del comportamiento de los incendios debido a la complejidad de las interacciones ya que son influenciados por muchos factores ambientales. Por tanto, en los últimos años también se han investigado técnicas de inteligencia artificial para intentar superar estas dificultades (Kucuk and Sevinc, 2023).

Entre los modelos más conocidos en el mundo están Farsite, FlamMap, BehavePlus, ForeFire, WFDSS, Prometheus, Phoenix, Spark y Wildfire Analyst (Cardil et al., 2021). Estos modelos han sido desarrollados no solo con investigación sino con experimentación en laboratorio y en campo para simular las condiciones de la vegetación, la topografía y las variables atmosféricas que influyen en el comportamiento del fuego. Otros modelos usados son el WRF-Fire (Coen et al., 2013) que cuenta con acoplamiento con la atmósfera y el Cell2Fire, modelo que ha sido desarrollado recientemente diseñado para apoyar la planificación de gestión y que mejora la eficiencia computacional (Pais et al., 2021). Estos modelos han sido usados para conocer el comportamiento de los incendios y apoyar la toma de decisiones para minimizar los impactos de los incendios forestales (Cardil et al., 2021).

La propagación de incendios forestales es un tema de relevancia para la generación de alertas tempranas y para la respuesta a emergencias de este tipo, sin embargo, en el Valle de Aburrá no se han explorado modelos de propagación de incendios forestales. Debido a su importancia, en este estudio se realizó una revisión de literatura de 5 modelos de propagación de incendios forestales y se evaluó su pertinencia de uso para el proyecto según los objetivos de los modelos y la disponibilidad de datos. Además, se realizó el procesamiento de los datos para realizar simulaciones en FlamMap con Farsite.

Metodología

Para esta vigencia, se realizó una revisión de literatura de de los modelos de propagación de incendios forestales *BehavePlus* (Andrews, 2007), *FlamMap* (Finney, 2006), *FARSITE* (Finney, 1998) desarrollados en el Servicio Forestal de Estados Unidos, *WRF-Fire* (Coen et al., 2013) desarrollado en la UCAR y *Cell2Fire* (Pais et al., 2021) desarrollado por las Universidades de Chile, Toronto y California. A partir de esta revisión se seleccionó el modelo *FARSITE* de FlamMap para realizar una simulación inicial de incendios forestales ocurridos en el Valle de Aburrá. Sin embargo, es importante hacer simulaciones con otros modelos para determinar el de mejor usabilidad, versatilidad y representatividad del comportamiento de los incendios forestales en la región. Se eligió como área de estudio el Área Protegida Quitasol - La Holanda en Bello, Antioquia, área en la que han ocurrido incendios forestales de gran extensión, lo que ha provocado afectación a los ecosistemas y a las comunidades que habitan cerca al área protegida.

Revisión de literatura

BehavePlus es un modelo matemático que describe el comportamiento del fuego simulando la tasa de propagación del fuego, altura del fuego, mortalidad de la vegetación, humedad del combustible y otras variables. Este es un sistema de modelación puntual, es decir, es un sistema que calcula el comportamiento del fuego en un punto o área con combustibles homogéneos (`https://www.frames.gov/behave/home`).

Por su parte, *FlamMap* es un sistema de modelación espacial de propagación de incendios forestales, por lo que calcula las características asociadas al comportamiento de incendios para cada pixel. Las variables de salida incluyen la tasa de propagación superficial y de copa, longitud de la llama, intensidad de la línea de fuego, entre otras. Inicialmente, *FlamMap* realiza la modelación bajo condiciones meteorológicas y de humedad del combustible constantes. Sin embargo, en su desarrollo se incluyó *FARSITE*, el cual es un modelo que permite la simulación del comportamiento del fuego bajo condiciones meteorológicas, de terreno y combustibles heterogéneas (`https://research.fs.usda.gov/firelab/projects/flammap`).

Por último, *WRF-Fire* es un módulo dentro del modelo atmosférico WRF-ARW que permite modelar el crecimiento de un incendio forestal en respuesta a las condiciones ambientales como la pendiente del terreno, las características del combustible, las condiciones atmosféricas y las retroalimentaciones dinámicas entre el fuego y la atmósfera. WRF-Fire es usado principalmente para la predicción y evaluación de riesgo y como apoyo en la preparación y respuesta (`https://ral.ucar.edu/model/`

`wrf-fire-wildland-fire-modeling`). Sin embargo, este modelo tiene un alto costo computacional y de implementación en cuanto a personal altamente calificado y entrenado para tal fin, lo que dificulta su uso operacional para predicción del comportamiento de incendios forestales como apoyo a las brigadas de incendios (Dobrinkova and Dobrinkov, 2013).

Procesamiento de datos de entrada y simulaciones preliminares

Se estudió el funcionamiento del modelo, las variables y datos de entrada necesarios para las simulaciones. Se procesaron los datos de entrada para la simulación y se realizaron algunas simulación de prueba para verificar el funcionamiento del modelo con 2 incendios forestales ocurridos en las fechas indicadas (tabla 22). Adicionalmente, se realizaron otras simulaciones para un escenario propuesto considerando la importancia del sitio para el programa piloto que se está realizando en la comunidad Plan de la Laguna.

Tabla 22: Incendios forestales simulados en el modelo de propagación.

Fecha del incendio	Coordenadas aproximadas del inicio	Área afectada (ha)
2023-12-27	-75.56342, 6.35295	124.4
2024-02-12	-75.53808, 6.35182	74.4
Escenario	-75.55724, 6.35322	NA

El modelo FARSITE de FlamMap requiere información de características del terreno y de condiciones meteorológicas. Los datos de entrada de terreno son: elevación, pendiente, aspecto, cobertura vegetal, modelo de combustibles y humedad inicial del combustible. Por otro lado, las variables meteorológicas necesarias son temperatura, humedad relativa, precipitación acumulada de la última hora, cobertura de nubes y velocidad y dirección del viento. Adicionalmente, puede agregarse densidad y altura del dosel como información adicional para mejorar los resultados del modelo. En la Tabla 23 se presenta la información empleada para las simulaciones.

Tabla 23: Datos de entrada utilizados en la simulación.

Datos	Fuente	Resolución	Fecha de generación
Modelo de combustibles	Equipo Hidrología, SIATA	5m	Noviembre de 2024
Datos meteorológicos	Estaciones meteoroló SIATA	Horaria	Diciembre de 2023 y enero de 2024
Altura del dosel arbóreo	Canopy height (Tolan et al., 2024)	1m	2018-2020
Cobertura del dosel arbóreo	Canopy cover (Hansen et al., 2013)	30m	2012
Elevación, pendiente, aspecto	SRTM	$\tilde{3}$0 m	2014
Humedad inicial del combustible	Datos por defecto	-	-

El modelo de combustibles y la información de vientos son condiciones de gran influencia en la propagación de incendios forestales (Catchpole et al., 1998; Rothermel, 1972), sin embargo, en la región no se tienen modelos o información detallada acerca de estas variables. Por lo tanto, es necesario levantar información e investigar alrededor de estas características.

Para generar el modelo de combustibles se requiere de una caracterización de la vegetación. Para esto, inicialmente se realizó una clasificación de coberturas sobre el área de estudio en el cerro Quitasol con la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia. Seguidamente, a cada cobertura se le asignó una categoría del modelo de combustibles desarrollado por (Scott, 2005), de acuerdo a su similaridad. Este modelo requiere mayor investigación para la región y constante actualización. El modelo de combustibles en FlamMap es un componente esencial que define la cantidad y el tipo de combustible en un área determinada. Diferentes tipos de combustibles se queman de formas distintas según sus características físicas y químicas, por lo tanto, el modelo de combustibles es fundamental para entender cómo se propaga el fuego en el tiempo. FlamMap utiliza clasificaciones de combustibles desarrolladas por el Servicio Forestal de Estados Unidos (Scott, 2005). Esta metodología define 44 modelos de combustible estándar, clasificados en siete categorías principales según el tipo de vegetación y las características del material combustible. Para definir estas categorías del modelo de combustibles en nuestra región de interés, se inició con la delimitación de las coberturas de tierra lo más detalladamente posible utilizando la metodología Corine Land Cover, y a cada cobertura se le asignó la categoría más congruente según el modelo de combustible (Figura 264).

Por otro lado, el comportamiento local del viento es influenciado por los terrenos montañosos en los que pueden producirse (Forthofer, 2007). El Valle de Aburrá tiene características topográficas complejas lo cual influye en los patrones de viento locales y dificulta su modelación. Además, también son influenciados por el forzamiento dinámico de los vientos alisios, lo que puede cambiar el comportamiento común de los vientos de valle. Consecuentemente, en caso de incendios forestales el viento afecta el comportamiento del fuego y en terrenos complejos se dificulta su predicción (Wagenbrenner et al., 2016). Por esto, para el caso

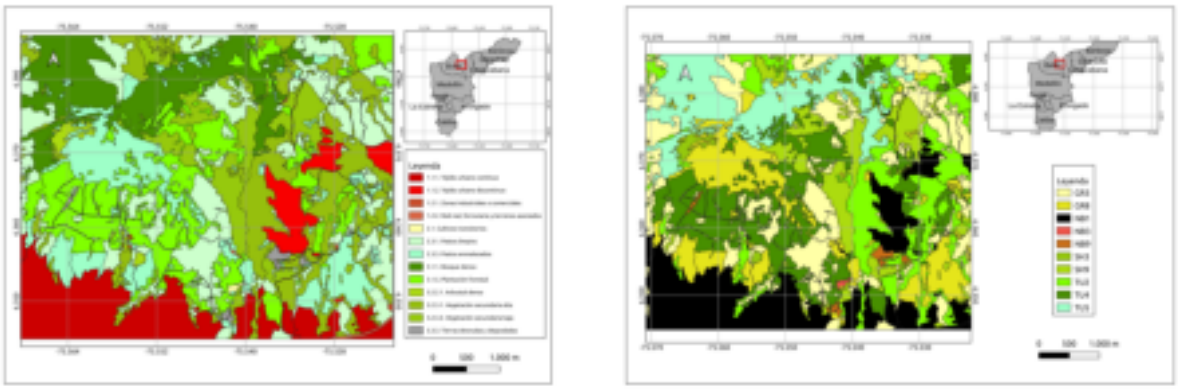


Figura 264: Coberturas y modelo de combustibles en el área de estudio, cerro Quitasol.

del Valle de Aburrá, es necesario refinar la información entregada por las estaciones meteorológicas o los datos de viento del modelo WRF. WindNinja es un modelo utilizado a nivel mundial que simula campos de viento superficial de alta resolución en terrenos complejos (Forthofer et al., 2014). Debido a esto, se selecciona para hacer pruebas de simulaciones de viento en el Valle de Aburrá. El modelo permite como información de entrada datos de estaciones meteorológicas y de algunos modelos meteorológicos como GFS o salidas de WRF (`https://research.fs.usda.gov/firelab/products/dataandtools/windninja`). Se realizaron simulaciones de viento con datos del modelo meteorológico de la UCAR GFS 0.5 grados (Figuras 265 y 266) y con datos de estaciones meteorológicas de la red de monitoreo de SIATA en diferentes días y a diferentes horas. Es necesario evaluar los resultados de estas simulaciones así como incluir simulaciones con datos de estaciones meteorológicas y con datos de viento del modelo WRF. Adicionalmente, es necesario tener en cuenta la dinámica de los vientos alisios y su influencia sobre los vientos locales.

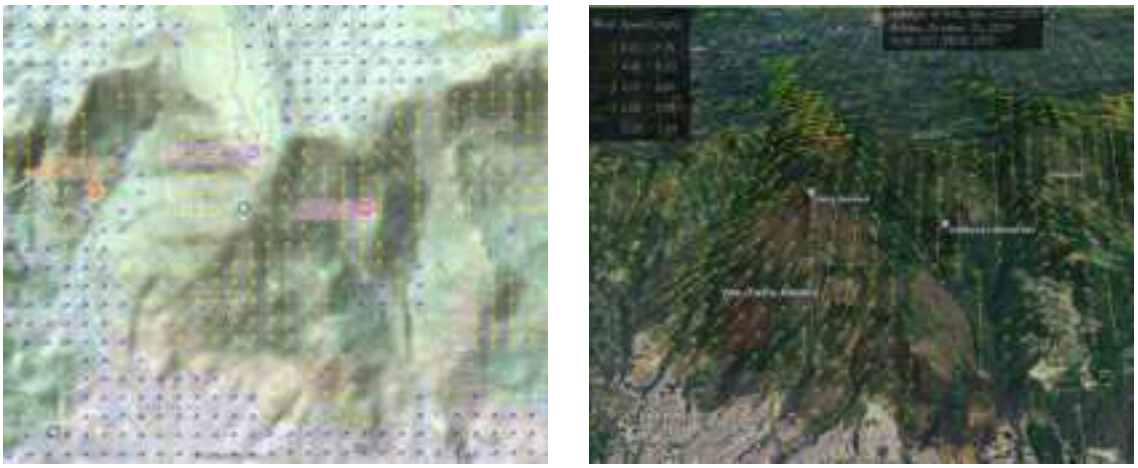


Figura 265: Vectores de dirección y velocidad del viento simulados con WindNinja a partir de datos de NOMAD-GFS-GLOBAL 0.5 grados para las 13:00 del 21/10/2024.

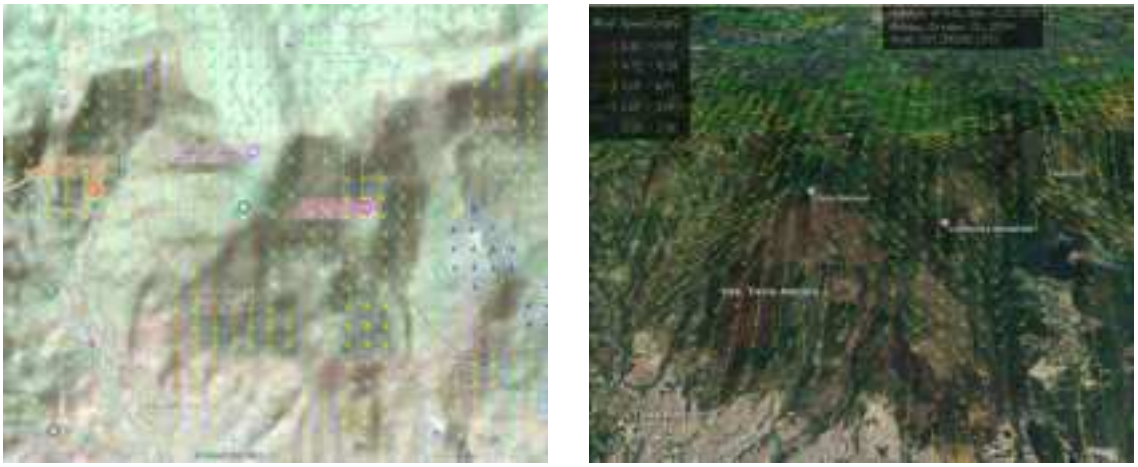


Figura 266: Vectores de dirección y velocidad del viento simulados con WindNinja a partir de datos de NOMAD-GFS-GLOBAL 0.5 grados para las 19:00 del 21/10/2024.

Las salidas de la simulación con FARSITE 4 incluye información como tiempo de propagación, tasa de propagación, dirección de propagación, vectores de viento y de propagación, perímetros y otras como intensidad de la línea de fuego, longitud de la llama, entre otras (`https://owfflammaphelp62.firenet.gov`). En las simulaciones se realizaron pruebas de sensibilidad al modelo de combustibles y a los datos de viento para hacer una identificación preliminar de su importancia.

En la Figura 267, se muestran los resultados de una simulación con los datos originales del modelo de combustibles, y cambios en el modelo de combustibles. Se puede observar la diferencia en los perímetros de salida con estos cambios. En los resultados de estas simulaciones iniciales se observó alta sensibilidad del modelo de propagación ante variaciones del modelo de combustibles y a los datos de viento. Por lo tanto, se resalta la importancia de la refinación de estos productos con el fin de obtener mejores resultados de propagación. Adicionalmente, se destaca la importancia de continuar con los análisis de sensibilidad, investigación y actualización permanente de otras variables como las características de las coberturas vegetales, humedad de los combustibles y mejora del modelo de vientos. También, es importante considerar otros modelos como el Cell2Fire o el WRF-Fire que, en otros sitios muestran buena eficiencia al simular incendios forestales bajo diferentes condiciones y que, además, disponen de código libre, el cual facilita su operación y validación de resultados.

Parte III: Procesamiento de imágenes satelitales para monitoreo de condiciones de vegetación relacionadas con condiciones secas

Introducción

Las condiciones de sequía pueden ser monitoreadas mediante imágenes satelitales que pueden detectar el estrés hídrico o el estado de la salud de la vegetación, debido a que la capacidad fotosintética de las plantas brinda esta información y puede evaluarse por medio de la combinación de diferentes bandas espectrales. Algunos índices usados para este fin son el Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI), Enhanced Vegetation Index (EVI), Normalized Difference Infrared Index (NDDI), Normalized Difference Water Index (NDWI), Vegetation Condition Index (VCI), entre otros. Las condiciones de sequía y el fenómeno de "propagación de sequía"pueden ser evaluadas con estos índices. Además, Zubieta et al. (2021) hace



Figura 267: Área quemada real y áreas simuladas realizando una prueba de sensibilidad al modelo de combustibles. Área quemada real (izquierda), Área quemada simulada con un modelo de combustibles (centro) y Área quemada simulada con otro modelo de combustibles. (derecha)

uso de estos índices para describir las condiciones de sequía de la vegetación y/o el suelo antes de los incendios.

Las imágenes satelitales también son útiles para calcular el área afectada de un incendio forestal y estimar la tasa de recuperación de la vegetación. Los índices más usados para este fin son el Normalized Burned Ratio (NBR), el Burned Area Index (BAI) y el Normalized Differenced Vegetation Index (NDVI).

Metodología y Resultados

Se realizó una estimación del NDVI para un área ubicada en el cerro El Quitasol en Bello con imágenes Sentinel-2 con el fin de cuantificar el NDVI para el periodo comprendido entre enero de 2021 y diciembre de 2024 y observar los patrones que se presentan y el comportamiento antes y después del incendio ocurrido en febrero de 2024 que afectó 76.7 ha. También se estimaron las áreas quemadas con NDVI y BAI con imágenes Planet para los incendios ocurridos en enero del 2025.

Para la estimación del NDVI con imágenes Sentinel-2, se seleccionaron imágenes sin cobertura de nubes en el periodo entre enero de 2021 y diciembre 2024 en una zona acotada sobre el área que afectó el incendio del 20240212 en el cerro Quitasol (Figura 268). En la serie de tiempo se logran apreciar los cambios en vegetación, el NDVI disminuye en los meses secos principalmente en la temporada de diciembre, enero y febrero. La línea punteada roja representa la fecha del incendio, donde se observa la rápida disminución del NDVI y su recuperación a valores anteriores después de 6 meses del evento. Este índice podría usarse como indicador de condiciones secas de la vegetación y el suelo.

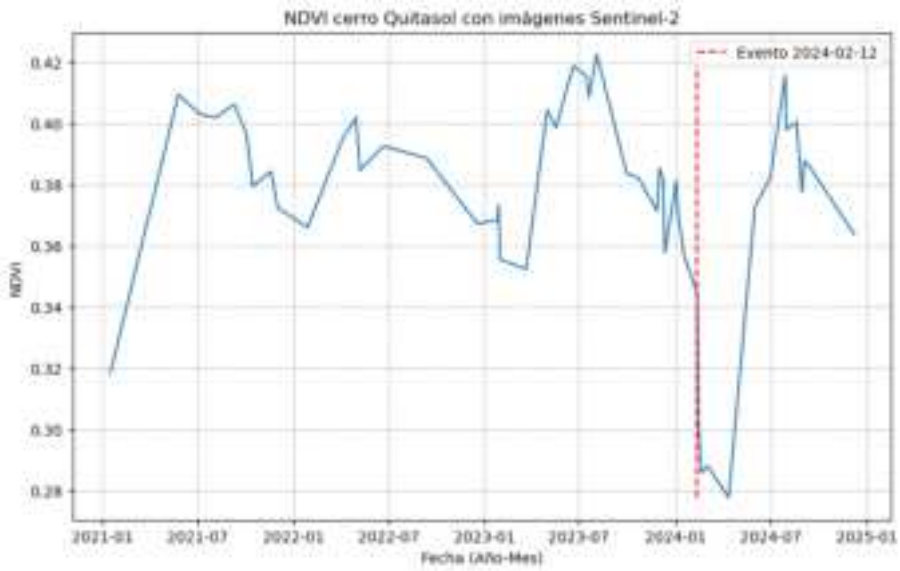


Figura 268: NDVI con imágenes Sentinel-2 para un área del cerro Quitasol para el periodo 2021-2024. La línea punteada representa la ocurrencia de un incendio.

Luego, para realizar una evaluación inicial de las condiciones de sequía de la vegetación mediante el NDVI con imágenes Planet, se realizó una búsqueda y descarga de imágenes Planet para el año 2023 en el área del cerro El Quitasol. En el año 2023 se registraron varias columnas de humo e incendios sobre el área de estudio y hubo buena visibilidad durante el año para calcular el NDVI. En total se descargaron 16 imágenes del comprendidas entre enero y diciembre del año 2023 269.

Inicialmente, se calculó el NDVI para todas las imágenes, posteriormente se cruzó con la información de coberturas vegetales para calcular el NDVI promedio por cobertura para cada fecha. En la serie de tiempo se puede observar que casi todas las coberturas tienen el mismo comportamiento a través del tiempo. Y que los mayores valores del índice se presentan en las coberturas de bosque denso, vegetación secundaria baja y alta y plantación forestal. Mientras que los valores más bajos se presentan en las coberturas de cultivos transitorios, tejido urbano discontinuo y pastos enmalezados. Igualmente, se aprecia que en febrero y marzo hay una disminución generalizada del índice, en mayo aumentan y se conservan estables durante la mitad del año, disminuyendo de nuevo en el mes de agosto y septiembre. Para finales de octubre hay un aumento de la actividad fotosintética, la cual disminuye para finales de noviembre y diciembre.

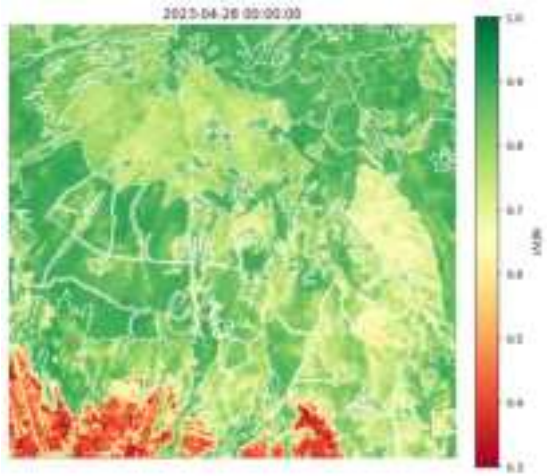


Figura 269: NDVI para el 28 de abril de 2023 en el cerro Quitasol.

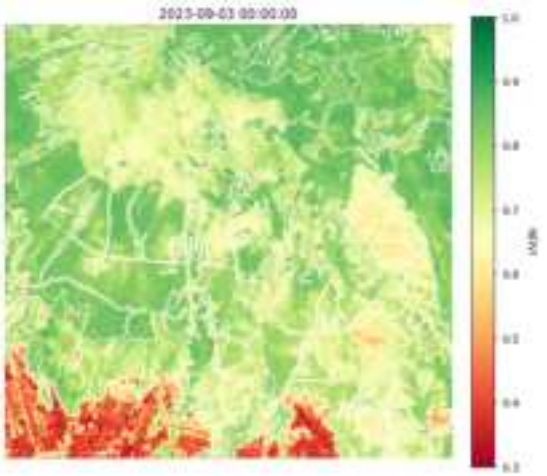


Figura 270: NDVI para el 3 de septiembre de 2023 en el cerro Quitasol.

Parte IV: Monitoreo del estado de las condiciones meteorológicas relacionadas con incendios forestales y su pronóstico en el Valle de Aburrá

Introducción

Las variaciones recientes en los regímenes de incendios en el mundo, incluyendo un aumento en la severidad de las condiciones meteorológicas propicias para incendios, su frecuencia y extensión, se han relacionado con cambios en el clima y en los patrones de uso del suelo en diferentes regiones del mundo (Pausas and Keeley, 2021; Jones et al., 2024). Con estos cambios, la necesidad de minimizar los daños y la gravedad de los incendios ha aumentado, y, en consecuencia, la capacidad para garantizar la preparación operativa y la concienciación pública sobre las posibles amenazas e impactos de los incendios ha cobrado una importancia igualmente creciente. Los sistemas de pronóstico del peligro de incendios son una herramienta muy importante para abordar esta necesidad, debido a que permiten cuantificar el efecto de factores ambientales y antropogénicos en el potencial de propagación de incendios, la dificultad de control, el potencial de ignición y los impactos sociales y ambientales (Hollis et al., 2024).

Los sistemas para clasificar y pronosticar el peligro de incendios han sido un componente clave en la gestión de incendios a nivel mundial durante más de un siglo. Desarrollados en gran medida para apoyar la toma de decisiones en operaciones contra incendios, estos sistemas también son una herramienta de gran valor para comunicar el peligro de incendios a la comunidad, aumentando la conciencia pública y permitiendo notificaciones sobre posibles amenazas. La complejidad de estos sistemas varía desde índices de sequedad simples, hasta sistemas más complejos, como el Sistema Nacional de Clasificación de Peligro de Incendios en los Estados Unidos,NFDRS por sus siglas en inglés, (Haines, 1986) y el Sistema Canadiense de Clasificación de Peligro de Incendios Forestales, CFFDRS por sus siglas en inglés (Stocks et al., 1989). El Índice Meteorológico de Incendios Forestales Canadiense (FWI, Fire Weather Index) presenta características de diseño con potencial para su aplicación más allá de los tipos de combustibles locales (Van Wagner et al., 1985). Como resultado, el índice FWI ha sido probado o adaptado para su uso en varias partes del mundo (Carvalho et al., 2008; Chelli et al., 2015; Dentoni et al., 2015; De Jong et al., 2016; Erickson et al., 2016; Varela et al., 2018; Quilcaille et al., 2022; Feron et al., 2024).

El índice FWI consta de seis componentes, calculados a partir de la temperatura del aire, velocidad del viento, humedad relativa y precipitación acumulada en 24 horas, cada uno medido al mediodía, hora local (Van Wagner et al., 1985). Los primeros tres componentes son çódigos de humedad": el Código de Humedad de Combustibles Finos (FFMC, por sus siglas en inglés), el Código de Humedad del Mantillo (DMC) y el Código de Sequía (DC). Cada uno está relacionado con el contenido de humedad de los combustibles disponibles. Estos códigos de humedad se utilizan en el Sistema FWI para determinar tres componentes adicionales denominados "índices de comportamiento del fuego", cada uno de los cuales proporciona información relacionada con el comportamiento potencial de un incendio en caso de que se produzca una ignición. El Índice de Propagación Inicial (ISI, por sus siglas en inglés) representa la tasa potencial de propagación del fuego; el Índice de Acumulación (BUI) indica la cantidad total de combustible disponible, y el componente final, "FWI", combina el ISI y el BUI para ofrecer una medida de la intensidad frontal potencial de un incendio (Figura 271).

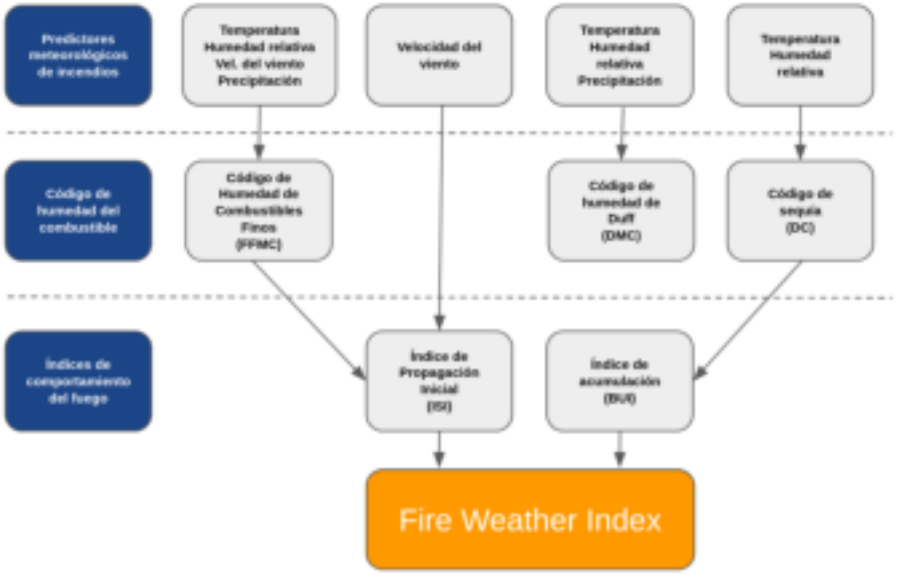


Figura 271: Estructura del sistema Canadiense FWI.

Aunque fue desarrollado originalmente para su uso en bosques en Canadá, la relativa simplicidad del enfoque del FWI ha llevado a su amplio uso en otros entornos, tanto dentro de Canadá como en otras regiones. La aplicación del índice se basa en su capacidad para proveer información sobre el peligro de incendios . Para eso, generalmente se categoriza en una escala descriptiva que va entre peligro muy bajo, bajo, moderado, alto a muy alto. Hay diferentes maneras de clasificar los umbrales de cada clase que dependen de la aplicación requerida (Kudláčková et al., 2024).

En este estudio investigamos el uso potencial del índice FWI para pronosticar el peligro de incendios en el Valle de Aburrá. Además, exploramos cómo el FWI y sus componentes se relacionan con la actividad histórica de incendios.

Metodología

Observaciones

Para el cálculo del índice FWI a partir de observaciones se utilizaron datos de la red de estaciones meteorológicas y pluviométricas del SIATA ubicadas a lo largo del Valle de Aburrá. Estos datos incluyen observaciones a las 12:00 pm de temperatura, humedad relativa, el máximo de velocidad del viento de los últimos 10 minutos y precipitación acumulada de 24 horas, de un total de 20 estaciones in situ para el período de 2018-2024. Por lo tanto, el resultado consiste en un conjunto de datos diarios del índice FWI y de cada uno de sus componentes. Finalmente, se evalúa la relación entre el FWI con los registros de ocurrencias de incendios y columnas de humo, y se compara con el FWI calculado a partir de simulaciones.

Simulaciones

Para el cálculo espacial del FWI se utilizaron datos de pronóstico meteorológico del Weather Research and Forecasting (WRF) producido en SIATA, en el período 2018 - 2022. El índice está escrito en Python y genera pronósticos FWI diarios. El FWI se calcula en cada ubicación de celda de la cuadrícula dentro del dominio del Valle de Aburrá, utilizando datos válidos en la hora local estándar del mediodía, teniendo en cuenta la diferencia horaria con respecto a UTC. El modelo genera archivos de salida en formato NetCDF que contienen los valores del FWI diarios y los valores del código de humedad del combustible guardados se utilizan posteriormente como entradas iniciales para el siguiente día de pronóstico. El modelo se inicializó el 1 de enero de 2018 utilizando valores de inicio predeterminados de 85, 6 y 15 para FFMC, DMC y DC, respectivamente (Van Wagner et al., 1985; Lawson and Armitage, 2008)

Resultados y discusión

El FWI calculado en las estaciones in situ y los registros de incendios entre 2018 - 2024 se muestran en la Figura 272. Se puede observar que para nuestro territorio, los valores del FWI varían entre 0 y 30, siendo los valores cercanos a cero aquellos días con condiciones meteorológicas que no favorecen la ignición ni la propagación del fuego, y los valores superiores a 20 aquellos días que si favorecen. Por lo tanto, valores superiores a 20 en el FWI indican un alto peligro de incendios forestales, con condiciones favorables para la rápida propagación del fuego. De acuerdo a la naturaleza misma del índice, para que se alcancen estos valores del índice con peligro alto se requieren días con altas temperaturas, baja humedad relativa, períodos prolongados sin lluvias y vientos fuertes. Comparado estos valores del FWI con otros estudios en el mundo, como en Norteamérica o Europa (Dentoni et al., 2015; Rodell et al., 2024; Kudláčková et al., 2024), no se alcanzan valores tan altos como en estas regiones, evidenciando que en nuestra zona no se presentan condiciones tan extremas para la ignición y propagación de incendios forestales. Por otro lado, se observa que en los días con valores bajos de FWI (<5) las columnas de humo diarios son pocos (<2 columnas de humo) pero pueden producirse, mientras que en aquellos días con valores más altos de FWI el número de ocurrencia diarias aumenta.

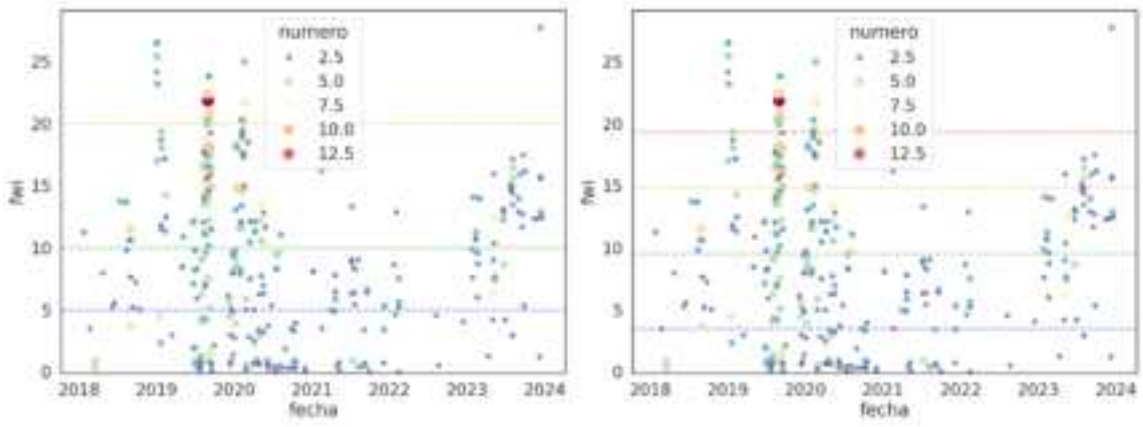


Figura 272: FWI calculado con las estaciones meteorológicas en el Valle de Aburrá para días con ocurrendia de incendios forestales.

La Figura 273 muestra los valores diarios de FWI para cada una de las estaciones meteorológicas en el 2019, así como el número de registros de incendios reportados en ese año. Los colores azules y verdes indican bajos valores del FWI, mientras que los colores naranjas y rojos indican valores altos. Se pueden observar marcados dos temporadas en las que los registros de columnas de humo y los resultados del FWI son más altos que el resto del año lo que coincide con las temporadas de menos lluvias en el Valle de Aburrá.

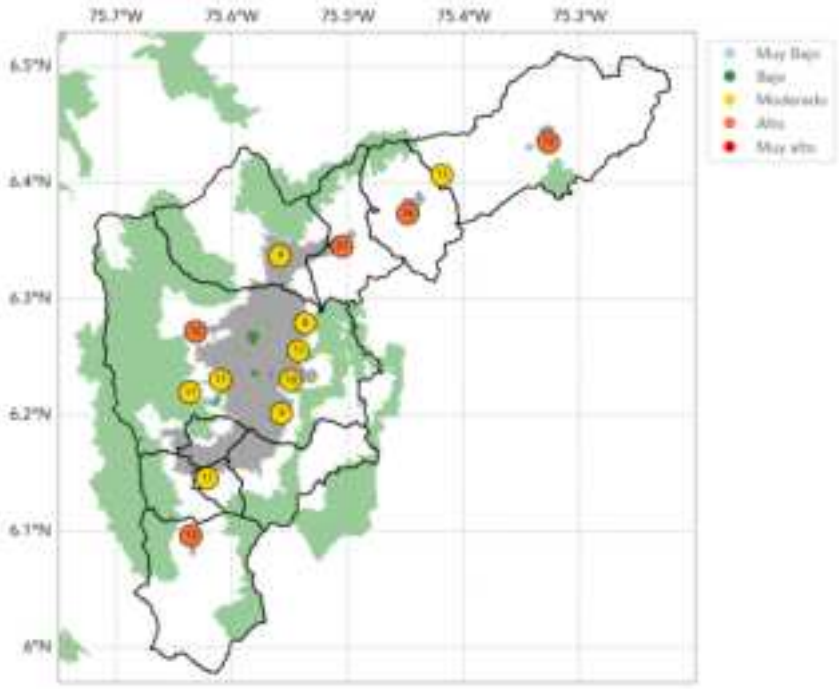


Figura 273: FWI del 12 de febrero de 2024 para algunas estaciones meteorológicas en el Valle de Aburrá.

En este estudio se definieron los umbrales con los percentiles 30, 70, 90 y 95 del histórico de estimaciones del FWI. Sin embargo, es preferible explorar otras metodologías para definir la que mejor se adecúa para nuestra región. Según la clasificación inicialmente propuesta, se muestra el resultado del índice para el 12 de febrero de 2024 en la Figura 274.

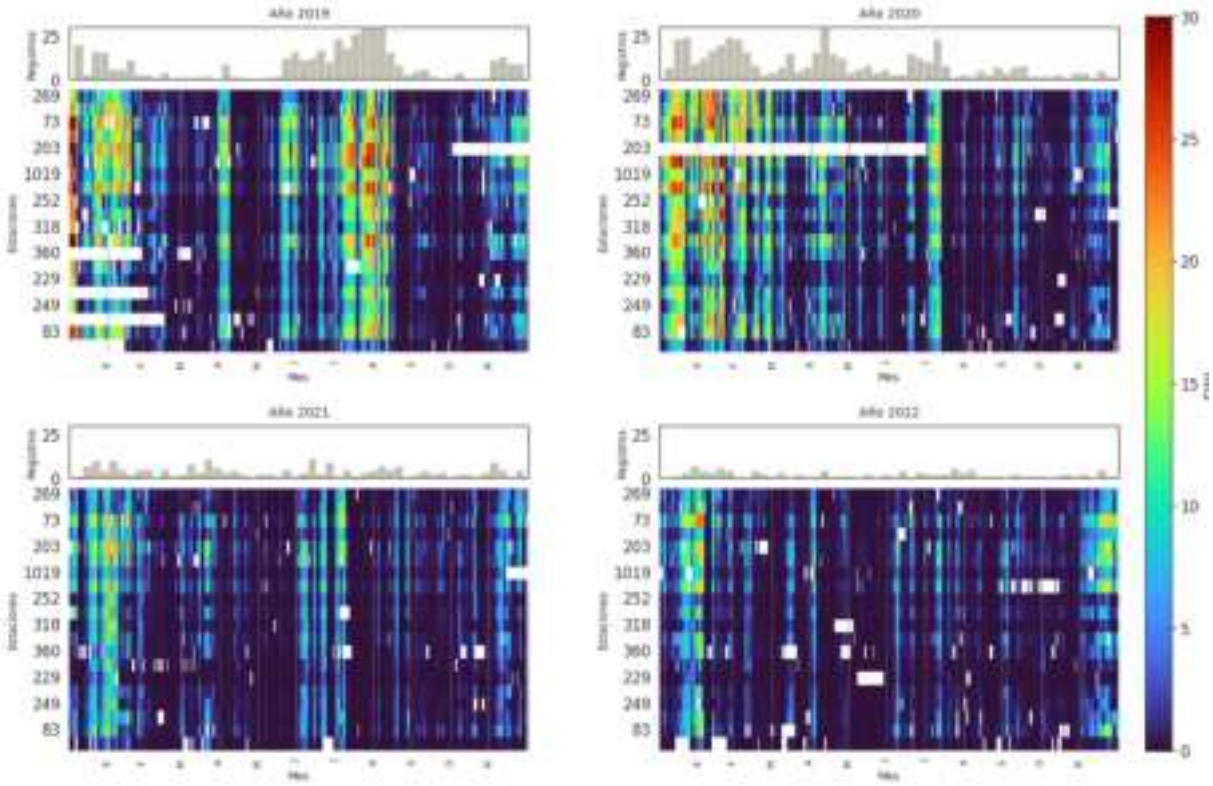


Figura 274: Matriz de estimaciones de FWI para algunas estaciones meteorológicas en el VA y registro de columnas de humo para los años 2019 a 2022.

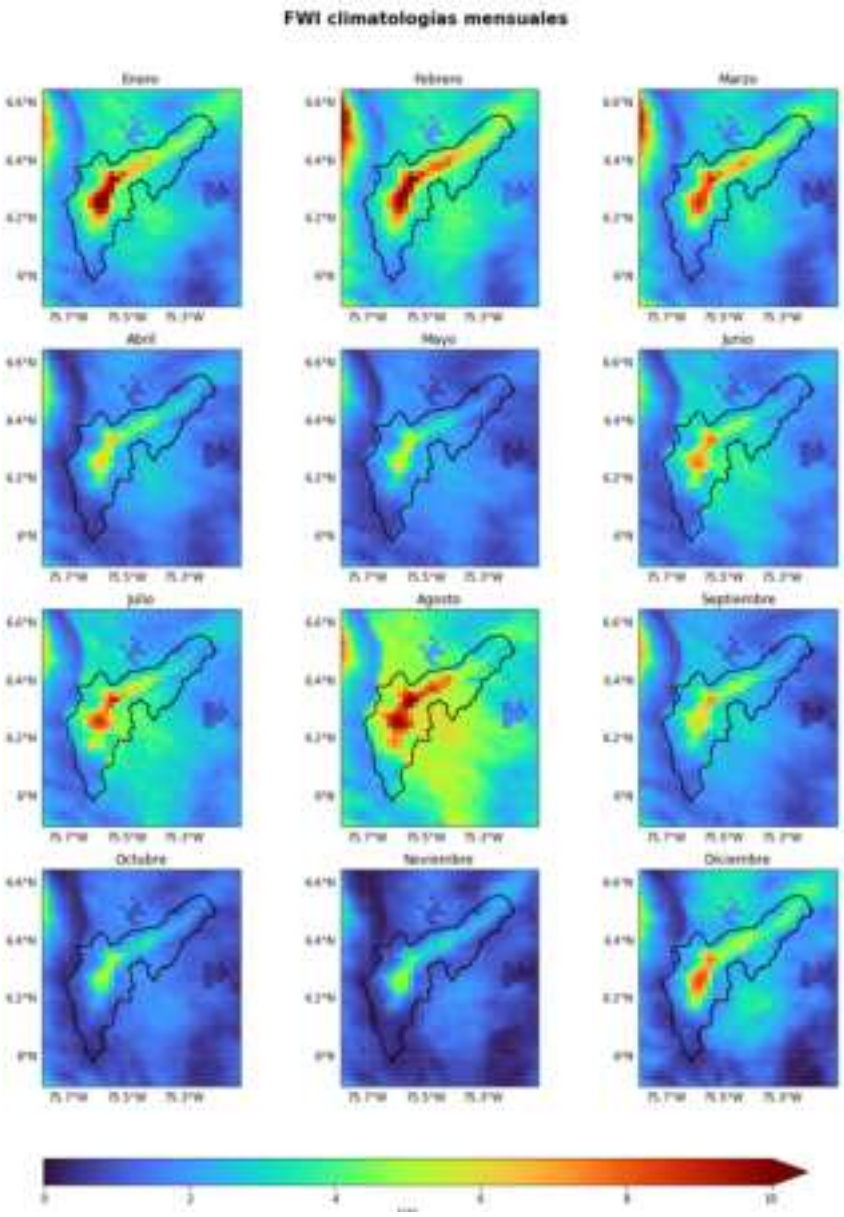


Figura 275: Media anual multianual FWI para los años 2018-2024 estimado con datos del WRF producido en SIATA.

Parte V: Análisis de variables hidrometeorológicas y su relación con la ocurrencia de incendios forestales

Introducción

Los incendios forestales están influenciados por varios factores como la vegetación, la topografía, el comportamiento humano y los factores climáticos y meteorológicos (Flannigan et al., 2005; All et al., 2017). La existencia de múltiples factores que influencian los incendios forestales complica la comprensión de su comportamiento y la evaluación de su riesgo, ya que se deben considerar tanto variables humanas como ambientales. Estudios previos han demostrado la relevancia de estos factores combinados en la evaluación del riesgo de incendio (Massada et al., 2009; Martínez et al., 2009).

La ocurrencia de incendios forestales y de interfaz en el Valle de Aburrá es mayor en las temporadas secas o de menos lluvias que generalmente corresponden a los meses de diciembre, enero y febrero (DEF) y junio, julio y agosto (JJA). Las condiciones meteorológicas son un factor importante en los patrones de los incendios forestales. Las temporadas de menor precipitación o sequías prolongadas junto con las altas temperaturas inciden en el comportamiento de los incendios forestales. Estas condiciones afectan el contenido de humedad en la vegetación y los combustibles disponibles, incrementando la probabilidad de ignición, la velocidad de propagación y severidad del fuego (Camia and Amatulli, 2009; Benson et al., 2008).

La comprensión de las condiciones meteorológicas del Valle de Aburrá como la temperatura, humedad relativa, precipitación, velocidad del viento y radiación solar son útiles para entender los patrones de incendios forestales (Masinda et al., 2022). También, es de importancia analizar variables relacionadas con el estado de la vegetación y con las condiciones de sequía, ya que están relacionadas con la ocurrencia de incendios forestales (Wardlow et al., 2012). En algunos estudios se relaciona, la precipitación, la frecuencia de días secos o cálidos con la ocurrencia de incendios (Zubieta et al., 2021). En este estudio se analiza la relación entre las variables meteorológicas y la ocurrencia de incendios forestales y de interfaz en el Valle de Aburrá, con el objetivo de identificar condiciones que puedan favorecer estos eventos. Se hace uso de la información de las estaciones meteorológicas y de los registros de columnas de humo del sistema de monitoreo de SIATA que se tiene desde 2018 hasta la actualidad.

Metodología

Con los datos de las estaciones meteorológicas, instaladas dentro del Valle de Aburrá por SIATA, se realizó una exploración preliminar de los datos para determinar las condiciones extremas que se presentan en la región.

Luego, se calcularon parámetros climáticos relacionados con sequías (Zubieta et al., 2021) como el acumulado de precipitación, frecuencia de días secos y frecuencia de días cálidos. Polade et al. (2014) y Espinoza et al. (2016) definen la frecuencia de días secos (DDF por sus siglas en inglés) como la frecuencia acumulada de días con acumulados de precipitación menor a 1 mm. Polade et al. (2014) también considera el uso de umbrales teniendo en cuenta la precipitación local con los percentiles 5, 10, 15, 25 o 35. Por tanto, se analizan varios valores teniendo en cuenta los acumulados de precipitación en el Valle de Aburrá para determinar el umbral que mejor represente la relación con años secos y con mayor ocurrencia de incendios. Se utilizó la información recolectada por 8 de los pluviométros con mayor histórico de datos y distribuidos por el norte, centro y sur del Valle de Aburrá.

Para el cálculo de los parámetros relacionados con precipitación se usó la información de pluviómetros distribuidos en el Valle con mayor historia. En el caso de los parámetros relacionados con temperatura se

usó la temperatura de las estaciones meteorológicas que se encuentran en la zona de interfaz o que están cerca a lugares recurrentes de incendios. Los resultados se compararon con el registro de columnas de humo de SIATA desde el 2018 hasta la actualidad para evaluar su capacidad de describir las condiciones meteorológicas en relación con la ocurrencia de estos.

Resultados

En total, hay 2011 reportes de columnas de humo realizados por SIATA desde 2018 hasta 2024. En el registro se cuenta con ubicación, fecha y hora del reporte, sin embargo, no se diferencia si la columna de humo fue un incendio forestal o una quema. Por lo tanto, los análisis de condiciones meteorológicas relacionadas con incendios forestales se realizaron teniendo en cuenta la cantidad de reportes hechos por día, considerando que a mayor cantidad de reportes por día, las condiciones pueden ser más extremas. En la Figura 276 se muestra un resumen de los reportes, donde se observa que el máximo de reportes hechos por año fue en el 2019 seguido por el 2020. Mientras que la menor cantidad de reportes hechas por año fueron en los años 2022 y 2021.

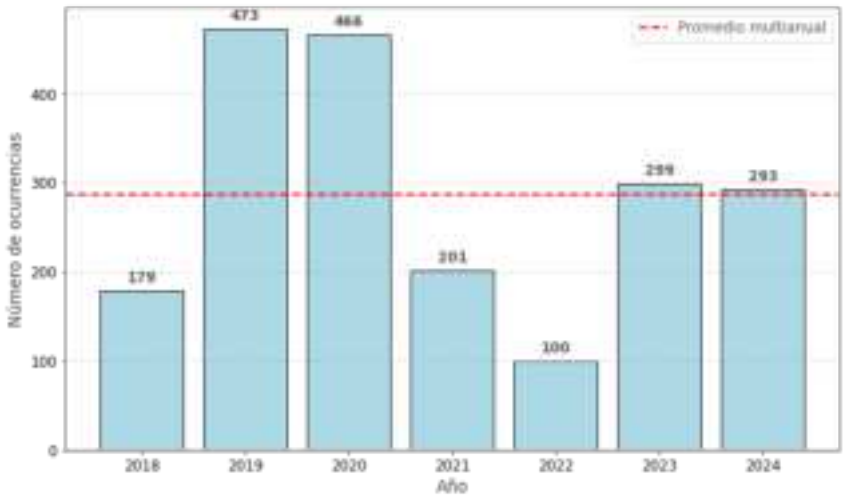


Figura 276: Acumulado de reportes de columnas de humo de SIATA por año entre 2018 y 2024.

Se consideraron las condiciones extremas para el análisis de la temperatura máxima y la humedad relativa mínima para los días de reporte y los 7 días anteriores a estos. En la Figura 277 (arriba) se observa que, en general, las condiciones centrales aumenta mientras más cercano está a la fecha de reporte. Además, las temperaturas para los días con al menos 4 y 5 reportes son más altas que para los días con 1 a 3 reportes. Principalmente, la mayoría de reportes se hacen con temperaturas máximas diarias mayores a 25°C, mientras que,más de 3 reportes se hacen con temperaturas máximas diarias mayores 26°C.

De manera similar, en la Figura 277 (abajo) se observa disminución de las condiciones centrales de la humedad relativa mientras más cercano está a la fecha de reporte. La humedad relativa mínima promedio para los días con 5 o más reportes reportes son más bajas. En este caso, la mayoría de reportes se hacen con humedad relativa mínima diaria menor a 60 %. Las condiciones más extremas se observa el último día con 5 o más reportes, donde en general la humedad relativa mínima pocas veces supera el 50 %.

En estas gráficas la dispersión de los datos es alta, esto puede deberse a la distribución de las estaciones meteorológicas y la diferencia de las condiciones meteorológicas en diferentes entornos. También, indica

que existen variedad de condiciones en las que se pueden presentar columnas de humo y podría ser de mayor utilidad tener más datos sobre los reportes, como duración o área afectada.

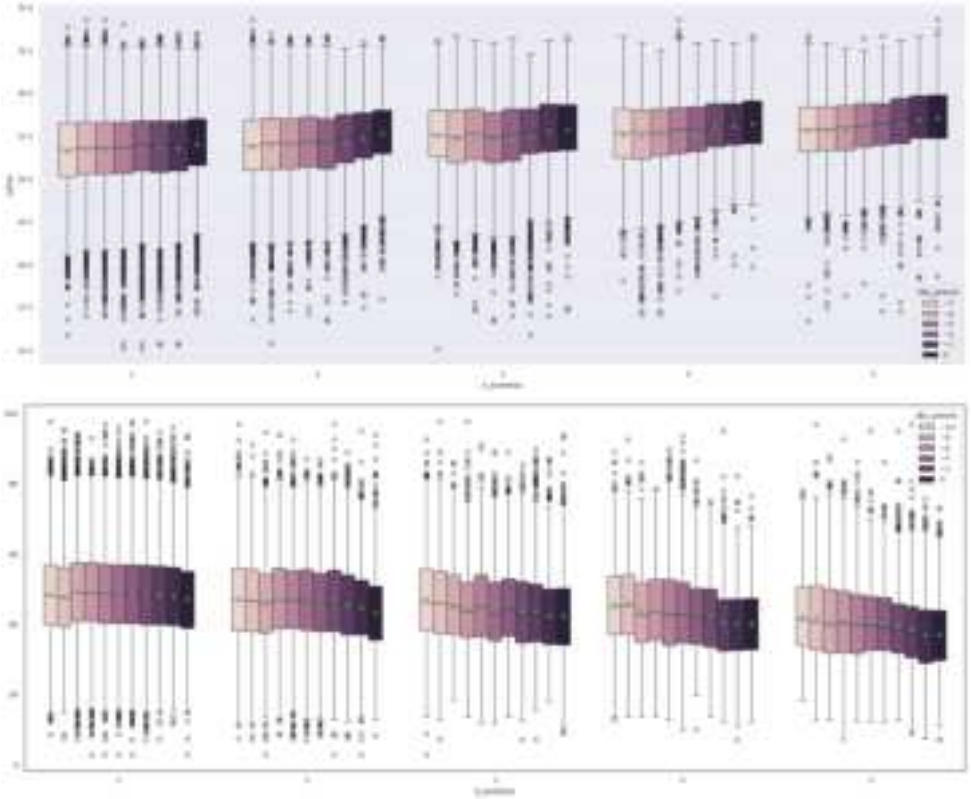


Figura 277: (Arriba) Temperatura máxima promedio (°C) y (Abajo) Humedad relativa mínima promedio(%), para los días previos a reportes de columnas de humo según número de reportes.

WP1.3. Insumos técnicos para herramientas operacionales/atención de emergencias

WP1.3.1. Revisión, análisis y evaluación de las capacidades existentes del proyecto para el acompañamiento en la atención de emergencias

Esta sección presenta los resultados de la revisión, y análisis de las capacidades técnicas y tecnológicas que actualmente posee el proyecto SIATA para el seguimiento de las variables ambientales relacionadas con las amenazas de tipo hidrológicas, geofísicas, climatológicas y meteorológicas presentes en el territorio; y el seguimiento de la calidad del aire, entendiendo que la contaminación atmosférica se genera tanto por fuentes antrópicas como naturales, y que el nivel de calidad del aire en el Valle de Aburrá está altamente relacionado con las variables ambientales monitoreadas por el proyecto.

En este punto vale la pena resaltar la definición de amenaza según la Ley 1523 de 2012 que promulgó el Gobierno de La República de Colombia y por la cual se adopta la política nacional de gestión del riesgo de desastres y se establece el Sistema Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres y se dictan otras disposiciones. Esta definición establece que la amenaza *es el peligro latente que un evento físico de origen natural, o causado, o inducido por la acción humana de manera accidental, se presente con una severidad suficiente para causar pérdida de vidas, lesiones u otros impactos en la salud, así como también daños y pérdidas en los bienes, la infraestructura, los medios de sustento, la prestación de servicios y los recursos ambientales.*

Seguimiento y monitoreo de amenazas

El siguiente es el listado de las amenazas, con los respectivas componentes de proyecto que lideran el seguimiento de la respectiva amenaza:

I. **Amenaza Hidrológica**: trabajo interdisciplinario entre los equipos de Hidrología, Meteorología, Geotecnia, Operacional, Telemetría, Teledetección y Calidad de Datos.

II. ***Amenaza Geofísica***:trabajo interdisciplinario entre los equipos de Ingeniería Sísmica, Geotecnia, Operacional, Telemetría, Teledetección y Calidad de Datos.

III. **Amenaza Climatológica**: trabajo interdisciplinario entre los equipos de Hidrología, Meteorología, Operacional, Telemetría, Teledetección y Calidad de Datos.

IV. **Amenaza Meteorológica y Climática**: trabajo interdisciplinario entre los equipos de Meteorología Hidrología, Operacional, Telemetría y Calidad de Datos.

V. **Amenaza por Contaminación del Aire**: Grupos Involucrados: Calidad de Aire, Operacional, Telemetría, Calidad de Datos.

VI. **Amenaza por Contaminación por ruido**: Grupos Involucrados: Calidad de Aire, Operacional, Telemetría, Calidad de Datos.

Capacidades tecnológicas del proyecto SIATA

Se presenta el listado de las principales variables, o aquellas magnitudes que representan la manifestación cuantificable de los procesos naturales que se relacionan con cada una de las amenazas de origen natural o antrópico a las que se hace seguimiento en el proyecto SIATA.

Esta caracterización contiene la siguiente información relacionada con cada variable: *variable, dato que se utiliza para la identificación de la variable, tipo de medición, sensor y marca que registra el dato, componentes del proyecto que intervienen.*

Variables físicas que se obtienen con las redes de monitoreo del proyecto

- **Precipitación in situ**: Intensidad y acumulación de la lluvia. Medición continua y en tiempo real cada minuto. Los equipos para esta medición son *pluviómetros de cazoleta* marca Davis, *pluviómetro por peso* OTT y *estaciones meteorológicoas compactas* marcas Vaisala WTX 520, Vaisala WTX 530, Luft WS700-UMB, Luft WS600-UMB, Thies Climate Sensor, Gill Maximet. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Hidrología, Geotecnia, Operacional, Calidad del Aire y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 24 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas pluviómetros se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red pluviométrica de SIATA.

- **Temperatura superficial del aire in situ**: Medición continua y en tiempo real cada minuto. Se realiza con *estaciones meteorológicas compactas*, marcas Vaisala WTX 520, Vaisala WTX 530, Luft WS700-UMB, Luft WS600-UMB, Thies Climate Sensor, Gill Maximet. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Hidrología, Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 25 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas meteorológicas se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red meteorológica de SIATA.

- **Viento superficial in situ**: Medición continua y en tiempo real cada minuto de la magnitud y dirección del viento superficial. Se realiza a través de *estaciones meteorológicas compactas* de las marcas Vaisala WTX 520, Vaisala WTX 530, Luft WS700-UMB, Luft WS600-UMB, Thies Climate Sensor, Gill Maximet. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Hidrología, Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 26 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas meteorológicas se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red meteorológica de SIATA.

- **Humedad relativa del aire en superficie**: Medición continua y en tiempo real cada minuto. Se obtiene a través de *estaciones meteorológicas compactas* marcas Vaisala WTX 520, Vaisala WTX

530, Luft WS700-UMB, Luft WS600-UMB, Thies Climate Sensor, Gill Maximet. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Hidrología, Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En el enlace Fichas técnicas meteorológicas se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red meteorológica de SIATA.

- **Presión atmosférica en superficie**: Medición continua y en tiempo real cada minuto mediante estaciones *meteorológicas compactas* marcas Vaisala WTX 520, Vaisala WTX 530, Luft WS700-UMB, Luft WS600-UMB, Thies Climate Sensor, Gill Maximet. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 28 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas meteorológicas se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red meteorológica de SIATA.

- **Radiación solar en superficie**: Medición continua y en tiempo real cada minuto de radiación solar incidente y radiación UV. Los equipos para esta medición son *piranómetros solar y piranómetros UV* marca KIPP&ZONEN referencias SMP11 y SMP10 y EPlab SPP. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Hidrología, Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 27 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas piranómetros se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de esta variable.

- **Clasificación de hidrometeoros**: Tamaño y cantidad de partículas, y tipo de precipitación (sólida-granizo o líquida-lluvia). Medición continua y en tiempo real cada minuto usando *disdrómetros* marcas Thies y OTT. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información. En la Tabla 24 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas disdrómetros se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red de disdrómetros del proyecto SIATA.

- **Reflectividad de radar meteorológico**: Medición continua y en tiempo real cada 5-6 minutos a partir del *radar meteorológico banda C de doble polarización y doppler* instalado en el corregimiento de Santa Elena. El fabricante es la empresa EEC - Entreprise Electronics Corporation. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Hidrología, Geotecnia, Calidad del Aire y Operacional. En la Tabla 24 se presentan detalles complementarios sobre esta variable.

- **Monitoreo de condiciones atmosféricas**: monitoreo de sistemas de precipitación de gran escala, según información derivada del satélite GOES-East de la NOAA (National Oceanographic and Atmospheric Administration, USA). La actualización de esta información depende de la variable pero oscila entre 5-10 minutos y se cuenta con un *sistema de recepción y procesamiento* (antena GOES) de la empresa Telespace de EEC, que permite la obtención en tiempo real de los 16 canales y demás sensores a bordo del satélite. Esta información es usada por los equipos de Meteorología, Hidrología, Calidad del Aire y Operacional.

- **Nivel de corrientes superficiales**: Medición continua y en tiempo real de la distancia entre la superficie del agua de la corriente y el sensor. Este registro se convierte en nivel, al restarle la profundidad del cauce (offset) en el punto de monitoreo. Se mide a partir de *sensores de nivel* marca SIEMENS LU referencias LR110 y LR120, *sensor de nivel tipo lidar* Benewake TF03, y *cámaras de imagen visible* marca AXIS. Esta información es usada por los equipos de Hidrología y Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 29 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas nivel se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red de nivel del proyecto SIATA.

- **Velocidad del agua**: Medición continua y en tiempo real de la velocidad superficial del agua en corrientes. Se mide a partir de un *radar de velocidad* marca Rika modelo RKL05 y Stalker Surface. Esta información es usada por los equipos de Hidrología y Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 30 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas velocidad se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de la red de velocidad superficial del proyecto SIATA.

- **Altura de la capa limite**: Estimación en tiempo real de la altura de la capa límite atmosférica de bajo nivel, la cual se realiza usando la información de retro-dispersión entregada por *ceilómetros* marca Vaisala. Esta información es usada por los equipos de Calidad del Aire y Operacional.

- **Sólidos suspendidos Totales (SST - LISTT)**: Medición en tiempo real a través de una *sonda acústica*, que de acuerdo a señales de sonido estima la carga de sedimentos (mg/litro) en corrientes superficiales en el punto de monitoreo.

- **Deformación del terreno**: Medición continua y en tiempo real y a partir de campañas de medición. Para el tiempo real se cuenta con registros de *extensómetros*, *TDR (Time Domain Reflectivity), satélites (metodología InSAR)*; mientras que las campañas se realizan con sobrevuelos con drones. Esta información es usada por el equipo de Geotecnia y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información. En la Tabla 33 se presentan detalles complementarios sobre esta variable.

- **Cambios en el terreno**: Medición en tiempo real a través de cámaras visibles y en campañas recolectando imágenes de sobrevuelos con drones para su posterior posprocesamiento. Esta información es usada por el equipo de Geotecnia y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y el equipo de Teledetección para el procesamiento de los sobrevuelos con drone.

- **Humedad del suelo**: Medición en tiempo real y en diferentes profundidades de la humedad del suelo. Para ello se usan *sensores de humedad y tensiómetros* marca Stevens Hydraprobe, Decagon 5TE FD, TEROS 21 Soil Water Potential. Esta información es usada por el equipo de Geotecnia y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información y del equipo de Calidad de Datos para revisar y calificar la validez de los datos. En la Tabla 31 se presentan detalles complementarios sobre esta variable y en el enlace Fichas técnicas

humedad del suelo se encuentra información asociada a cada una de las estaciones de monitoreo de esta red de monitoreo del proyecto SIATA.

- **Cambios de vegetación**: Medición continua a partir de satélites (Índices espectrales) y datos de campañas de drones. Esta información es usada y procesada por el equipo de Geotecnia del proyecto SIATA.

- **Variables morfométricas del terreno**: Mediante campañas de medición y trabajo en campo se hace levantamiento de este tipo de información, útil para la caracterización de zonas piloto para intrumentación y monitoreo y puntos críticos por inestabilidad del terreno. Esta información es usada y procesada por el equipo de Geotecnia del proyecto SIATA.

- **Variables geológicas-geotécnicas**: información obtenida mendiante campañas de medición y trabajo en campo, incluye además información recopilada en estudios geotécnicos de fuentes externas. Esta información es usada y procesada por el equipo de Geotecnia del proyecto SIATA.

- **Aceleración del terreno**: Medición continua y en tiempo real de la aceleración del terreno a partir de *acelerómetros* marca CUSP y Titan, referencias MPU-6000/MPU-6050, y *acelerómetros de bajo costo*. Esta información es usada y procesada por el equipo de Ingeniería Sísmica del proyecto SIATA y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Desplazamiento, velocidad y aceleración del terreno**: Medición continua y en tiempo real de la aceleración en las tres coordenadas espaciales (x, y, z). La velocidad y el desplazamiento se obtienen a partir de la integración de la aceleración obtenida a partir de equipos de medición marca Titan, Shakes 1D y Acelerógrafos CSI. Esta información es usada y procesada por el equipo de Ingeniería Sísmica del proyecto SIATA, el equipo Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Desplazamiento, velocidad y aceleración en estructuras**: Medición continua y en tiempo real (en la mayoría de las estaciones) de la aceleración en las tres coordenadas espaciales (x,y,z). La velocidad y el desplazamiento se obtienen a partir de la integración de la aceleración. Los equipos utilizados inluyen las marcas Titan, Shakes 4D y Acelerógrafos CSI. Esta información es usada y procesada por el equipo de Ingeniería Sísmica del proyecto SIATA, el equipo Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Velocidad vertical en el terreno y en estructuras**: Medición continua y en tiempo real en de la velocidad vertical utilizando sensores Titan y Shakes 4D. Esta información es usada y procesada por el equipo de Ingeniería Sísmica del proyecto SIATA, el equipo Operacional y cuenta con el soporte de Telemetría para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Respuesta frecuencial de edificaciones**: Medición y monitoreo vía campañas periódicas de vibración ambiental en edificaciones y estructuras priorizadas. Esta información es usada y procesada por el equipo de Ingeniería Sísmica del proyecto SIATA. Actividad suspendida desde el 14 de febrero

de 2025.

- **Imágenes de la superficie del terreno**: Imágenes en espectro visible 360º, imágenes térmicas, panorámicas y videos de la superficie del terreno, obtenidas mediante campañas de medición y sobrevuelos con drone. Para esto se usan *cámaras visibles* Zenmuse H20T, Zenmuse P1 y Sony RX1-II, *LiDAR* Zenmuse L1, y *Térmicas* Zenmuse H20T. Esta información es generada y procesada por el equipo de Teledetección y utilizada por Hidrología, Geotecnia, Apropiación Social del Conocimiento, y entidades de GRD.

- **Productos cartográficos**: Modelos Digitales de Superficie -DSM-, Modelos Digitales de Terreno -DTM-, nubes de puntos y ortomosaicos. Esta información es generada y procesada por el equipo de Teledetección y utilizada por Hidrología, Geotecnia, Apropiación Social del Conocimiento, y entidades de GRD.

- **Columnas de humo**: Monitoreo continuo a partir de imágenes de cámaras visibles e infrarrojas para el seguimiento de columnas de humo en incendios de cobertura vegetal. Se usan cámaras visibles y térmicas marca Flir, algunas con posicionador 360º. Esta información es utilizada por el equipo Operacional e Hidrología.

- **Material particulado (PM)**: Medición continua de partículas de diámetro menor a 1 micra (PM1.0), 2.5 micras (PM2.5) y 10 micras (PM10). Para ello se tienen diferentes equipos de medición de partículas en el aire, *HI-VOL y BAM1020* para PM10, *BAM1020, BAM1022 y BGI modelo (low vol) PQ200* para PM2.5, y *Met One ES-624* para PM1.0. Adicional a estos equipos, se cuenta con una red de más de 300 sensores de bajo costo -*Ciudadanos Científicos*- que entregan información continua de PM2.5 y otras variables (ruido ambiental, humedad y temperatura). Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuente con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los sensores, protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Óxido de nitrógeno (NOx)**: Medición continua de la concentración de óxido de nitrógeno gaseoso en el aire. Esta se realiza mediante la aplicación del *método de quimiluminiscencia* usando el equipo Teledyne-200E. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuente con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Dióxido de azufre (SO_2)**: Medición continua de la concentración de dióxido de azufre gaseoso en el aire mediante el *método automático equivalente*, usando el equipo Teledyne-100E. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuenta con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Ozono (O_3)**: Medición continua de la concentración de ozono gaseoso en el aire mediante el *método de fotometría UV*, usando los equipos Teledyne-400E o Thermo-49C. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuenta con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Monóxido de carbono (CO)**: Medición continua de la concentración de monóxido de carbono gaseoso en el aire mediante *espectrometría infrarroja no dispersiva*, usando los equipos Teledyne-300E o Thermo-48C. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuenta con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **BTEX**: Medición continua de las concentraciones de Benceno, Tolueno, Etilbenceno y Xileno (BTEX) en el aire usando un *cromatógrafo de gases*. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuenta con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Black Carbon**: Medición continua de la concentración de Black Carbon en el aire usando el equipo *Aethalómetro Magee AE33*. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuenta con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Carbono Total**: Medición continua de la concentración de Carbono Total en el aire usando un *Analizador de Carbono Total* marca Magee modelo TCA08. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuenta con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Ruido ambiental**: Medición continua del nivel de presión sonora en decibeles usando *sonómetros*. Esta información es utilizada por el equipo de Calidad del Aire y Operacional, y cuenta con el soporte del equipo de Mantenimiento-CA para el desarrollo de los protocolos de adquisición y transmisión de la información.

- **Medición de lluvia ácida**: Se han realizado campañas de medición (recolección de muestras) en sitios y periodos específicos para determinar la acidez de la lluvia en el territorio. Esta información ha sido procesada y analizada por el equipo de Calidad del Aire y requiere pruebas de laboratorio.

- **Medición de HAPs**: Medición de HAPs (Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos) a partir de campañas de medición en sitios y periodos particulares de territorio metropolitano. Esta información ha sido procesada y analizada por el equipo de Calidad del Aire y requiere pruebas de laboratorio.

- **Caracterización química de PM2.5**: Se han realizado campañas de medición en sitios y periodos particulares. Esta información ha sido procesada y analizada por el equipo de Calidad del Aire y requiere pruebas de laboratorio.

Variables físicas que se obtienen de otras fuentes externas al proyecto

- **Actividad ceráunica producida por eventos atmosféricos**: Medición continua y en tiempo real de la localización y tiempo de ocurrencia de descargas eléctricas. Existen dos fuentes de información, la primera es la *Red de Medición en tierra LINET* la cual proporciona información de descargas eléctricas en superficie, y la otra fuente corresponde a la información que entrega el sensor GLM (Global Lightning Mapper) a bordo del satélite GOES-East y que se obtiene a partir del sistema de adquisición de datos de GOES que opera el proyecto SIATA.

- **Puntos calientes en superficie identificados por satélite**: Número y localización de puntos calientes posiblemente asociados a incendios. Información con disponibilidad en tiempo real que se obtiene a partir de las *mediciones del Satélite MODIS y los análisis del proyecto FIRM de la NASA* (`https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/`). Esta información no tiene costo para el proyecto.

- **Proyecciones de precipitación y temperatura bajo escenarios cambio climático**: información de modelos climáticos sobre escenarios futuros provenientes del programa CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 6) el cual es un esfuerzo internacional de investigación que coordina el desarrollo y análisis de modelos y experimentos para estudiar el clima del pasado, presente y futuro. Esta información no tiene costo para el proyecto.

- **Localización y magnitud de eventos sísmicos**: esta información proviene del catálogo reportado por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y se obtiene a través de una API habilitada por el SGC para realizar las consultas. Este servicio no tiene costo para el proyecto.

- **Registro de llamada/reporte por movimientos en masa de la base de datos del DAGRD**.

- **Registro de reporte de avenida torrencial**: esta información se obtiene de la base de datos de Geohazards (`https://geohazards.com.co/` y no tiene costo para el proyecto.

- **Información externa del satelite GOES**: se encuentra en Amazon AWS y se utiliza cuando no el servicio de adqusición de datos en tiempo real del proyecto no está disponible. Tiene un pequeño tiempo de rezago.

- **Plataformas de información climática global como Windy y Nullschool**: estas plataformas web ofrecen pronósticos meteorológicos en escala global.

- **Información del Centro de Predicción Climática de la NOAA**: las plataformas en línea de NOAA ofrecen información sobre condiciones climáticas asociadas al ENSO (El Nilo-Oscilación del Sur, Huracanes, Ondas Tropicales, entre otros.

- **Información radares meteorológicos de Colombia**: se consultan imágenes de reflectividad de los radares del IDEAM, y la Aerocivil de manera complementaria. Esta información, en conjunto con el radar AMVA se usa para realizar la composición nacional de radares.



- **Información del ECMWF**: se utilizan pronósticos de precipitación y temperatura del centro de pronóstico europeo - ECMWF para una región que contiene el Valle de Abrrá. Estos pronósticos son inicializados cada día a las 00:00 y 12:00 UTC (17:00 y 12:00 Hora Local), y comprenden pronósticos de cada una de estas variables en horizontes de 15 días. La resolución temporal de estos pronósticos es de 1 hr en las primeras 90 horas, 3 hr para las 50 horas siguientes, y 6 hrs para el resto del tiempo. Ademas, existe un pronóstico subestacional a más largo plazo (45 dias) que se recibe cada dia. Esta información si tiene un costo para el proyecto.

- **Inventarios de movimientos en masa**: Se consulta a partir de ocurrencia de eventos e incluye la información de todos los municipios del Valle de Aburrá. Información gratuita y su obtención es a demanda.

- **Imágenes de satélite Sentinel 2**: imágenes de uso libre con frecuencia de revisita de 5/6 días. Incluye información para todos los municipios del Valle de Aburrá. Información gratuita y a demanda.

- **Microzonificaciones sísmicas**.

- **Reportes de organismos de Gestión del Riesgo**: bomberos, 123, UMGRD, entre otros.

- **Datos de GNSS**: se utilizan en el procesamiento de los productos capturados con el UAS Wingtra One, para la georeferenciación de los sobrevuelos; sin estos, no sería posible su procesamiento.

- **Artículos científicos y estudios locales**: se consultan al principio y durante el avance de cada investigación como referencia. se busca información para todos los municipios del Valle de Aburrá. Información gratuita y a demanda.

- **Reportes de organismos de Gestión del Riesgo**: La información se obtiene a partir de ocurrencia de eventos ocurridos en alguno de los municipios del Valle de Aburrá.

- **Datos de comunidades SATC**: Retroalimentación de las comunidades que hacen parte de los procesos de alertas comunitarias, en particular los de la cadena de llamados.

- **Información histórica de incendios de la UMGRD**: registros de ocurrencia de incendios de cobertura vegetal que alimentan el modelo de susceptibilidad de incencios. Información gratuita y a demanda.

- **Información de EPM para redes de drenaje urbano**: información sobre redes de alcantarillado, puntos críticos de atención recurrente.

- **Información satelital**: con resolución espacial entre 3.5 metros y 350 metros provenientes de Landsat, MODIS, Alos Palsar, Planet. Esta última tiene costo para descarga, no para visualización.

- **Pronóstico estacional de Copernicus, IRI**: resultados de modelos gloables en escala mensual, información útil para la elaboración del pronóstico trimestral o estacional. Información gratuita y a demanda.



Tablas resumen con la información mas relevante de las variables asociadas a las amenazas

En las Tablas que se presentan a continuación se resume la descripción del tipo de variable, la fuente de información, las escalas temporal y espacial, e información relacionada con la localización física de la información, disponibilidad, tipo de procesamiento (si es necesario), y paquete de trabajo de la actual vigencia a la que se asocia la variable.

[H]

Tabla 24: Información adicional sobre el monitoreo de la precipitación en el proyecto SIATA.

Variable: Precipitación		
Tipo	Precipitación Líquida o Sólida	**Parámetros y unidades**	- Lámina de precipitación [mm] - Acumulado de precipitación [mm] - Intensidad de precipitación [mm/hr] - Duración del evento/tormenta [min] - Racha [días] - Tamaño de gota de agua [mm]
Tipo de estimación	- Directa: dato en superficie, estación en tierra/Estimación superficial - Indirecta : Radar meteorológico, estimación para una elevación - Indirecta: Satelital con calibración usando estaciones en tierra, Estimación superficial - Indirecta: Información de modelos climáticos en escala global - Indirecta: Simulación usando modelo regional meteorológico - Indirecta: Información de reanálisis climáticos - Directa: tamaño de gota	**Fuente**	- Estaciones pluviométricas/meteorológicas propias/externas - Radar meteorológico Banda-C del AMVA (reflectividad de radar) - Productos IMERG-GPM-NASA (http://gpm.nasa.gov), CHIRPS (https://www.chc.ucsb.edu/data/chirps) - Salidas del modelo de pronóstico del GFS (para corto-mediano plazo), modelos del CMIP6 (para largo plazo) - Simulaciones usando modelo regional WRF para la región - Información del reanálisis climático ERA5 del ECMWF (https://www.ecmwf.int) - Información de disdrómetros de SIATA
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto (pluviometro, disdrómetro) - ∼5 minutos (reflectividad de radar) - 10 minutos (información de GOES) - 1 hora (precipitación de radar, IMERG, WRF, ERA5) - 3 horas (precipitación del modelo de pronóstico GFS) - 1 día (precipitación de CHIRPS, CMIP6, ERA5)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie - Espacial en grilla rectangular en superficie y para diferentes elevaciones - Polígonos definidos por límites de municipios - Escala general de cuenca hidrográfica
Localización física de los datos	- En base de datos de SIATA (pluviómetros, disdrómetros) - En almacenamiento interno (radar AMVA, GOES, IMERG, CHIRPS, GFS, CIMP6, WRF, ERA5)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (pluviómetros, disdrómetros, Radar AMVA, IMERG) - Posterior (CHIRPS, CIMP6, ERA5)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente (Pluviómetro, Disdrómetros, GOES, IMERG, CHIRPS, CMIP6, GFS, etc). - Derivado con procedimiento (Radar AMVA, GOES)	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	Desarrollado por SIATA (pluviómetros, disdrómetros); radar y GOES requieren software licenciado.

Table 24 Información adicional sobre el monitoreo de la precipitación en el proyecto SIATA.

Variable: Precipitación	
Procedimientos de validación de datos	Si
Fecha de inicio	2011
Paquetes de trabajo asociados con la variable	WP1.1, WP1.1.2, WP1.2.1, WP1.2.7, WP2.1.7, WP2.3.4
Fecha final	2025–

Tabla 25: Información adicional sobre el monitoreo de la temperatura superficial del aire en el proyecto SIATA.

Variable: Temperatura			
Tipo	Temperatura del aire: mínima, media y máxima	**Parámetros y unidades**	Temperatura del aire [°C]
Tipo de estimación	- Directa: Estación Meteorológica, Estimación cercana a la superficie - Directa: Medición del perfil vertical usando Radiosondas - Indirecta: Estimación para perfil vertical del radiómetro de microondas - Indirecta: Satelital con calibración usando estaciones en tierra - Indirecta: Información de modelos climáticos en escala global - Indirecta: Simulación usando modelo regional meteorológico - Indirecta: Información de Reanálisis climáticos	**Fuente**	- Estaciones meteorológicas propias - Termómetros instalados en equipos de bajo costo (Ciudadanos Científicos) - Campañas de medición usando Radiosondeos - Radiómetro de Microondas - Producto CHIRTSdaily (https://www.chc.ucsb.edu/data/chirtsdaily) - Salidas del modelo de pronóstico del GFS (para corto-mediano plazo) y modelos del CMIP6 (para largo plazo) - Simulaciones usando modelo regional WRF para la región - Información del reanálsis climático ERA5 del ECMWF (https://www.ecmwf.int)
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto (estaciones en tierra) - 1 hora (Promedio, Mínimo, y Máximo) - 3 horas (temperatura del modelo de pronóstico GFS) - 1 día (Promedio, Mínimo, y Máximo) - 1 día (CHIRTSdaily Min/Max)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie - Perfil vertical para diferentes alturas - Espacial en grilla rectangular en superficie y para diferentes elevaciones - Polígonos definidos por límites de municipios
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA (estaciones meteorológicas, ciudadanos científicos) - En almacenamiento interno (Radiometro, Radiosondeos, Modelos, Reanálisis Climáticos)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real: estaciones meteorológicas, ciudadanos científicos, radiómetro - Posterior: radiosondeos, modelos atmosféricos, reanálisis climáticos.
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente: estaciones meteorológicas, ciudadanos científicos, radiómetro, radiosondeos, modelos, reanálisis.	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por SIATA: estaciones meteorológicas y ciudadanos científicos. - Desarrollado por el vendedor
Procedimientos de validación	Si	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.1, WP1.1.2, WP2.3.4
Fecha de inicio	XXXX	**Fecha final**	2025–

Tabla 26: Información adicional sobre el monitoreo de la velocidad del viento en el proyecto SIATA.

Variable: Magnitud y dirección del viento			
Tipo	- Velocidades mínima, media y máxima - Dirección del viento	**Parámetros y unidades**	- Magnitud [m/s] - Dirección [azimut]
Tipo de estimación	- Directa: Estación Meteorológica, Estimación cercana a la superficie - Directa: Medición del perfil vertical usando Radiosondas - Indirecta: Estimación del perfil vertical del Radar Perfilador de viento - Indirecta: Información de modelos climáticos en escala global - Indirecta: Simulación usando modelo regional meteorológico - Indirecta: Información de Reanálisis climáticos	**Fuente**	- Estaciones meteorológicas propias - Campañas de medición usando Radiosondeos - Radar perfilador de viento - Salidas del modelo de pronóstico del GFS (para corto-mediano plazo) y modelos del CMIP6 (para largo plazo) - Simulaciones usando modelo regional WRF para la región - Información del reanálisis climático ERA5 del ECMWF (https://www.ecmwf.int)
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	Instantáneo de los radiosondeos - 1-minuto promedio (estaciones en tierra) - 1 hora (modelo regional WRF) - 3 horas (modelo de pronóstico GFS)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie - Perfil vertical para diferentes alturas - Espacial en grilla rectangular en superficie y para diferentes elevaciones - Polígonos definidos por límites de municipios
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA (estaciones meteorológicas) - En almacenamiento interno (Radar Perfilador, Radiosondeos, Modelos, Reanálisis Climáticos)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real: Estaciones Meteorológicas Radar Perfilador - Posterior: Radiosondeos, Modelos Atmosféricos, Reanálisis Climáticos)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente: estaciones meteorológicas, Radar Perfilador, Radiosondeos, Modelos, Reanálisis	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por SIATA: estaciones meteorológicas - Desarrollado por el vendedor: Radar Perfilador, Radiosondeos
Procedimientos de validación	Si	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.1, WP1.2.1, WP2.3.4
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025...

Tabla 27: Información adicional sobre el monitoreo de la radiación solar en el proyecto SIATA.

Variable: Radiación solar			
Tipo	- Radiación solar incidente - Radiación UV	**Parámetros y unidades**	- Radiación de onda corta, total, difusa y directa [W/m2] - Radiación solar ultravioleta [W/m2] e Indice UV [IUV]
Tipo de estimación	- Directa: Piranómetros, estimación puntual - Directa: Piranómetros UV, estimación puntual	**Fuente**	- Piranómetros - Piranómetros UV
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto promedio (estaciones en tierra)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por SIATA
Procedimientos de validación	- No	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1, WP1.2
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 28: Información adicional sobre el monitoreo de la presión atmosférica en el proyecto SIATA.

Variable: Presión atmosférica en superficie			
Tipo	- Presión atmosférica	**Parámetros y unidades**	- Presión atmosférica [hPa]
Tipo de estimación	- Directa: Estación meteorológica/barómetro en superficie - Indirecta - Información de modelos climáticos en escala global - Indirecta - Simulación usando modelo regional meteorológico - Indirecta - Información de Reanálisis climáticos	**Fuente**	- Estación meteorológica - Barómetro instalados en equipos de bajo costo (Red de Ciudadanos Científicos) Simulaciones usando modelo regional WRF para la región Información del reanálsis climático ERA5 del ECMWF (https://www.ecmwf.int)
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto (estaciones en tierra) 1 hora (modelos WRF, ERA5) 3 horas (modelo de pronóstico GFS)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie Espacial en grilla rectangular en superficie y en diferentes alturas en la vertical
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA (estaciones meteorológicas, ciudadanos científicos) - En almacenamiento interno (Modelos, Reanálisis Climáticos)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (Estaciones Meteorológicas, Ciudadanos Científicos) - Posterior (Modelos, Reanálisis Climáticos)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente (estaciones meteorológicas, ciudadanos científicos, Modelos, Reanálisis)	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por SIATA (estaciones meteorológicas, ciudadanos científicos)
Procedimientos de validación	- XXXX	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1, WP1.2
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 29: Información adicional sobre el monitoreo del nivel en corrientes en el proyecto SIATA.

Variable: Nivel (Lámina/profundidad de agua)			
Tipo	- Superficie libre en corriente superficial - Superficie libre en drenaje urbano	**Parámetros y unidades**	- Lámina [m] Pico de la hidrógrafa [m]
Tipo de estimación	- Directa: Monitoreo in-situ - Indirecta: Resultados de simulación de modelos hidrológicos-hidráulicos	**Fuente**	- Sensores de nivel en corrientes superficiales - Cámaras de vigilancia de secciones transversales en corrientes superficiales - Simulaciones del modelo de Onda Cinemática - Modelos hidrológicos SAC-SMA, SWAT y TETIS - Red de nivel de alcantarillado de aguas lluvias en puntos críticos del drenaje urbano - Cámaras de vigilancia de puntos críticos del drenaje urbano
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA (sensores de nivel) - En almacenamiento interno (Modelos, Simulaciones y Imágenes de Cámaras)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (Sensores, Piezómetros, Cámaras) - Posterior (Modelos)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Calibración y rectificación de nivel en visitas Se emplea pozómetro	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.2. WP1.2.3. WP1.2.5 WP1.2.8
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 30: Información adicional sobre el monitoreo de la velocidad de corrientes en el proyecto SIATA.

Variable: Velocidad de la corriente			
Tipo	- Velocidad superficial de la corriente de agua	**Parámetros y unidades**	- Velocidad superficial [m/s]
Tipo de estimación	- Directa: Monitoreo in-situ - Indirecta: Resultados de simulación de modelos hidrológicos-hidráulicos	**Fuente**	- Sensores de velocidad del agua (RIKA) en corrientes superficiales - Simulaciones del modelo de Onda Cinemática - Modelos hidrológicos SAC-SMA, SWAT y TETIS
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (Sensores) - Posterior (Modelos)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Rectificación con sensor manual y aforos	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.2. WP1.2.3. WP1.2.5 WP1.2.8
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 31: Información adicional sobre el monitoreo de la humedad del suelo en el proyecto SIATA.

Variable: Humedad del suelo		Parámetros y unidades	- Porcentaje (%) - Volumen de agua por volumen de suelo (m^3/m^3)
Tipo	- Humedad del suelo	**Fuente**	- Sensores de humedad (STEVENS) en suelo - Tensiómetros - Modelos hidrológicos SAC-SMA, SWAT y TETIS
Tipo de estimación	- Directa: Monitoreo in-situ - Indirecta: Resultados de simulación de modelos hidrológicos-hidráulicos	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (Sensores) - Posterior (Modelos)
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.2. WP1.2.3. WP1.2.5 WP1.2.8
Procedimientos de validación	- Ejercicio de validación en laboratorio (equipo Geotecnia)	**Fecha final**	2025
Fecha de inicio	- XXXX		

Tabla 32: Información adicional sobre el monitoreo de sólidos suspendidos totales en el proyecto SIATA.

Variable: Sólidos Suspendidos Totales			
Tipo	- Sólidos Suspendidos Totales	**Parámetros y unidades**	- Carga de sedimentos en la corriente [mg/litro]
Tipo de estimación	- Directa: Monitoreo in-situ - Indirecta: Resultados de simulación de modelos hidrológicos-hidráulicos	**Fuente**	- Sonda acústica - Modelos hidrológicos SAC-SMA, SWAT y TETIS
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (Sensores) - Posterior (Modelos, campañas de medición)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Validación con aforos sólidos	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.2. WP1.2.3. WP1.2.5 WP1.2.8
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 33: Información adicional sobre el monitoreo de la deformación del terreno en el proyecto SIATA.

Variable: Deformación del terreno			
Tipo	- Deformación del terreno	**Parámetros y unidades**	- Deformación [mm]
Tipo de estimación	- Directa: Monitoreo in-situ	**Fuente**	- Información del Extensómetro
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Si	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.6, WP1.2.10 y WP1.2.11
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 34: Información adicional sobre el monitoreo de la aceleración del terreno en el proyecto SIATA.

Variable: Aceleración del terreno	
Tipo	- Aceleración del terreno
Tipo de estimación	- Indirecta: Monitoreo in-situ
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 50 - 200 sps (muestras/segundo)
Localización física de los datos)	- En almacenamiento interno (SIATA)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente
Procedimientos de validación	- No
Fecha de inicio	- XXXX
Parámetros y unidades	- Aceleración [m/s2], [cm/s2]
Fuente	- Procesamiento del dato de superficie (counts") del acelerógrafo Titan - Procesamiento del dato de superficie del sismógrafo
Escala espacial	- Puntual en superficie
Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención	- En tiempo real - Posterior mediante recolección manual
Software para recuperación,transmisión y almacenamiento	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Paquetes de trabajo asociados con la variable	WP1.2.6, WP1.2.10 y WP1.2.11
Fecha final	2025

Tabla 35: Información adicional sobre el monitoreo de la aceleración del terreno en el proyecto SIATA.

Variable: Desplazamiento del terreno			
Tipo	- Desplazamiento del terreno	**Parámetros y unidades**	- Desplazamiento [m]
Tipo de estimación	- Indirecta: Monitoreo in-situ	**Fuente**	- Procesamiento del dato del acelerógrafo CSI o Titan - Procesamiento del dato de superficie del sismógrafo
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 50 - 200 sps (muestras/segundo)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos SIATA (Sensores CSI) - En almacenamiento interno (SIATA) (Sensores Titan)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real - Posterior mediante recolección manual
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- No	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.6, WP1.2.10 y WP1.2.11
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 36: Información adicional sobre el monitoreo de la aceleración en estructuras en el proyecto SIATA.

Variable: Aceleración en Estructuras			
Tipo	- Aceleración en Estructuras	**Parámetros y unidades**	- Aceleración x,y,z [m/s2] [cm/s2]
Tipo de estimación	- Indirecta: Monitoreo in-situ	**Fuente**	- Procesamiento del dato del Acelerógrafo mas Geófono
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 100 sps (muestras/segundo)	**Escala espacial**	- Puntual en edificaciones
Localización física de los datos)	- En almacenamiento interno (SIATA)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real - Posterior mediante recolección manual
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- No	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.6, WP1.2.10 y WP1.2.11
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 37: Información adicional sobre el monitoreo de la velocidad en estructuras en el proyecto SIATA.

Variable: Velocidad en estructuras			
Tipo	- Velocidad en estructuras	**Parámetros y unidades**	- Velocidad x,y,z [m/s]
Tipo de estimación	- Indirecta: Monitoreo in-situ	**Fuente**	- Procesamiento del dato del Acelerógrafo mas Geófono
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 100 sps (muestras/segundo)	**Escala espacial**	- Puntual en edificaciones
Localización física de los datos)	- En almacenamiento interno (SIATA)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real - Posterior mediante recolección manual
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- No	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.6, WP1.2.10 y WP1.2.11
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 38: Información adicional sobre el monitoreo del desplazamiento en estructuras en el proyecto SIATA.

Variable: Desplazamiento en estructuras			
Tipo	- Desplazamiento en estructuras	**Parámetros y unidades**	- Desplazamiento x,y,z [m]
Tipo de estimación	- Indirecta: Monitoreo in-situ	**Fuente**	- Procesamiento del dato del Acelerógrafo mas Geófono
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 100 sps (muestras/segundo)	**Escala espacial**	- Puntual en edificaciones
Localización física de los datos)	- En almacenamiento interno (SIATA)	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real - Posterior mediante recolección manual
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- No	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.2.6, WP1.2.10 y WP1.2.11
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 39: Información adicional sobre el monitoreo de PM2.5 en el proyecto SIATA.

Variable: PM2.5			
Tipo	Material particulado menor a 2.5 µm (PM2.5)	**Parámetros y unidades**	- Material particulado [µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación Oficial in-situ - Directa: Sensor de bajo costo in-situ	**Fuente**	- Sensor de medición de partículas en el aire (BAM1020 o BAM1022) - Sensores de bajo costo (Ciudadanos Científicos)
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto (BAM1022) - 1 hora (BAM1020) - 1-día (equipos manuales)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (Equipos automáticos) - Posterior (Equipos manuales)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente (BAM1020) Con procesamiento adicional (BAM1022, equipos manuales)	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 40: Información adicional sobre el monitoreo del PM10 en el proyecto SIATA.

Variable: PM10			
Tipo	Material particulado menor a 10 µm (PM10)	**Parámetros y unidades**	- Material particulado [µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación Oficial in-situ - Directa: Sensor de bajo costo in-situ	**Fuente**	- Sensor de medición de partículas en el aire - Sensores de bajo costo (Ciudadanos Científicos)
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto (Ciudadanos Científicos) - 1 hora - 1-día (equipos manuales)	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real (Equipos automáticos) - Posterior (Equipos manuales)
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 41: Información adicional sobre el monitoreo deL PM1 en el proyecto SIATA.

Variable: PM1			
Tipo	Material particulado menor a 1 µm (PM1)	**Parámetros y unidades**	- Material particulado [µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación in-situ	**Fuente**	- Sensor de medición de partículas en el aire Met-One ES-624
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto - 1 hora	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 42: Información adicional sobre el monitoreo de nitrógeno en el proyecto SIATA.

Variable: Oxido de Nitrógeno			
Tipo	Oxido de Nitrógeno (NOx)	**Parámetros y unidades**	- Concentración de óxido de nitrógeno gaseoso en el aire - NOx en [ppm] - NO y NO2 en [ppb] y en [µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación in-situ	**Fuente**	- Medición continua usando el equipo Teledyne-200E
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto - 1 hora	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente Las concentraciones de NO y NO2 se reportan en [µg/m3] y son medidas originalmente en [ppb]	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 43: Información adicional sobre el monitoreo de monóxido de carbono en el proyecto SIATA.

Variable: Monóxido de Carbono			
Tipo	Monóxido de Carbono (CO)	**Parámetros y unidades**	- Concentración de monóxido de carbono gaseoso en el aire [ppm y µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación in-situ	**Fuente**	- Medición continua usando equipos Teledyne-300E o Thermo48C
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto - 1 hora	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente Las concentraciones se reportan en [µg/m3] y son medidas originalmente en [ppb]	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 44: Información adicional sobre el monitoreo de ozono en el proyecto SIATA.

Variable: Ozono			
Tipo	Ozono (O3)	**Parámetros y unidades**	- Concentración de ozono gaseoso en el aire [ppm y µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación in-situ	**Fuente**	- Medición continua usando equipos Teledyne-400E o Thermo-49C
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto - 1 hora	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente Las concentraciones se reportan en [µg/m3] y son medidas originalmente en [ppb]	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 45: Información adicional sobre el monitoreo de dióxido de azufre en el proyecto SIATA.

Variable: Dióxido de Azufre			
Tipo	Dióxido de Azufre (SO2)	**Parámetros y unidades**	- Concentración de dióxido de azufre gaseoso en el aire [ppm y µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación in-situ	**Fuente**	- Medición continua usando el equipo Teledyne-100E
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto - 1 hora	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente Las concentraciones se reportan en [µg/m3] y son medidas originalmente en [ppb]	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 46: Información adicional sobre el monitoreo de black carbon en el proyecto SIATA.

Variable: Black Carbon			
Tipo	Black Carbon (BC)	**Parámetros y unidades**	- Concentración de carbono negro en el aire [µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación in-situ	**Fuente**	- Medición continua usando el equipo Aethalómetro Magee AE33
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 1-minuto	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente La contribución porcentual se calcula a partir del porcentaje de biomasa	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Tabla 47: Información adicional sobre el monitoreo de carbono total en el proyecto SIATA.

Variable: Carbono Total			
Tipo	Total Carbon (TC)	**Parámetros y unidades**	- Concentración de carbono total en el aire [µg/m3]
Tipo de estimación	- Directa: Estación in-situ	**Fuente**	- Medición continua usando el equipo Aethalómetro Magee AE33
Escala temporal (frecuencia de monitoreo)	- 20-minutos	**Escala espacial**	- Puntual en superficie
Localización física de los datos)	- En base de datos de SIATA Disponible en portal web para visualización y descarga	**Disponibilidad en tiempo real o posterior a su obtención**	- En tiempo real
Procesamiento necesario para su obtención	- Obtenido directamente del sensor/fuente	**Software para recuperación,transmisión y almacenamiento**	- Desarrollado por el proyecto SIATA
Procedimientos de validación	- Se cuenta con un procedimiento estandarizado y documentado para el proceso de validación	**Paquetes de trabajo asociados con la variable**	WP1.1.3; WP1.2.12; WP2.2.1; WP2.2.3
Fecha de inicio	- XXXX	**Fecha final**	2025

Capacidades técnicas del proyecto SIATA para el apoyo de emergencias durante la temporada marzo-abril-mayo de 2025

El proyecto SIATA cuenta actualmente con la capacidad de realizar un monitoreo permanente y en tiempo real de variables físicas que definen las amenazas listadas al inicio de la sección, mediante la instrumentación presentada en los apartados anteriores. El desarrollo local de tecnología, la adaptación a las condiciones del territorio y el contar con personal técnico altamente calificado tanto a nivel científico como en actividades de instalación y campo, hizo posible que durante la vigencia del CCT016 de 2024 se brindara apoyo y acompañamiento a la Entidad, el Distrito de Medellín y los municipios del Valle de Aburrá en la atención de la materialización del riesgo cuando fue requerido. Estos apoyos incluyeron desde visitas de campo para evaluar la viabilidad de instalación de sensores para monitoreo en puntos críticos de los municipios (conforme con disponibilidad de inventario) hasta la implementación de procesos comunitarios conducentes a la instauración de Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios y su posterior acompañamiento, sostenibilidad y generación de alertas.

En particular, durante esta vigencia se dió apoyo en la atención de emergencias ocurridas en los municipios de Bello, Copacabana, Sabaneta, Distrito de Medellín, La Estrella, Itagüí, Girardota, Barbosa y Venecia por activación con el DAGRAN. En el enlace Bitácora apoyos emergencias se encuentra el listado de acciones llevadas a cabo desde el proyecto para aquellos apoyos que por su magnitud involucraron la participación interdisciplinaria de diferentes equipos del proyecto SIATA.

La mayoría de los apoyos ocurrieron como respuesta a las emergencias la temporada de lluvias marzo-abril-mayo de 2025, dentro del marco de actuación del primer COEM (Centro de Operación de Emergencias Metropolitano) instaurado por el AMVA entre el 9 de mayo y el 6 de junio de 2025, el cual contó con la participación activa de personal del proyecto SIATA de las componentes de Geociencias, Apropiación Social del Conocimiento, Tecnologías de la Información y Logística y Mantenimiento, aportando conocimiento técnico en temas relacionados con pronóstico meteorológico, modelación y monitoreo de movimientos en masa, crecientes e inundaciones, procesos educativos, sociales y comunicaciones, sobrevuelos con drones, teledetección a partir de información satelital, salidas a campo para viabilidad técnica de instrumentación, así como la instalación de sensores para el monitoreo continuo en las zonas afectadas. Como resultado de las acciones de apoyo realizadas durante la temporada, en el enlace Reporte temporada MAM 2025 se presenta el resumen de las condiciones hidrolclimáticas de la primera temporada de lluvias del año, asi como el resumen de las activaciones de apoyo realizadas desde el proyecto durante el mismo periodo.

Durante el mes de junio, que típicamente marca el inicio de la temporada seca de mitad del año, se presentaron altos acumulados de precipitación que posiblemente dieron origen a la emergencia presentada en la vereda Granizal. En este caso, si bien ya no se tenía establecido un COEM, desde el AMVA se prestó apoyo desde el inicio de la emergencia y el proyecto SIATA participó activamente con sobrevuelos y acompañamiento permanente al PMU durante las tareas de rescate, apoyo y acompañamiento del equipo de Geotecnia, instalación de sensores de monitoreo en tiempo real, pronósticos meteorológicos, reporte de lluvias y la implementación de procesos sociales y SATCs (3). En el anexo Reporte apoyos Granizal se presenta el listado de actividades y apoyos realizados durante las tareas de atención a la emergencia del PMU.

WP1.3.2. Desarrollo y mejoramiento continuo de herramientas operativas que permitan la generación de alertas

Durante esta vigencia se desarrollaron o se mejoraron las siguientes herramientas o aplicativos de difusión:

- Desarrollo y puesta en producción de la aplicación web "Geoportal Ciudadanos".
- Desarrollo y puesta en producción de la nueva página web de SIATA (Riesgo y Aire).
- Desarrollo y puesta de Pantallas Divididas y mejora a los portales existentes.
- Se atendieron más de 100 solicitudes para mejorarar el nivel de automatización de procesos de Riesgos y Aire.
- Se provisionó y alistó la plataforma Dataverse.org para la implementación del Repositorio de Datos SIATA
- Se crearon y/o mejoraron las prácticas de desarrollo de software para lograr la gestión de aplicaciones y versionamientos y estándares de documentación en Gitlab.

Implementación de la plataforma SAMI para optimizar la generación de alertas tempranas

El equipo Operacional tiene la responsabilidad de garantizar la emisión de alertas tempranas y oportunas tanto a los organismos de gestión del riesgo y respuesta, como a las comunidades que cuentan con Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC). Estas alertas se difunden a través de diferentes canales de comunicación, como WhatsApp y redes sociales, con el objetivo de proporcionar actualizaciones constantes sobre las variables hidrometeorológicas en el Valle de Aburrá y reportar condiciones severas que se presenten, para que los organismos competentes puedan actuar de manera eficaz.

La labor de monitoreo incluye la recolección y validación de información proveniente de sensores y cámaras, la generación de productos con valor agregado, su publicación en los canales de divulgación, y el cumplimiento de otras actividades esenciales para el funcionamiento del proyecto.

En situaciones de emergencia, el equipo debe ser el primero en identificar el origen del evento, contar con el criterio técnico para resolver problemas operativos, actuar con prontitud y, de ser necesario, escalar la situación a los responsables de los procesos involucrados, con el fin de evitar retrasos en la generación y distribución de la información.

En este contexto, la plataforma SAMI ha fortalecido la capacidad operativa del equipo, permitiendo realizar tareas de generación de alertas tempranas de manera más ágil y precisa, con beneficios como:

- Reducción de tiempos de respuesta en la identificación y comunicación de eventos de precipitación, optimizando la emisión de alertas a las comunidades y entidades responsables. Esto se refleja en la facilidad para realizar consultas rápidas sobre aumentos de nivel, vientos, acumulados de la red pluviométrica y descargas eléctricas, información de referencia que permite a las personas en turno contar con un panorama claro antes de comunicarse con organismos de gestión del riesgo y comunidades de los SATC como se puede ver en Figura 278.
- Visualización en tiempo real de variables clave, como los niveles del río y las quebradas del Valle de Aburrá monitoreadas por el proyecto. La disponibilidad de datos minuto a minuto facilita la identificación de niveles de alerta por inundación menor (naranja) o inundación mayor (rojo), mejorando

la capacidad de reacción. Como se puede observar en Figura 279 se pueden visualizar los registros más altos de nivel en los últimos 5 minutos, con su respectivo color de riesgo, dentro de un rango de análisis de las últimas 3 horas. Las estaciones asociadas a SATC están identificadas con una marca especial para facilitar su seguimiento, y aquellas que alcanzan niveles de riesgo más altos se ubican automáticamente en la parte superior de la lista, lo que permite visualizarlas rápidamente y darles atención prioritaria en el reporte a organismos de gestión del riesgo y/o comunidades. Adicionalmente, la plataforma cuenta con una barra de búsqueda que permite localizar fácilmente cualquier estación. Al interactuar con los recuadros que muestran el nivel de riesgo, es posible acceder a información complementaria de la cuenca, como: su respectiva hidrografía, el registro histórico de aumentos de nivel y su comportamiento, gráficas de lluvia de radar acumulada de las últimas 24 horas frente a la precipitación horaria, acumulados de lluvia de radar sobre la cuenca en las últimas tres horas y el detalle de los niveles más altos registrados en la estación como se observa en la Figura 280.

- Integración de diferentes fuentes de información en un mismo entorno, evitando la consulta dispersa en múltiples herramientas y mejorando la eficiencia del monitoreo.
- Almacenamiento y consulta de eventos pasados para análisis y verificación (ver Figura 281). Esta funcionalidad permite acceder a los registros en cualquier momento e incluso corregirlos cuando sea necesario. Entre los datos disponibles se incluyen: imágenes del radar meteorológico de los momentos más relevantes del evento, acumulados de lluvia (tanto del radar como de la red pluviométrica), descargas eléctricas, aumentos de nivel que alcanzaron los umbrales de riesgo por inundación menor (naranja) o mayor (rojo), así como la descripción del evento y las activaciones de alarmas registradas.
- Disminución de errores humanos gracias a la automatización de procesos repetitivos y cálculos, lo que asegura mayor consistencia en los reportes, especialmente en los registros del informe de precipitación almacenados en `https://siata.gov.co/reporte_eventos/`

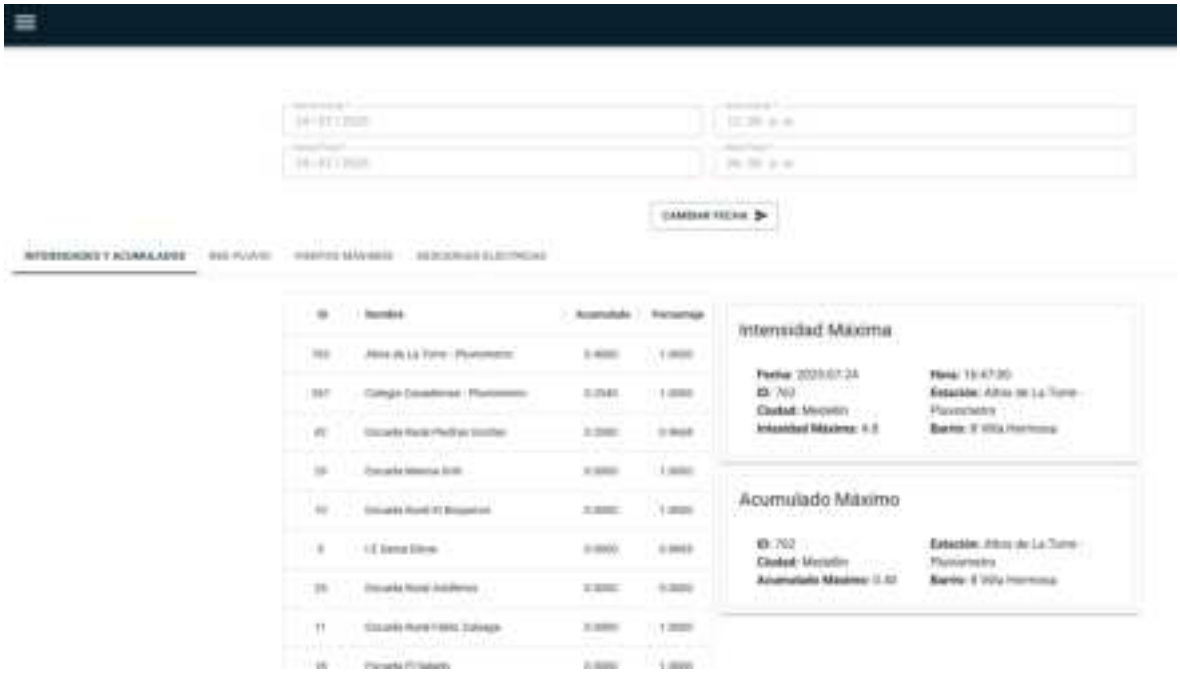


Figura 278: Consultas en plataforma SAMI



Figura 279: Matriz de niveles plataforma SAMI

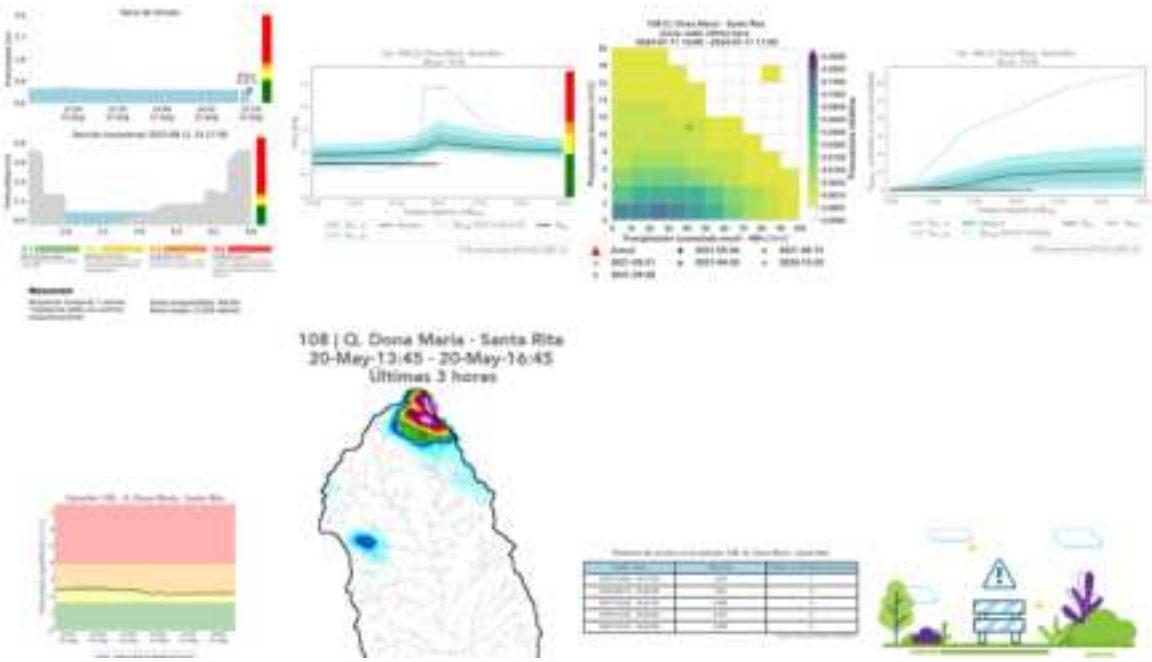


Figura 280: Matriz de niveles plataforma SAMI - información complementaria de las cuencas



Figura 281: Histórico de eventos de precipitación en plataforma SAMI

WP2.1. Medición y seguimiento

WP2.1.1. (Calidad del aire) Garantizar el cumplimiento de los requisitos de micro-localización de las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire

Los Sistemas de Vigilancia de la Calidad del Aire en el país están diseñados y operados bajo los lineamientos dados por el gobierno nacional Resolución 650 de 2010 del Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Los lineamientos son de obligatorio cumplimiento para contar con la acreditación por parte del IDEAM. Es necesario entonces garantizar el cumplimiento permanente de estos requisitos para mantener la acreditación de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá.

Durante la ejecución del contrato CCT016 de 2024 se realizaron los siguientes traslados e instalaciones de equipos:

I. Traslado hacia la sede Poblado de la Universidad CES, de la estación (PM2.5, Ozono y meteorología) que operaba en los Tanques La Ye de EPM en el Distrito de Medellín. Este traslado se hizo teniendo en cuenta la solicitud de retiro de la estación recibida por parte de Empresas Públicas de Medellín.

II. Instalación de un monitor de PM2.5 en el sector de la Tablaza del municipio de la Estrella.

III. La estación de monitoreo de ozono ubicado en la Universidad de Medellín, fue trasladada a la Institución Educativa Pedro Octavio Amado (MED-ALTA) del corregimiento de Altavista en el Distrito Especial de Medellín.

IV. Ubicación de una cámara térmica y una estación meteorológica en la unidad residencial Laureles Campestre de la Comuna 12 del Distrito de Medellín.

V. Ubicación de una cámara térmica en la unidad residencial Azalea del Parque de la Comuna 12 del Distrito de Medellín.

VI. Traslado del sonómetro ubicado en la estación Droguería Botica Junín en el municipio de Girardota (GIR-BOTJ) a la estación Biblioteca Jacinto Benavente del mismo municipio (GIR BIJA).

VII. Las múltiples gestiones realizadas para la instalación de una estación de monitoreo de PM2.5 en el sector cercano a la estación Estrella del Metro, y en el sector de influencia del futuro proyecto del tranvía de la 80, no tuvieron resultado positivo, dadas las dificultades para obtener los permisos en los sitios que cumplían con los criterios de microlocalización.

WP2.1.2. Garantizar el correcto funcionamiento de los sensores de monitoreo que hacen parte de las redes de monitoreo

Durante la vigencia del contrato CCT 016-2024, el proyecto SIATA contó con un esquema articulado entre los equipos de Operación, Mantenimiento y Calidad de Datos para garantizar el correcto funcionamiento de los sensores que conforman las redes de monitoreo.



El equipo Operacional, desde el centro de control, realizó diariamente la supervisión remota de las estaciones a través de monitores, identificando caídas en la comunicación, fallos en los sensores y otras alertas de funcionamiento. Esta labor permitió generar reportes diarios que fueron compartidos con el equipo de Mantenimiento para la programación de visitas correctivas en campo.

Por su parte, el equipo de Calidad de Datos analizó periódicamente la información proveniente de las bases de datos del sistema, detectando valores atípicos, fallas persistentes y comportamientos anómalos. A partir de este análisis, se generaron informes mensuales de recurrencias, los cuales facilitaron la priorización de acciones correctivas y la identificación de sensores con comportamientos inestables.

Como resultado de esta articulación, se logró mantener una operatividad constante en la red de sensores, reducir los tiempos de respuesta ante fallos críticos y generar insumos valiosos para la planeación técnica del mantenimiento preventivo y correctivo.

El histórico completo de los informes de recurrencia generados durante la vigencia puede consultarse en el enlace Informes mantenimiento.

WP2.1.3. Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad de los datos

Análisis de la recurrencia de fallas de las estaciones de monitoreo hidrometeorológico. A partir de los análisis de recurrencia de fallas realizados durante la vigencia CCT 016-2024, se sintetizaron los siguientes problemas identificados en las estaciones de monitoreo de la red hidrometeorológica y de geotecnia, y se consolidó el porcentaje de la cantidad de estaciones asociado a cada problema, con respecto al total de estaciones con fallas durante el mes en cuestión.

- Acumulado de problemas de baja recurrencia: **47.99 %**.
- Estaciones de nivel con datos distorsionados, ruidosos, sin hidrógrafas, comportamiento plano, sostenido o incoherente: **15.90 %**.
- Estaciones con problema recurrente de un pluviómetro taponado o pulsos de lluvia anómalos posterior al evento de precipitación: **13.92 %**.
- Estaciones con intermitencias en el envío de datos: **13.56 %**.
- Estaciones de la red meteorológica que presentan valores sostenidos simultáneamente en dos o más variables: **8.63 %**.

En el siguiente enlace, se proporciona mayor información relacionada: Calidad Datos. Los informes de análisis de recurrencia de problemas desarrollados durante esta vigencia pueden consultarse en: Análisis de recurrencias.

Inventario de estaciones de monitoreo hidrometeorológico. Durante la vigencia CCT 016-2024, la red hidrometeorológica in-situ del proyecto SIATA contó con *447* estaciones, distribuidas en las siguientes redes:

- Pluviómetros: 180.
- Niveles: 156.
- Meteorológicas: 47.



- Velocidad superficial: 21.
- Disdrómetros: 19.
- Humedad del suelo: 19.
- Piranómetros: 5.

Adicionalmente, se tuvieron quince (15) piezómetros que hacen parte de la red experimental de medición de nivel freático y dos (2) sensores experimentales para la medición de sedimentos en ríos y quebradas.

En el siguiente enlace se puede consultar más información sobre el inventario de estaciones hidrometeorológicas en tierra del proyecto SIATA: Calidad Datos.

Metadatos nuevas instalaciones. Durante la vigencia CCT 016-2024, en las redes de monitoreo hidrometeorológico, de geotecnia y de cámaras del proyecto SIATA, se logró un gran total de **176 instalaciones** en el Valle de Aburrá y en los municipios cercanos, correspondientes a las redes de: acelerómetros (5), cámaras (45), humedad del suelo (12), meteorológica (8), nivel (37), piezómetro (5), piranómetro (2), pluviométrica (24), sirenas (28) y tensiómetro (10). En el siguiente enlace se proporciona mayor información de las instalaciones realizadas: Calidad Datos.

WP2.1.4. Generar información oportuna sobre amenazas

Apoyos del grupo de Telemetría al grupo de Hidrología. Desde el equipo de Telemetría se brindó apoyo al equipo de Hidrología en torno a las siguientes actividades:

- Sistemas de monitoreo optrónico y cámaras térmicas FLIR FH-617 y SR7: como parte del fortalecimiento del monitoreo visual y ambiental del proyecto SIATA, el equipo de Telemetría desarrolló e integró dos (2) sistemas optrónicos especializados: la cámara térmica FLIR FH-617 con posicionador PTU-D48, y el sistema optrónico SR7 con funcionalidad de giro automático autónomo.
- Sistema optrónico SR7 con giro automático: se ensambló el tercer sistema SR7 con cámara, carcasa de protección, motor de giro horizontal y control mediante Raspberry Pi. Se desarrolló una lógica de giro automático programada en la plataforma Node-RED.
- Estaciones de sedimentos: el sensor de sedimento con número de serie SN6253, presentó fallas en la comunicación (protocolo RS232). Al realizar la revisión técnica, se identificó que el circuito integrado responsable de dicha comunicación estaba dañado y no contaba con repuesto disponible. Tras consultar la documentación del fabricante, se verificó que el sensor también es compatible con los protocolos SDI-12 y salida analógica, lo que permitió implementar esta solución para su operación. Por otro lado, se realizó mantenimiento preventivo al sensor de sedimento con número de serie SN6337, seguido de su respectiva verificación de funcionamiento para asegurar un desempeño adecuado en campo.
- Estaciones de monitoreo de nivel freático – piezómetros: desde el equipo de Telemetría, se brindó apoyo al equipo de Hidrología en la instalación de cuatro (4) sensores Keller en los siguientes sitios: Sotrames Sabaneta, Sotrames Envigado, Bellanita Group y Universidad EAFIT.
- Desarrollo e integración de sistema con sensor RPLiDAR 360: durante la vigencia, el equipo de Telemetría adelantó el desarrollo, integración y validación de un sistema de medición que incorpora el sensor RPLiDAR 360 S3 para realizar mediciones de contorno en el lugar donde se instale; la finalidad y uso de este sensor estará a cargo del equipo de Hidrología.

- Humedad de hoja y temperatura de suelo: en torno a este tema, se desarrolló un sistema compuesto por hardware y software que permite la lectura y transmisión de datos de estos sensores. Este desarrollo obtiene información en tiempo real sobre humedad superficial en las hojas y la temperatura del suelo. Este desarrollo fue posteriormente instalado en campo, específicamente en el cerro Quitasol (Bello), confirmando su operación continua con envío exitoso de datos cada minuto.
- Comunicación sensor stalker surface RS-485: apoyando esta red, se abordó la problemática de comunicación intermitente entre este sensor y la Raspberry Pi. El sensor fue llevado a laboratorio, donde se identificó que el conversor RS-485 usado presentaba fallas. Como solución, se integró un convertidor industrial RS-232 a RS-485 de la marca Waveshare.
- Sensores de calidad del agua: como parte de las actividades del equipo de Telemetría, se avanzó en la identificación de requisitos y diseño preliminar de un sistema de monitoreo en tiempo real del nivel de lámina de agua y variables fisicoquímicas, orientado a generar alertas sobre calidad del agua en cuerpos superficiales.

  Se realizaron investigaciones sobre las variables a medir (turbiedad y conductividad eléctrica), su viabilidad de integración con las redes del SIATA y la asesoría al equipo de Hidrología para definir especificaciones técnicas y de telemetría aplicables a acueductos veredales.

  Finalmente, se propuso un sistema basado en portasondas de inmersión, priorizando criterios de bajo costo, facilidad de mantenimiento y compatibilidad con las plataformas existentes del proyecto.

(Para más detalle visitar el anexo Telemetría).

WP2.1.5. Identificar e instalar nuevas estaciones de monitoreo en las diversas redes de monitoreo

Como parte de las actividades del proyecto SIATA, durante la vigencia comprendida entre el 1 de febrero de 2024 y el 7 de julio de 2025, se procedió con la instalación de nuevas estaciones de monitoreo. Estas actividades fueron registradas y clasificadas según su tipo, municipio de instalación y periodo de ejecución, permitiendo obtener un panorama claro sobre la distribución y alcance operativo de este componente.

Distribución mensual de instalaciones

La actividad de instalación mostró una variabilidad mensual significativa, evidenciando picos de alta ejecución en determinados periodos que pueden estar relacionados con la planeación operativa, la disponibilidad logística y atención de emergencias. El comportamiento mensual se visualiza en la Figura 282, en la cual se destacan los meses con mayor actividad y aquellos con menor intervención.



Figura 282: Instalaciones por mes durante el periodo comprendido entre febrero de 2024 y julio de 2025.)

Tipos de instalación

El total de instalaciones fue clasificado principalmente como **"instalación"**, sin presentarse otras categorías significativas o diferenciadas. Esto sugiere una ejecución concentrada en montajes completos de estaciones, lo cual es coherente con los objetivos técnicos del contrato durante este periodo.

Distribución por municipio

El municipio con mayor número de instalaciones fue **Medellín**, con un total de **117 intervenciones**, lo que representa el núcleo principal de la operación. Le siguen municipios como **Bello (13 instalaciones)**, **Caldas (12)**, **Sabaneta (10)** e **Itagüí (10)**, evidenciando una cobertura representativa dentro del Valle de Aburrá, pero con un claro énfasis en la ciudad núcleo del proyecto.

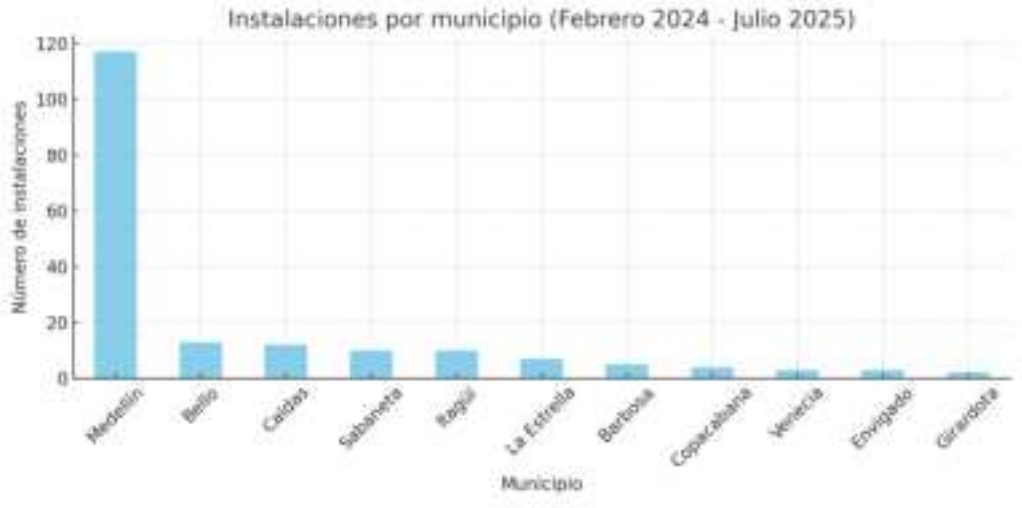


Figura 283: Instalaciones por municipio durante el periodo comprendido entre febrero de 2024 y julio de 2025.)

Este análisis permite identificar tendencias relevantes como la concentración geográfica de las intervenciones y los periodos de mayor actividad, constituyendo un insumo estratégico para la planeación futura de nuevas instalaciones, así como para evaluar la eficiencia del componente logístico-operativo del proyecto.

WP2.1.6. Llevar a cabo mantenimiento preventivo y correctivo de las estaciones en las diferentes redes de monitoreo

Las actividades de mantenimiento se realizaron de forma constante mes a mes. Se identificaron picos operativos asociados a periodos de alta demanda o consolidación de ciclos de revisión técnica.



Figura 284: Mantenimientos por mes durante el periodo comprendido entre febrero de 2024 y julio de 2025.

Distribución territorial de mantenimientos

La mayor parte de los mantenimientos se concentró en el distrito de **Medellín**, seguido por los municipios de **Bello**, **Caldas**, **La Estrella** e **Itagüí**, lo que refleja tanto la densidad de estaciones en estas zonas como la intensidad de su operación.



Figura 285: Mantenimientos por municipio durante el periodo comprendido entre febrero de 2024 y julio de 2025.

WP2.1.7. Generar información oportuna sobre de los procesos físicos relacionados con la meteorología y climatología de la región. (Calidad del aire) Toda esta información soporta decisiones relacionadas con calidad del aire, especialmente durante los períodos de gestión de episodios, de manera que permitan definir la pertinencia de activar el POECA.

Durante el período de ejecución del contrato 016 de 2024, el Área Metropolitana del Valle de Aburrá declaró mediante Resolución metropolitana, tres períodos de Gestión de Episodios por contaminación atmosférica, los cuales se presentan típicamente durante los meses de febrero-abril y septiembre-noviembre y donde las concentraciones de PM2.5 pueden alcanzar niveles dañinos para la población Para la declaratoria de los períodos mencionados, se tiene en cuenta el soporte técnico entregado por el SIATA, realizado con base en el comportamiento histórico del PM2.5, las condiciones meteorológicas proyectadas, la ocurrencia de eventos de quema de cobertura vegetal y la presencia de fenómenos como el ENSO. Los informes incluyen la entrega de un calendario con la estimación del comportamiento del PM2.5.

En los períodos declarados se hizo entrega de informes técnicos diarios en los que se reporta el estado de la calidad del aire asociada a PM2.5, de acuerdo con las condiciones de las últimas 24 horas. Los informe incluyen la descripción de las condiciones de calidad de aire, una explicación de los factores que puedan estar afectando este recurso natural, un pronóstico del comportamiento estimado del PM2.5 durante el resto del día y una conclusión sobre la pertinencia de declarar niveles de prevención, alerta o emergencia y de implementar las acciones establecidas en el Plan Operacional para enfrentar Episodios de Contaminación Atmosférica-POECA. Los informes se envían a través del grupo de WhatsApp GECATECH, el cual está conformado por profesionales del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, incluyendo el Subdirector Ambiental, y profesionales del SIATA.

Los informes de cierre de los Períodos de Gestión de Episodios de Contaminación Atmosférica pueden ser consultados en los siguientes enlaces:

I. Informe de cierre del primer episodio de gestión de episodios de 2024.

II. Informe de cierre del segundo episodio de gestión de episodios de 2024.

III. Informe de cierre del primer episodio de gestión de episodios de 2025.

WP2.1.8. Brindar apoyo a la Entidad en el monitoreo de puntos críticos

Durante el período de ejecución del contrato, se fortaleció el sistema de monitoreo de movimientos en masa en el Valle de Aburrá, con la implementación de acciones técnicas y estratégicas orientadas a la prevención, evaluación y respuesta ante fenómenos de inestabilidad del terreno. A continuación, se destacan los principales logros y cifras relevantes:

- Se mantuvo vigilancia permanente sobre **21 puntos críticos asociados a movimientos en masa**, sin registrarse novedades relevantes durante la extensión de la vigencia.
- Se actualizaron las hojas de vida técnicas de los 21 puntos monitoreados, integrando resultados de campo, análisis geotécnicos y registros fotogramétricos y satelitales.
- Se llevaron a cabo instalaciones de sensores geotécnicos en zonas priorizadas como La Montana, Tierra Alta, La Palma, La Palmera, El Zarzal, Los Balsos, Santa Rita, Granizal, y San Isidro, entre otros.
- Se definieron esquemas de monitoreo adicionales con teledetección en sectores activos como Villalía, Canalón (Sabaneta), La Valería y Ancón Norte.
- Se emitieron **reportes de caracterización geológica y geotécnica** con análisis detallados de zonas inestables.
- Se realizaron **análisis específicos** de puntos críticos mediante integración de sensores, vuelos de dron e imágenes satelitales (fotogrametría e InSAR).
- Se inició el proceso de emisión de **reportes de probabilidad de ocurrencia de movimientos en masa** usando clasificación de lluvia antecedente (baja, media, alta).
- Se consolidaron informes técnicos en respuesta a emergencias y solicitudes de entidades territoriales en municipios como Medellín, Caldas, Copacabana, Girardota, Barbosa, Sabaneta y Bello.
- Se mantuvo una participación activa en reuniones y salidas de campo con el DAGRD, el AMVA, y las UMGRDs, así como con otros actores territoriales.
- Apoyo técnico en la atención de emergencias a través de **PMU (Puestos de Mando Unificado)** y jornadas COEM, con presencia en terreno, análisis técnico y generación de información para la toma de decisiones.

Este conjunto de acciones ha permitido mejorar la comprensión territorial del riesgo por movimientos en masa, afinar estrategias de monitoreo con base científica y generar capacidades técnicas para la toma de decisiones.



WP2.1.9. Monitorear y capturar datos de interés a diferentes escalas temporales haciendo uso de VANTs

Las actividades de mantenimiento y renovación tecnológica fueron fundamentales para garantizar la operatividad continua del equipo durante todo el período del contrato. Se gestionaron más de ochenta (80) acciones relacionadas con adquisiciones, mantenimientos preventivos y correctivos de equipos UAS y periféricos asociados.

Entre las adquisiciones más significativas, se destacan la compra del dron DJI Mavic 3 Multiespectral con RTK, el DJI Mavic 3 Thermal, UPS CyberPower para protección de estaciones de trabajo, binoculares de largo alcance y botas dieléctricas para seguridad operacional. Se realizaron mantenimientos preventivos periódicos del UAS Matrice 300 RTK y actualizaciones de sus sensores asociados (Zenmuse P1, H20T y L1).

Se desarrollaron especificaciones para el dron-puerto como parte de los requerimientos RAC-100, así como la adecuación de las workstations Horus y Pixel del equipo. Se estableció también un sistema robusto de gestión de información con la adquisición de discos duros externos de alta capacidad y la implementación de sistemas de respaldo.

Se adelantó la investigación sobre sistemas de bases de datos espaciales, evaluando PostGIS y DuckXDB para optimizar el almacenamiento y consulta de información UAS. Se realizaron reuniones con el equipo de Sistemas para actualización de estructuras de datos conforme a requerimientos RAC-100.

Todas las acciones relacionadas con mantenimiento y renovación tecnológica se encuentran documentados en el enlace F-GAA-SIATA-130_Mantenimiento y renovación tecnológica.

WP2.1.10. Brindar apoyo a la Entidad para el acompañamiento en la atención de emergencias

Teledetección

El apoyo a la atención de emergencias representó una de las funciones más críticas y más demandantes para el equipo de Teledetección durante la vigencia del contrato. Se brindó respuesta a **55 activaciones de emergencia**, abarcando diferentes tipos de amenazas: incendios forestales (IF), incendios forestales subterráneos (IF sub.), avenidas torrenciales (AT), movimientos en masa (MM), avenidas torrenciales con movimientos en masa (AT/MM), obras en riesgo de colapso (ORC), infraestructura en riesgo de colapso (IRC), caídas de árboles (CA), inundaciones (In) y monitoreo del río (MR). En la Tabla 48 se presentan las emergencias atendidas por mes durante la vigencia.

Tabla 48: Emergencias atendidas por el equipo de Teledetección por mes y por año durante la vigencia 016-2024.

Año	Mes											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
2024	–	1	3	2	2	3	2	0	1	0	1	0
2025	2	0	0	3	34	1	–	–	–	–	–	–

Los apoyos más significativos incluyeron la atención a incendios forestales en los municipios de Bello, Girardota y Envigado, donde se logró identificar focos de calor activos y generar cartografía post-incendio

para evaluación de daños. En el caso de movimientos en masa, se prestó apoyo en sectores críticos como Hatoviejo (Bello), El Poblado (Medellín), La Valeria (Caldas) y Santa Cruz (Medellín). En la Figura 286 se presenta el desglose de las emergencias atendidas por municipio y por tipo de amenaza.

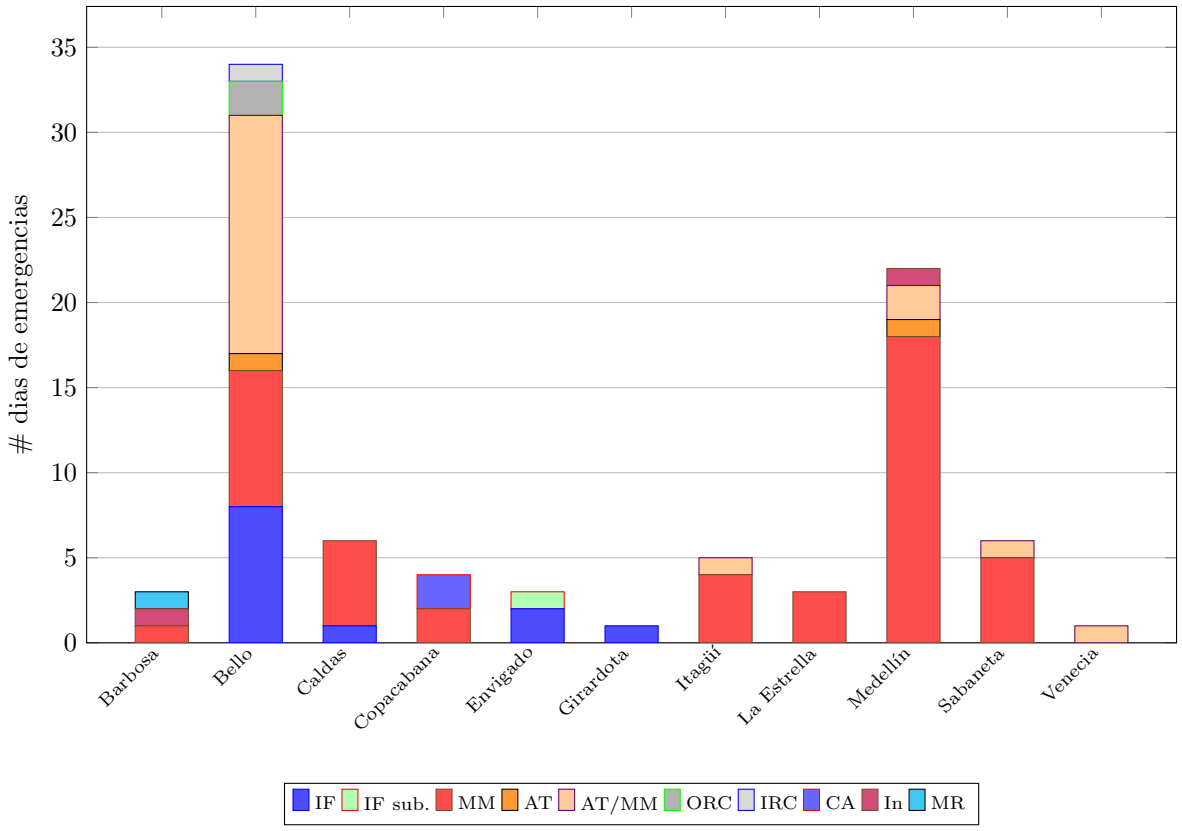


Figura 286: Emergencias atendidas por tipo y municipio.

Durante el período de calamidad pública decretado por el distrito y dos municipios del territorio metropolitano en abril y mayo de 2025, el equipo realizó **133 operaciones de emergencia** en coordinación con el Centro de Operaciones de Emergencias Metropolitano (COEM). El apoyo se distribuyó entre los diferentes municipios, con mayor concentración en Medellín (56 operaciones), Sabaneta (22) e Itagüí (16).

Un evento destacado fue la respuesta integral durante la emergencia del sector Manantiales en la vereda El Granizal del municipio de Bello, donde se realizaron **100 sobrevuelos** de apoyo directo al Puesto de Mando Unificado. Las actividades incluyeron labores de búsqueda y localización, apoyo en recuperación de cuerpos, monitoreo del proceso de fraguado y delimitación de áreas de riesgo para la inspección de infraestructura.

En las diferentes emergencias atendidas, se evidencia el trabajo y capacidad adquirida por el equipo de Teledetección para brindar herramientas de utilidad a los entes y Cuerpos de Bomberos del territorio, siendo ésto de valiosa ayuda para superar los impases de los hechos.

El compilado de todas las emergencias atendidas se encuentra documentado en el enlace F-GAA-SIATA-124 Apoyo a la atención de emergencias, donde se detalla la información correspondiente a la fecha y hora de inicio y finalización del apoyo, lugar, tipo de emergencia y una breve descripción de las acciones realizadas.

Operacional

- En apoyo a la emergencia ocurrida en el municipio de Bello y el Distrito de Medellín, se implementó la entrega diaria del Reporte Diario - Emergencia Bello al PMU. Esta entrega incluyó el pronóstico meteorológico para el día, así como un breve análisis de la información capturada por la cámara de monitoreo instalada en el sector. A partir del 27 de junio, este reporte fue entregado diariamente a las 3 p.m. a las personas encargadas en el PMU. Ver Reportes Diarios Emergencia Bello.
- Entrega de la discusión meteorológica correspondiente a los 3 o 4 días siguientes, el cual incluye información sobre el estado actual de la atmósfera y la predicción para el horizonte prospectivo mencionado. Esta discusión se realiza mediante la revisión e interpretación de datos, modelos numéricos, imágenes satelitales y otras herramientas meteorológicas, con el fin de proporcionar información valiosa para la planificación y la toma de decisiones en el lugar de la emergencia. Ver Discusiones Meteorológicas Emergencia Bello.

Adicionalmente, en la labor permanente 24 horas al día, los 7 días de la semana, el equipo Operacional se encargó de hacer seguimiento de las condiciones hidrometeorológicas en el Valle de Aburrá, así como de velar por la recepción y despliegue de la información en tiempo real de las redes de monitoreo del proyecto, la elaboración de reportes y la generación y envío de alertas tempranas a los organismos gestores de riesgos asociadas a la gestión de eventos de precipitación e incendios, a través de diferentes grupos de WhatsApp.

En la vigencia 016 de 2024, se generaron los siguientes reportes y alertas tempranas que fueron enviadas a los organismos gestores de riesgos a través de diferentes grupos de WhatsApp destinados para tal fin:

Tabla 49: Resumen de reportes a organismos de gestión del riesgo del Valle de Aburrá año 2024.

Tipo de reporte	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Precipitación	53	78	182	238	232	88	134	170	193	199	171	1738
Nivel	15	6	52	243	193	10	21	63	91	88	78	860
Eventos precipitación	11	15	26	33	30	11	24	25	25	27	26	258
Vientos	1	3	1	8	8	1	3	5	2	3	0	35
Descargas eléctricas	1	1	10	13	7	0	4	9	5	5	0	55
Granizo	1	3	5	15	6	3	4	16	5	2	1	61
Deprimidos viales	0	0	12	19	8	0	5	2	2	2	1	51
Incendios	51	83	23	1	4	21	28	18	3	6	3	237
Condiciones meteo.	1	2	1	0	0	1	1	0	0	0	0	6
Red pluviométrica	0	0	0	2	1	0	0	0	0	0	0	3

Tabla 50: Resumen de reportes a organismos de gestión del riesgo del Valle de Aburrá año 2025.

Tipo de reporte	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Total
Precipitación	116	272	247	316	269	191	95	1506
Nivel	39	127	126	322	228	171	12	899
Eventos precipitación	15	26	25	32	29	23	10	160
Vientos	1	3	5	1	3	5	2	20
Descargas eléctricas	2	11	10	4	6	3	1	37
Granizo	5	5	6	6	2	2	0	26
Deprimidos viales	0	4	3	5	2	3	1	18
Incendios	17	2	9	3	5	5	11	52
Condiciones meteo.	0	0	0	0	0	0	0	0
Red pluviométrica	0	0	6	0	0	0	0	6

Para información más detallada, consultar el siguiente link: Reportes.

WP2.2. Fortalecimiento

WP2.2.1. (Calidad del aire) Implementar y fortalecer las estrategias tecnológicas, logísticas y operativas para garantizar el correcto funcionamiento de las redes de Calidad de Aire y Ruido Ambiental, y el programa de Ciudadanos Científicos

Apoyos del equipo de Telemetría al equipo de Calidad del Aire: a continuación, se relacionan las principales actividades de apoyo brindadas:

- Evaluación de sensores de gases de bajo costo para la Red de Ciudadanos Científicos: con el objetivo de fortalecer la red de Ciudadanos Científicos y brindar nuevas alternativas tecnológicas al equipo de Calidad del Aire, el equipo de Telemetría desarrolló e implementó pruebas de sensores de gases de bajo costo, incluyendo sensores comerciales y sensores Honeywell para SO_2, O_3 y NO_2.

  Como parte del proceso, se realizó una investigación para identificar sensores disponibles en el mercado que cumplieran con los rangos de medición deseados y que se ajustaran a un presupuesto más accesible que el de las estaciones certificadas. Esto se llevó a cabo con el fin de evaluar su posible integración a las estaciones tipo nube del proyecto SIATA.

- Evaluación de otros sensores de bajo costo: por otro lado, se desarrolló e integró una solución basada en sensores de bajo costo conectados a un datalogger Raspberry Pi, con el objetivo de brindar al equipo de Calidad del Aire nuevas alternativas para el monitoreo ambiental.

  Esta iniciativa busca garantizar la continuidad y funcionalidad del proyecto en el largo plazo, ofreciendo opciones viables para reemplazo o actualización de sensores en caso de descontinuación de modelos actuales, sin comprometer el objetivo de accesibilidad y participación ciudadana.

  Para lo anterior, se desarrolló un sistema para evaluar nuevos sensores de material particulado y gases no evaluados en el ítem anterior.

- Evaluación adicional de nuevos sensores de bajo costo: continuando con la prueba de sensores adicionales, el equipo de Telemetría desarrolló software de prueba en Arduino para múltiples sensores ambientales, orientado a la medición de variables clave como temperatura, humedad, presión y material particulado.

  Se realizó el acondicionamiento electrónico y ensamblaje del sistema de pruebas en laboratorio, incluyendo la recolección de datos en una Raspberry Pi para su análisis posterior.

Las tres actividades de evaluación de sensores mencionadas anteriormente son similares debido a que se realizaron diferentes evaluaciones de sensores en diferentes momentos de la vigencia contractual.

- CC bicicletas: como parte del fortalecimiento de la estrategia de monitoreo ambiental móvil del proyecto SIATA, el equipo de Telemetría diseñó y evaluó un nuevo prototipo de sistema portátil para ser utilizado por Ciudadanos Científicos (CC) en bicicleta. Este desarrollo busca mejorar la autonomía, visualización de datos, portabilidad e integración de nuevos sensores, superando las limitaciones de versiones anteriores.



- Sensores de temperatura y humedad Metone 083E-900 y 085-9800: se desarrolló un sistema de adquisición y visualización que facilita el monitoreo en tiempo real de estos sensores. El sistema incluye una pantalla OLED que permite al usuario ver inmediatamente los valores registrados, así como una interfaz USB que, además de alimentar el sistema, permite la programación del dispositivo, lo cual facilita su adaptación a diferentes referencias de sensores.

- Red de calidad del aire en Museo de Antioquia: durante la vigencia 016-2024, se buscó comprender el funcionamiento técnico y operativo de esta red con el fin de generar capacidades que permitan brindar soporte y proponer mejoras cuando sea necesario. En este ejercicio de acercamiento, se identificó que la red está compuesta por estaciones automáticas, semiautomáticas y manuales, concentrando el entendimiento principalmente en las estaciones automáticas.

  Estas estaciones automáticas obtienen la información a través del protocolo de comunicación RS-232. Como parte del proceso de aprendizaje, desde Telemetría se implementó una conexión alternativa basada en el protocolo Ethernet, con el propósito de evitar cualquier alteración en el funcionamiento actual. Para ello, se utilizaron dispositivos como el ADAM-4570L, que permite convertir señales RS-232 a Ethernet, junto con un switch administrable TL-SG2210P y un módem industrial GL Inet Collie X300, que aseguran la conectividad de red de manera controlada y escalable. En el marco de estas pruebas paralelas, se desarrollaron programas para la lectura de los sensores BAM1022 y de gases SOx y NOx en la estación ubicada en el Museo de Antioquia, enviando la información al sistema de alta disponibilidad mediante el bróker RabbitMQ.

- Pantalla informativa Red de Calidad del Aire en Girardota: con el objetivo de mejorar la eficiencia operativa y reducir la intervención manual, se realizó la automatización de la visualización de contenido informativo en la estación de calidad del aire del Parque de Girardota, mediante el uso de una Raspberry Pi en modo kiosko.

- Sensor material particulado MetOne ES642: se trabajó en la actualización y fortalecimiento del sistema asociado a este sensor. Se desarrolló un nuevo software que optimiza la lectura, almacenamiento y el envío de los datos generados por el ES642. Como parte de esta mejora, se creó una tabla de pruebas en la base de datos para almacenar específicamente la información proveniente de este sensor, asegurando así una gestión de datos organizada y estructurada.

  De forma paralela, se configuraron colas dedicadas en el sistema de alta disponibilidad basado en RabbitMQ para garantizar la recepción constante de la información desde las estaciones. Para completar el flujo de datos, se desarrolló un programa consumidor encargado de leer la información desde las colas y transferirla automáticamente a la base de datos de destino.

- Anemómetro WS60: se realizaron mejoras significativas al sistema de adquisición de datos asociado a este sensor. Se integró una pantalla OLED de 1.3 pulgadas que permite visualizar en tiempo real los valores de velocidad y dirección del viento directamente en campo, sin necesidad de equipos adicionales. Esta característica facilita la verificación inmediata del funcionamiento del sensor y la visualización de los datos en tiempo real.

- Estación de monitoreo fuentes fijas: la actividad consistió en la ejecución de un mantenimiento preventivo a la estación de monitoreo de fuentes fijas ubicada en la Planta Proleche – Caribe, con el acompañamiento del equipo de Calidad del Aire y del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA).

  El objetivo principal fue asegurar el correcto funcionamiento y la operación continua de la estación, verificando la coherencia de los datos reportados, el envío en tiempo real al servidor del proyecto y el estado físico de los componentes, además de actualizar la información técnica asociada a la estación.

- Estación meteorológica GILL GMC600: durante esta vigencia, se brindó apoyo al equipo de Calidad de Aire para la configuración y puesta en funcionamiento de este sensor. Se implementó un sistema de visualización local mediante un display tipo e-paper, en el cual se muestran las variables principales medidas por el sensor. Además, los datos son almacenados localmente, asegurando la conservación de la información.

  Para la transmisión y adquisición de datos, se configuró la comunicación del sensor con una Raspberry Pi utilizando el protocolo serial RS485, lo que permitió la lectura continua y estable de las variables meteorológicas.

(Para más detalle visitar el anexo Telemetría).

Componente de Calidad del aire

Durante la vigencia del CCyT 016 de 024 se mantuvieron en operación permanente los diferentes equipos que componen las redes de Calidad de Aire, Ruido Ambiental, y el programa de Ciudadanos Científicos. Se realizaron los mantenimientos preventivos y correctivos a todos los sensores y se implementaron las acciones tecnológicas y logísticas para garantizar el correcto funcionamiento de las redes, para dar cumplimiento de las frecuencias establecidas en los diferentes métodos de medición de los equipos. Lo anterior permitió reportar oportunamente los Índices de Calidad del Aire -ICA-, y demás informes requeridos en el contrato.

Por otra parte, se mantuvieron en operación los equipos complementarios de las redes de calidad del aire que permiten realizar un análisis integral de los contaminantes en el aire y mantener activa las herramientas de análisis para el monitoreo de la Calidad del Aire, herramienta que está permanentemente a disposición de la supervisión del AMVA y del equipo de análisis de datos del componente de Calidad del Aire de SIATA

Indicadores de captación de datos

El seguimiento continuo de los reportes de las estaciones de calidad del aire, permite establecer un porcentaje de datos válidos para cada analizador. Este indicador es afectado, entre otras variables, por la cantidad de datos faltantes relacionadas con las actividades de monitoreo y verificación intermedia, posibles interrupciones en el fluido eléctrico de las estaciones, así como por la calificación realizada por el equipo de analistas de datos de la Red de monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá a partir de los procedimientos de validación establecidos.

Red de Calidad de aire

En la Tabla 51 se presenta, para el período comprendido entre el 1 de febrero de 2024 y el 30 de junio de 2025, el porcentaje de datos válidos para cada variable medida por las estaciones que hacen parte de la Red de Monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá. Según los resultados mostrados, durante el período de análisis en ninguno de los equipos de la Red de Monitoreo presentaron porcentajes de datos válidos inferiores al 75 %.

Tabla 51: Porcentaje de datos válidos para los contaminantes monitoreados durante el período comprendido entre el 1 de febrero de 2024 y el 30 de junio de 2025.

Estaciones	PM2.5	PM10	NO	NO_2	NO_x	O_3	CO	SO_2	PM2.5(s)	PM10(s)
BAR-HSVP										97.0
BAR-TORR	91.1									
BAR-PDLA						96.9				
GIR-EPM	96.1	80.8	81.6	82.4	82.9	93.1	96.7	90.7		
COP-HSMA										99.4
COP-CVID	95.8									
BEL-FEVE	91.1									
BEL-JEGA									92.7	
BEL-USBV		95.5				98.0				
MED-ARAN	95.0									
MED-PBLQ	97.9					92.7				
MED-SCRI	93.2									
MED-FISC	91.5		82.0	82.0	82.0	90.0		77.6		
MED-VILL	92.3									
CEN-TRAF	94.4	89.8	87.4	87.4	87.4			98.1		
MED-CORA										100.0
MED-EXSA		97.3								
MED-BEME	94.7									
MED-SELE	86.5									
MED-UDEM						90.3				
MED-MIRA						93.4				98.2
MED-PROV	91.1	92.2	82.9	83.4	83.4					
MED-ALTA	88.5	92.0	91.8	91.3	91.8	86.9				
MED-PJIC		95.8	96.2	96.2	96.2		94.9		90.0	95.9
MED-CES	92.6					94.5				
MED-TESO	94.1									
ITA-PTAR										98.8
ITA-POGO		95.7								99.4
ITA-CJUS	97.1		90.5	90.6	90.6			95.3		
MED-LAYE	94.0					99.5				
ITA-CONC	96.7	89.7				88.2				
ENV-HOSP	95.4									
EST-MAGO										96.5
EST-HOSP	98.0									
SAB-RAME	94.4									
EST-TABL	87.2									
CAL-JOAR	95.2									92.9

Datos meteorológicos

El monitoreo de variables meteorológicas es de especial importancia para el entendimiento de la calidad del aire en una región determinada, debido al papel fundamental que representa para el transporte y dispersión de contaminantes. La Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá cuenta con 15 estaciones de monitoreo automático de variables meteorológicas, ubicadas en el Distrito Especial de Medellín y en 6 de los 9 municipios del Valle de Aburrá.

La Tabla 52 muestra el porcentaje de datos válidos para las variables meteorológicas en cada una de las estaciones de monitoreo durante el período de la vigencia del CCyT 016. En esta tabla, P es presión atmosférica (hPa), PPT es precipitación (mm), T es temperatura del aire (°C) RG es radiación solar global (W/m^2), HR representa humedad relativa (%), VV es la velocidad del viento (m/s), y DV es la dirección del viento. De la totalidad de los equipos, solo el analizador de temperatura de la estación MED-UDEM presentó un porcentaje de datos válido inferior al 75 %.

Tabla 52: Porcentaje de datos válidos de las variables meteorológicas medidas en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire durante el período del 1 de febrero de 2024 y el 30 de junio de 2025.

Estaciones	P	PPT	T	RG	HR	VV	DV
BAR-PDLA	89.8	89.8	89.8		89.8	89.8	89.8
GIR-EPM	89.3	89.3	86.8		89.3	89.3	89.3
COP-CVID	90.3	90.3	86.6		90.3	90.3	90.3
MED-PBLQ	90.3	90.3	90.3		90.3	90.2	90.3
MED-FISC	92.7	92.7	92.7		92.7	92.7	92.7
MED-SELE	87.8	87.8	87.8		87.8	87.7	87.8
MED-UDEM	82.2	82.2	**73.5**		82.2	82.2	82.2
MED-MIRA	91.2	91.2	91.2		89.1	91.1	91.2
MED-PROV	95.5	95.5	95.5		95.5	95.4	95.5
MED-PJIC	94.8	94.8	94.8		94.8	94.6	94.8
MED-CES	95.0	95.0	95.0		95.0	94.7	95.0
ITA-CJUS	96.5		97.5	98.9	98.9	83.2	93.8
MED-LAYE	89.7	89.7	89.7		89.7	89.7	89.7
ITA-CONC	91.6	92.5	92.5		90.9	92.4	92.5
SAB-RAME	92.6	92.6	92.6		92.6	92.5	92.6

Es necesario aclarar que del total de las estaciones meteorológicas reportadas en este informe, los sensores ubicados en las estaciones BEL-USBV e ITA-CJUS son marca Met-One y miden radiación incidente, mientras que los demás equipos son marca Thies y Vaisala (no miden radiación). Los datos pertenecientes a los sensores Met-One son procesados y validados por el equipo de calidad del aire del SIATA, que a su vez se encarga de la operación de los equipos de monitoreo de calidad del aire y ruido ambiental. En



el caso de las estaciones meteorológicas Thies y Vaisala, el mantenimiento, la recepción y la validación de los datos obtenidos está a cargo del área de hidrometeorología del SIATA. Dicho proceso se hace de manera integral con los demás equipos técnicos pertenecientes al proyecto, y se completan transcurridos dos meses a partir del mes de la medición, por esta razón los porcentajes de datos válidos pueden variar si son consultados antes del tiempo de cierre. La calidad de los datos de estas estaciones depende, además de los procesos de validación propios del área de hidrometeorología, de los protocolos para la actualización manual de datos adquiridos con el objetivo de completar las series de tiempo medidas de cada variable y así poder obtener el mayor número posible de datos catalogados de buena calidad.

Red de Ruido Ambiental

En la Figura 287 se presenta el porcentaje de datos de nivel de presión sonora válidos, inválidos o faltantes. Por su parte, en la Tabla 53 se presenta el porcentaje de captura efectiva de datos para los niveles de presión sonora horarios, diurnos y nocturnos, calculados a partir de los niveles de presión sonora horaria. Es importante indicar que la captura efectiva hace referencia a la suma entre datos válidos e invalidados por meteorología, de acuerdo con los requerimientos de la Resolución 627 del MAVDT (actual MADS).

Con respecto al porcentaje de captura efectiva de datos se debe indicar que el sonómetro ubicado en la estación Droguería Botica Junín (GIR-BOTJ) fue retirado el 19 de septiembre por solicitud de la droguería en la cual se encontraba instalado, por lo que debió ser reubicado en la estación Biblioteca Jacinto Benavente (GIR BIJA), comenzando a operar en este nuevo punto el 05 de febrero de 2025, motivo por el cual estas estaciones no lograron cumplir con la meta del 75 % de captura efectiva de datos para las variables LRAeqH, LRAeqD y LRAeqN.

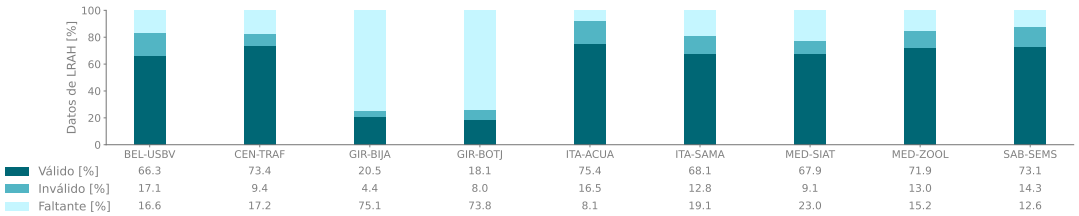


Figura 287: Datos captados válidos e inválidos del nivel de presión sonora horaria en el Valle de Aburrá durante el contrato CCT016 de 2024.

Tabla 53: Porcentaje de captura efectiva de datos de la Red de Ruido Ambiental para el contrato CCT016 de 2024.

Estaciones	$LRAeqh$	$LRAeq,d$	$LRAeq,n$
GIR-BOTJ	**24.2**	**24.5**	**23.5**
GIR-BIJA	**24.9**	**25.2**	**24.3**
BEL-USBV	83.4	84.7	83.9
MED-SIAT	77.0	77.8	77.1
CEN-TRAF	82.8	88.9	87.8

Tabla 53: Porcentaje de captura efectiva de datos de la Red de Ruido Ambiental para el contrato CCT016 de 2024.

Estaciones	$LRAeqh$	$LRAeq,d$	$LRAeq,n$
MED-ZOOL	84.8	85.7	83.9
ITA-SAMA	80.9	81.8	81.1
ITA-ACUA	89.9	90.1	88.9
SAB-SEMS	87.4	88.1	86.2

Red de Ciudadanos Científicos

Ciudadanos Científicos - Nubes

La Figura 288 muestra el porcentaje de nubes que enviaron datos al menos una vez cada día durante la vigencia del contrato 016 de 2024. La mayoría de ausencia de datos suele deberse a fines de semana en que los ciudadanos suspenden el flujo eléctrico del sensor porque van a dejar la vivienda sola durante esos días, en otros casos, son debidos a problemas técnicos en los que, a pesar de que luego se realiza el respectivo proceso de validación, no fue posible la completa recuperación de datos.

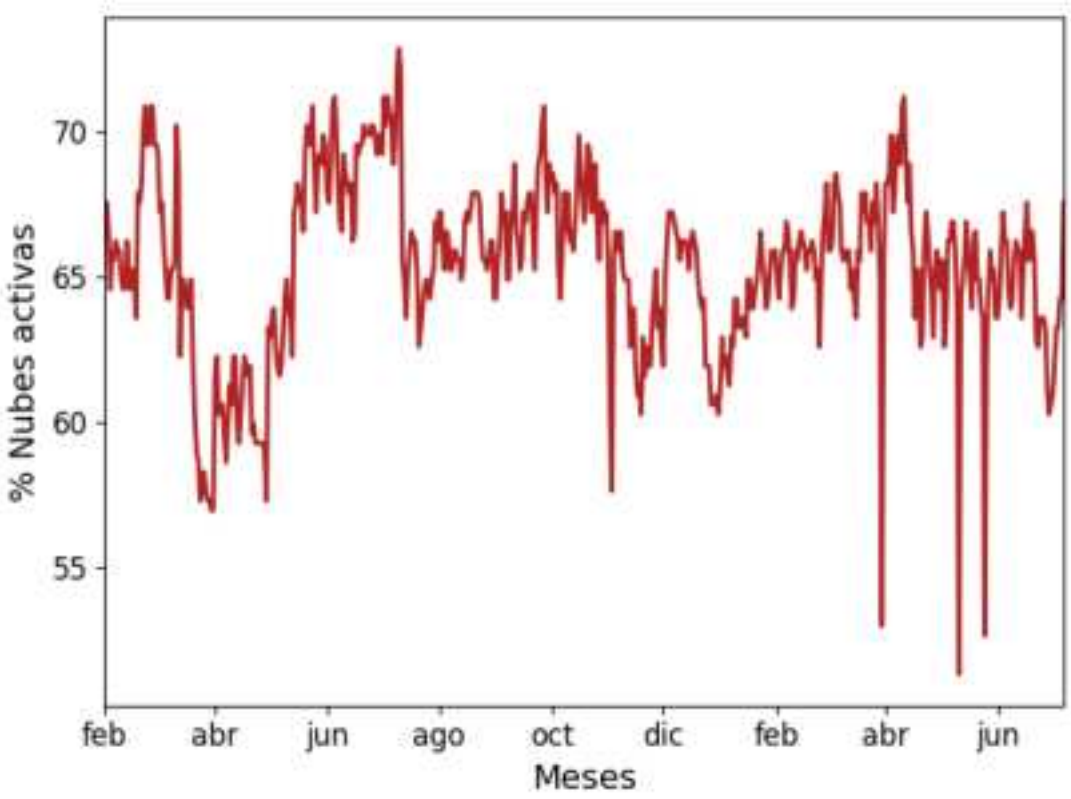


Figura 288: Porcentaje de Nubes activas al menos una vez durante el período de la vigencia del contrato 016 de 2024.

Durante el período de ejecución del contrato 016 de 2024, 245 nubes enviaron datos al menos una vez. En cuanto a las Nubes restantes del total del programa (un valor total de 284 nubes instaladas), éstas se encuentran fuera de operación, en calibración o mantenimiento. La Figura 289 muestra el ciclo semanal de Nubes que estuvieron activas al menos una vez durante el período de análisis. El margen de confianza graficado es del 95 %, es decir, se muestra la variabilidad del 95 % de los datos alrededor del promedio semanal. En esta se observa que la mayoría de ausencia de datos significativos fue en los días sábados y domingos, lo cual confirma lo mencionado anteriormente.

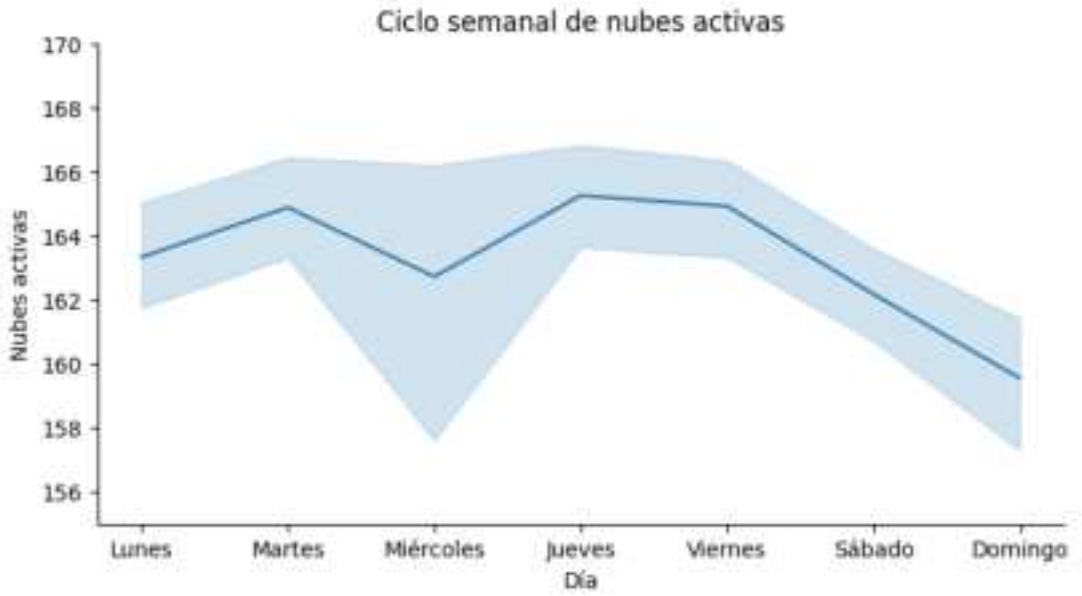


Figura 289: Ciclo semanal del número de Nubes activas durante la vigencia del contrato 016 de 2024

La Tabla 54 presenta el número de Nubes activas y que enviaron datos más del 50 % del mes, es decir, aquellas que estuvieron activas la mayor parte del tiempo, para un total de 245, lo que equivale al 86 % de las nubes que reportaron información en este período. La información se presenta clasificada por municipio en donde los datos de las nubes instaladas es el valor obtenido en el momento de elaboración de este informe.

Tabla 54: Nubes activas durante la vigencia 016, discretizadas para el Distrito Especial de Medellín y municipios del Valle de Aburrá.

Municipios	Número de nubes instaladas	Número de nubes activas
Barbosa	6	8
Bello	21	20
Caldas	10	9
Copacabana	14	13
Envigado	25	23
Girardota	21	17
Itagüí	12	15
La Estrella	20	17
Medellín	141	110
Sabaneta	14	13

Ciudadanos Científicos en Bicicleta

Durante el período de ejecución del contrato 016 de 2024, 39 sensores instalados en bicicleta, de un total de 50 asignados, enviaron datos al menos un día. En promedio, 2 sensores enviaron datos cada día durante este período de tiempo, como se presenta en la Figura 290.

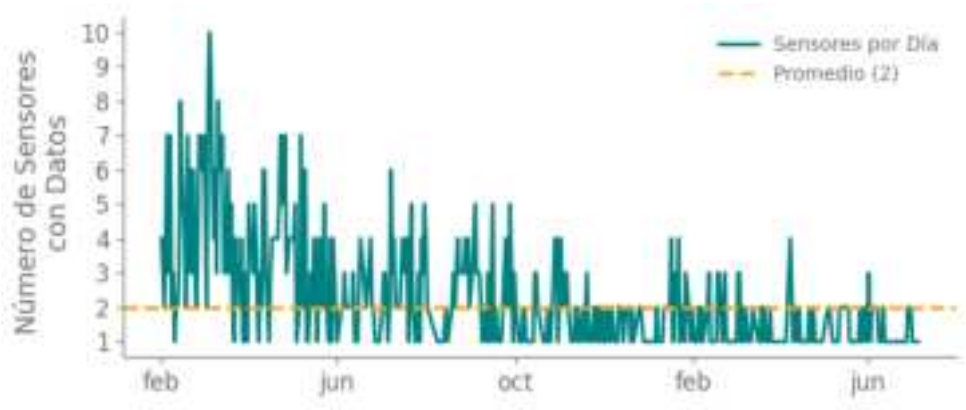


Figura 290: Balance de los sensores instalados en Bicicletas de la Red de Ciudadanos Científicos en la vigencia del contrato 016 de 2024

Soporte general de la red de Ciudadanos Científicos

Durante el período de la vigencia del contrato 016 de 2024 se realizaron 1795 intervenciones a las Nubes de la Red de Ciudadanos Científicos, incluyendo mantenimiento correctivo y/o actualización de software de acuerdo con los requerimientos de cada Nube, mientras que en el caso de los sensores móviles estas actividades corresponden a 313, tal como se presenta en la Figura 291.

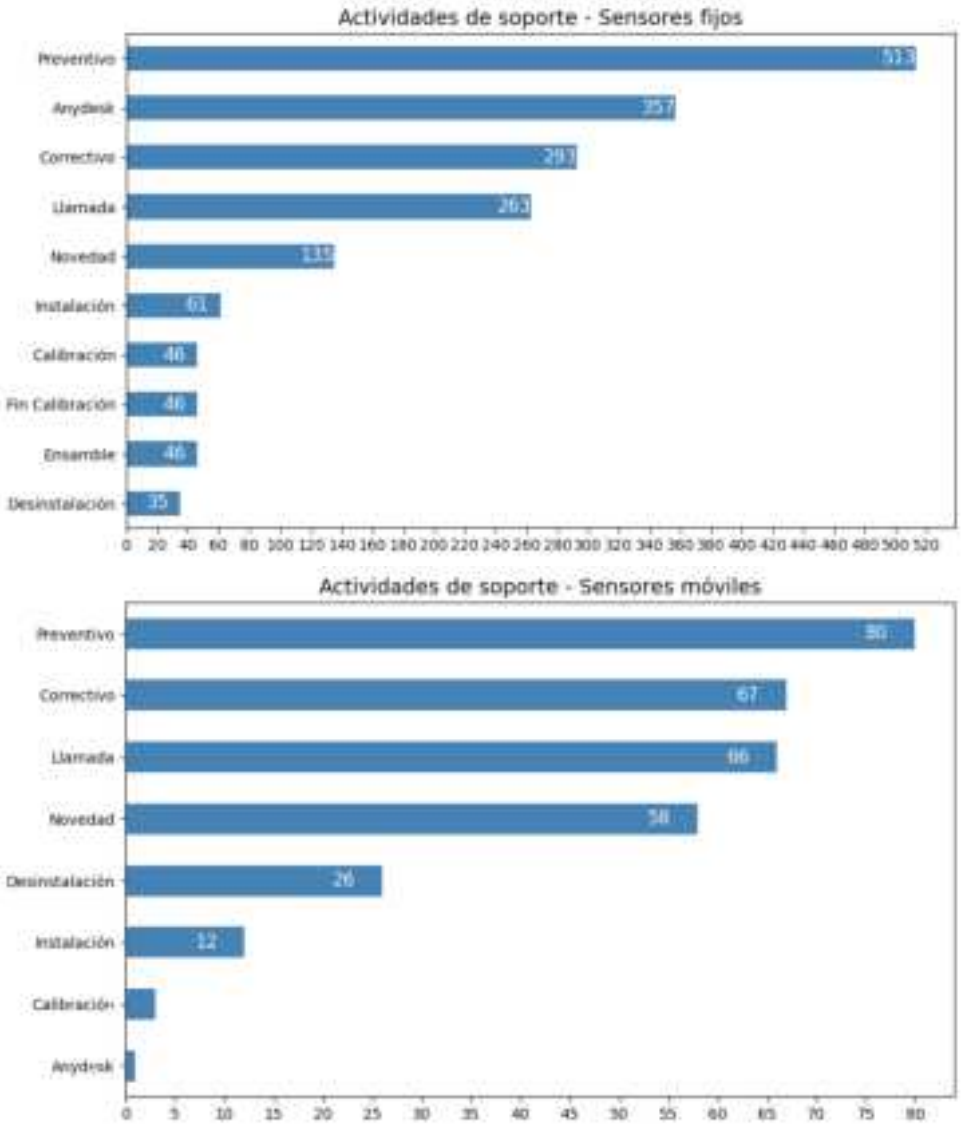


Figura 291: Actividades de soporte a la red de Ciudadanos Científicos durante la vigencia del contrato 016 de 2024

Comportamiento del nivel de presión sonora a partir de las nubes de Ciudadanos Científicos.

Durante la vigencia del contrato CCT016 de 2024, la red de Ciudadanos Científicos contó con 241 sensores de ruido instalados que transmitieron al menos un dato durante la duración del contrato en puntos de monitoreo ubicados en viviendas, oficinas e instituciones educativas que acogieron de manera voluntaria un sensor de bajo costo o *nube* como es conocido comúnmente el dispositivo, desarrollado por el SIATA.

Las Figuras 292 a 294 presentan la mediana del nivel de presión sonora para diferentes zonas de los municipios del área metropolitana del Valle de Aburrá durante el contrato CCT016 de 2024, calculada

teniendo en cuenta las nubes que operaron durante el contrato en los diferentes municipios. Las zonas se encuentran definidas de la siguiente manera:

- Zona Norte: estaciones ubicadas en los municipios de Girardota, Copacabana y Barbosa, con un total de 39 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.
- Bello: estaciones ubicadas en el municipio de Bello, con un total de 17 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.
- Zona Sur: estaciones ubicadas en los municipios de Sabaneta, Itagüí y Caldas, con un total de 39 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.
- Envigado: estaciones ubicadas en el municipio de Envigado, con un total de 23 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.
- La Estrella: estaciones ubicadas en el municipio de La Estrella, con un total de 18 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.
- Medellín Sur: estaciones ubicadas en el Distrito de Medellín, en los barrios Belén, El Poblado, Guayabal y Altavista con un total de 37 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.
- Medellín Centro: estaciones ubicadas en el Distrito de Medellín, en los barrios La América, Buenos Aires, San Javier, Laureles, Estadio, Villa Hermosa, La Candelaria y el corregimiento de Santa Elena con un total de 36 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.
- Medellín Norte: estaciones ubicadas en el Distrito de Medellín, en los barrios Robledo, Doce de Octubre, Castilla, Aranjuez, Manrique, la zona Nororiental, y el corregimiento de San Cristóbal con un total de 32 estaciones de Ciudadanos Científicos con sensor de ruido.

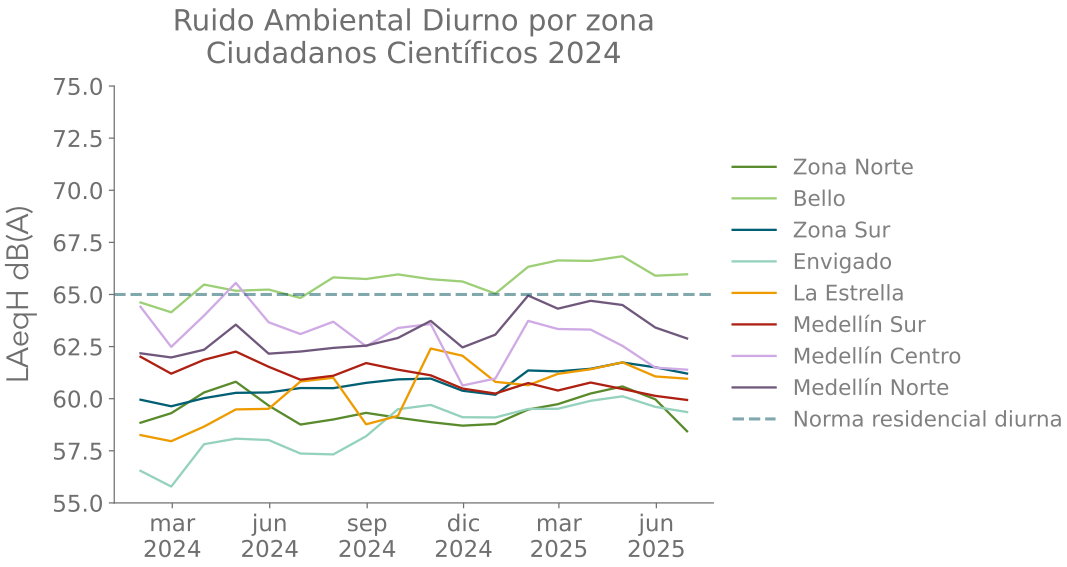


Figura 292: Serie de tiempo diurna por zonas de los sensores de ruido de la red de Ciudadanos Científicos para el contrato CCT016 de 2024.

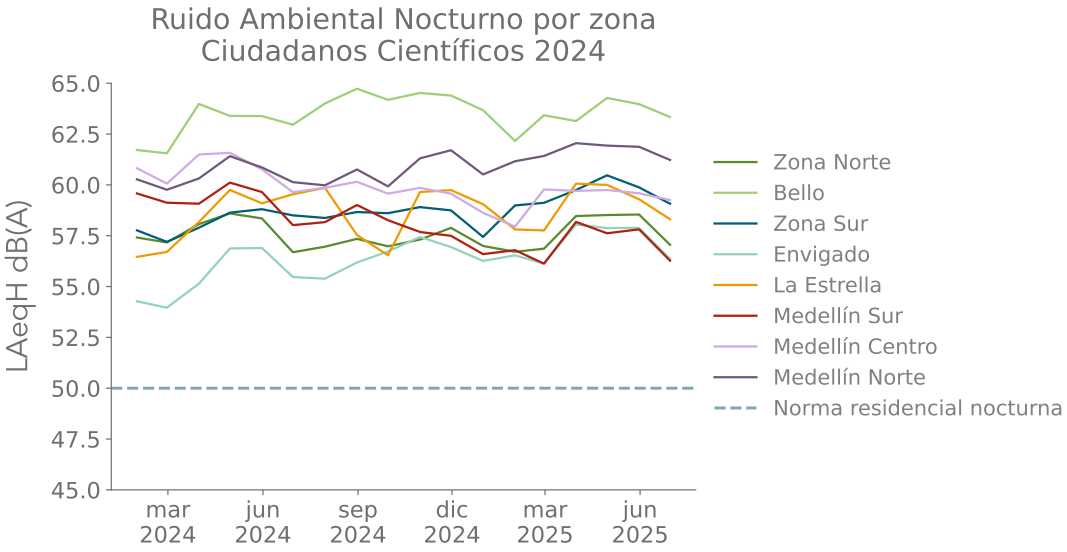


Figura 293: Serie de tiempo nocturna por zonas de los sensores de ruido de la red de Ciudadanos Científicos para contrato CCT016 de 2024.

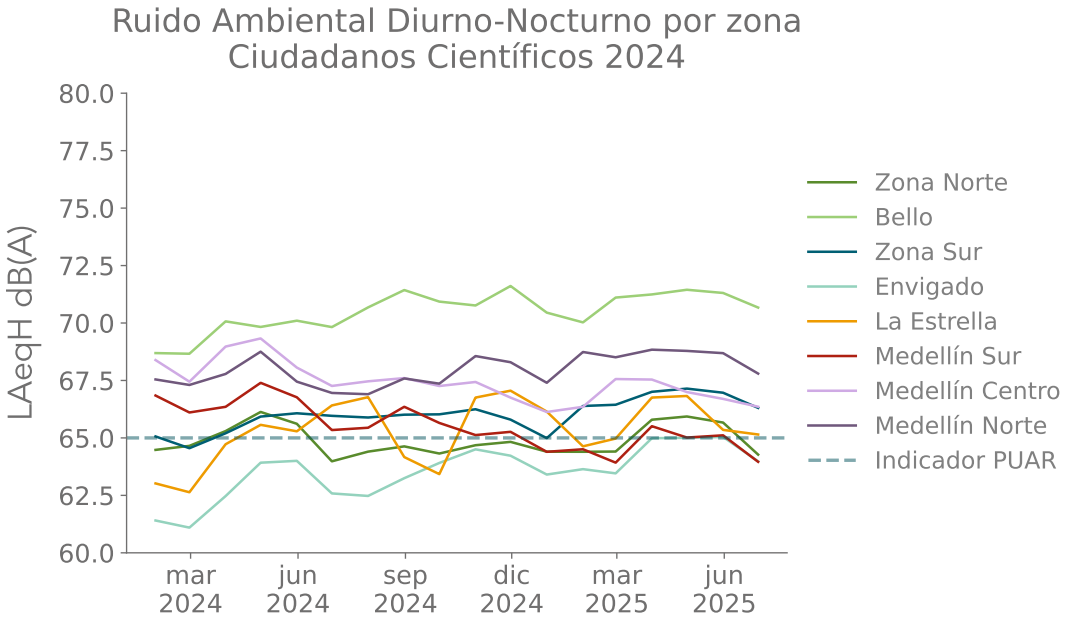


Figura 294: Serie de tiempo diurna-nocturna por zonas de los sensores de ruido de la red de Ciudadanos Científicos para el contrato CCT016 de 2024.

En las Figuras 292 a 294 es posible observar que la mediana del nivel de presión sonora varía entre 55 y 67 dBA durante el período diurno, entre 54 y 67 dBA durante el período nocturno, y entre 61 y 73 dBA para el indicador diurno-nocturno.

En las Figuras 295 y 296 se presentan los resultados del nivel de presión sonora promedio (LAeq) diurno y nocturno para las nubes de Ciudadanos Científicos que entregaron datos durante el contrato CCT016 de 2024. Es importante resaltar que los valores presentados corresponden al promedio energético de los días en los cuales cada estación entregó datos.

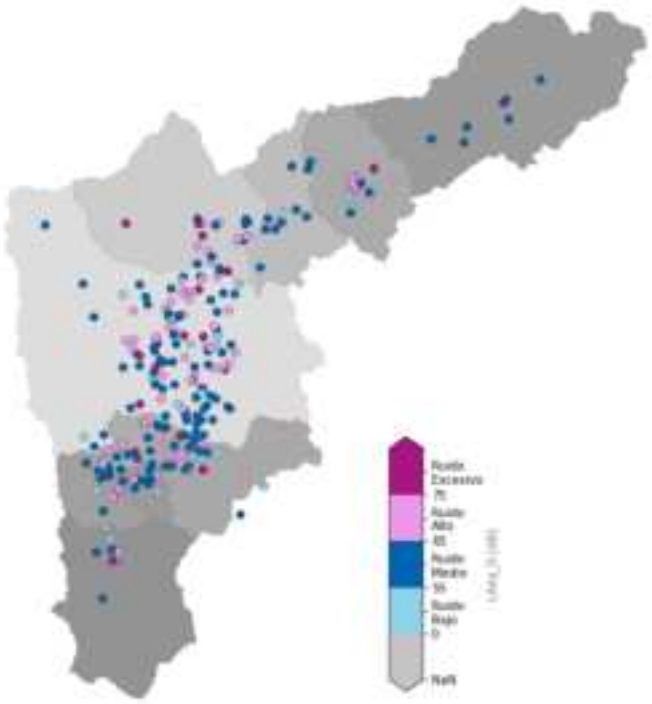


Figura 295: Mapa de los valores de LAeq promedio mensual diurno obtenidos con la Red de Ciudadanos Científicos para el contrato CCT016 de 2024.

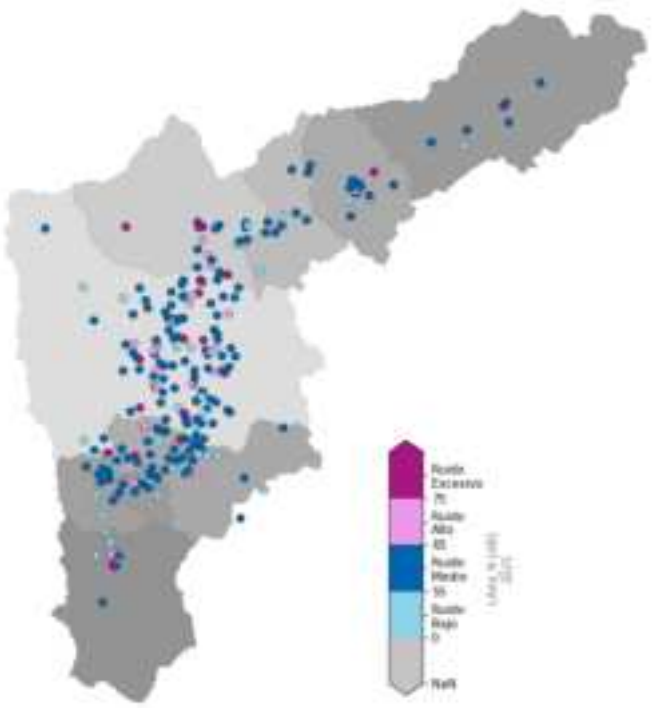


Figura 296: Mapa de los valores de LAeq promedio mensual nocturno obtenidos con la Red de Ciudadanos Científicos para el contrato CCT016 de 2024.

Finalmente, en la Tabla 55 se presenta el número de nubes de Ciudadanos Científicos que entregaron datos diarios de ruido para al menos la mitad de días del contrato CCT016 de 2024.

Tabla 55: Sensores de ruido de la red de Ciudadanos Científicos activos durante el contrato CCT016 de 2024.

Municipios	Número de nubes activas
Barbosa	7
Bello	14
Caldas	7
Copacabana	10
Envigado	19
Girardota	12
Itagui	11
La Estrella	16
Medellin	87
Sabaneta	13

WP2.2.2. Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad de los datos registrados en las redes hidrometeorológicas

Desde el equipo de Calidad de Datos, se llevó a cabo un constante avance en el desarrollo de herramientas para la evaluación de la calidad de los datos en tiempo real, y la detección y seguimiento de problemas en la red de monitoreo hidrometeorológico. Durante la vigencia 016-2024, se realizaron *87 herramientas de desarrollo de código* y *39 actividades involucradas en los procesos de calidad del dato* , las cuales se realizaron con periodicidades diaria, semanal y mensual. Para mayor detalle se puede consultar: Calidad Datos.

WP2.2.3. (Calidad del aire) Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad y validez de los datos registrados en la red de Calidad del Aire

Herramientas de análisis para el monitoreo de la Calidad del Aire

Durante todo el período de ejecución del contrato 016 de 2024 se tuvo disponible el enlace Herramientas AMVA (SIATA) para el análisis integral de la calidad del aire, página no oficial. Este enlace se ha dispuesto, desde hace varias vigencias, tanto para el grupo técnico del Área Metropolitana del Valle de Aburrá como para el equipo interno del componente de calidad del aire del SIATA. Es una herramienta fundamental para el seguimiento continuo de variables atmosféricas que influyen en la contaminación de este recurso natural y que posibilita el análisis para la toma de decisiones principalmente durante los períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica.

Potenciación y modernización de los instrumentos que permiten el conocimiento integral del recurso aire en el territorio.

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire cuenta con un proceso de validación de datos que garantiza la confiabilidad de la información que se entrega, documentada en el Sistema de Gestión de la Calidad del Aire, en el marco del paquete de trabajo 4 (WP4). En el caso de la Red de Ciudadanos Científicos se cuenta con un procedimiento que cualifica los datos arrojados por los diferentes sensores. Los procesos de ajuste a los registros de los sensores de bajo costo se realizan a partir de la red oficial acreditada por el IDEAM. En el enlace se puede consultar el Manual de Ciudadanos Científicos.

WP2.2.4. Gestionar el intercambio de la información registrada por todas las redes de monitoreo del proyecto SIATA a través de la respuesta a las solicitudes de información

La base de datos empleada para dar respuesta a las solicitudes de información, especialmente las relacionadas con los registros históricos de las distintas redes hidrometeorológicas, fue actualizada mensualmente teniendo en cuenta el último mes con evaluación de la calidad exhaustiva. De igual forma, esta información se almacenó periódicamente en los servidores del proyecto SIATA.

Adicionalmente, el seguimiento del correcto funcionamiento de la herramienta de descargas disponible al público fue una tarea que se realizó en conjunto con el equipo de Sistemas, teniendo en cuenta las retro-

alimentaciones recibidas por parte de los usuarios. La documentación relacionada con estas actividades de seguimiento se encuentra disponible en el siguiente enlace: Seguimiento descargas.

WP2.2.5. Proveer sostenibilidad a las redes

Durante la vigencia, se implementó un comparativo mensual de consumos, en el cual se registraron tanto las salidas de insumos como la necesidad asociada a las actividades de mantenimiento e instalación. Este análisis permitió clasificar los consumos según su origen —mantenimiento correctivo o preventivo— y generó información clave para optimizar la planificación presupuestal, el control de costos y la eficiencia en la gestión de recursos logísticos.

La implementación de estas prácticas fortaleció significativamente los procesos internos del almacén y tuvo un impacto directo en la sostenibilidad operativa de las redes del proyecto SIATA. Gracias a una gestión más estratégica de los insumos, fue posible garantizar la disponibilidad de componentes críticos, reducir tiempos de respuesta ante emergencias y mantener altos niveles de continuidad en la operación de las estaciones de monitoreo.

Para mayor información, se puede consultar el consolidado mensual en el siguiente enlace:

`https://drive.google.com/drive/u/0/folders/1eGhhM16TxF0K6xLRDjlaJjB2tsM5Y6B9`

WP2.2.6. Generar información oportuna sobre las consecuencias generadas por sismos

Como se presentó en este apartado en los meses anteriores, las labores de fortalecimiento de acuerdo con los activos disponibles para nueva instrumentación sísmica fueron ejecutados con éxito. Resumidamente, los logros asociados en esta actividad son:

- Instalación el 16 de julio de 2024 de acelerógrafo de referencia TITAN-SMA en la estación de la red acelerográfica del valle de Aburrá, Seminario Mayor (SEM). Esta estación se encuentra activa y funcionando en tiempo real.
- Instalación el 30 de octubre de 2024 de acelerógrafo de referencia TITAN-SMA en la estación de la red acelerográfica del valle de Aburrá, Centro de Control (ECC). Por inconvenientes asociados a la alimentación de energía del sensor en dicho sitio, éste fue removido y reinstalado en la Estación de La Estrella (EST), donde actualmente se encuentra activo y funcionando en tiempo real.
- Instalación finalizada el 26 de noviembre de 2024 de seis (6) acelerógrafos de referencia Rapsberry Shake 4D en las dos (2) edificaciones que comprenden el Centro Administrativo Municipal de Caldas (CAM Caldas).

WP2.2.7. Garantizar el seguimiento de las redes de monitoreo sísmico

De manera sistemática, mes a mes, se informó de las actividades realizadas o que, por alguna limitación, no fueron cubiertas por el equipo de Ingeniería Sísmica. Esta sub-actividad comprendió para el equipo las labores de reubicación de sensores y todas aquellas desempeñadas por sí mismo, orientadas a garantizar el correcto funcionamiento de los sensores de monitoreo sísmico. A continuación, se resumen todas las eventualidades concernientes a esta sub-actividad:



- El 10 de julio de 2024 se realizó la visita al sitio de reubicación de la estación La Tasajera (TAS) en un túnel auxiliar de la Central Hidroeléctrica del mismo nombre, conocido como Ventana 2, a una distancia aproximada de 1 km del punto original. El personal que realizó la visita hace parte de los equipos de Infraestructura, Mantenimiento e Ingeniería Sísmica del proyecto SIATA, así como del área de Mantenimiento y Operación de Empresas Públicas de Medellín (EPM). Esta evaluación sirvió para definir el punto exacto de reubicación dentro del túnel, las obras a realizar y los materiales necesarios para su ejecución, además del tiempo en el cual se realizará la obra, que estaba prevista para finales de agosto e inicios de septiembre del presente año. No obstante, sujeto a procesos de oferta y contratación, las labores de reinstalación se ejecutaron el 7 de noviembre de 2024; cabe decir que la entrada en operación del equipo de medición (acelerógrafo) se encontraba sujeta a la disposición de alimentación a energía por parte de la Central.

- El 16 de diciembre de 2024 se informó por parte de la Central La Tasajera la terminación de las obras para la disposición del punto de conexión necesario para la instalación del acelerógrafo. El 15 de enero de 2025, personal de Mantenimiento e Infraestructura de SIATA visitó la Central para la ejecución de las obras finales para la re-instalación del equipo. Con estas labores, se revisó el correcto funcionamiento del sensor y hasta la fecha se encuentra funcionando y figura como una estación activa de la Red Acelerográfica del valle de Aburrá. Las visitas posteriores que sean realizadas al sitio comprenderán labores de mantenimiento preventivo y recolección manual de eventos. En la Figura 297 se muestran los procesos de adecuación del nuevo sitios, posicionamiento del sensor y puesta en servicio.

- Por otro lado, en el mes de enero de 2025 se realizó la validación de los registros continuos del equipo CUSP-3C perteneciente a la estación Planta Villa Hermosa (EVH) de la red acelerográfica. Específicamente, se contrastó durante 2 horas junto al equipo acelerógrafo EQR-120 de la estación P15A de Torre SIATA (ver Figura 298). Los resultados evidencian que los registros son congruentes tanto en el dominio del tiempo como en la frecuencia, lo cual se visualiza en la Figura 299.

- Con relación a la estación sismológica de Santa Elena (ESE), que fue visitada en el mes de julio de 2024 con el fin de evaluar anomalías presentadas en sus registros, y que con una visita posterior ejecutada el 21 de agosto, se concluyó que es necesario cambiarla de sitio donde los registros no se vean alterados por algún tipo de ruido no identificado. El lugar para su reubicación fue identificado dentro del mismo predio donde se encontraba inicialmente el sensor; en este sitio es necesario disponer de obras menores para su respectiva instalación y alimentación a la energía. El proceso de compra de todos los elementos necesarios para realizar esta instalación se encuentra finalizado y las obras de adecuación y reubicación están sujetas a los respectivos permisos expresos por AEROCIVIL.



Figura 297: Adecuación del nuevo sitio y re-instalación de sensor de la Estación La Tasajera. Panel A: construcción de obra civil (bloque de concreto y caja metálica) para disposición del acelerógrafo con sus componentes necesarios. Panel B: reinstalación en sitio del sensor y puesta en servicio.



Figura 298: Prueba para la validación de los registros del equipo acelerógrafo CUSP-3C Planta Villa Hermosa (EVH).

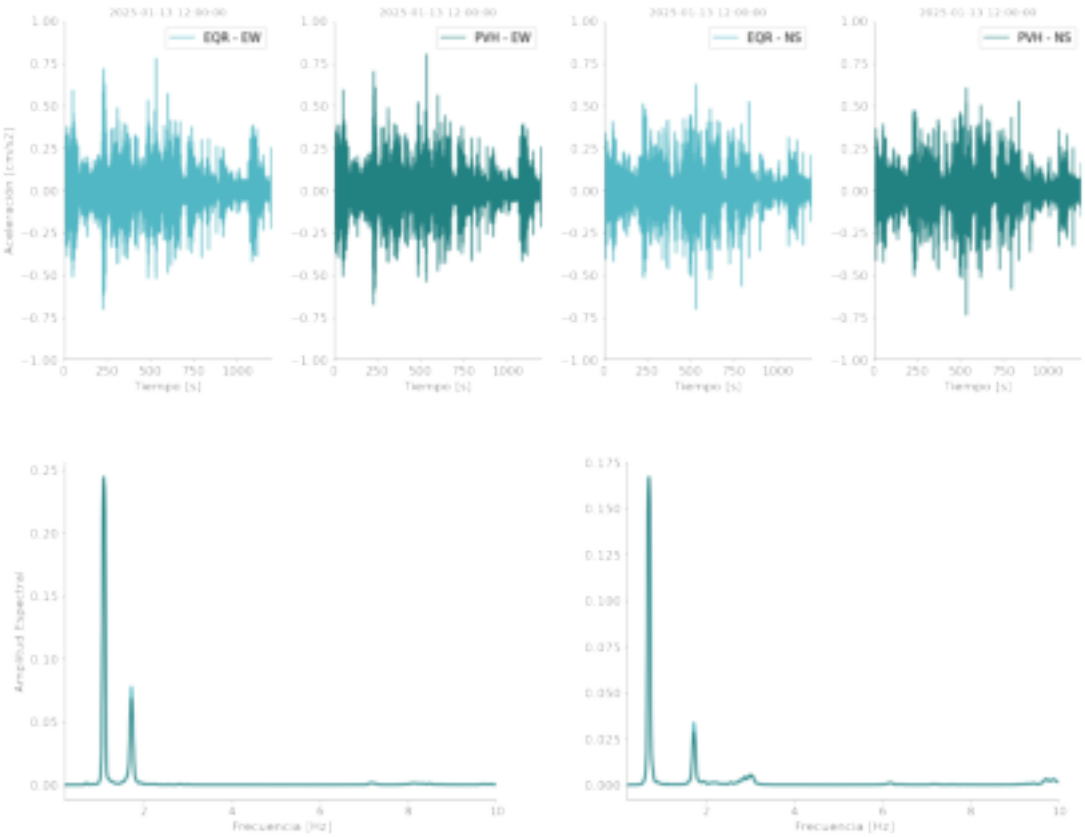


Figura 299: Comparación de registros continuos de vibración ambiental para la validación del acelerógrafo CUSP-3C Planta Villa Hermosa (EVH), con respecto al equipo EQR-120 de la estación P15A de la Torre SIATA.

WP2.2.8. Fortalecer y desarrollar la infraestructura IT para la gestión del conocimiento y el cumplimiento de las actividades misionales

Durante la vigencia 016-2024, se atendieron solicitudes relacionadas con el funcionamiento de equipos informáticos, tanto de servidores como de estaciones de trabajo. Entre las tareas llevadas a cabo, se encuentra la creación de usuarios, la modificación de permisos en directorios y archivos, la instalación y corrección de fallos en aplicaciones, así como la optimización de procesos en otros equipos informáticos.

Además, se resolvieron los requerimientos de los diferentes equipos de trabajo de SIATA en cuanto a la solución de errores y el mejoramiento de herramientas informáticas, tales como el correo de servidores, la realización de copias de seguridad, la configuración de software y la instalación de librerías, entre otros.

Las actividades más relevantes realizadas durante esta vigencia incluyen:

- Instalación de más de 3000 librerías, necesarias para el funcionamiento de diferentes entornos y herramientas.
- Reinstalación de más de quince (15) estaciones de trabajo o servidores, por razones de mantenimiento o fallos críticos.
- Adquisición de tres (3) nuevos servidores, fortaleciendo así la infraestructura del proyecto.
- Implementación de tecnología SD-WAN en las cuatro (4) sedes del proyecto, lo que permitió mejorar significativamente la interconexión y estabilidad de las comunicaciones entre las mismas.
- Reemplazo de la UPS del Datacenter ubicado en la sede Casa SIATA, luego de que la anterior sufriera daños debido al sobrecalentamiento causado por actos vandálicos que afectaron el sistema de aire acondicionado.
- Despliegue del nuevo geoportal a producción sobre el dominio https://geoportal.siata.gov.co

  Estas acciones han contribuido a garantizar la continuidad operativa, mejorar el rendimiento de los sistemas y fortalecer la infraestructura tecnológica de SIATA.

WP2.2.9. Establecer un ecosistema tecnológico para la gestión de datos

Base de datos. El almacenamiento y la correcta gestión de la información resultan fundamentales para la operación y sostenibilidad del proyecto. Tanto los datos históricos como los datos de carácter volátil requieren un tratamiento con criterios técnicos adecuados que garanticen su integridad, disponibilidad y trazabilidad.

Durante la vigencia 016-2024 del proyecto, se atendieron diversas solicitudes provenientes de los diferentes equipos que lo conforman, relacionadas con la administración, soporte y optimización de las bases de datos, entre las cuales se destacan:

- Se atendieron más de noventa y siete (97) solicitudes de gestión de las bases de datos (CRUD) para los diferentes componentes de riesgo y aire, las cuales fueron recibidas por el correo de servidores.
- Se realizaron más de noventa (90) respaldos de bases de datos, tanto de bases completas como de tablas específicas. Además, estos respaldos fueron almacenados en el servidor de almacenamiento STORINATOR 1 y se gestionaron bajo lineamientos definidos de retención y depuración, garantizando en todo momento la disponibilidad de al menos un (1) mes de respaldos vigentes para cada base de datos en entorno productivo.

- Se realizaron procesos de rectificación y actualización de los datos de las estaciones modificadas por el equipo de Mantenimiento. Algunas de estas estaciones presentaron fallas en la comunicación para su autenticación, por lo que fue necesario efectuar ajustes manuales en la base de datos con el fin de restablecer su funcionamiento. Durante la vigencia, se ejecutaron aproximadamente más de setenta (70) actualizaciones de este tipo.
- Se llevó a cabo el restablecimiento del sistema de réplica de las bases de datos principales de SIATA, a raíz de una falla crítica presentada a inicios de junio en el motor de base de datos MySQL encargado de esta funcionalidad. La falla, ocasionada por una corrupción grave en el motor, requirió la reconstrucción y reconfiguración completa del sistema de réplica. Este proceso, debido a su complejidad y a las dificultades técnicas encontradas, tuvo una duración aproximada de un mes.

Gobierno de Datos y Repositorio

- **Gobierno de Datos**. Durante la vigencia 016-2024, se iniciaron diferentes tareas asociadas a las actividades de la Fase 2 definida la consultoría de Gestión y Gobierno de Datos llevada a cabo en el marco de la vigencia 103-2023 del proyecto y cuyo informe fue entregado y presentado en febrero del año 2024 (el documento en formato pdf puede ser accedido en el siguiente link). El avance en cada una de las actividades se describe a continuación:

  - **Evaluar el estado actual al nivel de las diferentes herramientas y datos que son custodiados en el proyecto**. Las herramientas de gestión de los datos están desplegadas en cuatro (4) servidores dedicados al almacenamiento y disposición de los datos e información que proviene de las diferentes sensores/redes IoT, así como dieciséis (16) servidores y veintinueve (29) workstations que se dedican principalmente para las actividades de procesamiento (preparación, modelamiento y evaluación). En el segundo semestres del 2024, las tareas se centraron en los cuatro servidores que tienen motores de bases de datos Mysql o Postgresql, donde se gestiona el almacenamiento y la calidad de los datos crudos de las redes hidrometeorológicas. La gobernanza se trató desde las áreas de conocimiento para la gestión de los datos: modelado y diseño de los datos y metadatos, y seguridad de los datos. A continuación, se brinda una descripción general de las tareas adelantadas.
    - Modelado y diseño de los datos. La gobernanza de esta área de conocimiento se llevó a cabo directamente sobre el activo de datos Base de Datos o esquema de datos SIATA. Se validó el estado de la documentación y uso actual de sus activos de datos almacenados como tablas, índices y columnas o metadatos. Se seleccionó esta base de datos por encima de otras, porque en ésta se almacenan los datos que se generan minuto a minuto desde los diferentes sensores en las diferentes redes administradas científicamente por los equipos de Geociencias y Calidad del Aire. Los datos de hidrometeorología son los de mayor volumen según los registros históricos.

      - Hallazgo 1: Los modelos de datos existentes están implementados en dos motores de bases de dato: Mysql y Postgrsql ambos en versión Communitty Edition lo cual limita acciones de gobierno de administración de los datos. Bajo esta premisa se analizaron las actividades diaria de control sobre los datos y se identificaron inconsistencias en estructuras y algunas tablas con datos duplicados con diferentes definiciones y usos.
      - Acción de gobernanza 1: Se inició una labor de correlación entre tablas/columnas que son usadas por diferentes soluciones de software activas o inactivas y que además no tienen roles de responsabilidad en la gestión de la estructura, la calidad de los datos y su correspondiente uso. Específicamente se inició con la creación de nuevos modelos de

datos para dos casos específicos: Gestión Cámaras y HVEstaciones (solución software que maneja los datos maestros de todos los sensores, estaciones, y diferentes dispositivos sobre los cuales se hacen actividades mantenimiento a través del tiempo). Consecuentemente esto realizaron dos acciones a nivel de custodios de datos:
1) la creación de una plataforma de software para gestionar los datos de las Cámaras del Proyecto (estado: desarrollo avanzado) de tal forma que se garantice la gestión y el gobierno de los datos a nivel de su custodia en acciones CRUD (Create-Retrieve-Update-Delete), así como de los usuarios responsables de gestionar los datos.
2) En cuanto a los modelos de datos de HVEstaciones asociados a esta aplicación, estos ha sufrido muchos cambios a través del tiempo, lo cual a provocado deterioro en su calidad estructural y consecuentemente en la gestión de su datos. En la próxima vigencia se realizará un proyecto de desarrollo de la nueva versión de HVEstaciones.
- Hallazgo 2: no existen estándares, políticas y procedimiento para la actualización de los modelos de datos.
- Acción de gobernanza 2: se analizaron los diseños de las estructuras de datos que se requerían para hacer la réplica de los mismos que se iban a disponer en el Repositorio de Datos. Se realizaron algunos scripts que facilitaron la validación del uso del dato en diferentes aplicaciones de calidad de los datos y se hicieron las actualizaciones que se consideraron pertinentes.

- Metadatos. Aunque en el ambiente de gestión de datos del proyecto existen diferentes tipos de Metadatos, en esta vigencia iniciamos una labor de calidad de las bases de datos haciendo un análisis de los metadatos de los datos almacenados en las tablas de movimiento más relevantes rn la BD SIATA.
- Hallago 3: no existen diccionarios de datos para los activos de la base de datos (BD) SIATA. Esta situación pone en riesgo cualquier cambio sobre los datos o análisis con volúmenes de datos que han cambiado en el tiempo y no hay registro centralizado de estos para el proyecto.
- Acción de gobernanza 3: se creó un documento denominado Catálogo de Datos SIATA para estandarizar la forma de documentar los activos de las bases de datos. Esta herramienta apoyará la declaración, actualización e historia de los diferentes propósitos, aplicaciones, y cambios que un activo de datos tiene en el tiempo. Se seleccionaron las tablas de mayor volumen de datos y más representativas para la gestión de los mismos. En los diferentes activos de datos, se analizó su estructura, el significado de cada columna y su uso en diferentes modelos o aplicaciones de software. Este trabajo fue apoyado por la contratación de una consultoría. El informe fue presentado en el mes de diciembre de 2024 y se puede consultar en el enlace Consultoría Catálogo de Datos SIATA. Esta actividad se continuará en la nueva vigencia.

- Hallazgo 4: Aunque el gobierno de los metadatos de los sensores ubicados en diferente estaciones es administrada por el equipo de calidad del dato, este no se conecta con otras políticas o reglas que deberían estar definidas o implementadas en otras fases del ciclo de vida de los datos.
- Acción de gobernanza 4: para eliminar este hallazgo negativo asociado al gobierno de los metadatos misionales del proyecto, en el segundo semestre se hizo un análisis de posibles herramientas, plataformas o tecnologías que pudieran apoyar la gestión y el gobierno de los datos misionales del gobierno declararon políticas en cada una de las fases del ciclo de vida y hacer posible . Esta acción se está definiendo y documentando para su posterior implementación en un ambiente como un lago de datos y el Repositorio de Datos, de tal forma que se puedan establecer políticas que puedan abarcar las particularidades de cada

fase en el ciclo de vida, su coherencia y consistencia de principio a fin. Se proyecta para la próxima vigencia dar continuidad a esta actividad.

- Seguridad de los datos. La seguridad de los datos es una de las áreas de conocimiento que requieren de gobernanza.
  - Hallazgo 5: Los datos del proyecto son vulnerables a ataques externos principalmente.
  - Acción de gobernanza 5: En esta vigencia, se contrató una consultoría para determinar el estado actual de gobierno actual. En el siguiente documento, se presentan todos los hallazgos y acciones a seguir para hacer gestión y gobierno sobre los datos: link.

- **Crear el estado deseado de las políticas, estándares, y procedimientos que se realizarán a nivel de la calidad del dato**. Para dar inicio al desarrollo de las políticas, estándares y procedimientos del gobierno de datos, se tomó como caso de estudio - el Repositorio de Datos. Atendiendo la política:

  - Hallazgo 6: No se tiene una matriz de roles y responsabilidades declaradas de forma explícita en un contexto de gobierno de datos.

  - Acción de gobernanza 6: con base en los roles funcionales que se definen en la estructura organizacional del proyecto SIATA, y en especial en lo que respecta a la definición del caso de uso - Repositorio de Datos, se definió una matriz de roles y responsabilidades. Esta será validada y complementada en la actividad de pruebas alfa que se realizará en el primer semestre de la próxima vigencia.

  - Hallazgo 7: las herramientas de bases de datos son versiones tipo communitty lo que ocasiona que no provean servicios para implementar políticas, estándares, y procedimientos que permitan administrar los datos del proyecto acuerdo al gobierno establecido.

  - Acción de gobernanza 7: se llevó a cabo la búsqueda de plataformas/herramientas tipo data lake o lake house que permitieran implementar el gobierno de datos SIATA en diferentes áreas de conocimiento de la gestión de datos. Esta acción se justifica porque a esta vigencia el proyecto presenta un alto volumen de datos (aproximadamente 3.5 terabytes) y una variedad de datos (de tipos y formatos de almacenamiento) que provienen de sensores localizados en las diferentes redes IoT del proyecto, datos del radar, imágenes y videos capturadas desde drones, cámaras localizadas en diferentes puntos de la ciudad, imágenes satelitales, y datos adquiridos desde fuentes externas. Además, se generan datos producto del procesamiento de los datos para monitorear y generar alertas tempranas. Sin embargo, el proyecto actualmente no tiene una plataforma para administrar la ruta del dato desde su creación hasta su distribución a diferentes usuarios internos y externos. Estos datos son administrado de forma básica por el equipo de custodios de datos de SIATA y calidad del dato, sin embargo, existen riesgos inminentes que podrìan impactar los bases de datos o archivos de datos principales.

- **Configurar y alistar la implantación de Repositorio de Datos - fase 1**. Las actividades desarrolladas durante esta vigencia y la proyección durante el primer semestre de la próxima se pueden ver en el enlace Repositorio de Datos - Fase I.

- **Aplicar acciones de mejora a las necesidades de algunos activos de datos en bases de datos críticas del proyecto que sean administrados por el equipo de custodios de datos**. Se realizaron dos contratos de acompañamiento de consultores expertos en calidad de los datos, y seguridad de los datos. Así mismo, el equipo interno de la coordinación de TI en el componente de SISTEMAS realizaron diferentes acciones de mejora a las estructuras y aplicaciones que consumen datos internos o externos.



WP2.2.10. Optimizar los aplicativos de difusión de alertas en tiempo real

A nivel de los aplicativos de difusión, se lograron las siguientes metas:

- Desarrollo y puesta en producción de la aplicación web "Geoportal Ciudadanos".
- Desarrollo y puesta en producción de la nueva página web de SIATA.
- Desarrollo y puesta en producción de pantallas divididas y mejora a los portales existentes.
- Se atendieron más de 100 solicitudes para mejorar el nivel de automatización de procesos de riesgos y aire.
- Se mejoraron las prácticas de desarrollo de software para lograr la gestión de aplicaciones, versionamientos y estándares de documentación en Gitlab.

WP2.2.11. Investigar, evaluar y fortalecer el uso de nuevas tecnologías (sensores para medición y protocolos de intercambio de información Internet de las Cosas - IoT)

Fortalecimiento en el uso de nuevas tecnologías para la transmisión de la información en las estaciones del proyecto SIATA: buscando estar a la vanguardia en tecnologías de transmisión de la información IoT y, a su vez, fortalecer las redes existentes, se llevó a cabo el siguiente conjunto de actividades:

- Sistema de alta disponibilidad con el bróker RabbitMQ: durante el periodo contractual, se llevó a cabo un proceso continuo de fortalecimiento, mantenimiento y monitoreo de estos sistemas de alta disponibilidad (HA) basados en RabbitMQ, el cual es esencial para asegurar la recepción estable, segura y redundante de los datos provenientes de las distintas estaciones de monitoreo del proyecto. Se actualizaron progresivamente los programas desarrollados en Python encargados de consumir las colas de datos del bróker RabbitMQ, haciendo uso de la librería de Python Pika. Estas mejoras se enfocaron en optimizar tanto la lectura eficiente del bróker como el ingreso estructurado de datos a la base de datos. Se actualizó el software para múltiples redes (pluviográfica, nivel, piezómetros, nubes de ciudadanos científicos, TDRs, molinos de campo eléctrico, bicicletas, entre otras), implementando una arquitectura basada en la ejecución periódica (cada minuto) de procesos livianos que se cierran automáticamente tras cumplir su función, lo que redujo significativamente la carga del sistema. Paralelamente, se desarrolló un sistema de recuperación de información del día anterior en estaciones con Raspberry Pi, útil para asegurar la integridad de los datos ante posibles fallos de transmisión.

  En cuanto a infraestructura, se incorporaron Raspberry Pi 5 como dispositivos consumidores dedicados. Se adaptó una imagen con sistema operativo Debian v12 y se configuraron todos los servicios necesarios para automatizar el consumo de colas. Estos consumidores se desplegaron en sedes como Torre SIATA, Casa SIATA y 808, permitiendo una arquitectura verdaderamente redundante y distribuida. También se avanzó en el diseño de un dashboard de monitoreo interno que visualiza el estado de los diferentes componentes del sistema HA.

- Red LoRaWAN: durante la vigencia, el equipo de Telemetría del proyecto SIATA desarrolló e implementó tres (3) redes LoRaWAN independientes, ubicadas estratégicamente en las zonas de La Clara (Caldas), El Salado (San Antonio de Prado) y Ciudadela La Vida (Copacabana). Estas implementaciones permitieron mejorar la conectividad y continuidad operativa de estaciones de nivel



y pluviográficas, fortaleciendo la red de monitoreo ambiental del proyecto. Este ítem era una tarea contractual, que se llevó a cabo satisfactoriamente con la instalación de las redes mencionadas.

- Prospección señal red celular: con el fin de evaluar la calidad de la conectividad móvil en zonas de interés para la instalación de estaciones del proyecto SIATA, el equipo de Telemetría diseñó y puso en marcha una estación portátil de prospección de señal celular. Esta herramienta permite anticipar si los sitios cuentan con cobertura suficiente para el envío de datos en tiempo real, reduciendo riesgos operativos y optimizando los recursos del proyecto.

- Script para envío y recuperación de datos con RabbitMQ en estaciones Raspberry Pi: con el fin de mejorar la confiabilidad en la transmisión de datos desde estaciones remotas del proyecto SIATA, el equipo de Telemetría desarrolló un script en Python para el envío y recuperación de datos utilizando RabbitMQ. Este nuevo sistema permite almacenar localmente las tramas no enviadas por fallas de red y reenviarlas posteriormente en lotes controlados, asegurando la persistencia e integridad de la información.

- Implementación de transferencia de imágenes vía FTP con módem GL.iNet Collie X300: se desarrolló e implementó un sistema para la transferencia remota y automatizada de imágenes desde cámaras FLIR FH-617 hacia el servidor FTP de SIATA, utilizando un módem GL.iNet Collie X300. Esta solución fue necesaria debido a que la cámara no posee soporte FTP nativo y el sitio de instalación carece de radioenlace.

- Proyecto de gestión y administración de conectividad en estaciones que usan módem para red móvil: durante la vigencia, se realizó un análisis integral del estado actual de la conectividad móvil en las estaciones del proyecto SIATA. A partir de información suministrada por el grupo de logística, se identificó que el 58.8 % de las estaciones móviles utilizan red TIGO y el 41.2 % restante la red CLARO, siendo la coordinación de riesgo la que concentra el 93.4 % de los planes activos.

  Con base en estos hallazgos, se estableció una mesa de trabajo con el equipo comercial de TIGO Empresas para explorar alternativas que respondan mejor a los requerimientos técnicos del proyecto, en especial en términos de seguridad, trazabilidad del tráfico y administración remota. Como resultado, se implementó un piloto con SIMs gestionadas TIGO-IoT, con el plan DevKit Agrupación Flexible 30 días, en el cual participaron doce (12) estaciones de distintos tipos: meteorológicas, pluviométricas, de nivel, humedad y disdrométricas, además de un equipo de comunicaciones Mikrotik.

  Durante el piloto se monitoreó el consumo de datos de cada estación, encontrando consumos promedio entre 7 y 29 MB/día en estaciones operativas, y un consumo significativamente alto (262 MB/día) en el caso del Mikrotik. Se evidenció que la estación conectada a este último presentó poca continuidad operativa, posiblemente debido a su alto consumo y limitaciones del plan demo.

- Piloto de alarmas inclusivas para personas con discapacidad auditiva: con base en una necesidad planteada por el equipo Social del proyecto SIATA, se desarrolló un piloto orientado a mejorar la inclusión de personas con discapacidad auditiva en las comunidades que cuentan con Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC). El objetivo fue diseñar una solución tecnológica que permita a estas personas recibir notificaciones de emergencia de manera autónoma y efectiva en el momento de activación de una alarma comunitaria en su zona. La solución planteada se basa en la implementación del protocolo Meshtastic, un proyecto de código abierto que permite la creación de redes Mesh basadas en LoRa, tecnología de comunicación inalámbrica de largo alcance y bajo consumo. Esta red facilita la interconexión de múltiples dispositivos sin necesidad de infraestructura celular o internet.

- Levantamiento de la red IP de SIATA: durante la vigencia, el equipo de Telemetría brindó apoyo técnico en el levantamiento, documentación y análisis de la infraestructura de red IP en las diferentes

sedes del proyecto SIATA, incluyendo Bodega 808, Casa 4, Casa SIATA y Torre SIATA. Adicionalmente, se participó en reuniones con proveedores y asesorías externas para evaluar problemas de conectividad, y se brindó apoyo en pruebas funcionales. Finalmente, se acompañó el proceso de reactivación de la red de acelerómetros mediante VPN IPSec, explorando la viabilidad del uso de módems Sierra Wireless como solución de interconexión. Esta actividad fortaleció la comprensión y administración de las redes SIATA, permitiendo mejorar la documentación, detectar puntos críticos y apoyar futuros procesos de optimización y expansión.

- Migración de red IP y gestión de infraestructura de red del proyecto SIATA: durante la vigencia, se acompañó activamente el proceso de migración, soporte y monitoreo de la red IP del proyecto SIATA hacia una arquitectura basada en tecnología SD-WAN. Esta migración inició con el reemplazo de los switches Dell en las distintas sedes del proyecto, debido a que su configuración estaba generando conflictos en la lógica de capa 2.
- Alternativas en la transmisión de la información: el equipo de Telemetría inició la evaluación de diferentes tecnologías que permitan garantizar una transmisión estable, gestionable y con posibilidad de redundancia. Esta búsqueda tiene como objetivo fortalecer la red de comunicación, ampliar su cobertura y mitigar la pérdida de datos ante posibles fallos de conectividad. Para esto, se desarrolló un análisis comparativo entre varias soluciones tecnológicas disponibles, incluyendo SIM Cards con conectividad a múltiples operadores, módems con capacidad de doble SIM, redes LoRaWAN para zonas rurales y enlaces satelitales para estaciones sin cobertura móvil. Como conclusión de este ejercicio, se consolidaron las siguientes recomendaciones técnicas, teniendo en cuenta las pruebas realizadas y las limitaciones encontradas:

  Conectividad móvil: se recomienda el uso del servicio Tigo IoT, al ser el único evaluado con resultados positivos. Si en el futuro, Claro ofrece una alternativa similar, se aconseja utilizar ambos en paralelo para aumentar la cobertura y garantizar redundancia.

  Módems dual SIM: en estaciones críticas como alarmas comunitarias, se deben utilizar módems con doble ranura SIM, lo cual permite que, en caso de fallo de un operador, el otro pueda mantener la transmisión sin interrupciones.

  Zonas de cobertura limitada: para estaciones en el límite de cobertura celular, se sugiere integrar redes LoRaWAN como canal de respaldo.

  Zonas remotas sin cobertura: en sitios donde no existe conectividad móvil, debe optarse por transmisión satelital, garantizando así el envío de datos desde cualquier ubicación.

  Estas acciones buscan mejorar la resiliencia de la red de monitoreo del proyecto, permitiendo una respuesta más robusta frente a fallos en la conectividad y asegurando la continuidad de los datos en tiempo real.

(Para más detalle visitar el anexo Telemetría).

WP2.2.12. Propender por la actualización tecnológica, el mejoramiento y la densificación de las redes de monitoreo

Buscando fortalecer las redes de monitoreo del SIATA, en esta vigencia el equipo de Telemetría brindó apoyo con las siguientes actividades:



- **Fortalecimiento de los SATC – Sistema automatizado de notificación por SMS y correo electrónico**: con el fin de fortalecer los canales de comunicación ante emergencias, se desarrolló e implementó un sistema automatizado para el envío de notificaciones por SMS y correo electrónico, activado automáticamente cuando se genera una alerta a través de una alarma comunitaria. Este sistema busca garantizar que la comunidad, líderes locales y entidades encargadas de la gestión del riesgo reciban información en tiempo real, de la activación de una alarma comunitaria, permitiendo una respuesta más rápida y coordinada ante posibles amenazas de o eventos críticos. Esta solución está en espera de ser implementada en una nueva vigencia debido a la compra del paquete de mensajes de texto a utilizar.

- **Molino de campo eléctrico**: el molino de campo eléctrico es un sensor que ha sido desarrollado desde cero en el proyecto. Su diseño comenzó en el Convenio Interadministrativo de Asociación No. 522 de 2013 entre el Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, por lo cual es un proyecto enmarcado en la ciencia, tecnología e innovación. Durante este convenio, se comenzó mejorando la electrónica de algunos sensores existentes por parte de la Universidad Nacional y se finalizó con el desarrollo de un molino de campo eléctrico nuevo cuyo diseño fue madurando con vigencias anteriores. Para esta última contratación, se consolidaron los diseños, se actualizaron y se duplicó el tamaño de la red. El objetivo principal durante esta vigencia era la construcción e instalación de tres (3) estaciones de monitoreo de campo eléctrico para complementar la cobertura de estos sensores en el Valle de Aburrá. Adicional a esto, también estuvo el compromiso de actualizar los molinos existentes. Los tres molinos adicionales fueron instalados en el Parque 3 Aguas en Caldas, Parque de Las Aguas en Barbosa y Mega Colegio París en Bello, cumpliendo con esto a cabalidad los requisitos contractuales.

- **Datalogger basado en ESP32**: con el objetivo de fortalecer la infraestructura de las redes de monitoreo del proyecto SIATA, el equipo de Telemetría desarrolló un módulo de alimentación de 5V específico para dataloggers basados en ESP32, permitiendo una mayor estabilidad energética y mejor adaptación a condiciones de campo.

- **Desarrollo de tarjetas electrónicas**: como parte de las actividades de fortalecimiento de hardware para las redes de monitoreo del proyecto SIATA, el equipo de Telemetría adelantó el diseño, manufactura y prueba funcional de una tarjeta tipo shield para el módulo de comunicación LoRa-E32, con el objetivo de facilitar su integración con microcontroladores como ESP32 y Arduino.

- **Datalogger Raspberry Pi**: con el objetivo de mejorar la confiabilidad, escalabilidad y facilidad de mantenimiento de los sistemas basados en Raspberry Pi utilizados en el proyecto SIATA, el equipo de Telemetría adelantó un estudio técnico de mejora y posterior rediseño de la tarjeta electrónica multiparamétrica, utilizada como base de integración de sensores y módulos de comunicación. Esta tarjeta optimizará el funcionamiento del datalogger Raspberry Pi.

- **Red de piranómetros CMP10 Radiómetro SUV-E**: durante la vigencia, se desarrolló el hardware y software necesarios para la lectura, almacenamiento y transmisión de datos generados por los piranómetros CMP10 y el radiómetro SUV-E. Esta solución se implementó sobre Raspberry Pi, reemplazando los sistemas antiguos basados en computadores de escritorio, lo cual mejora la eficiencia energética y la autonomía del sistema. Además, se creó una cola específica en el sistema de alta disponibilidad para garantizar la recepción continua y segura de los datos hacia la base de datos central del proyecto.

- **Mantenimientos preventivos y correctivos**: durante la vigencia, el equipo de Telemetría brindó apoyo técnico a diversas tareas de mantenimiento preventivo y correctivo del proyecto SIATA, con el fin de garantizar el funcionamiento continuo y confiable de las estaciones de monitoreo ambiental. Estos apoyos se realizaron de manera coordinada con el equipo de Mantenimiento, respondiendo a

requerimientos específicos que involucraban desde diagnóstico remoto hasta intervención directa en sitio.

- **Actualización de software en dataloggers del proyecto SIATA**: durante la vigencia, se realizó la actualización de software en los dataloggers SIATA Raspberry Pi y ESP32, utilizados en estaciones del proyecto SIATA, especialmente en aquellos que integran sensores que requieren ajustes de lectura, compatibilidad o mejoras en la transmisión de datos. Todas estas actualizaciones propenden por la mejora continua de las estaciones de monitoreo del proyecto.

- **Acelerómetro WIT motion WT901C – HW9073**: durante la vigencia, se llevó a cabo el desarrollo de un software especializado para Raspberry Pi, encargado de leer, almacenar y procesar en tiempo real los datos emitidos por este sensor a través de su protocolo serial TTL. Asimismo, se diseñó y ensambló el hardware necesario para su operación, asegurando una integración estable y confiable.

- **Sensor meteorológico RK900-09**: se desarrolló un software específico para la lectura de los datos proporcionados por este sensor mediante el protocolo Modbus RS485, empleando una Raspberry Pi como plataforma de adquisición. Este desarrollo incluyó la implementación de rutinas de lectura, validación y almacenamiento de datos, asegurando su confiabilidad y sincronización con el sistema general del proyecto.

- **Sensor meteorológico Lufft WS700**: se desarrolló software para la lectura, interpretación y envío de los datos de esta estación utilizando el protocolo Modbus RS-485. Este desarrollo se realizó desde una Raspberry Pi, permitiendo integrar el sensor al ecosistema de monitoreo del proyecto SIATA. El software implementado asegura una lectura confiable y continua de las variables, optimizando tanto la adquisición como el posterior almacenamiento de la información y su envío en tiempo real.

  Adicionalmente, se brindó apoyo técnico en campo para la realización de pruebas funcionales y validación del sensor, lo que permitió verificar su correcto comportamiento antes de su instalación definitiva. Como resultado de este proceso, la estación fue instalada exitosamente en la Laguna Quitasol (municipio de Bello), donde actualmente opera como parte de la red de monitoreo hidrometeorológico.

- **Proceso de reparación y baja de sensores – diagnóstico técnico en el laboratorio de Telemetría**: dentro de las actividades permanentes del equipo de Telemetría, se encuentra la recepción, evaluación y diagnóstico de sensores que han sido retirados temporal o permanentemente de las estaciones de monitoreo del proyecto. Este proceso es esencial para asegurar la continuidad operativa y la calidad de los datos en la red hidrometeorológica.

  Cuando un sensor presenta fallas en campo o es reportado con mal funcionamiento, es enviado al laboratorio del equipo, donde se realiza una revisión técnica detallada. En este procedimiento se comprueban las conexiones, el comportamiento de las señales, la respuesta frente a estímulos y la comunicación con dispositivos de adquisición de datos. El objetivo es determinar si el sensor puede ser reparado y reintegrado a la red o si ya no es operativo.

  En los casos en que el sensor se encuentra en condiciones de ser recuperado, se realizan los ajustes, reparaciones o calibraciones necesarias, y se envía a campo nuevamente para operar. Por el contrario, cuando el diagnóstico concluye que el equipo no es funcional ni viable para reparación, se procede a dar de baja el bien ante el Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), entidad a la cual pertenece formalmente el inventario del proyecto.

  Durante esta vigencia contractual, se emitió desde el equipo de Telemetría treinta y nueve (39) conceptos técnicos y se repararon veinticinco (25) sensores, entre los cuales se destacan cuatro (4) acelerógrafos y un (1) sensor de sedimentos por su alto costo, lo que permitió optimizar los recursos usados en el proyecto.

- **Actualización del sistema operativo en Raspberry Pi para pantallas de Bomberos**: con el propósito de mantener la operatividad de las pantallas informativas instaladas en estaciones de Bomberos, que muestran en tiempo real el portal de visualización de SIATA, se realizó una actualización del sistema operativo de las Raspberry Pi utilizadas en dichas pantallas. Esta acción fue necesaria debido a que la versión Legacy 1.1 perdió compatibilidad tras recientes actualizaciones del portal, generando fallos de visualización, errores de carga e inestabilidad en el sistema. Se descargó e instaló la versión Lite de Raspberry Pi OS basada en Debian 12, la cual fue personalizada para funcionar en modo kiosko, con arranque automático del navegador en pantalla completa y sin intervención del usuario. Además, se incorporaron herramientas de monitoreo y recuperación ante fallos.

(Para más detalle visitar el anexo Telemetría).

WP2.3. Innovación

WP2.3.1. (Calidad del aire) Generar información complementaria a la Red de Monitoreo de Calidad de Aire, a partir de la implementación de campañas de medición de variables físicoquímicas

En todo el periodo de la vigencia del CCyT 016 de 2024, se mantuvo en operación los equipos complementarios de las redes de calidad del aire que permiten realizar un análisis integral de los contaminantes del aire. Además, se logró mantener activa la herramientas de análisis para el monitoreo de la calidad del aire, que facilita este seguimiento y que está permanentemente a disposición de la supervisión del AMVA y del equipo de análisis de datos del componente de calidad del aire de SIATA.

WP2.3.2. Gestionar el intercambio de la información registrada por todas las redes de monitoreo del proyecto SIATA a través de la respuesta a las solicitudes de información

Desde el equipo de Calidad de Datos se han desarrollado distintas herramientas de carácter interno que permiten procesar y optimizar la descarga de datos históricos, con miras a dar respuesta a aquellas solicitudes que requieran este volumen de información. En el siguiente enlace se puede obtener mayor información sobre las herramientas en mención: Descargas históricos.

Asimismo, es importante mencionar que el registro y seguimiento de las solicitudes de información recibidas durante cada mes fue llevado a cabo en el formato Registro solicitudes. En este documento, es posible observar el tiempo de respuesta, el tipo de usuario, la pertinencia con la herramienta de consulta de datos y la autorización para el intercambio de información. Cabe resaltar que para la vigencia 016-2024, se respondieron un total de **696 solicitudes** a través del correo *solicitud.datos@siata.gov.co*, donde predominaron **268 requerimientos** dentro de la categoría *Entidad*. Mayor detalle puede ser consultado en: Calidad Datos.

WP2.3.3. Proveer mantenimiento preventivo y correctivo de las estaciones de las diferentes redes de monitoreo

Durante la vigencia 016-2024, se ejecutó un plan sistemático de mantenimiento preventivo y correctivo a las estaciones que conforman las diferentes redes de monitoreo del proyecto SIATA, incluyendo redes hidrometeorológicas, meteorológicas urbanas, de calidad del aire y de ruido.

En total, se llevaron a cabo **1.943 mantenimientos preventivos** y **829 mantenimientos correctivos**, distribuidos a lo largo de los municipios del Valle de Aburrá, con especial énfasis en Medellín, Bello, Caldas, La Estrella e Itagüí. Estas intervenciones permitieron anticiparse a fallas, prolongar la vida útil de los sensores e infraestructuras, y responder oportunamente a eventos de afectación operativa.

Los mantenimientos preventivos fueron programados siguiendo criterios de periodicidad técnica y priori-

zación por criticidad, mientras que los correctivos fueron gestionados en función de alertas operacionales reportadas desde el centro de control y por análisis de calidad de datos. Esta articulación efectiva entre equipos técnicos garantizó una alta disponibilidad de la red durante la mayor parte de la vigencia.

Estas acciones no sólo contribuyeron al cumplimiento de los indicadores técnicos del proyecto, sino que además fortalecieron la sostenibilidad operativa de las redes, asegurando el flujo continuo de información ambiental en tiempo real para la toma de decisiones estratégicas en el territorio.

WP2.3.4. Generar información oportuna sobre de los procesos físicos relacionados con la meteorología y climatología de la región

Las principales tareas desarrolladas en torno a esta sub-actividad en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA incluyeron:

- Implementación del modelo WRF-Hydro en el Valle de Aburrá.
- Pronóstico de precipitación a corto plazo mediante técnicas de *Machine Learning* usando la información de GOES-16.
- Técnicas de Machine Learning (ML) para estimación cuantitativa de precipitación (QPE) a partir de datos del radar meteorológico.
- Modelos de descargas eléctricas basados en *Machine Learning*.
- Comportamiento en un perfil vertical de vientos (información medida con el perfilador de vientos) con la ocurrencia de eventos extremos.

WP2.3.5. Avanzar en la implementación de técnicas de teledetección para el monitoreo de movimientos en masa

Durante el período de ejecución del contrato, se consolidó e implementó un sistema de monitoreo de movimientos en masa basado en técnicas de teledetección, con enfoque tanto regional como local, orientado al fortalecimiento de la gestión del riesgo en el Valle de Aburrá. Toda la implementación estuvo basada en el proceso de investigación y académico reportado en el WP1.2.4 del Observatorio de Amenazas y Riesgos. A continuación, se destacan los principales logros alcanzados:

- Se realizaron análisis multitemporales utilizando imágenes Sentinel-1, identificando 22 anomalías, de las cuales 7 fueron validadas como movimientos en masa y 2 como minería a cielo abierto. Se estableció una metodología de monitoreo bimensual, diferenciando entre análisis regionales y seguimiento localizado en zonas críticas.
- Se implementó el análisis InSAR de forma semiautomatizada con actualizaciones mensuales. Se observó un aumento en desplazamientos en zonas como La Palma (San Cristóbal), La Manuela (San Antonio de Prado) y Villatina (Medellín), con deformaciones acumuladas entre 1.6 cm y 2 cm. Estos hallazgos fueron validados mediante recorridos de campo y con la instalación de sensores geotécnicos.
- Se desarrolló una línea de procesamiento automatizada utilizando el SDK de HyP3 para descarga e interpretación de imágenes satelitales. También se consolidaron herramientas para la interpretación orientada a usuarios no expertos, como las Unidades Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (UMGRD).

- Se aplicó el algoritmo Random Forest sobre imágenes Sentinel-2 para la detección periódica de movimientos en masa, diferenciándolos de actividades antrópicas como agricultura o construcción.
- Se integraron los productos derivados de la teledetección al servidor Nazca del proyecto y al repositorio técnico del equipo de Geotecnia, permitiendo la consulta y reutilización de los análisis y herramientas desarrolladas.
- En el marco del WP2.1.8, se brindó acompañamiento técnico en eventos críticos, consolidando más de 100 análisis a partir de datos satelitales y drones. En respuesta a emergencias en Medellín y Bello, se analizaron más de 86 viviendas afectadas por movimientos en masa usando imágenes PlanetScope, Sentinel-2 y vuelos con dron.
- Se realizaron reuniones técnicas de socialización de los productos desarrollados con actores clave como el AMVA y planeación municipal de Copacabana, presentando hallazgos y recomendaciones para acciones de monitoreo y mitigación.
- Se definieron metodologías para la zonificación de áreas detectables con InSAR, incluyendo visibilidad satelital y geometría del relieve, así como técnicas para reconstrucción histórica de eventos y generación de índices espectrales.

Este proceso evidencia la consolidación de un sistema que permite el seguimiento continuo y validación de movimientos en masa mediante teledetección, fortaleciendo la capacidad de respuesta de las entidades territoriales.

WP2.3.6. Implementar sensores de humedad

Durante la vigencia, se consolidó el proceso de implementación de sensores de humedad, con una zona de estudio específica en la cuenca La Despensa y otras zonas del corregimiento San Antonio de Prado, Medellín, como insumo para la evaluación del papel de la humedad del suelo como detonante de movimientos en masa. Esta actividad, desarrollada en el marco del WP1.2.8, se articuló con otros componentes del Observatorio de Amenazas y Riesgos. A continuación, se presentan los principales hitos:

- Se identificaron los puntos de prueba dentro de la cuenca para validar condiciones de conexión, transmisión y logística de instalación. Se diseñó un sistema en cadena para medir humedad a diferentes profundidades, permitiendo correlacionar estos datos con precipitación (WP1.2.7) y deformaciones del terreno.
- Se estandarizaron metodologías para mejorar la calidad de datos históricos, incluyendo filtros de suavizado (estadísticos y físicos) y técnicas de imputación. Las metodologías fueron validadas con datos sintéticos y luego aplicadas a datos reales.
- Se aplicaron pruebas triaxiales y análisis de relaciones de vacíos para convertir los datos de humedad a saturación. Esto permitió construir escalas comparables entre sensores ubicados en diferentes contextos geológicos. Se incorporaron además datos de permeabilidad.
- Se integraron los datos de sensores con análisis satelitales de humedad (índices espectrales e imágenes SAR del proyecto TOTRAM) y con estimaciones de desplazamientos obtenidos por InSAR, con el fin de fortalecer la interpretación integrada del riesgo.
- realizaron muestreos de suelo en estaciones como La Salina para mejorar la calibración de modelos. Se avanzó en la integración de estos datos en la plataforma de monitoreo en tiempo real.

- Se validó el desempeño de los sensores en campo, comparando sus mediciones con equipos de referencia. Los códigos y desarrollos fueron integrados al repositorio técnico del equipo de Geotecnia.

Este proceso permitió establecer las bases de un sistema para el monitoreo de humedad del suelo, integrando información in situ y remota, lo que fortalece las capacidades institucionales para la predicción y análisis de movimientos en masa a nivel de cuenca.

WP2.3.7. Propender por la sostenibilidad de las redes de monitoreo sísmico

Buscando fortalecer las red de monitoreo sísmico del proyecto SIATA, durante la vigencia 016-2024 el grupo de Telemetría brindó apoyo con las siguientes actividades:

- **Apoyo a mantenimiento de equipos acelerográficos**: se realizó el diagnóstico, reparación y validación de cuatro acelerógrafos pertenecientes a la red de monitoreo sísmico del proyecto SIATA, ubicados en Universidad de Medellín, Aures, Villa Hermosa e Itagüí. El objetivo fue garantizar su operatividad para el registro continuo de eventos sísmicos, mediante mantenimientos preventivos y correctivos.

  Todos los equipos fueron probados en laboratorio, validando su encendido, estabilidad, configuración y registro de eventos sísmicos simulados. Se logró restaurar su funcionalidad utilizando repuestos disponibles.

- **Mantenimiento y configuración de equipos**: durante la vigencia, se brindó apoyo técnico al grupo de Ingeniería Sísmica en el mantenimiento, diagnóstico y reparación de equipos de monitoreo sísmico, como acelerógrafos y sensores Raspberry Shake.

  Este acompañamiento permitió restablecer la operatividad de múltiples dispositivos, optimizando el uso de recursos disponibles y fortaleciendo la red de monitoreo sísmico del proyecto.

(Para más detalle visitar el anexo Telemetría).

WP2.3.8. Fortalecer y desarrollar la infraestructura IT para la gestión del conocimiento y el cumplimiento de las actividades misionales

Durante esta vigencia, se atendieron solicitudes relacionadas con el funcionamiento de equipos informáticos, tanto de servidores como de estaciones de trabajo. Entre las tareas llevadas a cabo, se encuentran la creación de usuarios, la modificación de permisos en directorios y archivos, la instalación y corrección de fallos en aplicaciones, así como la optimización de procesos en otros equipos informáticos.

Además, se resolvieron los requerimientos de los diferentes equipos de trabajo de SIATA en cuanto a la solución de errores y el mejoramiento de herramientas informáticas, tales como el correo de servidores, la realización de copias de seguridad, la configuración de software y la instalación de librerías, entre otros.

Las actividades más relevantes realizadas durante esta vigencia incluyen:

- Instalación de más de 3000 librerías, necesarias para el funcionamiento de diferentes entornos y herramientas.
- Reinstalación de más de 15 estaciones de trabajo o servidores, por razones de mantenimiento o fallos críticos.



- Adquisición de tres (3) nuevos servidores, fortaleciendo así la infraestructura del proyecto.
- Implementación de tecnología SD-WAN en las cuatro (4) sedes del proyecto, lo que permitió mejorar significativamente la interconexión y estabilidad de las comunicaciones entre las sedes.
- Reemplazo de la UPS del Datacenter ubicado en la sede Casa SIATA, luego de que la anterior sufriera daños debido al sobrecalentamiento causado por actos vandálicos que afectaron el sistema de aire acondicionado.
- Se hizo el despliegue del nuevo geoportal a producción sobre el dominio https://geoportal.siata.gov.co

  Estas acciones han contribuido a garantizar la continuidad operativa, mejorar el rendimiento de los sistemas y fortalecer la infraestructura tecnológica de SIATA.

WP2.3.9. Establecer un ecosistema tecnológico para la gestión de datos

Base de datos. El almacenamiento y la correcta gestión de la información resultan fundamentales para la operación y sostenibilidad del proyecto. Tanto los datos históricos como los datos de carácter volátil requieren un tratamiento con criterios técnicos adecuados que garanticen su integridad, disponibilidad y trazabilidad.

Durante la vigencia del proyecto, se atendieron diversas solicitudes provenientes de los diferentes equipos que lo conforman, relacionadas con la administración, soporte y optimización de las bases de datos, entre las cuales se destacan:

- Se atendieron más de noventa y siete (97) solicitudes de gestión de las bases de datos (CRUD) para los diferentes componentes de riesgo y aire, las cuales fueron recibidas por el correo de servidores.
- Se realizaron más de noventa (90) respaldos de bases de datos, tanto de bases completas como de tablas específicas. Además, estos respaldos fueron almacenados en el servidor de almacenamiento STORINATOR 1 y se gestionar bajo lineamientos definidos de retención y depuración, garantizando en todo momento la disponibilidad de al menos un (1) mes de respaldos vigentes para cada base de datos en entorno productivo.
- Se realizaron procesos de rectificación y actualización de los datos de las estaciones modificadas por el equipo de Mantenimiento. Algunas de estas estaciones presentaron fallas en la comunicación para su autenticación, por lo que fue necesario efectuar ajustes manuales en la base de datos con el fin de restablecer su funcionamiento. Durante la vigencia del proyecto se ejecutaron aproximadamente más de setenta (70) actualizaciones de este tipo.
- Se llevó a cabo el restablecimiento del sistema de réplica de las bases de datos principales de SIATA, a raíz de una falla crítica presentada a inicios de junio en el motor de base de datos MySQL encargado de esta funcionalidad. La falla, ocasionada por una corrupción grave en el motor, requirió la reconstrucción y reconfiguración completa del sistema de réplica. Este proceso, debido a su complejidad y a las dificultades técnicas encontradas, tuvo una duración aproximada de un mes.

Repositorio de datos SIATA. Se avanzó en la implementación del proyecto Repositorio de Datos, habilitando en entorno de pruebas para los componente Tipo 1 y parte de los componentes Tipo 2. Durante esta fase, se realizaron varias reuniones con los equipos involucrados para socializar los avances, recibir retroalimentación y alinear los siguientes pasos.

El proyecto continuará en construcción durante la próxima vigencia, con el objetivo de completar la implementación de los componentes restantes del Tipo 2 y fortalecer las funcionalidades ya desplegadas.



WP2.3.10. Monitorear y capturar datos de interés a diferentes escalas temporales haciendo uso de VANTs

La línea de innovación se centró principalmente en superar las limitaciones de conectividad entre los dispositivos utilizados para sobrevuelos y los equipos de visualización oportuna de datos capturados. Se desarrolló una investigación exhaustiva sobre alternativas tecnológicas, analizando diferentes sistemas de transmisión de datos en tiempo real.

Se identificó que las plataformas de transmisión Wi-Fi bajo el estándar 802.11ac wave 2 presentaban la mejor viabilidad técnica, alcanzando tasas de transferencia de hasta 1.73 Gbps en el espectro de 5 GHz, aunque con limitaciones de cobertura de hasta 30 metros en espacios abiertos. Tras evaluar múltiples opciones comerciales, se seleccionó y solicitó la compra de la licencia de la aplicación Apower Mirror para implementación operativa.

Durante las emergencias atendidas, especialmente en el sector Manantiales de Bello, se implementó exitosamente el sistema de doble control y visualización en pantalla de TV para el Puesto de Mando Unificado, permitiendo la presentación de datos en tiempo real a los coordinadores de emergencia.

Se realizó además una evaluación técnica de alternativas de comunicación satelital para situaciones de emergencia en áreas remotas, identificando las limitaciones económicas asociadas a su implementación y mantenimiento, pero estableciendo las bases técnicas para futuras implementaciones.

WP2.3.11. Acondicionar los subsistemas de un VANT destinado a prevenir el riesgo en las labores de inspección en espacios confinados, estructuras en riesgos de colapso o de difícil acceso

El acondicionamiento de los subsistemas para el desarrollo de un Sistema de Aeronave no Tripulada UAS (Unmanned Aircraft System, en inglés), orientado a la exploración de estructuras en riesgo de colapso y espacios confinados o de difícil acceso, ha sido guiado por la necesidad de mejorar versiones anteriores y por una rigurosa investigación sobre componentes electrónicos. Entre los elementos analizados y seleccionados se encuentran motores, hélices, controladora de vuelo, ESC (controladores electrónicos de velocidad), cámara, transmisor de video, receptor de radio, entre otros, los cuales fueron adquiridos mediante compra por el proyecto SIATA , esto para darle continuidad a este proceso busca optimizar el rendimiento del UAS y garantizar su operatividad en condiciones extremas.

Para lograrlo, además de obtenerse los componentes requeridos, se ha contado con la experiencia de uno de los pilotos de teledetección del proyecto SIATA, quien ha aportado su conocimiento sobre el comportamiento del UAS en campo y bajo condiciones adversas. Su retroalimentación ha sido clave para orientar las mejoras técnicas y funcionales del sistema.

En paralelo, se desarrolló el diseño de una estructura esférica protectora para el UAS, con el apoyo de un estudiante de la Universidad EAFIT y bajo la asesoría científica de un asesor científico. Este diseño tiene como objetivo principal brindar protección al vehículo durante la operación en entornos con alto riesgo de colisión.

Asimismo, se trabajó en la configuración del chasis y en la integración de los distintos componentes electrónicos, los cuales fueron ensamblados y programados para su correcto funcionamiento. La programación de la electrónica, incluyendo la controladora de vuelo, se llevó a cabo utilizando software especializado de uso libre como Betaflight Configurator, INAV y BLHeli.

Como parte de las mejoras, se diseñó un nuevo sistema de iluminación LED, esencial para la navegación

y la visibilidad en espacios confinados. También se modelaron en 3D los soportes para la iluminación, la antena de video y la cámara, los cuales fueron posteriormente fabricados en material TPU mediante impresión 3D.

Durante la vigencia del proyecto, se realizaron pruebas físicas de resistencia y fatiga sobre la estructura esférica protectora, así como la evaluación del comportamiento de los diferentes componentes ante estas condiciones. Los resultados de estas pruebas permitieron identificar oportunidades de mejora y aplicar ajustes técnicos relevantes al diseño final.

De esta manera, se consolida el desarrollo de un UAS para espacios confinados, incorporando mejoras sustanciales frente a versiones anteriores. Entre los avances más relevantes se destacan la electrónica de última generación, una estructura protectora fabricada en fibra de carbono, así como componentes impresos en TPU. Además, se optimizó el sistema de captura de información mediante una cámara con capacidad de grabación en 4K y se integró un sistema de iluminación LED que mejora significativamente la visibilidad tanto para el piloto como para la obtención de datos. Este nuevo diseño no sólo representa un avance respecto al UAS previo, sino que también conserva la posibilidad de seguir mejorando algunos de sus elementos con base en los resultados obtenidos durante las pruebas.

Durante el desarrollo de este contrato se adquirió una carpa de dimensiones 3x3x4 metros, junto con una malla de nylon, con el propósito de contar con un espacio seguro para la ejecución de pruebas de vuelo de los desarrollos UAS. Este entorno controlado tiene como objetivo mitigar riesgos y prevenir incidentes durante las pruebas operativas. Adicionalmente, constituye un recurso de seguridad fundamental para la exhibición de los UAS en eventos pedagógicos a los que asiste el equipo de Teledetección.



Figura 300: Esquema desarrollo espacios confinados.

WP2.3.12. Identificar potenciales herramientas para la teledetección

La identificación de herramientas potenciales para teledetección se desarrolló mediante un proceso sistemático de análisis de necesidades y evaluación de tecnologías emergentes. Se realizó una encuesta interna al equipo de Teledetección que permitió identificar tres líneas tecnológicas prioritarias: vehículos exploradores terrestres tipo rovers, vehículos acuáticos no tripulados y VANTs tipo zepelín para incrementar autonomía de vuelo.

El análisis se enfocó en escenarios específicos de teledetección relevantes para la gestión del riesgo en el Valle de Aburrá: socavaciones en afluentes, contaminación del aire, seguimiento de gases críticos, digitalización de ciudades, levantamiento de ejemplares arbóreos y estructuras en riesgo de colapso. Para cada



Figura 301: Espacio seguro para pruebas de vuelo.

escenario se desarrolló un proceso de diseño conceptual que incluyó la definición de equipos comerciales de referencia, especificaciones técnicas, características operativas y propuestas de desarrollo.

Se implementó una matriz ponderada de evaluación basada en la experiencia del equipo, que destacó una especial afinidad por el escenario de estructuras colapsadas y/o en riesgo de colapso. Para este escenario se propuso la adquisición de un rover equipado con capacidades para operar en espacios de difícil acceso y bajo condiciones de alta humedad.

Durante la fase final del contrato se inició la exploración de la plataforma Planet para detección de cicatrices de incendios sobre coberturas vegetales, desarrollando un piloto enfocado en el cerro Quitasol y sus alrededores utilizando índices de vegetación. Se estableció, además, la operatividad del radar interferométrico entregado por la Universidad EAFIT para monitoreo estructural.

WP2.3.13. Investigar, evaluar y fortalecer el uso de nuevas tecnologías (sensores para medición y protocolos de intercambio de información IoT)

Buscando fortalecer las redes de monitoreo del proyecto SIATA, durante esta vigencia contractual se adquirió nuevos conocimientos en tecnologías IoT y Edge Computing, lo que permitirá mejorar el funcionamiento de las estaciones. Para esto se llevó a cabo lo siguiente:

- **Investigación y evaluación de tecnologías Edge Computing** : con el fin de fortalecer las capacidades técnicas del equipo de Telemetría y prepararse para futuras implementaciones de sistemas inteligentes distribuidos en campo, se llevó a cabo un proceso de formación avanzada en tecnologías Edge Computing, a través de la culminación de tres cursos especializados en TinyML ofrecidos por la plataforma edX.

  Esta iniciativa busca evaluar la viabilidad del uso de modelos de aprendizaje automático en dispositivos de bajo consumo, como la Raspberry Pi, en aplicaciones de monitoreo ambiental, permitiendo una toma de decisiones más autónoma, eficiente y en tiempo real desde las estaciones remotas del proyecto SIATA.

  Como parte del proceso de apropiación tecnológica, se realizaron sesiones de socialización y trans-

ferencia de conocimiento al resto del equipo de Telemetría, compartiendo conceptos clave y casos de uso aplicables a las redes de monitoreo de SIATA.

- **Recolección y análisis de variables operativas en Raspberry Pi**: con el objetivo de evaluar la factibilidad técnica de implementar soluciones Edge en estaciones SIATA, se diseñó una estrategia para el monitoreo continuo del comportamiento de una Raspberry Pi instalada en campo (estación CEFA), durante un periodo de más de 260 días.

  Se definió un conjunto de variables clave, registradas cada minuto, que permiten caracterizar el desempeño operativo de la Raspberry Pi y su entorno.

  Este datos proporcionarán una línea base para evaluar la capacidad de procesamiento local de las Raspberry Pi en el contexto de las estaciones de monitoreo SIATA. Así mismo, identifica posibles cuellos de botella o limitaciones físicas antes de desplegar modelos de inferencia TinyML u otros servicios Edge.

  Los conocimientos adquiridos y datos recolectados servirán como insumo para futuros desarrollos de prototipos inteligentes y serán clave en la transformación hacia una arquitectura más autónoma, eficiente y escalable para las redes de monitoreo ambiental.

(Para más detalle visitar el anexo Telemetría).

WP2.4. Ciclo de vida del dato

WP2.4.1. Gestionar e implementar algoritmos, procesos y técnicas que garanticen la calidad de los datos

Durante la vigencia 016-2024, la red de monitoreo hidrometeorológico del proyecto SIATA obtuvo una recuperación total de datos del 96.47 %, de los cuales alrededor del 5.88 % corresponden con datos de calidad dudosa. La información ingresada por los procesos de importación (no en tiempo real) alcanzó un porcentaje del 1.01 %. Información relacionada para cada red de monitoreo hidrometeorológico puede ser consultada en el siguiente enlace: Calidad Datos.

WP2.4.2. Proveer sostenibilidad a las redes

Durante la vigencia 016-2024, se implementaron múltiples estrategias orientadas a garantizar la sostenibilidad de las redes de monitoreo, entendida no sólo como el mantenimiento físico de los equipos, sino también como la continuidad, calidad y confiabilidad de los datos generados.

Se consolidó un esquema de trabajo colaborativo entre los equipos Operacional, de Mantenimiento y de Calidad de Datos, lo que permitió una detección temprana de fallas, una respuesta oportuna en campo y un seguimiento técnico detallado de cada estación. A partir del análisis de datos, se identificaron patrones de recurrencia, anomalías en sensores y eventos críticos que afectaban la estabilidad de las series de tiempo, lo que permitió priorizar acciones correctivas.

Asimismo, se implementó un seguimiento sistemático a los mantenimientos ejecutados y al comportamiento de las estaciones, lo que facilitó la toma de decisiones informadas para la asignación de recursos y el ajuste de procesos internos.

Estas acciones integradas permitieron mantener un alto nivel de disponibilidad de datos y mejorar la confiabilidad de la información registrada por las estaciones, lo cual es esencial para la sostenibilidad técnica de las redes del proyecto SIATA y para su rol como insumo clave en la toma de decisiones ambientales en el Valle de Aburrá.

WP2.4.3. Propender por el sostenimiento de las redes de monitoreo sísmico

- Cada mes se realizó la curaduría de los registros acelerográficos asociados a eventos sísmicos reportados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), los cuales fueron incorporados a la base de datos acelerográfica. El resumen de estos eventos fue consignado mensualmente el WP1.2.10, donde se relacionó los datos relevantes de la amenazana sísmica del valle de Aburrá.
- Por otro lado, se realizó la actualización de las características principales (fecha, latitud, longitud, magnitud, profundidad, municipio y/o departamento) de los veintiséis (26) eventos más antiguos de la base de datos acelerográfica (1996 - 2000), las cuales son ajustadas por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) post-terremoto, y que son actualizadas también en la base de datos del proyecto



SIATA. Además, se realizó este trabajo de revisión sistemática para todos los demás eventos sísmicos registrados por la red acelerográgica del valle de Aburrá (hasta marzo del 2025). Vale mencionar que estas características pueden ser modificadas por el SGC meses después de la ocurrencia de los eventos sísmicos y, por ello, esta revisión es realizada de manera posterior con un tiempo prudente, para abarcar en mayor medida los cambios que la agencia nacional de monitoreo sísmico realice.

WP2.4.5. Monitorear y capturar datos de interés a diferentes escalas temporales haciendo uso de VANTs

Durante la vigencia 016-2024, se realizaron **406 sobrevuelos**, generando un volumen significativo de productos cartográficos, audiovisuales y de análisis.

Los sobrevuelos se distribuyeron en diferentes categorías operativas, a saber: monitoreo de movimientos en masa (aproximadamente 40 % del total), apoyo a atención de emergencias (35 %), monitoreo hidráulico y de infraestructura (15 %), y actividades de investigación y desarrollo (10 %). Se implementó un nuevo criterio de conteo que considera cada despegue como un sobrevuelo individual, permitiendo un registro más detallado de las acciones realizadas.

Se estableció un sistema robusto de almacenamiento de información con múltiples discos duros de alta capacidad y protocolos de respaldo. La información se organizó en estructuras de directorios específicas que facilitan la consulta y recuperación de datos históricos. Se implementaron también protocolos de actualización de la base de datos PostGIS para incorporar nuevos campos requeridos por la normativa RAC-100.

Los productos generados incluyeron ortomosaicos, Modelos Digitales de Superficie (DSM, por sus siglas en inglés), Modelos Digitales de Terreno (DTM, por sus siglas en inglés), nubes de puntos LiDAR, material audiovisual de alta resolución, fotografías panorámicas y productos cartográficos especializados. Se establecieron, además, protocolos específicos para la reproyección de productos a diferentes sistemas de coordenadas, según los requerimientos de las entidades usuarias.

Durante el período de emergencias del COEM, se implementó un sistema de procesamiento acelerado que permitió la entrega de productos cartográficos en tiempo casi real para apoyo a la toma de decisiones. Se desarrolló también un sistema de gestión de tickets con el equipo de Sistemas para optimizar la administración de las acciones del equipo.

En el enlace F-GAA-SIATA-89 Sobrevuelos realizados, se encuentra la información detallada de los sobrevuelos históricos, incluyendo tipo de producto generado, entidad solicitante, tipo de operación, ubicación y fecha.

WP2.4.5. Generar una infraestructura de almacenamiento con la información más relevante

En la vigencia 016-2024, se adelantaron numerosas tareas relacionadas con diferentes servicios que se derivan de la infraestructura de TI, la gestión del conocimiento y el cumplimiento de apoyo a actividades misionales, incluyendo: actualización de sistemas operativos, gestión de usuarios y permisos de acceso, migración tecnológica, alistamiento de servidores y servicios para el repositorio Tipo 1, atención a problemas de telecomunicaciones y redes LAN, soporte técnico a PCs por demanda o programación, y gestión general de solicitudes. Además, se adelantó el proceso de compra de tres (3) servidores presupuestados para la vigencia. Por otra parte, se realizó un diagnóstico integral de la infraestructura tecnológica del proyecto, con énfasis en los aspectos de seguridad. Actividades complementarias pueden ser consultadas



en el numeral [WP2.2.9] “Establecer un ecosistema tecnológico para la gestión de datos” de este informe.

WP3.1. Comunicación

WP3.1.1. Construir y ejecutar un Plan de Comunicaciones que incluya plan de medios masivos, pauta en redes y presupuesto

La comunicación es un eje estratégico en la gestión ambiental y la gestión del riesgo, pues dinamiza, promueve, influye y facilita la comprensión de situaciones de emergencia o desastre, así como de las medidas de mitigación, contribuyendo a modificar conductas y actitudes. La comunicación del riesgo de desastres constituye una estrategia integral que involucra a todos los actores, fomenta el conocimiento sobre los riesgos, sensibiliza a las audiencias y facilita el diálogo entre la población, organismos públicos y privados, equipos de salud, comunidad científica y medios de comunicación. Este proceso es clave para consolidar una cultura de prevención y la apropiación social del tema, y requiere el diseño e implementación de estrategias y planes a corto, mediano y largo plazo.

En este marco, el Sistema de Alerta Temprana del Valle de Aburrá ha desarrollado e implementado estrategias de comunicación y divulgación científica orientadas a la Apropiación Social del Conocimiento, con énfasis en temas ambientales y de gestión del riesgo. Estas acciones han permitido orientar decisiones informadas y fortalecer las relaciones con actores académicos, gestores del riesgo y la sociedad civil, gracias al manejo riguroso de la información, la apertura al intercambio de saberes y la constante exploración de nuevos formatos y canales de difusión.

El Equipo de Divulgación del SIATA lidera la creación de contenido educomunicacional e informativo para apoyar la toma de decisiones informadas, fortalecer una comunidad digital interesada en temas ambientales y de riesgo, y garantizar el acceso a información técnica y científica que fomente la corresponsabilidad ciudadana.

Plan de comunicaciones

Durante la vigencia del contrato CCT 016 de 2024, el Proyecto SIATA implementó una estrategia integral de comunicaciones y divulgación científica orientada a la apropiación social del conocimiento, el fortalecimiento de capacidades ciudadanas e institucionales y la consolidación de una cultura de prevención frente a los riesgos ambientales. El **Plan de Comunicaciones** definió seis ejes estratégicos: (1) generación y difusión de contenidos para divulgación científica, (2) actualización del sitio web y fortalecimiento del Geoportal, (3) producción de contenidos gráficos, digitales e impresos, (4) participación en espacios académicos y de intercambio de experiencias, (5) creación de un Laboratorio de Innovación Social y (6) campañas educativas sobre calidad del aire. Estas líneas de acción se articularon con la Ley 1523 de 2012 y los lineamientos internacionales en gestión del riesgo, integrando ciencia, tecnología y participación ciudadana para garantizar una comunicación efectiva y contextualizada.

El desarrollo del plan permitió una ejecución ordenada, segmentada por públicos y adaptable a eventos coyunturales. Las acciones implementadas incluyeron la producción de piezas audiovisuales y gráficas, la organización de campañas temáticas, el cubrimiento de eventos académicos, la creación de contenidos educativos innovadores, como la sala de escape pedagógica sobre avenidas torrenciales, y la puesta en marcha de un micrositio sobre calidad del aire. Todo esto se llevó a cabo bajo un enfoque educomunicativo

y participativo, con validación constante por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el equipo técnico del proyecto, logrando un alto nivel de cumplimiento y fortaleciendo la presencia de SIATA tanto en medios digitales como en el territorio.

Para más información, el Plan de Comunicaciones y el Informe de acciones implementadas se encuentran disponibles para consulta.

Estrategia digital

En SIATA se gestionan actualmente cuatro redes sociales con un posicionamiento consolidado en el Valle de Aburrá. Mediante una estrategia digital estructurada, se produce contenido alineado con cuatro ejes fundamentales: educomunicativo, de relacionamiento, científico e institucional.

Durante la vigencia del Contrato CCT 016 de 2024, comprendida entre febrero de 2024 y el 7 de julio de 2025, se han creado y publicado diversos contenidos digitales en coherencia con el plan de comunicaciones. Estas acciones han fortalecido y expandido de manera sostenida la comunidad digital en las plataformas de SIATA: Instagram, Facebook, YouTube y X.

- En febrero del 2024 la cuenta de Instagram @siatamedellin contaba con 17.000 seguidores, en junio del 2025 cuenta con 35.894, es decir 18894 seguidores más.
- La cuenta de X en febrero del 2024 tenía 73.181 seguidores, en junio del 2025 cuenta con 80.622 seguidores, 7.441 seguidores más.
- La cuenta de Facebook en febrero del 2024 tenía 13.022 seguidores, en junio del 2025 cuenta con 13.909, es decir 887 más.
- Youtube en febrero del 2024 contaba con 1.470 suscriptores, hoy tiene 1.760, 290 más.
- Entre febrero del 2024 y junio del 2025 hemos tenido 132.185 fans en todas las redes sociales y se han publicado más de 13.052 contenidos. La comunidad de todas las redes ha crecido 27.512 usuarios más que el año anterior.
- Se han implementado estrategias para X, Instagram, Facebook y YouTube; sin embargo, la red que ha mostrado un mayor impacto ha sido Instagram. A través de la cuenta @siatamedellin se han compartido 1.900 publicaciones, que han alcanzado 4.290.000 visualizaciones y generado 73.270 interacciones, entre *likes, comentarios, compartidos y guardados.*
- Los contenidos creados durante la vigencia respondieron a las necesidades y objetivos comunicacionales de la Entidad, con énfasis en visibilizar las historias de líderes comunitarios, organismos de socorro, estudiantes, docentes y testimonios de los diversos públicos del proyecto.
- Se otorgó un enfoque especial a la generación de contenido emocionalmente significativo, orientado a fortalecer la conexión con la audiencia, incrementar el impacto y fomentar la participación activa en plataformas digitales como el Geoportal Ciudadano. Asimismo, se produjeron contenidos de divulgación científica y técnica sobre fenómenos hidrometeorológicos y ambientales que ocurren o afectan al Valle de Aburrá.

El crecimiento sostenido de la comunidad digital de SIATA es el resultado de una estrategia integral que combina la generación constante de contenidos relevantes con la capacidad de conectar la información técnica y científica con las realidades y necesidades del territorio. La diversificación de formatos, el aprovechamiento de momentos de alta atención pública, la narrativa cercana y la visibilización de actores

clave han fortalecido el vínculo con la audiencia. Este enfoque no solo ha incrementado el alcance y la interacción en las plataformas, sino que también ha potenciado la apropiación social del conocimiento, posicionando a SIATA como un referente en comunicación ambiental y de gestión del riesgo en el Valle de Aburrá.

Este desempeño refleja no solo un crecimiento en números, sino también una consolidación en la calidad y pertinencia de los contenidos publicados. En este marco, algunos materiales han sobresalido por su alcance, interacción y conexión con la audiencia, convirtiéndose en ejemplos representativos del impacto de la estrategia digital de SIATA.

A continuación, se presentan los tres contenidos más relevantes de la vigencia y sus principales estadísticas:

- El contenido más destacado en Instagram fue el carrusel de videos "Así estuvo la noche de lluvia en el Valle de Aburrá", elaborado con material captado por las cámaras instaladas en distintos puntos del territorio. Publicado el 29 de abril de 2025, alcanzó 416.395 visualizaciones, 335.688 cuentas, y generó 14.413 interacciones: 12.509 *likes*, 57 comentarios, 1.521 compartidos y 776 guardados.



Figura 302: Contenido con más visualizaciones de la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

- El segundo contenido más popular fue el carrusel de piezas gráficas Abril 2025: el mes más lluvioso en los últimos 14 años, publicado el 9 de mayo de 2025. Registró 177.482 visualizaciones, 104.338 cuentas alcanzadas y 7.751 interacciones: 5.314 *likes*, 43 comentarios, 2.097 compartidos y 297 guardados.



Figura 303: Contenido más popular en redes sociales en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

- El tercer contenido más destacado fue el carrusel de fotos intervenidas con diseño Ruido decembrino en el Valle de Aburrá, publicado el 19 de diciembre de 2024. Alcanzó 98.225 visualizaciones, 53.698 cuentas, y generó 1.503 interacciones: 1.350 *likes*, 43 comentarios, 66 envíos y 66 guardados.



Figura 304: Contenido popular en redes sociales en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

Estos ejemplos muestran cómo la combinación de información técnica, narrativas visuales atractivas y pertinencia temática permite captar la atención masiva de la audiencia y promover la comprensión de fenómenos climáticos y ambientales de interés ciudadano. Más allá de las métricas, estos resultados confirman el valor de una comunicación que integra datos científicos, estrategias digitales efectivas y sensibilidad frente al contexto territorial. Este enfoque no solo fortalece el posicionamiento institucional de SIATA como referente técnico en la región, sino que también impulsa la apropiación social del conocimiento y la construcción de una cultura de gestión del riesgo basada en información clara, confiable y oportuna.

Por otro lado, en 2024 SIATA fortaleció su estrategia de interacción directa con la audiencia a través de la realización de tres *lives* desde su cuenta de Instagram, abordando temas de alto interés ciudadano:

- **¿Por qué el ruido es un riesgo?** — En el marco del Día Internacional de la Concienciación sobre el Ruido, el 24 de abril se transmitió un *live* en articulación con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, enfocado en el monitoreo y la gestión del ruido ambiental. Live Ruido Ambiental.
- **Temporada de lluvias e inundaciones en el Valle de Aburrá** — El 30 de mayo se presentó un *live* dedicado a analizar el comportamiento de los acumulados de lluvia y el aumento de niveles en quebradas durante los meses de marzo, abril y mayo. Se destacaron eventos extremos, activaciones de alarmas comunitarias, inundaciones en deprimidos viales y el efecto del ENSO en la temporada. Incluyó un testimonio pregrabado del director del DAGRD, Carlos Quintero, sobre el valor de la información de SIATA para la atención de emergencias. Promo Live Temporada de Lluvias.
- **Hablamos sobre calidad del aire desde Girardota** — Espacio en el que se presentó una introducción a SIATA y se explicaron conceptos clave de calidad del aire, como el PM2.5, sus efectos en la salud, fuentes de emisión, ICA, códigos de colores y variables que inciden en la calidad del aire. 2 de octubre de 2024. Live calidad del aire desde Girardota.

Estos *lives* evidencian el compromiso de SIATA por diversificar sus formatos de divulgación y fortalecer la interacción directa con la comunidad digital. Al transmitir en vivo, el proyecto logra presentar temas técnicos como el ruido ambiental, las lluvias extremas y la calidad del aire, entre otros, de manera cercana y comprensible, contando con la participación de expertos y entidades aliadas.

Más allá de su alcance inmediato, estos espacios han permitido visibilizar la articulación interinstitucional y reforzar el rol de SIATA como referente técnico en el Valle de Aburrá. Aunque la interacción y la audiencia tienen potencial de crecimiento, la estrategia de *lives* aporta de manera significativa al objetivo educomunicativo del proyecto, fomentando la apropiación social del conocimiento y ofreciendo respuestas en tiempo real a las inquietudes ciudadanas.

Interacción y participación de la comunidad digital

- La vocación de escucha e intercambio también se evidencia en la sistematización de las preguntas formuladas y respuestas entregadas en redes sociales durante la vigencia, disponible en: Tabla de preguntas y respuestas 2024 y 2025. Este ejercicio garantiza una interacción de calidad, en la que las contribuciones, preguntas y observaciones de los usuarios son reconocidas e incorporadas como insumo para la creación de nuevos contenidos.
- La interacción con los públicos de SIATA durante la vigencia permitió recibir retroalimentación directa de los usuarios a través de comentarios en las publicaciones. Estas opiniones, que reflejan percepciones, inquietudes y valoraciones, se constituyeron en insumo para orientar la creación de futuros contenidos y reforzar la conexión con la audiencia.



Figura 305: Comentarios de usuarios digitales

Para finalizar, el registro completo de contenidos realizados y publicados durante la vigencia está disponible para consulta. Los materiales correspondientes a 2024 se encuentran en: Tabla de contenidos 2024, y los de 2025 en: Tabla de contenidos 2025.

WP3.1.2. Gestionar el sitio web, Geoportal y aplicativos del proyecto SIATA

Durante la vigencia del contrato CCT 016 de 2024 se consolidó el concepto de **Ecosistema Digital SIATA**, entendido como el conjunto de herramientas de comunicación digitales, presentes y futuras, desarrolladas por el proyecto para potenciar los procesos de Apropiación Social del Conocimiento y ampliar el acceso a la información, tanto general como especializada, para todas las audiencias.

- Se actualizó el **Geoportal SIATA**, que originalmente fue concebido como una herramienta de uso científico, pero que, gracias a los procesos de Apropiación Social del Conocimiento, se transformó en un portal de consulta ciudadana. La renovación implicó mejoras en programación, desarrollo de software, lenguaje visual y experiencia de usuario.

- Dos plataformas del Ecosistema Digital están en proceso de mejora: el **sitio web informativo de SIATA** (incluido el micrositio de Calidad del Aire) y la **App SIATA**.
- El **micrositio de Calidad del Aire** busca divulgar información específica sobre la calidad del aire en el Valle de Aburrá, incluyendo contaminantes criterio, PM2.5 y ruido ambiental.
- El **sitio web** ahora cuenta con un *dashboard* que permite cambiar banners y actualizar información de forma ágil y eficiente, además de mantener las funcionalidades habituales de todo portal institucional.
- Tres meses después de su lanzamiento, en el evento SmartCities Latam de abril de 2025, el **Geoportal Ciudadano** registró aproximadamente 980.000 usuarios y un total de 9.742.050 visitas, lo que refleja tanto una alta apropiación por parte de la ciudadanía como un volumen significativo de ingresos recurrentes.
- Se avanzó en la **conceptualización de la App SIATA**, concebida como una versión móvil del Geoportal Ciudadano con valor agregado en personalización e inmediatez. Sus principales características proyectadas son:

I. Pantalla inicial con el estado del tiempo asociado a las estaciones de monitoreo más cercanas al usuario, incluyendo probabilidad de precipitaciones, temperatura, calidad del aire y pronóstico para las próximas 48 horas. También incorporará recomendaciones rápidas y la sección "Qué deseas consultar hoy" para acceder, según perfiles temáticos (Bienestar, Gestión del riesgo y Movilidad), a redes de monitoreo predeterminadas.

II. Ventana de notificaciones con recomendaciones y alertas tempranas sobre temas hidrometeorológicos y de calidad del aire relevantes para la gestión del riesgo.

III. Versión simplificada del Geoportal para consultas rápidas en tiempo real, con nomenclatura, menú de redes, animación de radar, acceso rápido a perfiles temáticos y resumen del estado del tiempo. Se omitirán las gráficas de series temporales, manteniéndolas como diferenciador del Geoportal Ciudadano.

- De los entornos digitales definidos, dos ya se encuentran en funcionamiento (**Geoportal Ciudadano** y **sitio web de SIATA**); uno está en desarrollo (**Micrositio de Calidad del Aire**); otro cuenta con un prototipo funcional en proceso de validación (**aplicación móvil**); uno entrará en fase de pruebas en agosto de 2025 (**Repositorio de datos**); y el último, el **Observatorio de Amenazas y Riesgos**, se encuentra en etapa de conceptualización y dará inicio a su desarrollo durante la vigencia CCT 261.
- Todo el Ecosistema Digital requerirá iteraciones permanentes para adaptarse a las necesidades de los usuarios y evitar la obsolescencia observada en desarrollos anteriores.

Toda la información detallada sobre este proceso se encuentra disponible en el Informe final del Ecosistema Digital SIATA y en el Informe de entrega del Geoportal Ciudadano.

WP3.1.3. Conceptualizar, diseñar y generar contenido técnico

Entre febrero de 2024 y junio de 2025, el componente de diseño del proyecto SIATA desarrolló una estrategia integral para informar, educar y fortalecer la relación de la ciudadanía con el conocimiento científico y la gestión del riesgo. A través de contenidos digitales, materiales impresos, eventos comunitarios y colaboraciones con equipos técnicos, se consolidó una narrativa visual y pedagógica alineada con los objetivos de Apropiación Social del Conocimiento.

Principales logros

- Implementación semanal del boletín "SIATA en datos" dirigido a la Dirección del Área Metropolitana, con información hidrometeorológica, geotécnica y de calidad del aire.
- Consolidación de una estrategia de comunicación visual para redes sociales, con contenidos educativos y preventivos sobre lluvias, periodos secos, contaminación atmosférica, sismos y cambio climático.
- Desarrollo de materiales impresos inclusivos: cuentos, cartillas, rompecabezas, juegos educativos y mapas adaptados, en colaboración con empresas especializadas como DADO.
- Acompañamiento logístico, comunicativo y gráfico en eventos como Fiesta Ciencia Local, IDRiM 2024, Ciudadanos Científicos y Smart Cities LATAM.
- Producción de herramientas gráficas para talleres con comunidades, cuerpos de bomberos e instituciones educativas.

Contenidos destacados

- Desarrollo de cartillas y cuentos en formatos digital e impreso.
- Unificación de la línea gráfica SIATA–AMVA, elaboración del Manual de imagen e implementación en redes y piezas impresas.
- Diseño de imagen para los eventos Deeper Learning y Fiesta de Ciencia Local.
- Se realizó el diseño y la producción del nuevo stand SIATA.
- Producción de plegables informativos para tomadores de decisiones de la Junta Metrpolitana y el Concejo de Medellín.
- Rediseño del pronóstico meteorológico diario para redes y contenido sobre resultados de gestión del riesgo en 2024.
- A lo largo del periodo, el componente de diseño produjo un total de **1422 piezas digitales**, entre las que se incluyen gráficos informativos, piezas para redes sociales e infografías. Estos materiales cumplieron funciones educativas, informativas e institucionales, y fueron fundamentales para mantener una comunicación constante, clara y oportuna con públicos diversos.
- De manera paralela, se desarrollaron y entregaron **158 piezas impresas**, como cuentos, cartillas, mapas, juegos pedagógicos, rompecabezas, plegables y souvenirs, diseñados para facilitar la apropiación del conocimiento en espacios presenciales como talleres comunitarios, eventos académicos y encuentros institucionales.

Todo lo descrito anteriormente se puede evidenciar en el siguiente enlace, a través de una tabla que relaciona los contenidos, el número de piezas, su uso y propósito, así como las piezas gráficas para las cuales fueron diseñadas: Tabla de contenidos y piezas gráficas SIATA.

El componente de diseño del proyecto SIATA ha sido esencial en la articulación de mensajes claros, pedagógicos e incluyentes que fortalecen la apropiación ciudadana del conocimiento científico. A través de una estrategia integral y sostenida, este cierre refleja no solo un trabajo consolidado, sino también una base sólida para afrontar los nuevos retos que se presentarán en el proyecto.



Contenidos audiovisuales de divulgación

El componente audiovisual produjo más de **400 contenidos** en formatos informativos, educomunicativos, institucionales, testimoniales y científicos, así como transmisiones en vivo, entre otros. Además, Se incorporaron técnicas como motion graphics, animación 2D y 3D, realidad aumentada y experiencias 360°, que facilitaron la comprensión de fenómenos ambientales complejos.

Los productos audiovisuales abordaron temas como calidad del aire, meteorología, sismos, hidrología, movimientos en masa, procesos educativos y comunitarios (SATC, Semilleros, Red de Educadores Científicos), integrando fases de preproducción, producción y postproducción para garantizar calidad técnica y pertinencia comunicativa.

La realización audiovisual de cada contenido implicó un trabajo integral que abarcó tres etapas: **Preproducción:** investigación, recopilación y análisis de información junto con los diferentes equipos del proyecto, selección de temas y definición de formatos; **Producción:** escritura de guiones, aprobación de textos, recopilación de material visual, grabación de voz en off, gestión y ejecución del cronograma de grabaciones y cubrimientos audiovisuales; **Postproducción:** edición y animación de los videos, revisiones, ajustes y entregas finales para su publicación.

En este enlace se puede visualizar los contenidos audiovisuales realizados durante el CCT016.



Figura 306: Contenidos audiovisuales de la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

Acompañamiento a espacios institucionales

Dentro del componente, se destacó el **acompañamiento a espacios institucionales, como las Juntas Metropolitanas y los Consejos Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres**, mediante la producción de videos y contenidos informativos que visibilizan el impacto del proyecto SIATA en la toma de decisiones territoriales y en la articulación intermunicipal para la gestión del riesgo.

Asimismo, se elaboraron contenidos específicos para la Oficina de Comunicaciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, fortaleciendo su plan de medios y dotando de recursos visuales a campañas institucionales como el **video del Plan de Gestión 2024–2027, presentado a los 10 alcaldes del Valle de Aburrá**. Su producción implicó el despliegue completo del equipo audiovisual de SIATA, con

grabaciones aéreas mediante drones en los nueve municipios metropolitanos y el Distrito de Medellín, así como el registro de obras estratégicas, sistemas de movilidad y entornos urbanos y ambientales.

El proceso contempló una fase rigurosa de preproducción, la elaboración de un guion unificado con lineamientos institucionales, grabación de voz en off, musicalización y una extensa etapa de postproducción que demandó más de 100 horas de edición, colorización y animación 3D, utilizada para ilustrar en un mapa del territorio los ejes estratégicos del nuevo plan. Este producto audiovisual se consolidó como una herramienta clave de comunicación institucional para transmitir las proyecciones y principales estrategias del AMVA.

En este enlace se puede visualizar el video del Plan de Gestión del Área Metropolitana 2024–2027.



Figura 307: Video Plan Gestión AMVA.

Participación en medios

Otra estrategia destacada fue la **participación semanal de SIATA en el programa institucional *Somos Área*, emitido por Telemedellín**, que se consolidó como un hito en la comunicación pública del conocimiento y la gestión del riesgo de desastres en el Valle de Aburrá. Esta sección fue diseñada para informar de manera clara y oportuna sobre el pronóstico y las condiciones hidrometeorológicas del territorio, incluyendo temperatura, radiación UV, vientos, precipitaciones, calidad del aire y fenómenos globales como El Niño y La Niña, llevando así contenidos científicos a una audiencia amplia y diversa.

SIATA cuenta con una sección fija en el programa *Somos Área*, emitida semanalmente, en la cual se presenta el pronóstico del estado del tiempo para la semana y otros datos meteorológicos relevantes. **En total, el proyecto participó en 26 emisiones regulares del *programa***, además de tener presencia destacada en 4 emisiones especiales dedicadas a visibilizar su labor en temas como el apoyo durante emergencias por temporada de lluvias, los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC), la calidad del aire, las estrategias interactivas del componente de Apropiación Social del Conocimiento, el Geoportal Ciudadano, y la estrategia de Ciudadanos Científicos.

Para su implementación, el componente audiovisual del equipo de Divulgación realizó visitas técnicas al canal, diseñó escenarios visuales adaptados a las pantallas del set, redactó guiones para televisión y editó todos los recursos audiovisuales que acompañaron los reportes. Este espacio no solo fortaleció la

pedagogía sobre el estado del tiempo y los riesgos ambientales, sino que también posicionó al SIATA como una fuente confiable de información técnica en medios masivos locales.

En este enlace se puede visualizar las emisiones del programa Somos Área - Telemedellín.



Figura 308: Programas Somos Área - Telemedellín.

Contenidos en lengua de señas

Como parte de la estrategia *Ciencia para todos y todas: una apuesta desde la accesibilidad*, **se desarrollaron más de 25 contenidos con interpretación en lengua de señas** dirigidos a la comunidad sorda, con el propósito de garantizar que el conocimiento científico sobre el riesgo y el territorio sea verdaderamente inclusivo.

En este proceso, el equipo visitó instituciones educativas con población sorda, donde se desarrollan procesos formativos con los Semilleros de Ciudadanos Científicos. Esta experiencia no solo promueve la accesibilidad, sino que también invita a imaginar nuevas formas de enseñar y divulgar ciencia de manera colectiva, sensible y participativa, reafirmando que la gestión del riesgo debe comunicarse desde el respeto a la diversidad.

Para la producción de estos contenidos, se grabaron y editaron piezas con interpretación en lengua de señas que, además de facilitar el acceso a la información, fomentan la construcción conjunta de nuevas maneras de enseñar, aprender y apropiarse del conocimiento. Porque la divulgación científica, para ser transformadora, también debe ser accesible.

En este enlace se puede visualizar algunos de los contenidos audiovisuales en lenguaje de señas.



Figura 309: Contenidos lenguaje de señas.

Divulgación del Geoportal Ciudadano

Con el lanzamiento del nuevo **Geoportal Ciudadano de SIATA**, se puso en marcha una estrategia integral de divulgación audiovisual orientada a promover su uso y apropiación por parte de diversos públicos del Valle de Aburrá. El Geoportal fue concebido con un enfoque ciudadano, construido a partir de aprendizajes y experiencias compartidas con comunidades y usuarios del territorio.

Para su difusión, se produjeron contenidos audiovisuales con un enfoque pedagógico y narrativo, que incluyen tutoriales explicativos y videos de uso cotidiano protagonizados por ciclistas, taxistas, grupos de amigos, familias, entre otros ciudadanos. Estas producciones, que combinan animaciones, narración accesible y ejemplos de consulta en tiempo real, transmitieron mensajes clave como la planificación de actividades al aire libre, la consulta de lluvias en tiempo real y el acceso a información sobre calidad del aire y pronósticos meteorológicos.

Desde su lanzamiento en *Smart Cities LATAM 2025*, el Geoportal ha demostrado su impacto como herramienta para fortalecer la cultura de la gestión del riesgo y garantizar el acceso equitativo a la información ambiental en el territorio metropolitano.

En este enlace se pueden visualizar los contenidos audiovisuales del Geoportal Ciudadano.



Figura 310: Contenidos Geoportal Ciudadano.

Cubrimientos audiovisuales

Durante la vigencia se llevó a cabo un amplio despliegue de cubrimientos audiovisuales con el fin de registrar, documentar y visibilizar las actividades de divulgación, apropiación social del conocimiento y gestión del riesgo desarrolladas en el territorio metropolitano.

Estos cubrimientos incluyeron talleres en comunidades de los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC), charlas académicas y de divulgación científica sobre los distintos componentes y estrategias del proyecto, encuentros educativos, procesos comunitarios, instalaciones de sensores y equipos de monitoreo, así como jornadas de formación lideradas por los diferentes equipos de SIATA. Para garantizar eficiencia en la producción, se diseñó y gestionó un cronograma semanal de cubrimientos audiovisuales, actualizado de manera constante para priorizar los eventos más relevantes y alinear la producción con los objetivos de divulgación del proyecto. Además de la asistencia a los eventos en campo, el equipo audiovisual realizó grabaciones específicas en exteriores e interiores, generando insumos para la creación de contenidos multimedia informativos y divulgativos. Este proceso incluyó la planeación logística, la producción técnica, la edición posterior de cada registro y la organización temática de los materiales en el repositorio audiovisual del proyecto.

Como resultado, se realizaron más de **300 registros fotográficos y videográficos**, que fortalecen el archivo audiovisual de SIATA, amplifican su alcance comunicativo en el territorio y enriquecen el repositorio visual de la Oficina de Comunicaciones del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con quien se comparten constantemente estos insumos para la creación de contenidos y publicaciones institucionales. En este enlace se puede acceder al repositorio audiovisual de SIATA-AMVA.

Kit de prensa

Con el propósito de fortalecer la gestión de medios de comunicación del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, se gestionó información e insumos para la producción de **kits de prensa** sobre diversas temáticas: meteorología, hidrología, movimientos en masa, calidad del aire, teledetección, apropiación social del riesgo de desastres, sismos, ciencia y educación, entre otras estrategias ambientales y de gestión del riesgo desarrolladas por SIATA.

Cada kit de prensa incluyó boletines informativos y productos audiovisuales como un audio para radio, un video testimonial completo del vocero de SIATA, un video o *mixer* de imágenes de apoyo para notas

periodísticas y un paquete fotográfico del tema correspondiente.

En total, se gestionaron **59 kits de prensa**, disponibles en el siguiente enlace: Kit de prensa SIATA-AMVA.

WP3.1.4. Generar espacios académicos y de intercambio de experiencias e información con otros modelos de CTeI

Durante el periodo comprendido por este informe, se llevaron a cabo diversas acciones orientadas a fortalecer la divulgación científica, la gestión del riesgo y la apropiación social del conocimiento. Estas incluyeron charlas, talleres, stands, entrevistas, reuniones y otras estrategias de interacción directa con la comunidad, con el propósito de promover la conciencia ambiental, difundir conocimiento técnico y fomentar la preparación ciudadana frente a diferentes fenómenos.

- **184** actividades desarrolladas.
- **20.465** personas impactadas.

Por su alcance e importancia divulgativa, las *charlas* constituyeron un componente esencial de la estrategia, permitiendo llegar a un amplio número de personas con temáticas diseñadas y adaptadas a cada tipo de público. Los profesionales del proyecto participaron en diversos espacios, como empresas, instituciones educativas y entidades aliadas. Estos escenarios se han fortalecido y consolidado, al punto de que las solicitudes para este tipo de actividades provienen directamente de docentes, departamentos de recursos humanos de diferentes organizaciones y actores estratégicos de entidades aliadas. En total se realizaron **86 charlas** en este periodo.



Figura 311: Charla Granizo, SENA Pedregal, 16 de agosto de 2024.

Los **talleres**, un total de 56, beneficiaron a más de 2.000 personas, una cifra significativa dada la pertinencia y el impacto de estas actividades. Cada taller fue diseñado y estructurado por el componente de Apropiación Social del Conocimiento, en articulación y con la validación del equipo técnico del proyecto, abordando temáticas como calidad del aire, meteorología, geología, entre otras. Estos espacios no solo fortalecieron la comprensión de conceptos científicos, sino que también promovieron la participación activa, el pensamiento crítico y la toma de decisiones informadas por parte de la comunidad.

La participación en eventos de ciudad, así como en jornadas académicas y empresariales con el **stand** del proyecto, facilitó la amplia difusión de información, el fortalecimiento de la visibilidad de la marca y la promoción de las herramientas disponibles para la ciudadanía. Estos espacios también permitieron resolver inquietudes de manera ágil y ofrecer aclaraciones sobre temas relacionados con el SIATA. Gracias a la

presencia en más de 25 eventos, y al uso de herramientas tecnológicas como gafas de realidad aumentada, juegos, experimentos, entre otros recursos interactivos, se logró un acercamiento directo con más de 2.500 personas, favoreciendo el diálogo, el intercambio de conocimientos y el fortalecimiento de la relación con diferentes públicos estratégicos.

Estos resultados reflejan un esfuerzo sostenido de articulación interinstitucional y de vinculación comunitaria, que ha fortalecido la apropiación social del conocimiento científico en el Valle de Aburrá. Las actividades desarrolladas no solo ampliaron el alcance territorial del proyecto, sino que también consolidaron redes de intercambio y aprendizaje que contribuyen a una gestión del riesgo más participativa, informada y sostenible.

Para consultar el detalle completo de estas actividades, se puede acceder al siguiente enlace: Actividades de Divulgación Científica.

WP3.1.5. Diseñar una estrategia piloto para la creación de un Laboratorio de Innovación Social y Deliberativa

El Laboratorio de Innovación Social y Deliberativa del proyecto SIATA es una iniciativa destinada a fortalecer la divulgación y apropiación del conocimiento científico en la gestión del riesgo ambiental en el Valle de Aburrá. Su diseño e implementación priorizaron la participación activa de la comunidad y la adopción de metodologías innovadoras, con el fin de mejorar la comprensión de los fenómenos ambientales y respaldar la toma de decisiones informadas.

A lo largo del período de ejecución, se lograron avances significativos, entre los que se destacan:

- **Priorización de públicos:** Identificación y caracterización de organizaciones juveniles y medios comunitarios clave, considerando su relación con el riesgo, el liderazgo ambiental y la creación de contenidos. Este análisis permitió focalizar de manera más precisa las estrategias del Laboratorio, facilitando el diseño de metodologías y enfoques colaborativos alineados con las necesidades de las comunidades.
- **Innovación metodológica:** Diseño e implementación de la Sala de Escape Educativa, basada en el modelo argumentativo de Toulmin, como estrategia para fortalecer la apropiación del conocimiento en comunidades vulnerables.
- **Integración de estrategias de adaptación y mitigación:** Inclusión de herramientas pedagógicas y metodologías participativas para difundir conocimiento sobre riesgos ambientales y cambio climático.
- **Trabajo interdisciplinario:** Alianzas estratégicas con la Escuela de Artes y Humanidades de EAFIT, fortaleciendo los enfoques educativos y metodológicos del Laboratorio.
- **Validación y ajuste del modelo:** Realización de pruebas piloto con expertos del proyecto SIATA y de la Escuela de Humanidades, ajustando accesibilidad, claridad de instrucciones y dinamismo de la experiencia interactiva.

Testimonios de los participantes

Los resultados se evidencian en la retroalimentación recibida:

- "La metodología es innovadora y cautivadora para públicos distintos a los que usualmente aborda SIATA, pero requiere mayor claridad en las instrucciones y dinamismo en su desarrollo."– Participante de prueba piloto.



- "Antes de implementarlo en la comunidad, es fundamental realizar pilotos internos para ajustar accesibilidad, narrativa y fluidez, asegurando la inmersión de todos los participantes."– Líder del Equipo de Educación de SIATA.
- "Es clave incrementar la interactividad con elementos físicos y tecnológicos, como candados, tableros de pistas o realidad aumentada, para que realmente se sienta como una experiencia de escape."– Miembro del Equipo de Apropiación Social del Conocimiento de SIATA.
- "El modelo argumentativo de Toulmin nos ayudó a estructurar mensajes claros y persuasivos para la divulgación del riesgo."– Miembro del equipo de Divulgación de SIATA.

Actividades destacadas y nuevas prácticas

- **Sala de Escape Educativa:** Enfoque interactivo que combina gamificación y aprendizaje experiencial para fomentar la comprensión sobre la gestión de riesgos por avenidas torrenciales.



Figura 312: Construcción de la metodología con la Escuela de Humanidades de EAFIT.

- **Mapeo de comunidades en riesgo:** Análisis territorial para seleccionar zonas prioritarias para la implementación de estrategias.



Figura 313: Recorridos territoriales para identificación de comunidades en riesgo.

- **Desarrollo de materiales pedagógicos:** Creación de kits de implementación con recursos visuales, auditivos e interactivos que complementaron las estrategias didácticas.
- **Evaluación y mejora continua:** Pruebas piloto y ajustes metodológicos basados en la retroalimentación para optimizar procesos de enseñanza y aprendizaje.



Figura 314: Pruebas piloto con el Equipo de Apropiación Social del Conocimiento.

Estado actual y recomendaciones

El Laboratorio de Innovación Social se ha consolidado como una herramienta clave en la divulgación del conocimiento científico y la gestión del riesgo ambiental. Sin embargo, para su continuidad y ampliación, se recomiendan las siguientes acciones:

- Expansión territorial: Replicar la experiencia de la Sala de Escape en más comunidades en riesgo, asegurando una mayor cobertura.
- Fortalecimiento de la estrategia de comunicación: Implementar campañas de sensibilización para aumentar la participación y el impacto del laboratorio.
- Mejoras en accesibilidad y materiales: Integrar nuevas herramientas tecnológicas y optimizar los recursos pedagógicos para garantizar la inclusión.
- Validaciones adicionales: Ampliar las pruebas piloto en diferentes sectores antes de su implementación definitiva, con el fin de optimizar su efectividad.
- Medición del impacto: Desarrollar indicadores de seguimiento para evaluar el nivel de apropiación del conocimiento en las comunidades beneficiarias y ajustar las estrategias según los resultados obtenidos.

El Laboratorio de Innovación Social del SIATA se consolida como una experiencia pionera en la aplicación de metodologías innovadoras para la apropiación social del conocimiento en gestión del riesgo ambiental. La combinación de herramientas pedagógicas, participación comunitaria y alianzas interdisciplinarias ha fortalecido el vínculo entre ciudadanía y ciencia. Este modelo representa un paso significativo hacia la democratización de la información y la construcción de comunidades más resilientes frente a los retos ambientales actuales y futuros.

Ingrese aquí para visualizar el informe completo del Laboratorio de Innovación Social.

WP3.1.6. (Calidad del aire) Realizar campañas de sensibilización y difusión con la ciudadanía y los actores interesados

Durante la vigencia de este contrato, se desarrollaron y difundieron contenidos orientados a la divulgación científica sobre los fenómenos físicos y químicos que afectan la calidad del aire, resaltando el papel del Proyecto SIATA y de la Red Oficial de Monitoreo de la Calidad del Aire del Valle de Aburrá. También se abordaron temas como los períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica, el ruido ambiental y la importancia de su medición, entre otros.

A continuación, se describen las publicaciones más destacadas durante el período, junto con sus estadísticas de alcance e interacción:

Publicación: Ruido decembrino en el Valle de Aburrá

El 19 de diciembre de 2024 se publicó un carrusel que contextualizó los niveles de ruido registrados durante las horas más intensas de la Alborada, explicando qué es el ruido ambiental y cómo se realiza su monitoreo desde el Proyecto SIATA. Esta fue la publicación más popular en las redes sociales del proyecto durante 2024, alcanzando a 97.987 personas, con 1.351 "Me gusta" y 43 comentarios. El contenido puede consultarse en el enlace ruido alborada.



Figura 315: Publicación sobre los niveles de ruido en la Alborada.

Publicación: Riesgos de los globos de mecha

El 12 de diciembre de 2024 se difundió un carrusel que explicó los riesgos asociados a elevar globos de mecha, incluyendo la generación de incendios y el aumento en las concentraciones de material particulado PM2.5. Esta publicación tuvo un alcance de 62.290 personas, con 1.177 "Me gusta" y 13 comentarios. El contenido se encuentra en el enlace globos mecha.



Figura 316: Publicación sobre los riesgos de elevar globos de mecha.

Publicación: Diferencia entre contaminantes físicos y químicos

El 21 de noviembre de 2024 se publicó un carrusel que explicó las principales características y diferencias entre los contaminantes atmosféricos físicos y químicos, con el propósito de facilitar la comprensión ciudadana sobre el ruido y elementos como el PM2.5. El contenido tuvo un alcance de 17.560 personas, con 207 "Me gustaz 4 comentarios. Disponible en el enlace contaminantes físicos y químicos.



Figura 317: Publicación sobre diferencias entre contaminantes físicos y químicos.

Publicación: ¿Qué son los episodios de calidad del aire y por qué ocurren?

El 2 de marzo de 2024 se publicó un video explicativo sobre los episodios de calidad del aire y sus causas en el Valle de Aburrá. Alcanzó a 17.353 personas, con 256 "Me gusta" y 3 comentarios. Puede consultarse en el enlace episodios de calidad del aire.



Figura 318: Publicación explicativa sobre episodios de calidad del aire.

En el enlace top sobre contenidos de calidad del aire se encuentra el consolidado de publicaciones.

Como conclusión del análisis, se evidencia que las audiencias del Proyecto SIATA muestran una preferencia por contenidos técnicos con enfoque de divulgación científica, especialmente aquellos que incluyen datos curiosos sobre contaminantes atmosféricos. Asimismo, el ruido se consolida como una temática prioritaria para la opinión pública, con una demanda creciente de información y aprendizajes al respecto.

Transmisiones en vivo

En 2024 se realizaron dos transmisiones en vivo sobre calidad del aire y ruido. La primera, desarrollada el 24 de abril, abordó el concepto de ruido ambiental, su monitoreo y la gestión de este contaminante en el Valle de Aburrá. El video de invitación está disponible en live ruido.



Figura 319: Live sobre ruido ambiental.

La segunda transmisión se realizó el 2 de octubre en el municipio de Girardota, en colaboración con la administración local. En esta, se presentaron conceptos básicos sobre calidad del aire, acciones de monitoreo y estrategias de divulgación científica implementadas en el territorio. El video de invitación está disponible en live Girardota.



Figura 320: Live sobre calidad del aire en Girardota.

Programa Somos Área

Como parte de la estrategia para llegar a nuevos públicos, se produjeron dos emisiones del programa *Somos Área* (Telemedellín) dedicadas a la calidad del aire. La primera se centró en el rol de los Ciudadanos Científicos en el monitoreo de este recurso, disponible en Programa Somos Área 1.

La segunda abordó conceptos técnicos sobre calidad del aire, métodos de monitoreo y un experimento para ilustrar fenómenos de dispersión y acumulación de contaminantes. Disponible en Programa Somos Área 2.

Micrositio de calidad del aire

En el marco del Plan de Comunicaciones de Calidad del Aire, se avanzó en la construcción de un micrositio temático, con secciones sobre generalidades, PM2.5, otros contaminantes, ruido, Ciudadanos Científicos y un blog de contenidos. El desarrollo incluyó creación de textos, conceptualización discursiva, arquitectura de la información, diseño y avances en programación dentro del sitio web del SIATA. Actualmente, se incorporan los últimos ajustes solicitados por el equipo técnico de Calidad del Aire. El prototipo puede consultarse en micrositio web.

Gestión de la comunidad Ciudadanos Científicos

Durante 2024 y los primeros meses de 2025, se implementó el Plan de Acción Comunicacional de la Red de Ciudadanos Científicos, que incluyó tácticas digitales, espacios de divulgación y participación, avisos informativos sobre las nubes ubicadas en espacios públicos y un ejercicio de caracterización de públicos.

Se establecieron canales de comunicación directa con los miembros de la estrategia mediante grupos de WhatsApp: uno para quienes cuentan con Nubes y otro para quienes tienen sensores en bicicletas. En la Figura 321 se muestran ejemplos de los mensajes enviados.



Figura 321: Canales de comunicación de la estrategia Ciudadanos Científicos.

Entre los contenidos compartidos se incluyó información institucional, datos curiosos sobre ciencia, divulgación técnica y respuestas a inquietudes de los participantes. Además, se desarrolló una campaña para visibilizar a Ciudadanos Científicos inspiradores.

La táctica más innovadora del año fue la creación de los *Encuentros Científicos*, espacios mensuales de aprendizaje, diálogo y construcción colectiva, orientados a fortalecer la participación activa. Se realizaron dos encuentros temáticos: uno sobre ICA y otro sobre criterios cromáticos para informar datos de Nubes y sensores en bicicleta. Esta metodología también permitió la realización de la *Mesa de Retos por el Aire y el Ruido* en el Encuentro General.



Figura 322: Encuentro Científico con la red de Ciudadanos Científicos.

Más información está disponible en el Informe de Ejecución de la Estrategia Comunicacional de Ciudadanos Científicos.

Encuentro de Ciudadanos Científicos

En noviembre de 2024 se planificó, convocó y desarrolló el Encuentro Anual de Ciudadanos Científicos, realizado el 30 de noviembre en la Universidad EAFIT (Bloque 19, Aula de Pedagogía Inversa). El objetivo fue propiciar un espacio de interacción, participación y diálogo entre los integrantes de la red, el equipo del Proyecto SIATA y el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, fortaleciendo la gobernanza y el pensamiento crítico frente a los temas estratégicos del Plan Integral de Gestión de la Calidad del Aire (PIGECA), así como consolidar la estrategia de apropiación social del conocimiento y reconocer el compromiso de la comunidad.

Programación:

- Registro
- Saludo institucional por representantes del Área Metropolitana
- Presentación de avances de la estrategia Ciudadanos Científicos
- Monólogo científico del colectivo *Science Told*
- Mesa de Retos por el Aire y el Ruido
- Reconocimiento a Ciudadanos Científicos destacados

El evento contó con la participación de 98 asistentes, incluyendo miembros de la red, representantes de instituciones educativas, hogares, empresas y acompañantes. Durante la exposición de avances, la profesional Karen Velásquez presentó los resultados de 2024 y algunas proyecciones para 2025 (presentación avances Ciudadanos Científicos).

El colectivo *Science Told* realizó un monólogo con experimentos para incentivar la curiosidad, abordando temáticas como divulgación científica, uso de datos y desinformación. Posteriormente, se llevó a cabo la *Mesa de Retos por el Aire y el Ruido*, un ejercicio de co creación y recolección de ideas sobre cómo mejorar la calidad del aire y la gestión del ruido en la región.





Figura 323: Mesas de retos por el aire y el ruido.

Los temas abordados incluyeron: ciencia aplicada, movilidad sostenible, POECA, industria y servicios competitivos, educación y divulgación, gobernanza y participación, y dos mesas sobre ruido ambiental. Las discusiones se guiaron con preguntas orientadoras sobre retos actuales, medidas efectivas, recomendaciones para tomadores de decisiones y acciones ciudadanas. Paralelamente, se realizaron mesas de activación con dinámicas lúdicas para promover el aprendizaje y la apropiación del conocimiento.

Las relatorías completas están disponibles en relatorías de las mesas de Retos por el Aire y el Ruido.

En la sección de reconocimientos, se destacó a:

- Un ciudadano con nube instalada en su hogar que publica datos en Twitter y en una página web.
- Una docente que lidera semilleros de investigación con datos de la Red de Estaciones Ciudadanas.
- Los tres primeros lugares en cantidad de viajes y kilómetros recorridos con sensor en bicicleta.



Figura 324: Reconocimientos en el Encuentro de Ciudadanos Científicos.

El evento cerró con conclusiones motivadoras, invitando a la comunidad a mantener su interés en la generación de datos, la ciencia aplicada y la divulgación del conocimiento adquirido. El informe completo se encuentra en Informe de Ejecución del Encuentro.

Caracterización de la comunidad Ciudadanos Científicos

Como parte del fortalecimiento de la estrategia, se finalizó el ejercicio de caracterización de la red, cuyo objetivo fue conocer mejor a los diferentes perfiles de participantes: hogares, empresas o entidades públicas, instituciones educativas, universidades y biciusuarios.

La Escuela de Artes y Humanidades de la Universidad EAFIT fue la encargada de realizar los análisis cualitativos y cuantitativos, identificar tendencias y elaborar el informe final. Para ello, se aplicaron 153 encuestas y 20 entrevistas semiestructuradas a una muestra representativa de la comunidad.

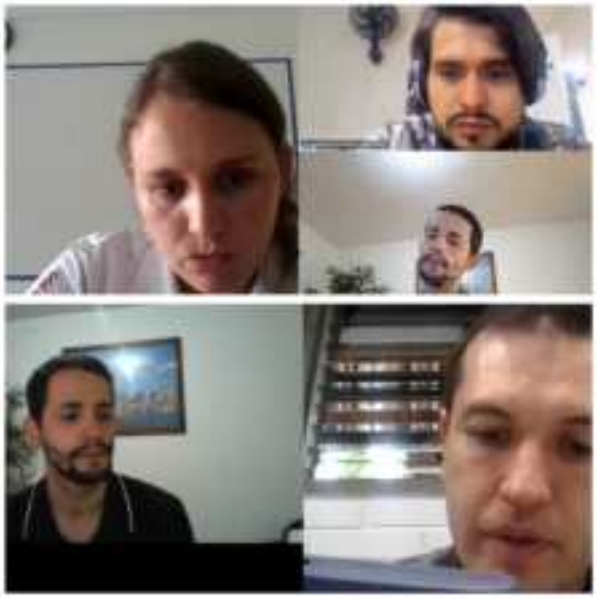


Figura 325: Entrevistas y encuestas para la caracterización de la red.

El informe de caracterización puede consultarse en Informe de caracterización. Los insumos asociados están disponibles en la carpeta Insumos finales.

WP3.2. Educación

WP3.2.1. Potenciar los procesos de Apropiación Social del Conocimiento por medio de prácticas experienciales con públicos priorizados

La Apropiación Social del Conocimiento (ASC) es clave para la gestión del riesgo de desastres, al facilitar que la ciudadanía comprenda y utilice información técnica y científica para identificar, prevenir y mitigar amenazas, fomentando una cultura de prevención y resiliencia. Durante el CCT 016, el componente ASC del SIATA buscó vincular a comunidades y actores estratégicos con temas de ciencia, tecnología e innovación aplicados a la gestión del riesgo, contribuyendo a territorios más resilientes y adaptados a las condiciones climáticas regionales.

En total se realizaron **713 actividades** con públicos vinculados a las estrategias de SATC, UMGRD, organismos de socorro y Conexiones Territoriales. Las acciones incluyeron talleres formativos, visitas de seguimiento, reuniones de articulación, recorridos y eventos especializados, como:

- Tres (3) encuentros con UMGRD, Secretarías de Medio Ambiente y organismos de socorro para compartir información clave para la planificación territorial.
- El VII Intercambio de Experiencias con comunidades SATC y demás públicos de la línea Social.

En las Figuras 326 y 327 se presenta el número de actividades desarrolladas por estrategia y por municipio.



Figura 326: Actividades desarrolladas por la estrategia Social en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.



Figura 327: Actividades desarrolladas por municipio en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

Conexiones Territoriales

Estrategia orientada a públicos diferentes a comunidades SATC, como mesas ambientales, guardabosques, guardacuencas, grupos CUIDÁ y organizaciones comunitarias, para fortalecer el conocimiento en variables ambientales y gestión del riesgo.

Articulación con organismos de socorro

Se desarrollaron **100 actividades** en el marco del contrato, incluyendo talleres sobre cambio climático, riesgo sísmico, descargas eléctricas, salud mental en la gestión del riesgo y apropiación digital, con **96 participantes**.

Trabajo con UMGRD

Se promovió la articulación y capacitación en municipios como Sabaneta, Caldas, La Estrella, Bello y Medellín, con talleres sobre gestión de emociones, cambio climático, pronóstico del tiempo e interpretación de informes hidrometeorológicos.

Logros y testimonios

Entre los hitos alcanzados se destacan:

- Inicio de la estrategia Conexiones Territoriales, ampliando el alcance del proyecto.
- Procesos formativos con nuevas estaciones de bomberos en Medellín (Buenos Aires y Libertadores).
- Prueba piloto del SATC para incendios forestales en el cerro Quitasol (Bello).
- Participación en eventos académicos y técnicos nacionales e internacionales: Congreso IDRiM (Cartagena), Congreso Iberoamericano de Gestión del Riesgo (Perú) y Seminario del DAGRD.
- Inicio de la caracterización de públicos en alianza con la Escuela de Humanidades de la Universidad EAFIT.

Los testimonios recopilados reflejan el fortalecimiento organizativo, la articulación interinstitucional y la apropiación del conocimiento por parte de líderes comunitarios y organismos de socorro, en coherencia con la Ley 1523 de 2012.

- Testimonio - Maximiliano Flores, presidente JAC de Villa Comabel - SATC La Planta, Caldas

  "Nosotros lo primero que le dijimos a ellos es que capacitaciones como capacitaciones no queríamos más. ¿Qué queríamos? Acciones, y eso fue lo que el SIATA nos brindó: alarmas, monitoreo de niveles del agua y recursos. Primero nos capacitaron a los diez presidentes de las Juntas, y luego ya nosotros convocamos a la comunidad. Ahí fue donde vimos que sí se podía. El jueves que ocurrió eso, nosotros mismos reaccionamos. La primera comunicación fue con Camilo, le mandamos una foto. Ya sabemos qué hacer, tenemos los puntos de encuentro definidos, y eso lo hemos aprendido gracias a las alertas tempranas. Nos han enseñado a actuar sin desesperarnos."

- Testimonio - Carlos Dueñez, líder comunitario SATC 19 de Abril, Itagüí

  "Se pueden prevenir muchos desastres, la quebrada Doña María es un afluente muy peligroso y ha ocasionado muchas tragedias. En este momento está socavando todo por debajo de las casas que están a la orilla. Estos ejercicios son excelentes, una prevención muy bonita. La alarmas fundamentales, la instalaron los del SIATA, debido a que la quebrada es una de las más peligrosas de Antioquia. Estos ejercicios pueden salvar muchas vidas."

- Testimonio - Israel Antonio Flórez, Comandante del Cuerpo Voluntarios de Bomberos, Girardota

  "Para nosotros el proyecto SIATA es una herramienta fundamental, damos las gracias al AMVA y al proyecto SIATA que nos brindan información fundamental en el momento cuando se presentan las olas invernales más fuertes y cuando es temporada de menos lluvias también nos brindan información con los incendios de cobertura vegetal. Entonces, es una herramienta muy fundamental con los monitoreos que tienen en las quebradas. Creo que para el Cuerpo Voluntarios del Municipio de Girardota es una gran ayuda para salvar las vidas de nuestros habitantes, ya que nos están ayudando con el monitoreo en la central de comunicaciones de nosotros donde nos ofrecieron y nos colocaron una pantalla, para estar mirando en tiempo real todo las variables que se monitorean. Agradecemos a todos los que van en la cabeza de este proyecto por ser una herramienta fundamental para los cuerpos de bomberos".

Durante la vigencia del CCT 016, las estrategias de Apropiación Social del Conocimiento implementadas por el equipo Social del proyecto SIATA consolidaron un modelo integral de trabajo con comunidades, instituciones y actores estratégicos del Valle de Aburrá. La ejecución de **713 actividades**, entre talleres, eventos, visitas y procesos de articulación, permitió fortalecer capacidades locales, promover el uso de herramientas tecnológicas y ampliar la comprensión social de la gestión del riesgo. Estas acciones no sólo contribuyeron a la reducción de la vulnerabilidad y el fortalecimiento de la resiliencia territorial, sino que también afianzaron la red de cooperación entre comunidades, organismos de socorro, UMGRD y otros grupos ciudadanos, asegurando que el conocimiento científico y técnico llegue de forma oportuna y útil a quienes toman decisiones y a la ciudadanía en general.

WP3.2.2. Fortalecer los procesos educativos de los Semilleros de Ciudadanos Científicos

La estrategia *Semilleros de Ciudadanos Científicos* crea espacios de aprendizaje sobre gestión del riesgo y cambio climático para públicos diversos del Valle de Aburrá, fortaleciendo la cultura del riesgo y la capacidad de acción informada en sus comunidades.

Durante la vigencia del CCT 016-2024 se realizaron procesos formativos con instituciones educativas, grupos comunitarios, organizaciones de gestión del riesgo y colectivos ciudadanos, involucrando estudiantes de todos los niveles, personas con discapacidad, grupos scouts, brigadas de la Defensa Civil y comunidades vinculadas a los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC).



Cada semillero consta de 10 a 15 sesiones adaptadas a las necesidades y contexto de los participantes, desarrolladas en tres fases principales, a saber:

I. **Semillero general:** introducción y análisis de contexto.

II. **Semillero específico:** profundización en una temática.

III. **Proyecto o experiencia final:** aplicación práctica en la comunidad.

Esta metodología fomenta la participación activa, el trabajo colaborativo y la aplicación del conocimiento científico y tecnológico en contextos reales, contribuyendo al fortalecimiento de capacidades locales para la gestión integral del riesgo.

Desarrollo de actividades de la Estrategia Semilleros de Ciudadanos Científicos

Durante la vigencia del Contrato de Ciencia, Tecnología e Innovación 016-2024, la estrategia *Semilleros de Ciudadanos Científicos* se consolidó como un componente esencial para el aprendizaje activo y la apropiación social del conocimiento científico en el Valle de Aburrá. Su impacto se reflejó en la participación de niñas, niños, jóvenes y personas adultas que, a través de procesos de investigación y experimentación, fortalecieron su comprensión de la gestión del riesgo de desastres y su vínculo con el territorio.

En total, se llevaron a cabo **499 encuentros**, con **2640 participantes**, distribuidos en **127 procesos** desarrollados en 9 de los 10 municipios del Valle de Aburrá (Figura 328 y Figura 329). Los talleres abordaron variables meteorológicas como temperatura, humedad, viento, precipitación y formación de nubes, así como temáticas de calidad del aire, cambio climático, movimientos en masa y gestión del riesgo de desastres.



Figura 328: Total de encuentros por municipio – Estrategia Semilleros de Ciudadanos Científicos.



Figura 329: Procesos desarrollados – Estrategia Semilleros de Ciudadanos Científicos.

El Tabla 56 presenta un consolidado general de la estrategia, incluyendo municipios, número de participantes y descripción de procesos. Además, se registraron características socioeducativas de las instituciones vinculadas:

- Tipo y nivel de escolaridad.
- Ubicación según zona geográfica.
- Modelo pedagógico.
- Temáticas trabajadas.

La información detallada de cada proceso, incluyendo fechas, instituciones participantes y temáticas, está disponible en el consolidado de la vigencia 016.

Asimismo, las evidencias fotográficas, listas de asistencia y registros administrativos se encuentran organizadas en los siguientes repositorios:

- Evidencias procesos 2024
- Evidencias procesos 2025-1

Tabla 56: Consolidado procesos Semilleros de Ciudadanos Científicos

Municipio	Participantes	Escolaridad	Zona	Modelo	Tema específico
Barbosa	279	Mixto - Bachillerato	Rural	Escuela nueva - Inclusión	Meteorología, gestión del riesgo de desastre, territorio
Copacabana	155	Primaria, bachillerato	Urbano, rural	Regular, escuela nueva	Meteorología, STEM

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Municipio	Participantes	Escolaridad	Zona	Modelo	Tema específico
Bello	177	Primaria, bachillerato	Urbano	Regular	Meteorología, calidad del aire, gestión del riesgo
Medellín	1571	Preescolar, primaria, bachillerato, universitario	Urbano	Regular, inclusión	Meteorología, STEM, cambio climático, gestión del riesgo de desastre, territorio
Envigado	188	Primaria, bachillerato	Urbano, rural	Regular, inclusión	Meteorología
Itagüí	50	Primaria, bachillerato	Urbano	Inclusión	Meteorología
Sabaneta	30	Mixto	Urbano	Regular	Meteorología
La Estrella	135	Primaria	Urbano	Regular	Gestión del riesgo de desastre
Caldas	55	Primaria, mixto	Urbano, rural	Regular	Meteorología

Procesos destacados de la estrategia Semilleros de Ciudadanos Científicos

La estrategia *Semilleros de Ciudadanos Científicos* conecta ciencia y territorio mediante talleres, mediciones y proyectos aplicados que fortalecen la comprensión de variables ambientales, el pensamiento crítico y la acción informada frente al riesgo. A continuación, se presentan los procesos más relevantes de la vigencia, con sus logros y productos.

Institución Educativa Normal Superior María Auxiliadora (Copacabana)

Durante dos años, el semillero profundizó en **movimientos en masa** y su relación con temporadas de lluvia intensificadas por el cambio climático. El grupo comparó *in situ* registros de precipitación y saturación del suelo con datos de estaciones SIATA en Copacabana, identificando correlaciones con deslizamientos y zonas de mayor susceptibilidad dentro de la institución.

Logros y productos

- Protocolos de observación y reporte de señales tempranas de inestabilidad del terreno.
- Mapas internos de riesgo con rutas seguras y puntos de encuentro.



- Segundo lugar en la *Feria de Ciencia de Copacabana* (entre 45 proyectos), con socialización de resultados y reconocimientos públicos.



Figura 330: Semillero I.E. Normal Superior María Auxiliadora (Copacabana).



Figura 331: Feria de Ciencia de Copacabana: socialización y reconocimientos.

Centro Educativo Rural Pantanillo (Barbosa)

El proceso se centró en **lectura del territorio** y variables meteorológicas (precipitación, dirección y velocidad del viento, reconocimiento de nubes). Los estudiantes elaboraron cuadernos de campo, compararon sus registros con el *Geoportal SIATA* y discutieron implicaciones para actividades locales (agricultura y movilidad).

Logros y productos

- Rutinas de medición con pluviómetros analógicos y digitales y registro sistemático de observaciones.
- Participación en la *Fiesta de Ciencia Local*, intercambio con otros semilleros del Valle de Aburrá.
- Apropiación familiar y comunitaria de las herramientas del Geoportal; cartas de gratitud por el impacto del proceso.



Figura 332: Semillero C.E.R. Pantanillo: trabajo de campo y socialización.



Figura 333: Mensajes y cartas de agradecimiento (C.E.R. Pantanillo).

Semilleros con enfoque STEM

Se integraron **LEGO SPIKE**, **Micro:bit**, sensores e IoT para idear y prototipar soluciones a problemas reales: contaminación de ríos, riesgo de inundaciones, búsqueda de agua en zonas áridas y alertamiento sísmico. El enfoque STEM favoreció pensamiento crítico, creatividad y proyectos con impacto comunitario.



Figura 334: Actividades STEM con LEGO SPIKE: prototipado y resolución de problemas.

Institución Universitaria ITM (sede Robledo) — enfoque STEM

Se monitorearon **temperatura, humedad y PM_{10}** con *Micro:bit* y sensores, visualizando datos en *Home Assistant*. El grupo diseñó un **huerto automatizado** con control por condiciones ambientales y

exploró un kit de ciencia ciudadana basado en *Arduino* con conexión a internet.

Logros y productos

- Prototipo funcional de huerto con sensores integrados y visualización remota.
- Protocolos de medición y análisis para calidad de aire de entorno cercano.
- Capacidades en integración hardware–software para toma de decisiones informada.



Figura 335: ITM Robledo: monitoreo ambiental y huerto automatizado.

Bibliotecas Comfama (Caldas) y Biblioteca Cristo Rey (Medellín) — enfoque STEM

Con públicos intergeneracionales, se desarrollaron **experimentos del ciclo del agua**, medición de precipitación y lectura de variables como $\mathbf{PM_{10}}$, temperatura y humedad. Se fortaleció la comprensión del estado del ambiente y sus efectos en la vida cotidiana.

Logros y productos

- Cuadernos de campo y ejercicios de comparación con datos SIATA.
- Alfabetización ambiental práctica con instrumentos reales de monitoreo.
- Motivación comunitaria para consultar el Geoportal y reportar observaciones.



Figura 336: Bibliotecas Comfama y Cristo Rey: prácticas de monitoreo y discusión pública.

Colegio Pinares Altoverde — enfoque STEM

Las estudiantes programaron *Micro:bit* y visualizaron datos en *ThingSpeak*. Se ensambló una **estación meteorológica escolar** con sensores de viento, humedad, temperatura y $\mathbf{PM_{10}}$, y se definieron rutinas de monitoreo y análisis.

Logros y productos

- Integración de sensores y tablero en la nube para seguimiento en tiempo real.
- Protocolos escolares de registro y comparación con series SIATA.
- Fortalecimiento de habilidades en visualización y comunicación de datos.



Figura 337: Colegio Pinares Altoverde: estación y tablero de datos en la nube.

Institución Educativa Finca La Mesa — enfoque STEM

En contexto rural con conectividad intermitente, se trabajó con *Micro:bit* y kits **IoT** para medir **precipitación, viento, temperatura y humedad**, publicando datos en *ThingSpeak*. Se ajustaron metodologías para sesiones con tabletas y recursos limitados.

Logros y productos

- Estrategias de continuidad pedagógica sin laboratorio fijo ni internet estable.
- Publicación de datos ambientales y uso formativo de visualizaciones en línea.
- Guías de operación y mantenimiento de instrumentos para contextos rurales.



Figura 338: I.E. Finca La Mesa: mediciones con IoT y adaptación metodológica.

Los procesos destacados consolidan capacidades para observar, medir y usar información ambiental, transformando datos en **acciones concretas** (protocolos, estaciones escolares, tableros de monitoreo, prototipos y cartografías de riesgo). La articulación entre ciencia, tecnología y comunidad fortaleció la resiliencia educativa y territorial, y dejó **productos replicables** para su continuidad en el Valle de Aburrá.

Ciencia para todos y todas: una apuesta desde la accesibilidad

El componente de Apropiación Social del Conocimiento, principalmente desde el equipo de Educación, ha venido consolidando la iniciativa *Ciencia para todos y todas: una apuesta desde la accesibilidad*, cuyo objetivo es garantizar que la ciencia sea inclusiva y accesible, especialmente para personas históricamente excluidas —como aquellas con discapacidad— en áreas como la enseñanza de la ciencia y la gestión del riesgo de desastres.

Si bien desde 2018 y 2022 se había realizado acercamientos iniciales con públicos con discapacidad, el trabajo sistemático comenzó a fortalecerse en 2023. Esta propuesta asegura el acceso y la participación activa de personas con discapacidad en procesos educativos, sociales y de divulgación, mediante la implementación de ajustes razonables en materiales, metodologías y entornos, así como el desarrollo de experiencias basadas en la multisensorialidad. Dichos ajustes parten tanto de las necesidades individuales de los estudiantes como de las demandas colectivas en materia de accesibilidad, con el fin de promover espacios educativos sin barreras.

La inclusión de personas con discapacidad en la gestión del riesgo es un compromiso respaldado por marcos internacionales como el Marco de Sendai, los Objetivos de Desarrollo Sostenible y la Convención sobre los Derechos de las Personas con Discapacidad. Además de fortalecer sus conocimientos sobre prevención, riesgos y respuesta, su participación aporta perspectivas únicas para el diseño de materiales, metodologías y sistemas de alerta temprana, contribuyendo a eliminar barreras y a fortalecer las capacidades comunitarias.



Figura 339: Ciencia para todos y todas: una apuesta desde la accesibilidad.

Semilleros de Ciudadanos Científicos con enfoque de accesibilidad

Durante la vigencia del CCT 016 de 2024 se desarrollaron **18 semilleros** dirigidos a personas sordas, con discapacidad visual y neurodiversas, en instituciones educativas de primaria y secundaria. Estos espacios incorporaron metodologías inclusivas, materiales educomunicativos adaptados y estrategias pedagógicas diseñadas para garantizar igualdad de oportunidades en el aprendizaje.

Los participantes exploraron conceptos científicos y de gestión del riesgo de desastres a través de experiencias significativas, reconociendo y valorando sus propias capacidades para hacer ciencia. La construcción colectiva y el trabajo colaborativo fueron ejes transversales, fomentando el análisis del territorio, el reconocimiento de riesgos locales y la identificación de acciones de prevención y mitigación.

El impacto de esta línea de trabajo se refleja en la credibilidad y el reconocimiento alcanzado entre docentes e instituciones que atienden a población con discapacidad. Estas han recomendado los procesos y han solicitado replicar la experiencia en otros contextos, destacando la combinación de criterios de

accesibilidad y rigurosidad científica.

Tabla 57: Consolidado procesos Semilleros de Ciudadanos Científicos con enfoque de accesibilidad.

Municipio	Participantes	Nivel escolar	Institución educativa	Discapacidad	Proceso
Barbosa	30	Bachillerato	I.E. Rural El Hatillo	Comunidad sorda	Reconociendo la ciencia y el territorio
Barbosa	30	Bachillerato	I.E. Rural El Hatillo	Comunidad sorda	Meteorología
Envigado	5	Primaria	Colegio Alcaravanes	Trastorno del espectro autista	Reconociendo la ciencia y el territorio
Envigado	5	Primaria	Colegio Alcaravanes	Trastorno del espectro autista	Meteorología
Itagüí	14	Primaria	I.E. Juan N. Cadavid	Comunidad sorda	Reconociendo la ciencia y el territorio
Itagüí	14	Primaria	I.E. Juan N. Cadavid	Comunidad sorda	Meteorología
Itagüí	14	Primaria	I.E. Juan N. Cadavid	Comunidad sorda	Caminando la investigación
Itagüí	8	Bachillerato	I.E. Juan N. Cadavid	Comunidad sorda	Reconociendo la ciencia y el territorio
Medellín	25	Bachillerato	I.E. Francisco Luis Hernández	Comunidad sorda	Reconociendo la ciencia y el territorio
Medellín	9	Primaria	I.E. Francisco Luis Hernández	Comunidad sorda	Meteorología
Medellín	9	Primaria	I.E. Francisco Luis Hernández	Comunidad sorda	Caminando la investigación
Medellín	7	Bachillerato	I.E. Francisco Luis Hernández	Discapacidad visual	Reconociendo la ciencia y el territorio
Medellín	21	Primaria/Mañana	I.E. Francisco Luis Hernández	Discapacidad motora	Reconociendo la ciencia y el territorio
Medellín	21	Primaria/Mañana	I.E. Francisco Luis Hernández	Discapacidad motora	Meteorología

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior.

Municipio	Participantes	Nivel escolar	Institución educativa	Tipo de discapacidad	Proceso
Medellín	22	Primaria/Tarde	I.E. Francisco Luis Hernández	Trastorno del Espectro Autista	Reconociendo la ciencia y el territorio
Medellín	22	Primaria/Tarde	I.E. Francisco Luis Hernández	Trastorno del Espectro Autista	Meteorología
Medellín	30	Primaria/Aceleración	I.E. Vida Para Todos	Discapacidad intelectual y TDAH	Reconociendo la ciencia y el territorio
Medellín	30	Primaria/Aceleración	I.E. Vida Para Todos	Discapacidad intelectual y TDAH	Gestión del Riesgo de Desastres



Figura 340: Semilleros de Ciudadanos Científicos con enfoque de accesibilidad.

La estrategia *Ciencia para todos y todas* ha permitido posicionar la accesibilidad como un eje central en la enseñanza de la ciencia y la gestión del riesgo, ofreciendo a las personas con discapacidad herramientas para participar activamente en la construcción de comunidades resilientes. Su implementación en 2024 no sólo ha fortalecido capacidades individuales, sino que también ha promovido alianzas interinstitucionales, contribuyendo a un cambio cultural hacia la inclusión y el reconocimiento de la diversidad como un valor para la ciencia y la sociedad.

Proyectos de investigación

En la I.E. Francisco Luis Hernández (Medellín) y la I.E. Juan N. Cadavid (Itagüí) se desarrollaron Semilleros de Ciudadanos Científicos de meteorología, de los cuales surgieron dos proyectos de investigación: Conociendo el Valle de Aburrá en señas y Descubriendo la ciencia en señas.

Estos proyectos, publicados en las redes del SIATA y empleados como insumo pedagógico en semilleros con personas sordas, lograron:

- Fortalecer el reconocimiento del territorio y los riesgos asociados.

- Facilitar la comprensión del monitoreo de variables meteorológicas.
- Producir contenido para divulgación científica en Lengua de Señas Colombiana (LSC), favoreciendo el acceso de la comunidad sorda a la ciencia.

Entre los retos identificados, destaca la limitada oferta de material educativo accesible que aborde ciencia y gestión del riesgo de desastres para población sorda, lo que refuerza la necesidad de continuar desarrollando recursos específicos.

Semilleros universitarios

Se desarrolló un semillero universitario en la Universidad de Antioquia con estudiantes de Licenciatura en Ciencias Naturales. Este piloto abordó la inclusión y accesibilidad como ejes articuladores con los contenidos científicos, respondiendo a la necesidad de que futuros docentes cuenten con conocimientos y herramientas para trabajar con población con discapacidad, especialmente en contextos de práctica profesional.

El proceso permitió:

- Experimentar la creación de material accesible.
- Profundizar en conceptos técnicos de ciencia y gestión del riesgo.
- Integrar nuevas perspectivas al pensum universitario, enriqueciendo la formación docente.

Una de las participantes resaltó el valor de vincular la universidad con iniciativas externas que amplíen la mirada académica y fortalezcan saberes aplicables a su desarrollo profesional y laboral.



Figura 341: Semilleros universitarios con enfoque de accesibilidad.

Difusión y articulación interinstitucional

Se destaca la participación en el podcast *AccesLab* de la editorial Braille Dado Diseño para Todos, donde se compartió la experiencia de la estrategia *Ciencia para todos y todas* y las generalidades del proyecto SIATA. El diálogo, guiado por una persona con discapacidad visual experta en accesibilidad, generó reflexiones sobre la Apropiación Social del Conocimiento, la ciencia, la gestión del riesgo de desastres y la accesibilidad como principios transversales.

Este intercambio de saberes enriqueció la visión y proyección de la estrategia, evidenciando el valor de los espacios de colaboración. Para escuchar el episodio, consulte el enlace: AccesLab – Ciencia para todos y todas.

Estos procesos han consolidado un enfoque integral en el que la accesibilidad no es un componente accesorio, sino un principio rector de las acciones educativas y científicas. Desde la producción de contenidos en LSC, hasta la formación de futuros docentes y la generación de diálogos interinstitucionales, la estrategia fortalece la capacidad de las comunidades para apropiarse del conocimiento científico y participar activamente en la gestión del riesgo de desastres.

Fiesta de Ciencia Local

La **Fiesta de Ciencia Local** es un evento anual que representa la materialización de los procesos desarrollados en la línea educativa del componente de Apropiación Social del Conocimiento. En la vigencia 016-2024, reunió a la comunidad educativa, grupos scouts y grupos focales que participaron en las estrategias de *Semilleros de Ciudadanos Científicos* y *Red de Educadores Científicos (REC)*, en un esfuerzo conjunto por visibilizar el conocimiento científico y tecnológico aplicado al contexto local y la **gestión del riesgo de desastres**. El objetivo principal fue propiciar un espacio donde estudiantes y educadores compartieran logros, aprendizajes y experiencias, fortaleciendo el vínculo entre ciencia, territorio y comunidad.

Participación y diversidad de proyectos

Durante la jornada se presentaron **25 pósteres** elaborados por instituciones educativas, colegios, universidades y grupos scouts que hicieron parte de las estrategias. Cada uno mostró investigaciones y experiencias que abordaron fenómenos ambientales y sociales del Valle de Aburrá, así como propuestas tecnológicas con enfoque STEM. La calidad de los trabajos reflejó un alto compromiso institucional, dominio de conceptos científicos, apropiación de herramientas de monitoreo y capacidad para vincular los contenidos a su contexto local.

Ejemplos destacados de participación

- **Tecnología y monitoreo ambiental**
  - *Institución Universitaria ITM*: implementó sensores y tecnologías de monitoreo en tiempo real, desarrollando un prototipo para huertos automatizados sostenibles.
  - *I.E. Finca La Mesa*: construyó estaciones meteorológicas con kits LEGO y empleó kits de IoT para monitorear variables meteorológicas a distancia.
- **Calidad del aire**
  - *Colegio Pinares Altoverde*: estudió la calidad del aire alrededor de la institución y en un área residencial de Sabaneta, usando datos de las nubes de Ciudadanos Científicos.
  - *I.E. Federico Sierra Arango*: investigó el uso de epífitas para monitoreo ambiental.
  - *Grupo Scout Kenya 5 – Mosqueteros 24* e *I.E. Fontidueño*: diseñaron estrategias para caracterizar la calidad del aire en sus entornos educativos.
- **Cambio climático y apropiación del territorio**
  - *I.E. Jesús María Valle* (zona urbana) y *Granjas Infantiles – sede La Veta* (zona rural): vincularon la temática del cambio climático a sus currículos escolares, fortaleciendo la relación de los estudiantes con el territorio.
- **Gestión del riesgo de desastres**
  - *I.E. Fe y Alegría Luis Amigó* y *Grupo Scout Forjadores 142*: desarrollaron estudios territoriales orientados a la gestión del riesgo.

  - *Colegio Mano Amiga*, *I.E. Alberto Lebrún*, *I.E. Normal Superior María Auxiliadora*, *Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid*, y *Grupo Scout Rakut 71*: integraron la gestión del riesgo a partir de fenómenos físicos y variables monitoreadas por SIATA.

- **Meteorología aplicada**
  - *I.E.R. Granjas Infantiles sede La Veta – Copacabana*, *I.E. Sol de Oriente*, *Grupo Scout Abirá 128*, *I.E. Rafael Uribe Uribe*: estudiaron variables como viento, temperatura y precipitación, integrándolas a sus planes de área y currículos.

Inclusión y accesibilidad

Una participación especial correspondió a grupos de estudiantes sordos de primaria de la *I.E. Francisco Luis de Aranjuez* y la *I.E. Juan N. Cadavid de Itagüí*, quienes presentaron sus proyectos en **Lengua de Señas Colombiana** con apoyo de intérpretes. Esta experiencia no sólo fortaleció la **divulgación científica inclusiva**, sino que generó sensibilización en el público asistente, despertando interés y admiración por el trabajo y compromiso de los estudiantes.

Aporte de la Red de Educadores Científicos (REC)

La REC presentó **13 pósteres** que reflejaron un año de crecimiento, consolidación y fortalecimiento de vínculos con los contextos educativos, sociales y culturales. Las investigaciones evidenciaron:

- Adaptación de contenidos científicos a las particularidades del entorno.
- Innovación pedagógica contextualizada.
- Impacto en la apropiación social del conocimiento en las comunidades.

Principales logros del evento de Fiesta de Ciencia Local

Al concluir uno de los eventos más significativos de la línea de educación del componente, se mencionan los principales logros:

- El aprendizaje de una ciencia contextual, que se basa en las realidades del territorio, no sólo reivindica el papel de cada ciudadano en su entorno, fortalece la mirada crítica y reflexiva frente al lugar que habita, favoreciendo la toma de decisiones.
- Pensar en una ciencia para todas y todos es posible. Desde la visión del proyecto SIATA, queda claro que ajustar las herramientas y proponer estrategias en las que la comunidad sorda, personas con discapacidad visual y personas neurodiversas tienen un lugar importante, hace que se esté más cerca de los principios de democratización de la ciencia.
- El enfoque STEAM se ha ido posicionando a lo largo de los años como insumo clave para favorecer la ciencia y la tecnología, los acercamientos que se tuvieron durante esta vigencia, reflejan las oportunidades de alto valor que posibilita este enfoque, favoreciendo habilidades en los estudiantes.
- Se reafirma el papel de los profesores en las estrategias de la línea educativa. El éxito está altamente influenciado por la responsabilidad y nivel de compromiso de quienes lideran los procesos en cada contexto.
- Las comunidades rurales juegan un papel significativo dentro de los procesos. En este evento, se pudo contar con participantes de aquella ruralidad lejana del Valle de Aburrá, permitiéndoles vivir una experiencia diferente, donde intercambiaron conocimientos con personas con realidades diferentes, lo que nutre y enriquece su visión del territorio.



En la Figura 342 se presentan algunas evidencias de la *Fiesta de Ciencia Local*



Figura 342: Fiesta de Ciencia Local.

Para conocer mejor los posters que fueron presentados en este espacio ingrese aquí.

La Fiesta de Ciencia Local 2016 demostró que la ciencia escolar y comunitaria puede integrarse de forma efectiva a la comprensión y gestión del territorio. El uso de herramientas de monitoreo, la inclusión de enfoques STEM, la articulación curricular y la promoción de la accesibilidad fueron ejes clave para fortalecer la apropiación social del conocimiento y generar un impacto positivo en las comunidades del Valle de Aburrá.

Red de Investigación Escolar (RIE)

En 2024, como parte de las acciones para fortalecer los procesos educativos del proyecto, el SIATA se vinculó a la Red de Investigación Escolar (RIE), una iniciativa que promueve el fortalecimiento de la investigación escolar en diferentes instituciones educativas. Este espacio ha permitido la participación activa de docentes y estudiantes vinculados a las estrategias educativas del proyecto, brindándoles la oportunidad de socializar y visibilizar sus procesos de investigación en el aula.

Durante la vigencia del contrato CCT 016-2024, el SIATA participó y apoyó actividades enmarcadas en las tres líneas de acción de la RIE:

- Reposicionamiento.
- Publicación.
- Organización del evento anual.

El aporte principal del SIATA se centró en la planeación y el desarrollo del **evento de investigación escolar** organizado por el Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia (CTA).

Apoyo logístico y académico previo al evento

Previo a la jornada, el equipo de SIATA realizó la revisión técnica y de contenido de seis pósteres pertenecientes a dos instituciones educativas participantes. Además, coordinó la distribución de espacios para los talleres y la organización de los recursos requeridos.

Desarrollo del evento

El encuentro se llevó a cabo el 19 de septiembre, donde el SIATA apoyó la logística de inscripción de asistentes, la ubicación de pósteres y la organización de los grupos para los diferentes talleres. Más allá del soporte logístico, la mayor contribución del proyecto fue su participación activa en el componente académico del evento, lo que permitió:

- **Presentación de experiencias investigativas:** Tres docentes vinculados a procesos educativos del SIATA socializaron, mediante pósteres, sus proyectos de investigación escolar. En las Figuras 343 y 344 se observan los pósteres y momentos de su exposición.



Figura 343: Pósteres del SIATA presentados en el evento de la RIE.



Figura 344: Presentación de pósteres de SIATA en el evento de la RIE.

- **Desarrollo de talleres prácticos:** SIATA facilitó ocho talleres dirigidos a docentes, organizados en cuatro temáticas clave (dos talleres por cada temática):
  - Ciencia para todos y todas: una apuesta desde la accesibilidad.

- Calendario meteorológico para el aula.
- Enseñanza de las geociencias con material didáctico (experimentos, cuentos y juegos).
- STEAM: herramientas tecnológicas para la innovación educativa.

En la Figura 345 se presentan evidencias de estas actividades.



Figura 345: Talleres desarrollados por SIATA en el evento de la RIE.

La participación de SIATA en la RIE durante 2024 no solo contribuyó al fortalecimiento de la investigación escolar en la región, sino que también permitió expandir el alcance de sus estrategias de educación no formal, posicionando al proyecto como un referente en la articulación entre ciencia, comunidad educativa y gestión del riesgo.

WP3.2.3. Fortalecer los procesos educativos de la Red de Educadores Científicos

La **Red de Educadores Científicos** es una estrategia de apropiación social de la ciencia que vincula el conocimiento científico local con la gestión del riesgo de desastres en el Valle de Aburrá, mediante la participación activa de actores sociales del ámbito educativo formal e informal. Se consolida como una comunidad de aprendizaje situada, basada en la lectura crítica del contexto, la comprensión de fenómenos físicos y la construcción colectiva de conocimientos para proponer soluciones que favorezcan el cuidado y la transformación de los entornos.

Participantes: está conformada por docentes de educación básica y universitaria, integrantes de organismos de socorro y otros ciudadanos con prácticas educativas. La interacción se da a través de un diálogo de saberes que fortalece la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia local. Las actividades incluyen formación de formadores, talleres cortos, salidas de campo, difusión educativa y acompañamiento, empleando metodologías constructivistas como el aprendizaje experiencial, basado en el lugar, en evidencia, uso de TIC y trabajo cooperativo.

Procesos de formación de formadores: comprenden nueve encuentros. Los cinco primeros abordan variables ambientales y fenómenos físicos asociados; el sexto es un espacio de diálogo con un investigador del proyecto para resolver dudas y retroalimentar. Los tres finales están dedicados a diseñar una estrategia educativa que articule ciencia y práctica pedagógica. Según el perfil de los participantes, se elabora una secuencia didáctica o propuesta de aula (docentes) o un taller (organismos de socorro). La estructura es flexible y se adapta a las dinámicas del contexto.

Talleres cortos: son espacios de formación y recorridos dirigidos a educadores interesados en las temáticas del proyecto. Surgieron por demanda y se han articulado con otras iniciativas de formación de formadores del Valle de Aburrá, extendiéndose a educadores de otras regiones y fortaleciendo alianzas con propuestas de ciudad.

Salidas de campo: favorecen la lectura y apropiación del territorio desde la educación basada en el contexto, promoviendo la comprensión del entorno local y su relación con otras regiones. Se reconoce que los fenómenos físicos son interdependientes y trascienden los límites territoriales.

Difusión educativa: se mantiene un canal activo mediante un grupo de WhatsApp, donde se comparten reportes sobre variables hidrometeorológicas y geofísicas, herramientas pedagógicas y testimonios de educadores que empoderan a comunidades en ciencia para la gestión del riesgo.

Acompañamiento: se realiza con educadores que buscan profundizar en procesos de formación o investigación, permitiendo identificar el impacto de la estrategia. Aunque el objetivo inicial fue acompañar prácticas de aula, la actividad se ha ampliado a otras modalidades, como el apoyo a ejercicios docentes a través de Semilleros de Ciudadanos Científicos.

En la Figura 346 se presentan las actividades de la red y su articulación con los temas estratégicos del proyecto SIATA.



Figura 346: Estrategia Red de Educadores Científicos.

Datos sociodemógráficos de los participantes en las actividades de la red

Durante la vigencia, participaron un total de **323 educadores**: 119 se identificaron con el género masculino y 204 con el género femenino, según sus respuestas. La edad promedio reportada fue de 40,8 años (Tabla 58).

Tabla 58: Rango de edad participantes de la Red de Educadores Científicos.

Rango de edad	Nro. Participantes
20 a 25	28
26 a 30	29
31 a 35	48
36 a 40	45
41 a 45	56
46 a 50	42
51 a 55	50
56 a 60	17

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Rango de edad	Nro. Participantes
Más de 60	7
No reportan	2

Respecto al nivel educativo, los educadores con formación profesional fueron el grupo con mayor participación en las estrategias implementadas por la Red durante la vigencia del contrato CCT 016 (Figura 354).



Figura 347: Participantes de la Red de Educadores Científicos, según el tipo de profesión.

Desarrollo de actividades Estrategia Red de Educadores Científicos

Durante la vigencia 016-2014, varias de las actividades previstas en el marco de la estrategia se encontraban aún en fases iniciales. Los acercamientos con los actores del territorio eran limitados, por lo que fue necesario continuar con ejercicios piloto que aseguraran un proceso sólido y pertinente. Este periodo permitió avanzar en la consolidación de la Red de Educadores Científicos, ejecutando todas las actividades programadas, las cuales se convirtieron en escenarios clave para su fortalecimiento.

En la Figura 348 se presenta de forma gráfica el resumen de las actividades realizadas. Se destaca que los ciclos de formación y los acompañamientos fueron las acciones más recurrentes, aunque con diferencias en el número de participantes. Esta variación se explica porque los acompañamientos implican espacios de profundización en los que el profesorado asume tareas con un mayor nivel de exigencia y compromiso, lo que naturalmente reduce el número de inscritos.

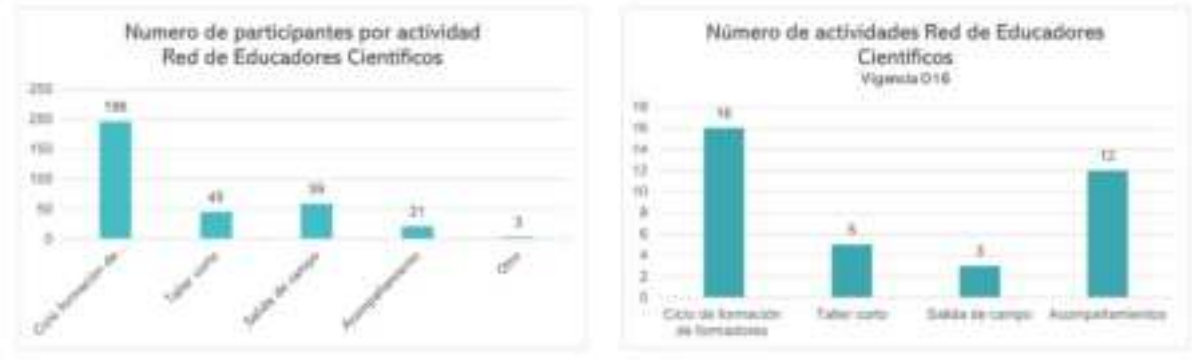


Figura 348: Encuentros de acompañamiento de la Red de Educadores Científicos.

Asimismo, se identificaron los temas más abordados en los espacios de la red. Entre ellos, la calidad del aire y el cambio climático fueron los contenidos que despertaron mayor interés. Otros temas asociados al proyecto —como programación, accesibilidad, investigación y territorio— también generaron una participación significativa, con un total aproximado de 91 asistentes, como se observa en la Figura 349.

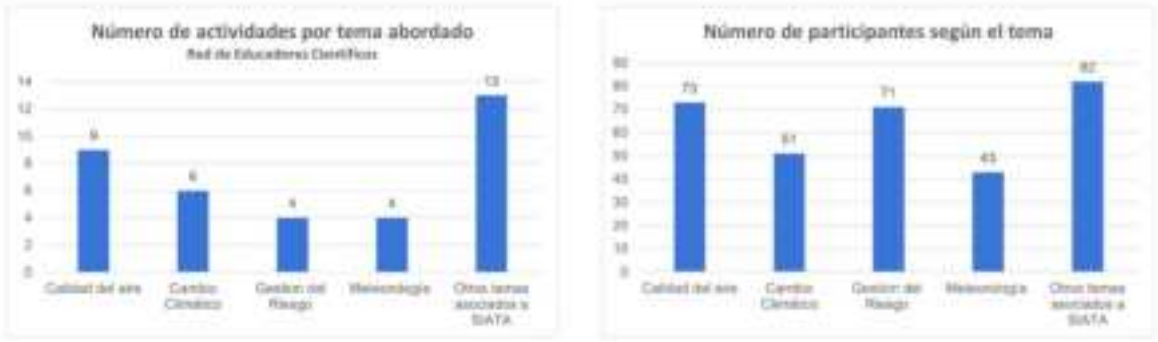


Figura 349: Temas abordados en la Red de Educadores Científicos.

En la 59 se presenta con un poco más de detalle las actividades llevadas a cabo en la Red de Educadores Científicos para la vigencia 016-2024.

Tabla 59: Procesos Red de Educadores Científicos.

Tipo de actividad	Tema	Participantes
Ciclo de formación de formadores	Calidad del aire	9
Acompañamiento	Calidad del aire	9
Taller corto	Programación	9

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Tipo de actividad	Tema	Participantes
Salidas de campo	Territorio	13
Acompañamiento	Investigación	1
Salidas de campo	Otro	21
Taller corto	Semillero general	7
Acompañamiento	Investigación	3
Ciclo de formación de formadores	Cambio climático	18
Ciclo de formación de formadores	Calidad del aire	25
Ciclo de formación de formadores	Meteorología	20
Ciclo de formación de formadores	Gestión de riesgos	29
Ciclo de formación de formadores	Cambio climático	12
Ciclo de formación de formadores	Calidad del aire	14
Ciclo de formación de formadores	Gestión de riesgos	13
Taller corto	Meteorología	19
Taller corto	Investigación	4
Ciclo de formación de formadores	Cambio climático	11
Ciclo de formación de formadores	Calidad del aire	4
Ciclo de formación de formadores	Gestión de riesgos	6
Ciclo de formación de formadores	Meteorología	5
Acompañamiento	Gestión de riesgos	1
Taller corto	Otro	8
Acompañamiento	Calidad del aire	2
Acompañamiento	Calidad del aire	2
Acompañamiento	Cambio climático	2
Acompañamiento	Cambio climático	2
Salidas de campo	Territorio	25
Acompañamiento	Calidad del aire	2
Acompañamiento	Calidad del aire	2
Ciclo de formación de formadores	Gestión del riesgo de desastres y cambio climático	8
Ciclo de formación de formadores	Gestión del riesgo de desastres y cambio climático	9
Ciclo de formación de formadores	Gestión del riesgo de desastres y cambio climático	6

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Tipo de actividad	Tema	Participantes
Ciclo de formación de formadores	Gestión del riesgo de desastres y cambio climático	6
Acompañamiento	Meteorología	1

Red de Educadores Científicos con enfoque de accesibilidad

Durante la vigencia se realizaron **dos encuentros de conocimiento**: uno en el marco de los procesos formativos dirigidos a los docentes integrantes de la REC y otro durante el Encuentro de Investigación Escolar de la RIE.

Estas formaciones brindaron a los profesores herramientas metodológicas y didácticas para fortalecer su labor en el acompañamiento a personas con discapacidad, especialmente en la enseñanza de contenidos científicos. Se abordaron estrategias para el diseño de materiales educativos accesibles, explorando tanto el uso de recursos sencillos como la incorporación de tecnologías, por ejemplo, la impresión 3D, con el fin de generar materiales multisensoriales y duraderos.

Los talleres tuvieron gran acogida entre los participantes, quienes resaltaron la pertinencia de la temática, dada la presencia de estudiantes con discapacidad en sus aulas y la dificultad que encuentran para abordar contenidos científicos inclusivos. Muchos expresaron que las actividades les aportaron ideas prácticas para la creación de materiales adaptados, reconociendo el valor de la multisensorialidad en el aprendizaje.

La formación en accesibilidad para los docentes de la REC es fundamental, no solo por su rol como acompañantes directos de los procesos educativos, sino también como replicadores de la información. De este modo, se genera un efecto multiplicador que promueve la reflexión sobre la inclusión y la transformación institucional. Acompañar a estudiantes con discapacidad es visto así no como una limitación, sino como una oportunidad para enriquecer las experiencias educativas.



Figura 350: Encuentros de conocimiento.

Enfoque STEM

Las actividades desarrolladas en el marco de la Red de Educadores Científicos también posibilitaron a los profesores acercarse a temáticas propias del enfoque STEM, tales como la programación y el pensamiento computacional. A través de una serie de talleres cortos ofrecidos desde la estrategia, se conformaron dos grupos de maestros que trabajaron con estaciones meteorológicas (Figura 351).

Durante estos talleres, los participantes interactuaron con herramientas como el pluviómetro, para medir la lluvia en milímetros; el anemómetro y la veleta, para registrar la velocidad y dirección del viento, utilizando la plataforma MakeCode. Asimismo, programaron los códigos necesarios para medir estas variables y trabajaron con un módulo SD que permitió almacenar los datos en una memoria microSD. Uno de los grupos empleó adicionalmente un kit IoT que posibilitó medir la humedad del suelo y visualizar los datos de forma remota a través de la plataforma ThingSpeak.



Figura 351: Fotografías de las actividades STEM realizadas con la Red de Educadores Científicos.

De manera complementaria, otro grupo de profesores se acercó a una temática que, al igual que el enfoque STEM, está adquiriendo gran relevancia en el proyecto: la accesibilidad e inclusión en la ciencia. En este espacio, los docentes conocieron la estrategia *"Ciencia para todas y todos: una apuesta desde la accesibilidad"* y recibieron insumos para fortalecer sus prácticas educativas, especialmente aquellas dirigidas a estudiantes ciegos, sordos o con discapacidades cognitivas (Figura 352).



Figura 352: Taller sobre accesibilidad en el marco de la Red de Educadores Científicos.

Los espacios de la red también funcionaron como escenarios para identificar habilidades y fomentar nuevos proyectos que podrían ser determinantes en la trayectoria profesional de los docentes. Esto se evidencia en testimonios como el de Carolina Prada, docente de la I.E. Sol de Oriente, Medellín, quien expresó: *"A mí siempre me ha gustado la ciencia, pero con lo que empecé a conocer en el SIATA, yo quedé enamorada, me matriculé en el doctorado de la enseñanza de las ciencias naturales de la Universidad de Antioquia"*. Según la profesora, la experiencia con el SIATA influyó de manera significativa en su decisión de continuar con estudios doctorales en el campo de la ciencia.

A este testimonio se suman las expresiones de los docentes de la I.E. Fontidueño, en Bello, quienes calificaron las estrategias del proyecto como innovadoras y accesibles para quienes se inician en la programación: *"Hace que la programación sea amigable para los no programadores, además acompañan en el camino"*.

Desde la estrategia STEM, uno de los objetivos fue precisamente promover la comprensión y confianza de los participantes, asegurando un acompañamiento que permitiera superar los retos propios de la introducción a nuevos contenidos.

En este contexto, el papel de la mujer en la ciencia ha tenido una presencia relevante. Se identificó que la mayoría de participantes en las actividades de la red son mujeres, un patrón que también se observa en otras estrategias del proyecto, como los SATC, donde el número de lideresas supera al de líderes. Este hecho refleja la influencia de los temas del proyecto y las dinámicas territoriales en la decisión de estas mujeres de articularse y liderar espacios de ciencia y gestión del riesgo de desastres en sus comunidades.

Durante la vigencia 016, uno de los logros más significativos fue la **descentralización** de la Red de Educadores Científicos, extendiendo su alcance a municipios diferentes al Distrito Especial de Medellín. En particular, se consolidaron dos redes en el municipio de Itagüí, lo que permitió fortalecer procesos educativos en ciencia y gestión del riesgo desde una perspectiva territorial.

Esta expansión generó beneficios importantes: favoreció la apropiación del conocimiento en contextos locales, promovió la participación de docentes con realidades y desafíos diversos, y fortaleció el tejido educativo y comunitario.



Figura 353: Red de Educadores Científicos municipio de Itagüí.

Logros y conclusiones de la Red de Educadores Científicos

Durante la ejecución de la estrategia de la Red de Educadores Científicos (REC) se desarrollaron un total de 30 actividades, reflejando un esfuerzo constante por articular el conocimiento científico local con los contextos educativos del territorio metropolitano. Si bien las dinámicas propias de este tipo de públicos presentan retos para la implementación, la respuesta de los participantes fue ampliamente positiva, generando avances significativos en el desarrollo profesional docente. Incluso, en diversos espacios de formación se evidenció que el proyecto SIATA está alcanzando un alto nivel de reconocimiento entre el profesorado.

Los procesos de *formación de formadores* (Figura 354) dejaron productos de alto valor educativo, aportando al desarrollo, construcción y replanteamiento de los Proyectos Institucionales de Gestión del Riesgo Escolar (PIGRE), a los Proyectos Ambientales Escolares (PRAE) y a la formulación de estrategias de aula derivadas del currículo.

Ingrese aquí para consultar las propuestas presentadas.

Asimismo, la participación de los grupos SCOUT enriqueció el enfoque de la estrategia, al reconocer que la labor educativa del profesor trasciende el contexto escolar formal. Este público estratégico integró los temas investigados por el proyecto en sus apuestas internas, fortaleciendo así la apropiación social del conocimiento.



Figura 354: Encuentros de formación de formadores de la Red de Educadores Científicos.

El trabajo con los proyectos institucionales de gestión del riesgo escolar, sumado a ejercicios similares realizados en años anteriores, reafirmó la necesidad de contar con una metodología clara para la construcción de cartografías sociales (Figura 355). Además, se identificó la oportunidad de ajustar y fortalecer estrategias que aporten a estos proyectos en el Valle de Aburrá, ya que en varios encuentros se evidenció que muchas escuelas presentan dificultades para consolidarlos, e incluso, en algunos casos, carecen de propuestas escritas.



Figura 355: Ejercicio cartográfico con docentes en el marco de la Red de Educadores Científicos.

Todas las actividades de la REC buscaron fortalecer la práctica educativa y promover la apropiación de la ciencia local. En este sentido, las salidas de campo (Figura 356) tuvieron un impacto significativo, facilitando la comprensión del territorio y promoviendo aprendizajes situados. Aunque en años anteriores ya se habían realizado, en la vigencia 016 se observó una mayor receptividad por parte de los docentes. Este cambio puede atribuirse a la migración del canal de comunicación hacia la plataforma WhatsApp, lo que favoreció la interacción y participación activa. El grupo creado en esta red social finalizó el periodo con 154 integrantes. Cabe mencionar que no todos los docentes que participan en los ciclos de formación deciden unirse al grupo para continuar en las demás actividades de la estrategia.



Figura 356: Salidas de campo en el marco de la Red de Educadores Científicos.

WP3.2.4. Fortalecer la estrategia Territorio al Aire: diálogo de saberes

Territorio al Aire es una estrategia de divulgación científica orientada a generar espacios de conversación en torno a los procesos de investigación desarrollados en el Proyecto SIATA. Este espacio ha permitido socializar avances, hallazgos y conocimientos derivados de estudios técnicos y científicos clave para la comprensión del territorio y la gestión del riesgo en el Valle de Aburrá.

A diferencia de otras estrategias de divulgación del proyecto, Territorio al Aire está especialmente diseñado para públicos académicos, ofreciendo un enfoque más especializado sobre temas como la gestión del riesgo, las herramientas de monitoreo y modelación, y los principales desafíos ambientales de la región.

En este apartado se presentan los detalles de la implementación de la estrategia durante la vigencia del contrato 016, organizados en: proceso de convocatoria, desarrollo de contenidos y logros principales.

Proceso de convocatoria

La convocatoria para la estrategia se gestionó en articulación con entidades públicas y privadas del Valle de Aburrá, que dispusieron espacios físicos y apoyaron la difusión de cada encuentro. Estas alianzas garantizaron una amplia convocatoria, logrando llegar tanto a la comunidad académica como a la ciudadanía en general.

En la vigencia, los encuentros se realizaron principalmente de manera presencial, con transmisiones simultáneas a través del canal de YouTube del Proyecto SIATA, lo que permitió ampliar el acceso al conocimiento sin barreras geográficas.

Los principales aliados fueron: **Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA), Universidad de Antioquia, Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid, Biblioteca EPM de la Fundación EPM y la Personería de Medellín**.

Para cada evento se diseñaron piezas gráficas, difundidas en redes sociales propias y de las entidades aliadas, fortaleciendo el posicionamiento de la estrategia como referente en investigación y gestión del riesgo.



Figura 357: Piezas de invitación a la estrategia Territorio al Aire.



Figura 358: Transmisión de Territorio al Aire por la plataforma YouTube.

Desarrollo de contenidos

Territorio al Aire fortaleció su presencia en espacios académicos del Valle de Aburrá, promoviendo el diálogo y la divulgación científica en colaboración con diversas instituciones.

En el primer semestre se abordaron temas liderados por los equipos de **meteorología, hidrología y calidad del aire**, incluyendo fenómenos como la formación de nubes, la precipitación y el monitoreo de la calidad del aire con sensores de diferentes tecnologías.

Se establecieron acuerdos con el Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid para realizar encuentros periódicos integrados a la dinámica académica, y se desarrollaron charlas en la Biblioteca EPM —reconocida como la "Mejor Biblioteca Verde del Mundo"— que atrajeron a públicos diversos.



Figura 359: Evidencias Territorio al Aire primer semestre.

En el segundo semestre, los encuentros incluyeron temas como crecientes en ríos y quebradas, precipitación sólida y efectos del cambio climático. Además, se participó en eventos de ciudad como Bibliotech y la conmemoración del Día Internacional para la Reducción del Riesgo de Desastres, así como en un conversatorio sobre cambio climático en la Personería de Medellín.



Figura 360: Evidencias Territorio al Aire segundo semestre.

Logros y conclusiones

Uno de los principales logros de la vigencia fue el lanzamiento del curso **Ciencia Bullosa**, liderado por el colectivo Science Told, para fortalecer las habilidades de divulgación científica de los colaboradores del SIATA. El curso, con un enfoque en *storytelling* y presentaciones orales, constó de cuatro sesiones de dos horas cada una, con 68 inscritos y 35 seleccionados.



Figura 361: Curso de Divulgación Científica Ciencia Bullosa.

El balance refleja un año de expansión para la estrategia Territorio al Aire. Se lograron establecer nuevas alianzas, llegar a nuevos públicos y generar espacios de aprendizaje significativos para cientos de personas. A medida que el proyecto avanza, se abre la puerta a nuevos retos y oportunidades, con el propósito de seguir construyendo una comunidad informada y comprometida con el conocimiento sobre la gestión del riesgo en sus territorios.



Figura 362: Indicadores Territorio al Aire para la vigencia 016-2024.

WP3.2.5. Diseñar y construir material edu-comunicativo, lúdico y pedagógico con enfoque en inclusión

SIATA para la Escuela

En el marco del contrato CCT 016-2024, la estrategia **SIATA para la Escuela** fortaleció su propósito de ofrecer a la ciudadanía herramientas educativas accesibles, innovadoras y contextualizadas, orientadas a la comprensión de fenómenos hidrometeorológicos, geofísicos y de calidad del aire, en el contexto de la gestión del riesgo en el Valle de Aburrá.

Durante esta vigencia, se avanzó en la creación de nuevos materiales, la actualización y optimización de recursos previamente desarrollados, así como en la implementación de acciones para ampliar su alcance y mejorar el acceso de los diferentes públicos de interés. Estas actividades incluyeron procesos de diseño pedagógico, revisión técnica, producción de contenidos y puesta en marcha de estrategias de divulgación que permiten fortalecer la apropiación social del conocimiento.

En la Tabla 60 se presenta un resumen de los productos y contenidos trabajados durante el periodo, reflejando la diversidad de formatos abordados y el compromiso con la inclusión, la pertinencia temática y la calidad educativa de los recursos generados.

Tabla 60: Contenido desarrollado en la estrategia de SIATA para la escuela durante la vigencia 016.

Formato	Descripción	Accesibilidad	Tema
Cartillas educativas	Guía de drones educativos. Ingrese aquí		Drones
Cartillas educativas	Pruebas y correcciones finales de la Cartilla de cambio climático. Ingrese aquí		Cambio climático
Cartillas educativas	Cartilla de meteorología. Ingrese aquí		Meteorología
Cartillas educativas	Planeación de la formación de la REC en calidad del aire. Ingrese aquí		Calidad del aire
Cartillas educativas	Planeación de la formación de la REC en gestión del riesgo. Ingrese aquí		Gestión del Riesgo
Cartillas educativas	Creación de la cartilla STEM. Ingrese aquí		Meteorología, calidad del aire
Cartillas educativas	Creación de la guía de LEGO. Ingrese aquí		Meteorología
Cartillas educativas	Creación de la cartilla educativa: Reconociendo la ciencia y el territorio. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Experimentos SIATA	Desarrollo del experimento sobre lluvia ácida. Ingrese aquí		Calidad del aire
Experimentos SIATA	Desarrollo del experimento sobre turbulencia. Ingrese aquí		Calidad del aire

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Formato	Descripción	Accesibilidad	Tema
Experimentos SIATA	Ajuste razonable Lengua de Señas Colombia al experimento Fenómeno de El Niño. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Recursos lúdicos	Actualización de rompecabezas SIATA. Ingrese aquí		Varios.
Recursos lúdicos	Actualización del Póker Meteorológico. Ingrese aquí		Meteorología
Recursos lúdicos	Planteamiento del juego "SIATA Cubes". Ingrese aquí		SIATA
Recursos lúdicos	Adaptaciones y mejoras al juego de cambio climático, creación del prototipo y pruebas. Ingrese aquí		Cambio climático
Recursos lúdicos	Actualización del juego "Investicake". Ingrese aquí		Investigación
Recursos lúdicos	Adaptación de una estación meteorológica análoga para personas con discapacidad visual	Sí	Meteorología Ingrese aquí
Recursos lúdicos	Creación de rompecabezas de carta de nubes para personas con discapacidad visual. Ingrese aquí	Sí	Tipos de nubes
Recursos lúdicos	Diseño calendario meteorológico. Ingrese aquí		Meteorología
Recursos lúdicos	Desarrollo de Rosa de los rumbos para personas con discapacidad visual. Ingrese aquí	Sí	Territorio
Recursos lúdicos	Video Descubriendo la ciencia en señas con la participación de estudiantes sordos. Ingrese aquí	Sí	Monitoreo
Recursos lúdicos	Video Conociendo el Valle de Aburrá en señas. Ingrese aquí	Sí	Territorio
Recursos lúdicos	Desarrollo de convenciones del monitoreo del viento para personas con discapacidad visual. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Recursos lúdicos	Desarrollo del juego "Arma con cubos". Ingrese aquí	Sí	Gestión del riesgo
Recursos lúdicos	Rompecabezas del Valle de Aburrá con relieve y braille. Ingrese aquí	Sí	Territorio
Recursos lúdicos	Diseño de modelo 3D sobre zona tropical. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Recursos lúdicos	Experiencia alrededor del Valle de Aburrá con realidad virtual. Ingrese aquí	Sí	Territorio
Literatura científica	Creación del cuento "Aprendiendo a estar listos". Ingrese aquí		SATC

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Formato	Descripción	Accesibilidad	Tema
Literatura científica	Creación del cuento “De preguntas curiosas a ciencia que salva vidas”. Ingrese aquí		SIATA
Literatura científica	Creación del cuento “El día que la Tierra empezó a hablar. Un cuento sobre escuchar al planeta y cuidarlo entre todos”. Ingrese aquí		Cambio climático
Literatura científica	Creación del cuento “El viaje de las nubes”. Ingrese aquí		Meteorología
Literatura científica	Creación del cuento “El gran Pacífico y su amigo Alisio”. Ingrese aquí		Meteorología
Literatura científica	Diseño del cuento “¿Por qué se producen los derrumbes?”. Ingrese aquí		Geotecnia
Literatura científica	Actualización del cuento “Cómo se producen las descargas eléctricas” a formato impreso. Ingrese aquí		Meteorología
Literatura científica	Actualización del cuento “Qué pasa al interior de una nube” a formato impreso. Ingrese aquí		Meteorología
Literatura científica	Actualización del cuento “ZCIT ¡Donde los vientos se encuentran!” a formato impreso. Ingrese aquí		Meteorología
Literatura científica	Actualización del cuento “Es un rayo, trueno o un relámpago” a formato impreso. Ingrese aquí		Meteorología
Literatura científica	Actualización del cuento “Soy el viento” a formato impreso. Ingrese aquí		Meteorología
Literatura científica	Actualización del cuento “¿Por qué tiembla la tierra? ” a formato impreso. Ingrese aquí		Ingeniería sísmica
Literatura científica	Desarrollo del libro álbum “Entonces yo también puedo serlo” en braille. Ingrese aquí	Sí	Ciencia
Literatura científica	Ajuste razonable Lengua de Señas Colombia al cuento “Qué pasa al interior de una nube”. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Literatura científica	Ajuste razonable Lengua de Señas Colombia al cuento “Cómo se generan las descargas eléctricas”. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Literatura científica	Ajuste razonable Lengua de Señas Colombia al cuento“soy el viento”. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Literatura científica	Ajuste razonable Lengua de Señas Colombia al cuento “¿Por qué tiembla la tierra? ”. Ingrese aquí	Sí	Ingeniería sísmica

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Formato	Descripción	Accesibilidad	Tema
Recurso educomunicativo	Creación de la PictoSIATA "¿Por qué las quebradas del Valle de Aburrá "se crecen' tan rápido?". Ingrese aquí		Hidrología
Recurso educomunicativo	Creación de la PictoSIATA "Lluvias convectivas en el Valle de Aburrá: ¿cómo se forman?". Ingrese aquí		Meteorología
Recurso educomunicativo	Diseño del PictoSIATA "Variabilidad climática... ¿Qué tiene que ver con el cambio climático?". Ingrese aquí		Meteorología y cambio climático
Recurso educomunicativo	Diseño del PictoSIATA "El sistema climático". Ingrese aquí		Meteorología y cambio climático
Recurso educomunicativo	Diseño del PictoSIATA "Meteorología, clima... ¿Qué comprende cada una?". Ingrese aquí		Meteorología y clima
Recurso educomunicativo	Diseño del PictoSIATA "¿Qué es un sistema de fallas? ". Ingrese aquí		Ingeniería sísmica
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual Sol de Lluvia en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual Glosario SIATA: Cuenca Hidrográfica en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	Hidrología
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual Glosario SIATA: Precipitación en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual Semilleros de Ciudadanos Científicos en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	Educación
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual ¿Qué es cambio climático y variabilidad climática? en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	Meteorología
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual ¿Por qué las quebradas del Valle de Aburrá son de respuesta rápida? en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	Hidrología
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual Soy Gestor de Riesgos de Desastres en mi territorio en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	SATC
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual Qué es un Sistema de Alerta Temprana Comunitario en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	SIATA

Continúa en la siguiente página

Continuación de la página anterior

Formato	Descripción	Accesibilidad	Tema
Recursos educomunicativos	Recurso audiovisual SIATA cómo referente de la Gestión de Riesgo de Desastres en Lengua de Señas Colombiana. Ingrese aquí	Sí	SIATA

Para acceder a todos los recursos Ingrese aquí.

En total, se trabajó en **59 productos educativos** en el marco de SIATA para la Escuela. En la Figura 363 se presenta la distribución según el formato.

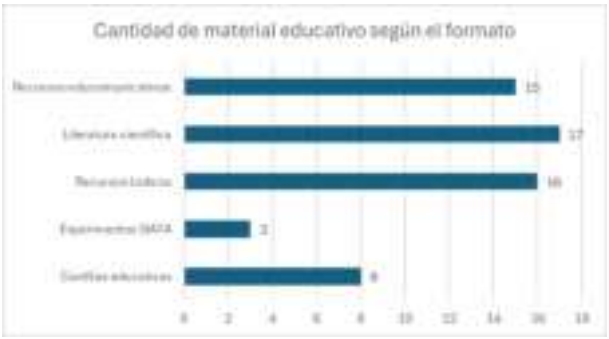


Figura 363: Material educativo desarrollado en el marco de SIATA para la Escuela, según el formato.

Dentro de esta apuesta se avanzó en el desarrollo de material accesible para personas ciegas y la comunidad sorda. En la Figura 364 se presentan los formatos trabajados desde la accesibilidad.

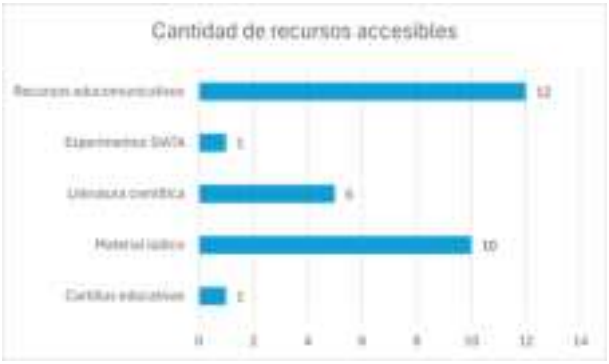


Figura 364: Recursos educativos accesibles.

Es importante resaltar que, durante la vigencia CCT 016-2024, se realizó la actualización de varios recursos educativos tras un proceso de pilotaje que permitió identificar necesidades específicas en los espacios formativos donde el proyecto tiene incidencia. Algunos de estos materiales ya existían, pero no estaban incluidos previamente en el catálogo de **SIATA para la Escuela**. Tal es el caso de ciertos videos

que presentan generalidades del proyecto y que, con la incorporación de la Lengua de Señas Colombiana, se transformaron en insumos con alto potencial para las actividades educativas inclusivas.

En la Figura 365 se presentan los recursos actualizados en el marco de esta estrategia.



Figura 365: Recursos actualizados en el marco de SIATA para la Escuela.

SIATA en la Red de Bibliotecas de Medellín

En el marco del objetivo de generar contenido educativo que favorezca la apropiación social del conocimiento sobre los fenómenos estudiados por el proyecto, se implementó la iniciativa *"Historias que cuidan: cuentos SIATA para promover la lectura científica"*. Esta propuesta permitió articular esfuerzos con el Sistema de Bibliotecas de Medellín para la realización de una serie de talleres mediados por cuentos infantiles creados por el equipo educativo del componente de Apropiación Social del Conocimiento.

Los relatos abordan fenómenos como la lluvia, el viento y las descargas eléctricas, y fueron diseñados para facilitar la comprensión de estos procesos desde un enfoque lúdico y narrativo, adaptado a públicos infantiles. El cronograma de trabajo desarrollado con el Sistema de Bibliotecas se presenta en la Tabla 61.

Tabla 61: Cronograma ejecutado con el Sistema de Bibliotecas de Medellín para promover la lectura científica.

Biblioteca	Público	Fecha
Biblioteca El Limonar	Infantil y familiar	04/06/2025
Biblioteca Altavista	Infantil y familiar	07/06/2025
Biblioteca CREM Granizal	Niños y niñas	10/06/2025
Biblioteca Fernando Gómez Martínez	Infantil y familiar	11/06/2025
Biblioteca CREM Granizal	Niños y niñas	12/06/2025
Biblioteca El Poblado	General	13/06/2025
Parque Biblioteca 12 de Octubre	General	14/06/2025
Parque Biblioteca San Javier	Adultos, adultos mayores	16/06/2025
Parque Biblioteca Belén	Niños y niñas	16/06/2025

Continúa en la siguiente página

Biblioteca	Público	Fecha
Biblioteca Santa Cruz	Adultos, adultos mayores	17/06/2025
Casa de la literatura	Infantil y familiar	18/06/2025
Parque Biblioteca San Cristóbal	General	18/06/2025
Parque Biblioteca La Ladera	Familiar	19/06/2025
Biblioteca Ávila	Infantil, adolescentes y Familiar	20/06/2025
Biblioteca La Floresta	Infantil y familiar	21/06/2025
Parque Biblioteca Doce de Octubre	Infantil y familiar	22/06/2025

El fortalecimiento de la estrategia **SIATA para la Escuela** también implicó una actualización en su fundamentación teórica. Esta estrategia nació como un conjunto de materiales para apoyar los procesos educativos de los *Semilleros de Ciudadanos Científicos* y, durante la pandemia, se consolidó con el objetivo de facilitar la enseñanza mediante canales digitales.

En la vigencia CCT 016-2024 se avanzó hacia un nuevo hito: la revisión y fundamentación teórica de los formatos utilizados. Este ejercicio permitió actualizar y ampliar los contenidos, incrementando su pertinencia y calidad educativa. Aunque la actualización se menciona al inicio de este apartado, puede consultarse aquí el documento completo.

Principales logros en el marco de SIATA para la Escuela

- **Cartillas para la Red de Educadores Científicos:** se diseñaron cartillas con un equilibrio entre teoría, actividades lúdicas y experimentos, alineadas con metodologías de formación docente y elaboradas junto a los equipos técnicos para garantizar rigor científico. Su objetivo es profundizar y replicar los conceptos trabajados en capacitaciones, adaptándose a distintos contextos educativos. En la Figura 366 se ilustra el proceso de diseño.



Figura 366: Diseño de cartillas educativas.

- **Actualización de juegos y cuentos:** se optimizaron recursos preexistentes a partir de la retroalimentación de docentes y estudiantes, mejorando su usabilidad, reforzando conceptos científicos y adaptándolos a diferentes públicos. Se incorporaron créditos para reconocer autorías, dar transparencia y facilitar trazabilidad. Ejemplo en la Figura 367.



Figura 367: Actualización del juego *Investicake*.

- **Material accesible:** se consolidaron 29 recursos adaptados para personas con discapacidad, di-

señados desde la multisensorialidad y validados con públicos diversos. El trabajo interdisciplinar favoreció la creación de herramientas inclusivas que motivaron la participación en semilleros, talleres y la Red de Educadores Científicos. Ejemplos en la Figura 371.



Figura 368: Material accesible desarrollado en 2024.

- **Nuevos recursos educativos:** se crearon materiales atractivos y contextualizados que abordan fenómenos ambientales locales, valorados por docentes como herramientas pertinentes para enriquecer la enseñanza. La Figura 369 muestra ejemplos.

Figuras/Educacin/diseos_nuevos.jpeg

Figura 369: Nuevos materiales educativos desarrollados en 2024.

- **Articulación con el Sistema de Bibliotecas:** la iniciativa *Historias que cuidan* permitió llevar los contenidos de SIATA a espacios no escolares, diversificando públicos y fortaleciendo la comunicación pública de la ciencia. Evidencias en la Figura 370.



Figura 370: Actividades con el Sistema de Bibliotecas de Medellín.

- **Fundamentación teórica:** se fortaleció la estrategia al pasar de una producción empírica de materiales a una propuesta educativa estructurada, respaldada por marcos conceptuales que incrementan su pertinencia, calidad y capacidad de articulación con comunidades educativas y actores institucionales.

El fortalecimiento de la estrategia **SIATA para la Escuela** incluyó una actualización integral de su fundamentación teórica. Esta iniciativa nació inicialmente como un conjunto de materiales para apoyar los procesos educativos de los *Semilleros de Ciudadanos Científicos* y, con el tiempo, se consolidó bajo este nombre durante la pandemia, con el propósito de facilitar el aprendizaje a través de canales digitales.

Durante la vigencia CCT 016-2024 se dio un paso significativo: abordar por primera vez la fundamentación teórica de los formatos utilizados. Este trabajo permitió actualizar y ampliar los contenidos, garantizando su pertinencia y fortaleciendo su calidad educativa. Aunque esta actualización se menciona al inicio de este apartado, el documento completo puede consultarse aquí.

Esta renovación consolidó la estrategia como un puente efectivo entre el conocimiento científico y la comunidad, transformando información técnica en experiencias pedagógicas accesibles y contextualizadas. Con un enfoque en STEM, ciencia local y accesibilidad, **SIATA para la Escuela** fortaleció la comprensión de los fenómenos ambientales y la gestión del riesgo, fomentando una ciudadanía crítica, informada y comprometida con el cuidado del entorno.

SIATA para las comunidades

Durante la vigencia, la estrategia *SIATA para las comunidades* consolidó avances significativos en la planeación y diseño de actividades que requieren materiales de apoyo para la ejecución de talleres dirigidos a sus públicos objetivo. Se desarrollaron procesos de revisión y fortalecimiento metodológico, priorizando la creación de recursos didácticos más pertinentes, contextualizados e innovadores, como la maqueta de socialización y la *Matrioska* en forma de nube. Estos materiales fueron concebidos para facilitar la valoración de saberes previos y el seguimiento al aprendizaje en los espacios formativos, contribuyendo a una interacción más efectiva con las comunidades.

El proceso fue enriquecido mediante espacios de discusión interdisciplinar al interior del componente de Apropiación Social del Conocimiento (ASC), lo que permitió alinear los recursos y metodologías con las necesidades reales de los públicos abordados.

En cuanto a herramientas digitales, se incorporó por primera vez la plataforma *Kahoot* en un entorno académico, obteniendo resultados positivos en términos de participación e interacción. Asimismo, en articulación con el equipo de diseño, se estructuró el juego piloto *Pregunta SIATA*, orientado a dinamizar la apropiación del conocimiento mediante una secuencia de preguntas que transitan de lo general a lo específico sobre el proyecto.

Estas iniciativas representan un avance importante en la consolidación de estrategias pedagógicas accesibles y efectivas, fortaleciendo el vínculo entre el Proyecto SIATA y las comunidades del Valle de Aburrá, y potenciando el alcance de los procesos de apropiación social del conocimiento.

El fortalecimiento de la estrategia durante esta vigencia sienta las bases para un trabajo futuro más inclusivo, interactivo y adaptable a las realidades territoriales. De cara a los próximos ciclos, el reto será ampliar su cobertura, diversificar los formatos de interacción y consolidar una comunidad más activa y comprometida con la gestión del riesgo y el cuidado ambiental, asegurando que el conocimiento técnico-científico llegue a todos los sectores sociales de la región.

WP3.2.6. (Calidad del aire) Realizar procesos educativos y de transferencia del conocimiento

Para esta vigencia se realizaron un total de **137 espacios de divulgación sobre calidad del aire y ruido ambiental**, lo cual permitió la sensibilización de un total de **6905 personas** sobre temáticas relacionadas con calidad del aire y el monitoreo de los contaminantes atmosféricos y de presión sonora en la región. Para lograrlo, se adelantaron charlas, activaciones del aula móvil, talleres y participaciones en ferias ambientales de diferentes actores como universidades, empresas, entidades públicas y privadas que desean conocer más sobre calidad del aire. En las Figuras 371 y 372 se puede visualizar la cantidad de personas sensibilizadas por cada uno de los 10 municipios del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y el total de actividades de divulgación realizadas por municipio.

La lista detallada de actividades, con sus respectivas fechas, ubicaciones y cantidad de personas impactadas, pueden consultarse en detalle a través del enlace espacios de divulgación.



Figura 371: Número de personas sensibilizadas en los diferentes espacios de divulgación realizados sobre calidad del aire durante 2025.



Figura 372: Número de espacios de divulgación sobre calidad del aire realizados durante 2025.

Estas acciones de divulgación no sólo fortalecieron el conocimiento técnico de la ciudadanía en torno a la calidad del aire y el ruido ambiental, sino que también contribuyeron a la construcción de una cultura ambiental más consciente y participativa en los diez municipios del Valle de Aburrá. La diversidad de formatos empleados —desde talleres especializados hasta experiencias interactivas con el aula móvil— garantizó el acceso a información clara y actualizada, fomentando la apropiación social de los procesos de monitoreo y control de contaminantes. De esta manera, la estrategia avanza en su objetivo de sensibilizar y empoderar a la comunidad para que se convierta en un actor activo en la protección y mejora de la calidad ambiental del territorio.

WP3.3. Relacionamiento, articulación y gestión con actores estratégicos

WP3.3.1. Adelantar procesos de articulación con organizaciones de carácter público y/o privado

Durante la vigencia del contrato CCT016-2024, el componente de **Apropiación Social del Conocimiento (ASC)** del proyecto SIATA desarrolló una estrategia integral orientada a fortalecer la divulgación científica, promover la apropiación social del conocimiento, consolidar el posicionamiento institucional del proyecto y fomentar una ciudadanía activa e informada en la gestión del riesgo de desastres en la región.

En 2024, el equipo participó y gestionó un total de **136 eventos** realizados en los nueve municipios del Valle de Aburrá, así como en escenarios de alcance regional y virtual, con un impacto directo sobre **9.399 personas**. Entre los públicos participantes se destacaron comunidades educativas, funcionarios públicos, ciudadanía en general, organizaciones comunitarias y actores institucionales.

Entre enero y julio de 2025, el componente ASC ejecutó **50 actividades adicionales**, que convocaron a **1.647 personas**. Las charlas y talleres se consolidaron como los principales mecanismos de interacción, reuniendo a más de **1.000 asistentes en charlas** y cerca de **540 en talleres**. Adicionalmente, se desarrollaron visitas técnicas, reuniones institucionales, entrevistas, eventos de intercambio de experiencias y participación en ferias con el stand del proyecto, entre otras acciones que fortalecieron el vínculo entre la ciudadanía y el conocimiento técnico generado por SIATA. La diversidad de públicos y formatos evidencia la transversalidad del enfoque comunicativo del proyecto y su capacidad de adaptarse a contextos sociales y técnicos variados.

Las actividades abordaron temáticas clave como el uso del Geoportal Ciudadano, la gestión del riesgo por eventos hidrometeorológicos, la calidad del aire, la interpretación de los datos generados por el proyecto y la presencia territorial del SIATA. El registro detallado de estas actividades puede consultarse en el siguiente enlace: Actividades de divulgación científica 2024-2025.

Como resultado, la articulación con organizaciones públicas y privadas permitió consolidar un entramado de colaboración que amplifica el impacto de las acciones del SIATA en el territorio. La diversidad de escenarios y públicos alcanzados refleja un avance sustancial en la apropiación social del conocimiento, asegurando que la información técnica se traduzca en capacidades locales para la gestión del riesgo y la toma de decisiones informadas.





Figura 373: Actividades de divulgación científica 2024-2025.

WP3.3.2. Fortalecer los procesos sociales con las comunidades y los públicos de interés

Procesos sociales con comunidades nuevas

Como parte de la estrategia con comunidades, durante el contrato se lograron instaurar **veinte (20) nuevos SATC**, de los cuales cinco (5) fueron en los municipios del Valle de Aburrá y diez (10) en el Distrito de Medellín. Esto representó un fortalecimiento de la red comunitaria de los habitantes que se encuentran en riesgo por el desbordamiento de afluentes. Estos procesos afianzaron la resiliencia comunitaria y evidenciaron la importancia de contar con una ciudadanía preparada e informada ante las diversas emergencias ocasionadas por eventos extremos de precipitación en la región metropolitana. A continuación, se resumen las principales experiencias y logros de algunos de los SATC representativos.

SATC Alejandro Echavarría - Distrito de Medellín

El proceso desarrollado en el barrio Alejandro Echavarría movilizó y sensibilizó a un número significativo de actores comunitarios e institucionales en torno a la gestión del riesgo de desastres. Las acciones incluyeron talleres correspondientes a la fase 2 de la metodología, simulaciones específicas y espacios de articulación institucional, con una participación promedio de 17 personas por sesión, según los registros de asistencia.

De manera complementaria, se llevaron a cabo actividades de mayor alcance como las jornadas puerta a puerta y el simulacro general, que en conjunto beneficiaron a cerca de 260 personas. En detalle, aproximadamente 200 personas participaron en las dos jornadas puerta a puerta (100 en cada una), y unas 60 personas en el simulacro general. Este último contó con la presencia de habitantes del sector, líderes comunitarios y representantes de entidades como el Metro de Medellín, la Secretaría de Infraestructura del Distrito, el DAGRD y organismos de socorro como Bomberos Medellín y la Cruz Roja.

Esta participación refleja el alto nivel de apropiación social alcanzado, así como la capacidad del proceso para articular de manera efectiva a diversos actores en torno al fortalecimiento de la preparación y respuesta frente a eventos extremos de origen hidrometeorológico en el territorio metropolitano, contribuyendo a la protección de la vida y el bienestar de sus habitantes.

Figuras/Social/SATC Alejandro Echavarra.jpg

Figura 374: Proceso social SATC Alejandro Echavarría.

SATC San Fernando, Caldas

El 30 de mayo se dio inicio al proceso formativo para instaurar el SATC San Fernando Figura 375, con la participación de la comunidad ubicada en la parte alta de la vereda La Valeria. A lo largo de las sesiones, asistieron alrededor de ocho personas, quienes demostraron un alto nivel de compromiso en cada encuentro.

Durante la fase 3, correspondiente a la simulación y el simulacro, este SATC enfrentó retos significativos debido a la limitada cobertura de los operadores de telefonía celular y la ausencia de servicio de internet domiciliario. Ante esta situación, se implementaron diversas acciones orientadas a identificar las mejores alternativas de conectividad para las estaciones de monitoreo y la alarma comunitaria.

Las pruebas realizadas por el grupo de Telemetría determinaron que, en la zona, únicamente es viable la transmisión de datos desde las estaciones de monitoreo (nivel y pluviométrica), sin que sea posible garantizar la conectividad estable necesaria para la instalación de una alarma comunitaria en la zona de ocupación.

En consecuencia, mientras la UMGRD avanza en la gestión de soluciones de comunicación, se instalarán las estaciones de monitoreo en la parte alta, las cuales funcionarán como fuente de alerta temprana para el SATC La Planta, ubicado aguas abajo.

Actualmente, la comunidad de San Fernando no se considera un SATC, ya que no ha sido posible completar la instrumentación necesaria para su consolidación. No obstante, el proceso social con la comunidad fue finalizado y se mantiene un seguimiento permanente, que incluye comunicación constante vía WhatsApp y telefónica, así como la realización mensual de talleres sobre temáticas relacionadas con la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD), a cargo del equipo del proyecto SIATA. Estas acciones se mantendrán mientras se gestiona una solución a la problemática de telecomunicaciones que ha limitado la implementación técnica.



Figura 375: Proceso formativo SATC San Fernando.

SATC Cristo Rey, Caldas

En marzo de 2024 inició la implementación del Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC) en el barrio Cristo Rey, destacándose por la activa y constante participación de sus habitantes. El proceso también contó con la valiosa vinculación de residentes del barrio vecino Barrios Unidos, quienes enriquecieron los espacios formativos con sus aportes y experiencias.

Gracias al compromiso y responsabilidad de la comunidad, fue posible desarrollar en su totalidad las cuatro fases de la metodología, logrando que al finalizar el proceso contaran con capacidades instaladas para interpretar información técnica, activar protocolos y tomar decisiones oportunas ante posibles situaciones de emergencia.

Las actividades formativas registraron una participación promedio de 9 personas por sesión, según los registros de asistencia, sin incluir el simulacro. En este ejercicio final, 29 participantes evacuaron hacia los puntos de encuentro establecidos, poniendo en práctica los conocimientos adquiridos durante el proceso.



Figura 376: Proceso formativo SATC Cristo Rey.

SATC La Planta, Caldas

Durante el segundo semestre de 2024, se inició el proceso formativo con la comunidad de La Planta, perteneciente a la Junta de Acción Comunal Unidos por La Valeria, la cual mantiene una relación directa con la quebrada La Valeria. Esta comunidad se beneficiará con la instalación del sensor de nivel en el SATC San Fernando, ubicado aguas arriba, fortaleciendo así la implementación de la cadena de llamadas en ambos SATC.

Cada jornada de formación contó con la participación de aproximadamente 12 personas, reflejando el compromiso de la comunidad con el fortalecimiento de sus capacidades en gestión del riesgo. El 3 de octubre se llevó a cabo el taller de socialización, primer encuentro en el que la comunidad evidenció gran interés y disposición para involucrarse activamente en el proceso. En esta actividad participaron entre 10 y 12 personas, junto con representantes de la supervisión del AMVA y la UMGRD.

El proceso ha avanzado satisfactoriamente en todas las fases metodológicas, consolidando la capacidad instalada en el territorio Figura 377. Actualmente, la comunidad se encuentra en la fase 4, correspondiente al seguimiento, y se espera que mantenga su compromiso para garantizar la continuidad y fortalecimiento del proceso.



Figura 377: Proceso formativo SATC La Planta.

SATC El Cairo, Bello

En septiembre de 2024, se instaló oficialmente el SATC El Cairo en el municipio de Bello, comunidad ubicada en las cercanías de la quebrada La García. Históricamente, esta cuenca ha generado afectaciones significativas en los barrios aledaños, incluyendo pérdidas humanas. En articulación con la Oficina de Gestión del Riesgo, organismos de socorro y la comunidad, se consolidó un compromiso conjunto para la implementación y apropiación del SATC en el territorio.

Como parte del proceso, se instalaron dos (2) alarmas que brindan cobertura a la mayor parte de la población expuesta, así como un sensor de nivel en la quebrada El Barro, afluente de importancia para la quebrada La García, lo que permitió ampliar el alcance del monitoreo.

La formación comunitaria culminó en la fase 4 Figura 378, con la realización de siete (7) talleres que hacen parte de la fase 2 de desarrollo, además de la simulación y un simulacro de evacuación por inundación en coordinación con los organismos de socorro del municipio. Este ejercicio se realizó con el propósito de evaluar la capacidad instalada del SATC en los habitantes del sector. La participación en los encuentros formativos fue de 12 personas aproximadamente, quienes asistieron de manera juiciosa y comprometida. Actualmente, el seguimiento se mantiene a través de comunicación por WhatsApp y llamadas telefónicas, dado que la comunidad no ha solicitado nuevos espacios formativos.



Figura 378: Proceso formativo en SATC El Cairo.

SATC El Vallano, Envigado

El proceso de implementación de este SATC inició con el reconocimiento del territorio y de la quebrada La Ayurá, evaluando tanto su viabilidad técnica como social para el desarrollo del proyecto. Posteriormente, se dio inicio a la fase de formación, siguiendo la metodología definida por la Estrategia Social. Actualmente, el SATC se encuentra en la fase 4, correspondiente al seguimiento y fortalecimiento de capacidades. En las diferentes sesiones participaron 15 personas, quienes demostraron un alto compromiso con las dinámicas de su territorio y una activa articulación con los principios de la Gestión del Riesgo de Desastres.

Asimismo, se logró articular esfuerzos con la Caja de Compensación Familiar Comfenalco, administradora del Parque Ecológico El Salado, y con la Administración del Acueducto Veredal Cristal Peñazúl, facilitando la participación de los habitantes en los talleres de formación. Esta coordinación también permitió establecer acciones conjuntas de preparación y respuesta ante posibles emergencias, como inundaciones o avenidas torrenciales, fortaleciendo así la capacidad comunitaria de prevención y reacción.



Figura 379: Proceso formativo en SATC El Vallano.

SATC 19 de Abril, Itagüí

El proceso social desarrollado en esta comunidad permitió fortalecer las capacidades locales en gestión del riesgo de desastres, a través de actividades formativas y participativas implementadas en las distintas fases de la metodología. En promedio, cada sesión contó con la asistencia de 21 personas, según los registros diligenciados en cada encuentro.

Durante la jornada de simulación y simulacro, se estima que alrededor de 120 personas, entre niños, jóvenes, adultos y adultos mayores, evacuaron hacia los puntos de encuentro previamente establecidos, con datos obtenidos de los dos lugares de concentración. Debido al carácter abierto de esta actividad, no fue posible contar con un registro cerrado de asistencia.

En conjunto, el proceso evidenció un alto nivel de apropiación comunitaria y una articulación efectiva con actores clave del territorio, lo que contribuyó al fortalecimiento de la preparación y la capacidad de respuesta ante emergencias asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos.

Figuras/Social/SATC 19 de Abril, Itag.jpg

Figura 380: Proceso social SATC 19 de Abril, Itagüí.

SATC El Pesebre, Itagüí

Se realizó un recorrido junto con la Oficina de Gestión del Riesgo en el sector El Pesebre, asociado a la quebrada El Sesteadero. Durante la visita se confirmó la viabilidad técnica para la instalación de los instrumentos; sin embargo, en el aspecto social quedó pendiente consolidar el compromiso y la participación activa de la comunidad.

Posteriormente, se dio inicio al proceso de formación (Figura 381), desarrollando los talleres correspondientes a la fase 2. No obstante, la respuesta comunitaria no fue favorable. La Oficina de Gestión del Riesgo intentó establecer contacto con los líderes locales, pero no obtuvo una respuesta positiva. Por esta razón, el proceso quedó suspendido hasta que la administración logre despertar mayor interés en la comunidad frente a los temas de gestión del riesgo, en especial sobre el Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC).



Figura 381: Talleres con la comunidad de El Pesebre, Itagüí.

Tabla 62: Resumen de los SATC implementados.

Nombre SATC	Municipio	Descripción del proceso
Alejandro Echavarría	Medellín	Proceso desarrollado a partir de solicitud del Tribunal Contencioso, combinando conocimiento técnico y saber comunitario. Incluyó instalación de sensores, talleres, cartografía participativa, protocolo de emergencia y simulacro.
San Fernando	Caldas	Ubicado en la parte alta de La Valeria. Retos de conectividad limitaron la instalación de la alarma comunitaria. Se instaló monitoreo hidrometeorológico y se articula con SATC La Planta. Actualmente en fase de seguimiento.
Cristo Rey	Caldas	Participación activa de la comunidad y barrio Barrios Unidos. Implementadas las cuatro fases metodológicas, fortaleciendo capacidades locales ante riesgo de inundación o avenida torrencial.
La Planta	Caldas	Vinculada a la JAC Unidos por La Valeria. Beneficiada por monitoreo aguas arriba desde SATC San Fernando. Culminó formación y se encuentra en seguimiento.

Continúa en la siguiente página

Continuación de la Tabla 62

Nombre SATC	Municipio	Descripción del proceso
El Cairo	Bello	Comunidad cercana a la Q. La García con histórico de afectaciones graves. Instaladas dos alarmas y un sensor en Q. El Barro. Finalizó con simulacro y seguimiento remoto.
El Vallano	Envigado	Evaluación técnica y social de Q. La Ayurá. Formación articulada con Comfenalco y Acueducto Veredal. Actualmente en fase de seguimiento.
19 de Abril	Itagüí	Talleres de socialización, imaginarios, monitoreo ambiental, rutas de evacuación, cadena de llamadas, instalación de alarma y simulacro comunitario. Seguimiento continuo.
El Pesebre	Itagüí	Evaluación técnica positiva pero baja participación comunitaria. Proceso suspendido hasta fortalecer interés local.

Actividades realizadas en el Distrito Especial de Medellín - Convenio DAGRD

Durante el Convenio Interadministrativo No. 277 de 2024, se implementaron diez (10) nuevos Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC) en el Distrito de Medellín, siguiendo la metodología social del SIATA. El proceso incluyó: diagnóstico técnico y social; talleres de formación en gestión del riesgo, monitoreo y protocolos de emergencia; y simulacros para evaluar capacidades y funcionamiento. La adaptación a las particularidades de cada territorio, junto con la participación activa de las comunidades, permitió consolidar capacidades locales y fortalecer la articulación institucional. Como resultado, en la primera temporada de lluvias de 2025 no se registraron pérdidas humanas en las zonas intervenidas, reafirmando el propósito central del SIATA: salvar vidas. Para más detalles, consultar el informe final del convenio.

Para revisar todos los detalles de los procesos realizados, consultar el siguiente enlace: Detalle de procesos SATC – Convenio 277 de 2024.



Figura 382: Evidencias de encuentros de SATC, convenio AMVA-DAGRD.

Estado actual de los SATC

Durante la vigencia 016-2024, se dio continuidad al seguimiento de los SATC implementados en periodos anteriores, con el objetivo de fortalecer de manera sostenida las capacidades previamente instaladas en las comunidades. La mayoría de estos sistemas se encuentran actualmente en la Fase 4, correspondiente a la etapa de seguimiento, lo que implicó la ejecución de diversas acciones orientadas a su sostenimiento y apropiación.

Entre las actividades realizadas, se destacan las jornadas puerta a puerta, dirigidas a mantener informada a la población ubicada en el área de influencia de cada SATC sobre aspectos clave como los puntos de encuentro, el sonido característico de la alarma y la importancia del cuidado y protección de los sensores instalados. En el marco de estas visitas, se efectuaron pruebas de sonido de las sirenas con la participación activa de la comunidad.

Asimismo, se mantuvo comunicación permanente con los líderes de las cadenas de llamadas, actualizando la información de contacto y reforzando su papel esencial ante eventos de precipitación extrema. Como complemento, se desarrollaron talleres sobre temáticas propias del proyecto SIATA, orientados a fortalecer el conocimiento técnico y la apropiación social del sistema por parte de las comunidades.

Al cierre del contrato 016-2024, se cuenta con un total de cincuenta y seis (56) SATC, en su mayoría en Fase 4; es decir, en funcionamiento y con el acompañamiento respectivo por parte del equipo Social. Cabe resaltar que los SATC implementados de manera prioritaria por situaciones de emergencia, si bien fueron desarrollados bajo una metodología *express*, requieren continuar reforzando algunas temáticas para consolidar las capacidades de los habitantes.

En la Figura 383 se presenta la distribución de los SATC existentes por municipio al finalizar el contrato 016-2024.



Figura 383: SATC por municipio al finalizar el contrato 016-2024.

Durante la vigencia, se instauraron veinte (20) nuevos SATC que se especifican en la Tabla 63. Vale resaltar que cuatro (4) de estos veinte (20) fueron en el marco del apoyo a las emergencias ocurridas en la primera temporada de lluvias del 2025.

Tabla 63: SATC creados en el contrato 016-2024 por municipio.

Municipio	Nuevos SATC
Caldas	2
La Estrella	0
Sabaneta	2
Itagüí	1
Envigado	1
Medellín	13
Bello	1
Copacabana	0
Girardota	0
Barbosa	0

Apoyo a las emergencias ocurridas en el primer semestre de 2025

Durante el primer semestre de 2025, en el marco de una temporada de lluvias particularmente compleja, que provocó múltiples emergencias en el Valle de Aburrá, el proyecto SIATA, a través de su componente de

Apropiación Social del Conocimiento (ASC), brindó acompañamiento técnico y educativo a las Unidades Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (UMGRD). Este acompañamiento incluyó el desarrollo de talleres sobre el uso del geoportal y la socialización de la estrategia de los SATC, así como el apoyo a los profesionales en visitas a comunidades de territorios priorizados por estos entes.

Las acciones contemplaron recorridos de campo para evaluar la viabilidad de implementar Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC) de emergencia en zonas afectadas de municipios como Copacabana, Bello, Sabaneta y el Distrito de Medellín.

Esta fue la primera vez en la historia del territorio y del proyecto que se establecieron SATC como respuesta directa a una emergencia, rompiendo con la dinámica habitual en la que estos procesos, de carácter preventivo, se desarrollan en un periodo de hasta seis meses. La situación excepcional exigió adaptar la metodología tradicional para responder de manera ágil y efectiva a la urgencia que vivían las comunidades, garantizando la instalación de sistemas funcionales en tiempos significativamente reducidos.

La metodología aplicada, originalmente diseñada para puntos de monitoreo con proceso social establecido, se reestructuró en tres fases principales:

I. **Diagnóstico técnico y social:** recorridos conjuntos con autoridades locales y equipos interdisciplinarios de SIATA para identificar puntos de conexión de sensores y sirenas, así como actores clave y condiciones comunitarias para el funcionamiento del SATC.

II. **Fortalecimiento comunitario:** socialización del proyecto SIATA, construcción de cadenas de llamadas internas y externas, mapeo participativo de quebradas y zonas de riesgo, y divulgación de rutas de evacuación y puntos de encuentro.

III. **Preparación y práctica:** presentación del Geoportal Ciudadano como herramienta de monitoreo, simulaciones de comunicación entre comunidad y equipo operacional, y realización de simulacros de activación de sirenas y cadenas de llamadas, adaptados según las condiciones y tiempos de cada territorio.

Pese a las exigencias del contexto, el equipo ASC adaptó la metodología y su implementación con rigor y pertinencia, priorizando procesos ágiles pero participativos que permitieran garantizar la instalación y apropiación comunitaria de los SATC en plazos muy cortos. Adicionalmente, se entregaron herramientas digitales para fortalecer la toma de decisiones durante las contingencias, entre ellas el acceso a portales especializados que replicaban la información de las pantallas de monitoreo en estaciones de bomberos, integrando visualización en tiempo real de cámaras, sensores, mapas de susceptibilidad y datos del radar SIATA.

Esta experiencia, además de marcar un hito en la historia del proyecto, evidencia la capacidad de adaptación y respuesta del equipo técnico y social frente a escenarios de alta presión, estableciendo un precedente para futuras implementaciones de SATC en contextos de emergencia.

A continuación, se destacan los principales hitos en el marco de la instauración de *Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios por emergencia.*

Manzanillo, corregimiento de Altavista - Medellín

El SATC se implementó como respuesta a los eventos del 29 de abril, asociados a las quebradas Potrerita y La Guayabala, los cuales ocasionaron pérdidas humanas y materiales. Debido a la naturaleza de la emergencia, se aplicó la metodología previamente descrita para la instalación de SATC por contingencia. La comunidad evidenció una alta resiliencia y disposición inicial, lo que facilitó la identificación de liderazgos y la conformación de una cadena de llamadas operativa.



Uno de los principales retos fue redirigir las expectativas comunitarias —centradas en soluciones estructurales— hacia la comprensión del SATC como una herramienta de prevención y protección de la vida. Aunque la participación disminuyó con el paso del tiempo, se logró consolidar un núcleo comunitario capacitado y comprometido, que integró conocimientos técnicos y saberes territoriales, fortaleciendo así la pertinencia y apropiación del sistema.

En la Figura 384 se presenta evidencia del proceso desarrollado en esta comunidad.



Figura 384: Proceso social, SATC Manzanillo.

Palo Blanco, corregimiento de San Antonio de Prado - Medellín

El SATC se implementó como respuesta a la emergencia del 25 de abril, asociada a la quebrada La Chorrera, mediante una metodología abreviada desarrollada en dos encuentros, con una participación promedio de 49 personas. Pese al tiempo limitado, se logró una articulación ágil entre entidades y comunidad, que permitió instalar la infraestructura básica y construir de manera participativa la cadena de llamadas, las rutas de evacuación y la identificación de zonas seguras.

El simulacro con activación de sirena facilitó la puesta en práctica de respuestas coordinadas y transformó la percepción del riesgo en acciones concretas de autoprotección. No obstante, se identificaron desafíos como la dificultad para consolidar liderazgos y redes locales, así como una apropiación tecnológica inicial más demostrativa que operativa, lo que evidencia la necesidad de procesos formativos más profundos que fortalezcan el uso autónomo del sistema.

En la Figura 385 se presenta evidencia del proceso desarrollado en esta comunidad.



Figura 385: Proceso Social SATC Palo Blanco.

Vereda Las Brisas, Sector Capitanes y Playas Placer - Sabaneta

Los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC) se implementaron como respuesta a los eventos de inundación ocurridos el jueves 8 de mayo, siguiendo un proceso metodológico adaptado tanto a la situación de emergencia como a la disponibilidad de la comunidad. Las comunidades involucradas demostraron una notable resiliencia, evidenciada en su sólida organización y cohesión social, lo que facilitó la construcción participativa de la cadena de llamadas y el fortalecimiento de redes de autoprotección. La apropiación social del conocimiento y una percepción clara del riesgo impulsaron acciones colectivas de preparación, contribuyendo a la reducción de la vulnerabilidad en el territorio.

Durante el proceso formativo participaron activamente 30 personas, quienes mostraron un alto interés en el desarrollo de las actividades propuestas. Asimismo, se llevó a cabo, con la participación de la comunidad, la Unidad Municipal para la Gestión del Riesgo de Desastres (UMGRD) y el Cuerpo de Bomberos Voluntarios de Sabaneta, un taller de simulación y un simulacro de evacuación por inundación, en el que participaron aproximadamente 50 personas. Estas actividades fortalecieron las capacidades de respuesta comunitaria frente a eventos de inundación, fomentaron el trabajo articulado entre las instituciones y mejoraron los tiempos de reacción ante una posible emergencia.

De manera complementaria, en la vereda Playas Placer (parte alta) se reactivó el proceso de formación comunitaria mediante talleres orientados a socializar el proyecto SIATA, fortalecer el protocolo de emergencia y consolidar la cadena de llamadas interna y externa. También se abordó la temática de movimientos en masa, lo que promovió un compromiso activo de la comunidad para actuar de manera adecuada ante una emergencia y proteger la vida de sus habitantes.



Figura 386: Proceso social SATC en el sector Capitanes.

El Trapiche - Bello

En junio se inició el proceso para evaluar la viabilidad de implementar un SATC en el barrio El Trapiche y la vereda Los Espejos, con el acompañamiento de la Secretaría de Gestión del Riesgo de Desastres de Bello y los equipos de Hidrología y Social del SIATA. Durante las visitas técnicas se identificaron puntos estratégicos para la instalación de instrumentos de monitoreo en la quebrada El Barro y en un nacimiento de agua, con potencial para fortalecer las capacidades de alerta temprana en la zona.

No obstante, el principal desafío fue la falta de contacto directo con la comunidad expuesta, lo que impidió dar inicio a la fase de validación social y al desarrollo del componente formativo. Esta condición resulta esencial para garantizar la participación activa de la comunidad y la sostenibilidad del SATC en el tiempo, ya que la apropiación social es un pilar fundamental para la efectividad del sistema.

Vereda El Zarzal - Copacabana

En la vereda El Zarzal, recientemente afectada por un movimiento en masa, se realizó una visita técnica con el objetivo de evaluar la viabilidad técnica y social para la instalación de un Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC) por emergencia. Tras el recorrido y en concertación con el equipo de Hidrología, se determinó que la instalación de un SATC no era viable, dado que el riesgo identificado no está directamente asociado a eventos de inundación.

Como alternativa, se propuso la instalación de una cámara orientada hacia la quebrada El Limonar y un sensor de nivel para registrar variaciones en el caudal, incluyendo cambios en el color y nivel del agua, que podrían advertir sobre posibles obstrucciones o afectaciones derivadas de deslizamientos.

Adicionalmente, se recomendó el desarrollo de un enlace web que integre la información proveniente de la cámara, el sensor de nivel, el radar meteorológico y el pluviómetro, con el fin de facilitar un monitoreo integral del sector. Este recurso estaría disponible para la Unidad Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres (UMGRD) y el Cuerpo de Bomberos, fortaleciendo su capacidad de respuesta ante eventuales emergencias.

Piloto SATC por incendios de interfaz

El proceso adelantado con los habitantes del Plan de la Laguna, en el cerro Quitasol del municipio de Bello, marcó un hito significativo en el proyecto SIATA ya que se logró identificar la amenaza relacionada con los incendios forestales y de zonas de interfaz urbano-forestal en esta zona, que permitió a partir de una estrategia metodológica realizar la implementación de un piloto Sistema de Alerta Temprana Comunitario (SATC) por esta temática en el Valle de Aburrá. En este proceso se evaluó esta amenaza con las comunidades ubicadas en el perímetro urbano cercano a áreas con cobertura vegetal, como también la construcción conjunta con la comunidad de estrategias de cuidado y apropiación del territorio para mitigar dichos riesgos. Se determinó que en el territorio no es posible aún consolidar un SATC dada la falta de certeza en la capacidad de brindar alertas tempranas debido a la complejidad de esta amenaza. Esto en parte se debe a la falta de conocimiento e investigación previa en el Valle de Aburrá, relacionada principalmente con el comportamiento de incendios forestales y de las variables asociadas, sistemas de pronóstico, la automatización de alertas, además de la dificultad de instrumentalizar adecuadamente la zona. Bajo estas condiciones, se le informó a la comunidad de cada una de las dificultades por lo que, se estableció con ellos el acompañamiento bajo la estrategia conexiones territoriales. Desde el equipo técnico, está en proceso de investigación y definición de una metodología para la mejora de la información de susceptibilidad a incendios forestales, la emisión de alertas tempranas y la aplicación de sistemas de pronóstico para esta amenaza con el fin de aumentar el conocimiento de esta amenaza para mejorar la anticipación de los organismos de socorro y de las comunidades. Uno de los principales logros fue la activa participación de la comunidad en todas las etapas del proceso, con una asistencia de 17 personas por los cinco talleres: desde el reconocimiento del territorio y la evaluación del riesgo, hasta la construcción colectiva de estrategias de cuidado y apropiación del entorno natural. Los habitantes valoraron especialmente el espacio de formación, el diálogo abierto con las instituciones y la posibilidad de aportar desde su conocimiento del territorio. Estas acciones fortalecieron el sentido de corresponsabilidad frente a la gestión del riesgo y reforzaron los lazos comunitarios. Actualmente, la comunidad se encuentra a la espera de que se avance en la implementación de la instrumentación tecnológica necesaria para recibir alertas tempranas en caso de incendios forestales. Esta herramienta sería clave para actuar de manera oportuna y efectiva ante una eventual emergencia. Por último, se resaltó la relevancia de la articulación territorial entre el proyecto SIATA (Área Metropolitana del Valle de Aburrá), la Oficina de Gestión del Riesgo de Desastres de Bello y el Cuerpo de Bomberos Voluntarios lo que permitió consolidar un enfoque colaborativo para la evaluación, implementación y acompañamiento comunitario.Figura 387



Figura 387: Piloto SATC Plan de la Laguna

Evento Anual Intercambio de Experiencias VII – 2024

En continuidad con el objetivo de promover espacios de participación y fortalecimiento del conocimiento en los procesos comunitarios asociados a los SATC para la gestión del riesgo de desastres, se realizó el VII Intercambio de Experiencias Figura 388.

Este encuentro tuvo como propósito resaltar la importancia del intercambio de saberes entre comunidades y gestores del riesgo, mediante conversatorios y actividades participativas que facilitaron el diálogo sobre distintas perspectivas y enfoques en las experiencias científicas y sociales. En el siguiente enlace se puede ver el informe final de este evento y las evidencias información correspondiente al VII Intercambio de Experiencias con comunidades SATC y gestores del riesgo de desastres.



Figura 388: VII Intercambio de Experiencias

El evento se llevó a cabo el 9 de noviembre y contó con la asistencia de 239 personas, entre ellas representantes de 27 comunidades SATC, Unidades Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (UMGRD) y organismos de socorro —Cuerpo de Bomberos, Cruz Roja Colombiana y Defensa Civil— de los nueve municipios y el Distrito Especial de Medellín que conforman el Valle de Aburrá.

La jornada concluyó satisfactoriamente, cumpliendo los objetivos propuestos y generando un espacio de alto valor para el intercambio de experiencias. Los participantes destacaron especialmente los momentos culturales, en los que la ciencia se presentó de manera cercana y cotidiana.

El Intercambio de Experiencias se consolida así como un escenario clave para reconocer y comprender las realidades de los distintos contextos del Valle de Aburrá, integrando ciencia, tecnología e investigación en el abordaje de la gestión del riesgo en el territorio.

WP3.3.3. Participar de diferentes espacios técnicos y de gobernanza

En el periodo de ejecución de la vigencia 016-2024, esto es, entre el 1 de febrero de 2024 y el 7 de julio de 2025, el proyecto SIATA participó en diferentes espacios técnicos y de gobernanza. En la Tabla 64, se resaltan algunos de los más representativos que tuvieron lugar en el 2024.

Tabla 64: Espacios técnicos y de gobernanza en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

Mes	Número	Espacio(s)
02-2024	1	Dirección de Planificación, Gestión y Ejecución de Proyectos de RAP-E Región Central
03-2024	1	Grupo EPM
04-2024	4	Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, el Consejo Distrital Extendido Extraordinario de Gestión del Riesgo, la Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Cobertura Vegetal, y Gestión del Drenaje Urbano

Continúa en la siguiente página

Tabla 64 – Continuación de la tabla anterior.

Mes	Número	Espacio(s)
05-2024	5	Comité de Manejo del DAGRD, CITRA-Movilidad, Gestión del Drenaje Urbano, Secretaría de Gobierno de Copacabana, y Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
06-2024	5	Departamento de Caldas, Ministerio de Minas, Servicio Geológico Colombiano, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal, Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Bello
07-2024	3	Comité Distrital de Manejo de Desastres, Junta de Acción Local de la comuna 4 de Itagüí, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
08-2024	3	Gestión del Drenaje Urbano, Cruz Roja colombiana, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
09-2024	4	Parque de la Conservación, DAGRD, CCP Comuna 8, Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA
10-2024	1	Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA
11-2024	2	Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
12-2024	1	Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA

WP3.3.4. Gestionar las estrategias y redes con grupos de interés para la identificación de potencialidades y la implementación de acciones

Conexiones Territoriales

El componente de Apropiación Social del Conocimiento del proyecto SIATA pone especial énfasis en democratizar la ciencia y fortalecer su apropiación por parte de la ciudadanía. Al ser SIATA un proyecto orientado a la gestión del riesgo de desastres, se busca también mejorar la percepción del riesgo entre los habitantes del Valle de Aburrá, a través de procesos de sensibilización y de profundización en los riesgos y condiciones hidrometeorológicas que enfrenta la región. Reconocer el territorio que se habita y comprender que las acciones individuales tienen un impacto directo sobre el ambiente son principios que motivaron al equipo Social a ampliar su alcance territorial.

En este contexto, surge la estrategia Conexiones Territoriales, la cual responde al interés de la ciudadanía no solo por conocer el proyecto, sino también por profundizar en temas como el monitoreo ambiental, la gestión del riesgo de desastres, el cambio climático y la calidad del aire, entre otros. Las solicitudes para desarrollar estos espacios provienen de personas que, en muchos casos, no habitan zonas de alto riesgo ni están vinculadas a los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios, sino que expresan preocupación e interés genuino por las problemáticas ambientales de su territorio y la necesidad de contar con información veraz y oportuna. En el siguiente enlace se puede ampliar información sobre esta estrategia: Conexiones



Territoriales.

Este interés no se limita a la ciudadanía; también proviene de organizaciones y entidades que buscan fortalecer sus capacidades para prevenir y atender amenazas en sus territorios. Además, el programa ha permitido formar embajadores de la gestión del riesgo en distintos contextos, logrando que el conocimiento y la información generados por el proyecto se multipliquen y lleguen a más personas.

Durante el presente contrato se desarrollaron **55 talleres formativos** con 19 grupos, en los que se abordaron temáticas diversas de interés para cada público.

Aquí se pueden consultar evidencias de las actividades ejecutadas para Conexiones Territoriales.

Modelado y recursos didácticos en Teledetección

Durante la ejecución del contrato CCT016-2024, el equipo de Teledetección desarrolló diversas actividades vinculadas con la fabricación aditiva, que incluyeron el diseño y modelado 3D mediante el software especializado *Fusion 360*, así como la impresión 3D de múltiples piezas utilizando la impresora Creality disponible en el área. Estas acciones se orientaron a fortalecer las capacidades técnicas internas y a brindar apoyo a los equipos de Educación e Ingeniería Sísmica del proyecto SIATA.

En articulación con el equipo de Educación, se diseñaron e imprimieron modelos tridimensionales con fines pedagógicos, tales como un rompecabezas en forma de nube con rotulado en braille y una nube tipo regadera. Los modelos se elaboraron en *Fusion 360* y se prototiparon mediante impresión 3D utilizando materiales como TPU (poliuretano termoplástico), caracterizado por su flexibilidad y resistencia al impacto, y PLA (ácido poliláctico), de uso extendido en prototipado rápido por su facilidad de impresión.

Por solicitud del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA), se fabricaron modelos topográficos representativos del Valle de Aburrá en dos escalas: gran formato (aproximadamente 1,20 m × 1,20 m) y formato reducido (20 cm × 20 cm). Las piezas se imprimieron por secciones y se ensamblaron como un rompecabezas, incorporando procesos complementarios de pegado, resane, lijado y pintura, para asegurar un acabado adecuado a su uso educativo y divulgativo.

En colaboración con el equipo de Ingeniería Sísmica, se modelaron e imprimieron 21 piezas que representan las placas tectónicas del planeta, destacando los relieves oceánicos y continentales. Asimismo, se elaboró un modelo esférico del globo terráqueo dividido en dos mitades, que fue ensamblado, resanado y pulido para garantizar una presentación homogénea.

Estas acciones no sólo fortalecieron las capacidades de modelado e impresión 3D dentro del proyecto, sino que también generaron recursos didácticos y científicos que potencian la labor pedagógica y de divulgación técnica de SIATA, contribuyendo a la apropiación social del conocimiento en temáticas ambientales y de gestión del riesgo.

WP3.3.5. Fortalecer los procesos con los gestores de riesgo, organismos de socorro, UMGRD y público de interés

El equipo Operacional se encarga de realizar un seguimiento continuo de las condiciones hidrometeorológicas en el Valle de Aburrá las 24 horas del día, los 7 días de la semana. Este seguimiento incluye la generación y envío de alertas tempranas por vía telefónica o radioteléfono a los organismos gestores del riesgo. Estas alertas se emiten en respuesta a eventos de precipitación que provocan aumentos significativos en el nivel de las corrientes hídricas monitoreadas, así como en el caso de la detección de columnas



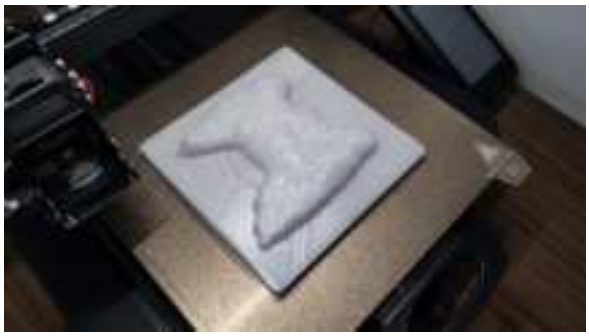


Figura 389: Rompecabezas nube braille impresa en material TPU.



Figura 390: Impresión 3D a 3 colores con topografía del territorio metropolitano.

de humo o puntos de calor de gran relevancia, o en apoyo a labores realizadas por organismos a lo largo del territorio.

Además, el equipo envía alertas tempranas a las comunidades asociadas a los Sistemas de Alerta Temprana Comunitaria (SATC) en eventos que, debido a sus características y la vulnerabilidad de estas zonas, requieren una comunicación inmediata con los líderes sociales. Esto se hace especialmente necesario en casos de precipitaciones intensas y el aumento significativo de los niveles en las quebradas que se monitorean, las cuales pueden desencadenar la activación del protocolo de activación de las alarmas comunitarias.

El seguimiento de las condiciones hidrometeorológicas en el Valle de Aburrá condujo a la realización de **ciento cincuenta y cinco (155) comunicaciones telefónicas** con organismos de gestión del riesgo y atención de desastres de los municipios del territorio en el 2024 y **ciento treinta y nueve (139)** en el 2025. En la Tabla 65 y Tabla 66 se presentan los resúmenes de estos llamados por tipo de alerta durante el CCT 016 de 2024:

Tabla 65: Resumen de llamados a organismos de gestión del riesgo del Valle de Aburrá en 2024.

Tipo de llamado	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
Aumentos de nivel	2	0	11	34	18	0	4	6	6	6	2	89
Incendios	18	21	6	2	3	4	6	5	1	0	0	66

Tabla 66: Resumen de llamados a organismos de gestión del riesgo del Valle de Aburrá en 2025.

Tipo de llamado	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Total
Aumentos de nivel	5	0	5	49	31	31	1	122
Incendios	10	0	0	0	0	0	7	17



Figura 391: Impresión gran formato del territorio metropolitano.

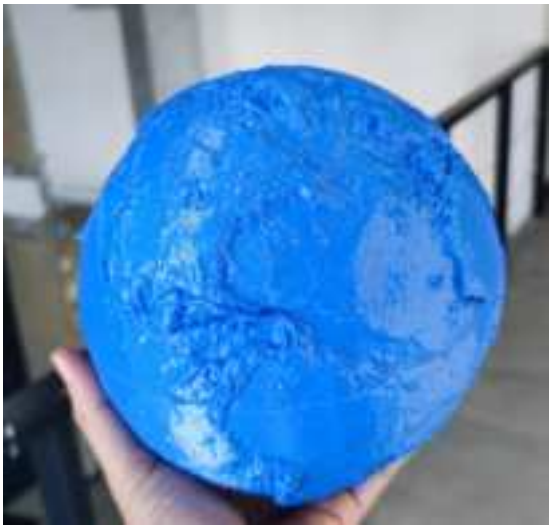


Figura 392: Mapamundi placas tectónicas.

En cuanto a las comunidades de los SATC, se realizaron docientos noventa y seis (296) interacciones con líderes, y cincuenta y ocho (58) activaciones de alarmas en el 2024 (Tabla 67). En cuanto al año 2025, hasta el mes de julio, se realizaron cuatrocientos ochenta y dos (482) interacciones con líderes, y ciento cuarenta y seis (146) activaciones de alarmas (Tabla 68)

Tabla 67: Resumen de llamados a comunidades de los SATC y activaciones de alarma en 2024.

Tipo de llamado	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
A líderes comunitarios	7	1	11	92	94	2	4	25	21	24	16	296
Alarmas activadas SATC	1	0	0	22	18	0	0	3	2	6	6	58

Tabla 68: Resumen de llamados a comunidades de los SATC y activaciones de alarma en 2025.

Tipo de llamado	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Total
A líderes comunitarios	10	0	21	190	111	143	7	482
Alarmas activadas SATC	0	0	5	61	29	31	20	146

En la Tabla 69 se pueden visualizar las activaciones de alarmas realizadas en el CCT 016 de 2024, con información de la fecha, el SATC asociado, el municipio, el afluente y la cantidad de activaciones realizadas.

Tabla 69: Resumen de activaciones de alarmas comunitarias.

Fecha	SATC	Municipio	Afluente	Activaciones
2024-02-03	La Clara	Caldas	Q. La Clara y Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-04	La Clara	Caldas	Q. La Clara y Río Aburrá - Medellín	5
2024-05-04	La Inmaculada	La Estrella	Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-04	La Primavera	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-04	La Isaza	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-04	Hatillo - Santa Marta	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-07	El Plebiscito	Sabaneta	Q. San Alejo y Q. La Sabanetica	1
2024-05-15	Hatillo - Santa Marta	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-16	Hatillo - Santa Marta	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-16	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2024-05-16	La Isaza	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-05-21	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2024-05-23	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	1
2024-05-23	Hato Viejo	Bello	Q. La Avelina	2
2024-05-23	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	2
2024-05-23	Aures - El Chorro	Medellín	Q. La Malpaso	2
2024-06-02	Hato Viejo	Bello	Q. La Avelina	1
2024-06-09	La Primavera	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-06-09	La Isaza	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-06-09	Hatillo - Santa Marta	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-06-09	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	1
2024-06-09	Aures - El Chispero	Medellín	Q. La Malpaso	1
2024-06-09	José Antonio Galán	Bello	Q. La Madera	1
2024-06-16	La Isaza	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-06-19	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2024-06-22	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2024-06-25	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2024-06-25	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	3
2024-06-25	Potrerito	Bello	Q. La Ortega	2
2024-06-25	La Clara	Caldas	Q. La Clara y Río Aburrá - Medellín	1
2024-06-30	La Isaza	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1
2024-09-01	La Isaza	Barbosa	Río Aburrá - Medellín	1

Continúa en la siguiente página

Tabla 69 – continuación

Fecha	SATC	Municipio	Afluente	Activaciones
2024-09-03	La Iguana	Medellín	Río Aburrá - Medellín	2
2024-10-16	EL Plebiscito	Sabaneta	Q. La Sabanetica	1
2024-10-16	La Iguana	Medellín	Q. La Iguaná	1
2024-11-9	La Iguana	Medellín	Q. La Iguaná	2
2024-11-18	Aures - El Chispero	Medellín	Q. Malpaso	2
2024-11-19	La Iguana	Medellín	Q. La Iguaná	1
2024-11-20	Isaza	Barbosa	R. Medellín	1
2024-12-25	Espíritu Santo	Bello	Q. El Hato	3
2024-12-26	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	3
2024-12-26	Aures - El Chispero	Medellín	Q. Mal Paso	1
2025-02-16	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	1
2025-02-28	El Plebiscito	Sabaneta	Q. La Sabanetica	1
2025-03-17	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	3
2025-03-17	Olaya Herrera 1	Medellín	Q. La Iguaná	1
2025-03-26	El Plebiscito	Sabaneta	Q. La Sabanetica	1
2025-04-04	Olaya Herrera 1	Medellín	Q. La Iguaná	2
2025-04-04	Nueva Villa de La Iguana	Medellín	Q. La Iguaná	1
2025-04-04	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2025-04-04	Santa Rita	Medellín	Q. Doña María	1
2025-04-07	Santa Lucia	Medellín	Q. Santa Elena	1
2025-04-09	Espíritu Santo	Bello	Q. El Hato	2
2025-04-09	Hato Viejo	Bello	Q. La Avelina	3
2025-04-09	El Cairo	Bello	Q. La García	1
2025-04-09	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	3
2025-04-09	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2025-04-09	Potrerito	Bello	Q. La Ortega	1
2025-04-10	Las Playitas	Medellín	Q. La Picacha	1
2025-04-10	Guanteros	Medellín	Q. La Picacha	1
2025-04-10	La Clara	Caldas	R. Medellín	1
2025-04-10	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-11	La Clara	Caldas	R. Medellín	2
2025-04-11	Primavera	Barbosa	R. Medellín	1

Continúa en la siguiente página

Tabla 69 – continuación

Fecha	SATC	Municipio	Afluente	Activaciones
2025-04-11	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-11	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-24	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	2
2025-04-24	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-24	El Pedrero	La Estrella	Q. La Cañuela	1
2025-04-24	La Inmaculada	La Estrella	R. Medellín	1
2025-04-25	Santa Rita	Medellín	Q. Doña María	4
2025-04-25	19 de Abril	Itagüi	Q. Doña María	1
2025-04-25	Salado - Playas	Medellín	Q. Doña María	2
2025-04-25	Salado - Paraíso	Medellín	Q. Doña María	2
2025-04-25	Villa Lia	Itagüi	Q. Doña María	2
2025-04-25	Las Playitas	Medellín	Q. La Picacha	2
2025-04-25	Guanteros	Medellín	Q. La Picacha	1
2025-04-25	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-25	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-27	Santa Rita	Medellín	Q. Doña María	2
2025-04-28	Santa Rita	Medellín	Q. Doña María	3
2025-04-28	19 de Abril	Itagüi	Q. Doña María	1
2025-04-28	Guanteros	Medellín	Q. La Picacha	1
2025-04-28	Las Playitas	Medellín	Q. La Picacha	1
2025-04-28	Salado - Paraíso	Medellín	Q. Doña María	1
2025-04-28	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-29	Guanteros	Medellín	Q. La Picacha	1
2025-04-29	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	2
2025-04-29	Primavera	Barbosa	R. Medellín	1
2025-04-29	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	1
2025-05-05	Villa Lia	Itagüi	Q. Doña María	1
2025-05-05	Primavera	Barbosa	R. Medellín	2
2025-05-05	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	1
2025-05-05	Kennedy	Medellín	Q. Cantera Norte	1
2025-05-05	El Cairo	Bello	Q. La García	1
2025-05-05	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	2

Continúa en la siguiente página

Tabla 69 – continuación

Fecha	SATC	Municipio	Afluente	Activaciones
2025-05-05	Hato Viejo	Bello	Q. La Avelina	3
2025-05-06	Primavera	Barbosa	R. Medellín	1
2025-05-06	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	2
2025-05-06	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	1
2025-05-06	Colinas de Enciso	Medellín	Q. La Aguadita	1
2025-05-08	Plebiscito	Sabaneta	Q. La Sabanetica	2
2025-05-08	Playas Placer	Sabaneta	Q. La Doctora	1
2025-05-08	Palo Blanco	Medellín	Q. La Chorrera	1
2025-05-08	Salado - Playas	Medellín	Q. Doña María	1
2025-05-10	Salado - Paraíso	Medellín	Q. Doña María	1
2025-05-17	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	2
2025-05-19	Guanteros	Medellín	Q. La Picacha	2
2025-05-19	Las Playitas	Medellín	Q. La Picacha	2
2025-05-19	El Pesebre	Medellín	Q. La Iguaná	1
2025-05-19	Olaya Herrera 1	Medellín	Q. La Iguaná	1
2025-05-19	El Hoyo	Medellín	Q. La Picacha	1
2025-06-13	Manzanillo Parte Alta	Medellín	Q. Potrerita	2
2025-06-13	La Asunción	Copacabana	R. Medellín	4
2025-06-13	Guadalajara	Copacabana	R. Medellín	2
2025-06-13	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	5
2025-06-13	Primavera	Barbosa	R. Medellín	1
2025-06-13	La Isaza	Barbosa	R. Medellín	2
2025-06-23	Santa Marta	Barbosa	R. Medellín	1
2025-06-23	El Cafetal	Bello	Q. La Loca	3

En el siguiente enlace Bitácora de interacciones se encuentra información más detallada sobre estos llamados y activaciones de alarma.

Acciones ejecutadas para mantener la comunicación con las UMGRD

Para fortalecer la comunicación y el relacionamiento con las UMGRD, se desarrollaron diversas acciones, entre las que se destacan:

- **Envío periódico de pronóstico meteorológico:** tres veces por semana (lunes, miércoles y viernes) vía WhatsApp, con el fin de mantener informados a los funcionarios sobre las condiciones atmosféricas y facilitar su capacidad de respuesta ante posibles eventualidades.
- **Visitas presenciales:** encuentros directos con los equipos de las UMGRD para atender solicitudes puntuales, brindar acompañamiento técnico en gestiones específicas y coordinar talleres formativos para funcionarios y otras dependencias municipales.
- **Oferta de portafolio temático:** a cada unidad se presentó un conjunto de temas para que priorizaran según su contexto e intereses, fomentando la apropiación del conocimiento técnico y su posible réplica en espacios institucionales y comunitarios.

Los temas ofrecidos en el portafolio de talleres fueron:

- Socialización del proyecto SIATA
- Geoportal Ciudadano
- Calidad del aire
- Monitoreo ambiental
- Salud mental en la gestión del riesgo
- Cambio climático
- Descargas eléctricas
- Uso de drones y teledetección
- Movimientos en masa
- Riesgo sísmico
- Humedad del suelo

Interacciones realizadas por municipio

En el marco de esta articulación, se llevaron a cabo talleres y acciones de acompañamiento técnico en los municipios del Valle de Aburrá y el Distrito de Medellín, con el propósito de fortalecer las capacidades locales en gestión del riesgo de desastres y en el uso de las herramientas tecnológicas desarrolladas por el proyecto SIATA.

Las actividades fueron planificadas a partir de las necesidades expresadas por cada UMGRD y se ejecutaron de manera coordinada con sus equipos, lo que permitió asegurar la pertinencia de los contenidos y una mayor efectividad en los procesos de formación y apoyo técnico.

En total, durante la vigencia del Contrato 016, se realizaron 105 actividades con las UMGRD del Valle de Aburrá. En la Figura 393 se presenta un gráfico que ilustra la distribución de estas actividades por municipio, así como el porcentaje que representan frente al total.



Figura 393: Actividades realizadas con UMGRD por municipio en el marco del contrato 016

Barbosa

Se llevaron a cabo talleres sobre el uso del Geoportal Ciudadano, Cambio y Variabilidad Climática, Movimiento en Masa, y Riesgo Sísmico, además de visitas periódicas de seguimiento.

Copacabana

Se desarrollaron talleres sobre Calidad del Aire, Gestión de las Emociones, Salud Mental en la Gestión del Riesgo de Desastres, Manchas de Inundación, Movimiento en Masa y Geoportal Ciudadano. Estas actividades respondieron a solicitudes específicas de la UMGRD y permitieron abordar el riesgo desde una perspectiva técnica y psicosocial, promoviendo la apropiación del conocimiento en los distintos escenarios de amenaza del territorio.

Girardota

Las acciones estuvieron centradas en talleres de interpretación de los informes técnicos generados por SIATA y el uso del Geoportal Ciudadano, fortaleciendo la comprensión y el análisis de la información por parte del equipo municipal y promoviendo el uso activo de las herramientas de monitoreo.

Bello

En este municipio se ofrecieron talleres sobre Cambio y Variabilidad Climática, Modelación Hidráulica, Calidad del Aire, Gestión de las Emociones, Salud Mental, Manchas de Inundación y Geoportal Ciudadano. Estas actividades fortalecieron tanto el conocimiento técnico como el enfoque psicosocial del riesgo.

Asimismo, se mantuvo contacto permanente con la UMGRD para avanzar en la creación del SATC en el sector El Cairo, y se realizaron reuniones para identificar comunidades con potencial para participar en la prueba piloto de un SATC enfocado en incendios de cobertura vegetal, como parte de una estrategia diferenciada del proyecto.

Distrito de Medellín

Se realizaron talleres de socialización de la estrategia de apropiación social del conocimiento y sobre Monitoreo y Gestión del Recurso Hídrico, con el fin de fortalecer el uso de las herramientas técnicas del

proyecto para los funcionarios públicos.

Adicionalmente, se mantuvo la articulación constante con el DAGRD, abordando temas como la planeación de nuevos SATC en zonas priorizadas, el acompañamiento durante emergencias del primer semestre de 2025, y la mejora de la comunicación con las estaciones del Cuerpo de Bomberos, todo orientado al fortalecimiento de la capacidad institucional y operativa del Distrito.

Envigado

Aunque se presentaron dificultades para la realización de talleres formativos debido a la disponibilidad de personal, se gestionó la participación de la UMGRD en los tres encuentros semestrales del proyecto. Esto permitió mantener informada a la administración sobre los avances, actividades y perspectivas climáticas hacia el cierre de cada periodo.

Itagüí

Aunque durante el periodo del convenio no fue posible concertar la realización de talleres con la UMGRD de Itagüí, debido a la falta de respuesta y participación por parte de sus funcionarios, el equipo mantuvo una comunicación constante con la administración municipal. Esta relación se sostuvo principalmente a través del envío periódico de boletines con pronósticos meteorológicos y del acompañamiento a solicitudes puntuales relacionadas con el proyecto. Gracias a esta disposición, fue posible mantener un canal de información activo y ofrecer apoyo técnico en temas específicos de interés para el municipio, a pesar de las limitaciones en la ejecución de actividades formativas.

Sabaneta

Se llevaron a cabo talleres sobre descargas eléctricas, gestión de las emociones, salud mental, hidrología urbana, incendios de cobertura vegetal, pronósticos del estado del tiempo y del clima, eventos extremos, cambio y variabilidad climática, uso de drones, sismos y geoportal ciudadano. Estas sesiones fortalecieron tanto las capacidades técnicas como el enfoque integral de la gestión del riesgo en el municipio.

Asimismo, se realizaron reuniones de coordinación con la UMGRD, en las que se abordaron dos líneas de trabajo: (1) la planeación de procesos formativos con cronogramas orientados al uso de herramientas y comprensión de variables ambientales; y (2) la revisión del estado de los SATC, donde se identificaron necesidades técnicas y estrategias de fortalecimiento comunitario. Como resultado de este proceso articulado, el equipo del SIATA participó en una sesión del Concejo Municipal, donde se presentó el alcance del proyecto, su implementación en el territorio, la instrumentalización instalada y su contribución a la gestión integral del riesgo desde una perspectiva técnica y comunitaria.

Caldas

Para este municipio se ofrecieron talleres sobre interpretación de informes, uso del Geoportal Ciudadano, Monitoreo Hidrológico, Movimiento en Masa y Salud Mental en la Gestión del Riesgo de Desastres. Estas actividades facilitaron el desarrollo de capacidades locales y el uso de herramientas técnicas disponibles para la toma de decisiones informadas.

La Estrella

Se realizaron talleres sobre Calidad del Aire y Cambio Climático, además de visitas de seguimiento y reuniones de gestión. La articulación con la UMGRD permitió consolidar procesos formativos y fortalecer la apropiación de herramientas por parte del equipo municipal.

Encuentros Unidades Municipales de Gestión de Riesgos de Desastres, Organismos de Socorro y Secretarías de Medio Ambiente

En el marco del presente contrato, se implementó por primera vez una estrategia de encuentros dirigidos a las Unidades Municipales de Gestión del Riesgo de Desastres (UMGRD), Organismos de Socorro y Secretarías de Medio Ambiente del Valle de Aburrá y el Distrito de Medellín. Estos espacios fueron concebidos como escenarios de diálogo e intercambio técnico entre los funcionarios públicos y el proyecto SIATA, con el objetivo de fortalecer la articulación interinstitucional y favorecer la toma de decisiones informadas en materia de gestión del riesgo.

El propósito central de estos encuentros fue proporcionar a los representantes institucionales información técnica actualizada sobre las condiciones climáticas, los eventos más relevantes del semestre y las proyecciones para el periodo siguiente, contribuyendo así a la planificación territorial y a la respuesta oportuna frente a emergencias.

Asimismo, los encuentros fortalecieron las estrategias de apropiación social del conocimiento con actores clave, fomentando la comprensión y apropiación de los componentes de tecnología, innovación e investigación aplicada al territorio que caracterizan al proyecto.

Como parte de esta iniciativa, se planteó la realización de estos encuentros de manera semestral, consolidándolos como espacios periódicos y estratégicos, semejantes a los intercambios comunitarios de experiencias, pero con un enfoque orientado a tomadores de decisiones y entidades responsables de la gestión del riesgo.

Durante la ejecución del convenio, se llevaron a cabo tres eventos (Tabla 70): el primero el día 27 de junio de 2024, el segundo el 10 de diciembre del mismo año y el tercero el 3 de julio de 2025, este último enfocado en presentar un balance técnico del primer semestre, con especial énfasis en los impactos de la temporada de lluvias que generaron múltiples emergencias en la región.

Tabla 70: Resumen de eventos con UMGRD, Organismos de Socorro y Secretarías de Medio Ambiente.

Fecha	Asistentes	Principales temas tratados
27 de junio de 2024	Representantes de UMGRD, Organismos de Socorro y Secretarías de Medio Ambiente de los 9 municipios y el Distrito de Medellín. Para un total de 63 participantes.	Contextualización y actualización de los SATC y socialización de la estrategia social, Contexto climático y proyecciones para el segundo semestre del año y llegada del fenómeno de la niña, Río Aburrá como eje articulador del territorio y Proyección segundo semestre Calidad del Aire.
10 de diciembre 2024	Funcionarios de UMGRD y equipos técnicos municipales. Un total de 43 participantes.	Información clave del comportamiento del Río Aburrá y los diferentes afluentes del Valle de Aburrá para el segundo semestre, Contexto climático y proyecciones para el segundo semestre del año, Balance alborada y Balance de los SATC para este 2024.
3 de julio de 2025	UMGRD, Organismos de Socorro y Secretarías de Medio Ambiente. Un total de 58 participantes.	Balance técnico del primer semestre sobre la temporada de lluvias, explicación del comportamiento de los afluentes, atención de emergencias - COEM y mesas de trabajo con los asistentes por una experiencia 360º carrera de observación.

Estos encuentros demostraron ser una estrategia eficaz para fortalecer la relación entre el proyecto SIATA y las entidades territoriales, posicionándose como espacios valiosos para el intercambio técnico y la construcción conjunta de estrategias de prevención, preparación y respuesta ante eventos climáticos extremos. Su consolidación como espacios permanentes permitirá avanzar en la construcción de territorios más resilientes, informados y articulados frente al cambio climático y la gestión integral del riesgo.

Organismos de Socorro

La articulación del equipo Social de SIATA con los organismos de socorro del territorio metropolitano constituye un pilar fundamental de la estrategia Social, ya que reafirma la importancia del trabajo interdisciplinario para garantizar la precisión de la información compartida con la ciudadanía y, en consecuencia, favorecer la atención oportuna de las emergencias asociadas a eventos hidrometeorológicos extremos en la región.

En este sentido, el trabajo conjunto con los organismos de socorro ha tenido como propósito profundizar en temas de monitoreo ambiental y gestión del riesgo de desastres, asegurando la entrega de información veraz, en tiempo real y de manera oportuna. Esta articulación también ha permitido su vinculación a

procesos sociales y formativos, y se ha fortalecido con la instalación de pantallas de monitoreo en diversas estaciones de Bomberos del Área Metropolitana, para facilitar la observación continua de las condiciones ambientales.

Durante la vigencia del CCT 016-2024, se desarrolló un total de **89 actividades** con organismos de socorro en el Valle de Aburrá y el Distrito de Medellín, las cuales se distribuyen por municipio tal como se presenta en la Figura 394.



Figura 394: Actividades desarrolladas con Organismos de Socorro en el marco de la vigencia 016-2024.

La evidencia completa de estas acciones puede consultarse en el siguiente enlace: Estrategia con Organismos de Socorro.

WP3.3.6. Apoyar al AMVA en los espacios de gobernanza donde se promuevan conversaciones ciudadanas

Construcción de la Caja de Herramientas para Gobernanza Participativa

Durante la vigencia, el equipo de Apropiación Social del Conocimiento del proyecto SIATA, en articulación con la Escuela de Humanidades de la Universidad EAFIT, desarrolló un proceso integral de indagación, investigación y análisis para la conceptualización y diseño de una Caja de Herramientas orientada al fortalecimiento de espacios de gobernanza participativa.

El trabajo inició con una fase diagnóstica para identificar las necesidades del proyecto y de la entidad en materia de gobernanza, incorporando entrevistas, análisis de experiencias previas y revisión de referentes metodológicos. A partir de estos insumos, se avanzó en el diseño conceptual de un recurso práctico que facilite la planificación y ejecución de conversaciones efectivas de distintos tipos, promoviendo la participación activa y la toma de decisiones informada.

Durante el segundo semestre del 2024 se alcanzaron hitos clave:

- Definición de la estructura general de la Caja de Herramientas, que incluye un conjunto de cartas metodológicas y complementos para dinamizar procesos de conversación.
- Elaboración de prototipos de los componentes principales, validados internamente mediante sesiones de retroalimentación con el equipo SIATA.

- Producción de maquetas funcionales de las cartas y complementos, disponibles en los enlaces Maqueta cartas y Maqueta complementos.
- Integración de observaciones y mejoras de usabilidad, incorporando criterios de pertinencia cultural y adaptabilidad a diferentes contextos comunitarios.

En octubre se completó la fase de conceptualización y se dejó listo el prototipo. Esta entrega marca el inicio de la etapa de producción del material final y su posterior implementación en procesos participativos liderados por SIATA para futuras vigencias.

El detalle documental de este proceso, incluyendo diseños, justificaciones metodológicas y cronograma de trabajo, puede consultarse en el repositorio del proyecto en el enlace: Caja de Herramientas.

El proceso desarrollado en conjunto con la Escuela de Humanidades de la Universidad EAFIT permitió avanzar desde la identificación de necesidades en materia de gobernanza hasta la conceptualización y prototipado de una caja de herramientas orientada a fortalecer las conversaciones y la toma de decisiones en entornos participativos. Este trabajo integró un enfoque metodológico riguroso con una perspectiva práctica, asegurando que el producto final no solo respondiera a los requerimientos institucionales del AMVA y del proyecto SIATA, sino que también fuese adaptable a diferentes contextos y actores.

La caja de herramientas no se limita a ser un compendio de recursos; constituye un medio para fomentar interacciones más inclusivas, efectivas y estratégicas, facilitando el diálogo y la construcción colectiva de soluciones. Su valor radica en que articula elementos conceptuales y didácticos con instrumentos tangibles (cartas, complementos y guías) que potencian la experiencia de aprendizaje y el ejercicio de la gobernanza.

Contar con este tipo de instrumentos pedagógicos es fundamental para institucionalizar prácticas de comunicación efectiva, fortalecer las capacidades de gestión del conocimiento y promover la apropiación social de los procesos. Además, su diseño participativo y adaptable contribuye a que los actores involucrados asuman un rol más activo y consciente en la gestión de riesgos, la planificación y la toma de decisiones, incrementando la sostenibilidad e impacto de las iniciativas.

En suma, la implementación de esta herramienta representa un paso para el proyecto, al vincular la innovación pedagógica con la gestión estratégica de la gobernanza, ofreciendo un legado que puede seguir fortaleciéndose y escalándose en futuras vigencias.

WP3.4. Gestión del conocimiento técnico y científico

WP3.4.1. Generar los boletines técnicos e informes especializados de cada uno de los componentes del proyecto

El número total de informes especializados que el proyecto SIATA presentó en la vigencia 016-2024 del mismo es el siguiente:

- Trece (13) informes de Procuraduría, en los cuales se resumieron los promedios y los valores máximo y mínimo mensual y por estación de cada parámetro de las redes de Calidad del Aire y Ruido Ambiental, así como el número de veces que se superó la norma diaria.
- Dos (2) informes anuales, en los cuales se presentó el consolidado del comportamiento anual de todos los parámetros de calidad del aire y su comparación con la norma, y se incluyó el análisis de tendencias de largo plazo, para por lo menos los últimos cuatro años, así como la valoración del comportamiento de las medias móviles diarias y su comparación con la norma anual, con el fin de identificar el porcentaje de excedencias por estación y por contaminante.
- Cinco (5) informes de inicio y cierre de cada uno de los periodos de episodios por contaminación atmosférica.
- Dieciséis (16) informes de avance mensual, en los cuales se reportaron los avances de todas las actividades desarrolladas en cada uno de los Work Packages del proyecto.
- Un (1) informe consolidado anual de la vigencia (este documento), en el cual se documentan todos los logros del proyecto.

WP3.4.2. Documentar, administrar y socializar procedimientos, protocolos y manuales de los diferentes procesos

Reportes de prensa ante ocurrencia de eventos extremos de precipitación

Estos reportes presentan un resumen de las características más relevantes de cada evento, incluyendo acumulados máximos de precipitación medidos por radar y red pluviométrica, registro de descargas eléctricas, aumentos de nivel con riesgo naranja y rojo, llamados a organismos de gestión del riesgo y a comunidades de los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios (SATC), activaciones de sirenas e inundaciones en deprimidos viales monitoreados por el proyecto SIATA. La consulta general de estos reportes se encuentra disponible en Informes de Prensa SIATA.

A continuación, se listan los informes generados en el marco del CCT 016 de 2024:



- Informe de Prensa – Evento 3087
- Informe de Prensa – Evento 3115
- Informe de Prensa – Evento 3125
- Informe de Prensa – Evento 3131
- Informe de Prensa – Evento 3132
- Informe de Prensa – Evento 3134
- Informe de Prensa – Evento 3168
- Informe de Prensa – Evento 3170
- Informe de Prensa – Evento 3193
- Informe de Prensa – Evento 3206
- Informe de Prensa – Evento 3208
- Informe de Prensa – Evento 3266
- Informe de Prensa – Evento 3278
- Informe de Prensa – Evento 3407
- Informe de Prensa – Evento 3414
- Informe de Prensa – Evento 3418

Reporte diario de pronóstico meteorológico

Se envió diariamente a la dirección del Área Metropolitana del Valle de Aburrá (AMVA) y a las alcaldías del distrito y los nueve municipios un reporte de pronóstico meteorológico por franjas horarias (mañana, tarde y noche). Estos reportes se actualizan y almacenan para su consulta en Pronóstico Diario por Municipios.

Reportes operativos diarios

Estos reportes contienen un resumen de las alertas presentadas durante las últimas 24 horas, incluyendo: eventos de precipitación, aumentos de nivel con riesgo de inundación en ríos o quebradas, inundaciones en deprimidos viales, máximos registros de ráfagas de viento y temperatura, movimientos en masa monitoreados, calidad del aire, incendios, eventos sísmicos, apoyo a organismos externos, interacciones con organismos de gestión del riesgo, comunidades y activación de alarmas en SATC en el Valle de Aburrá. Se encuentran disponibles en Reportes Operativos Diarios SIATA.



WP3.4.3. Responder a las solicitudes del AMVA, entidades públicas y privadas, ciudadanía y medios de comunicación

Durante la vigencia CCT 016, desde el equipo de Calidad de Datos se dio respuesta a un gran total de **268 solicitudes especiales de información**, es decir, solicitudes de entidades relacionadas con la gestión del riesgo y la gestión ambiental. Información relacionada con cada solicitud atendida puede ser consultada en: Registro solicitudes.

WP3.4.4. Realizar procesos de investigación en temas relacionados y de interés del proyecto y de la Entidad

Actividades académicas y de investigación componente de Apropiación Social del Conocimiento

Antes de iniciar el desarrollo del presente apartado, se considera importante destacar el papel investigativo desempeñado durante la vigencia 016. En el marco de las actividades académicas y de investigación del componente de Apropiación Social del Conocimiento, se elaboró un entregable que documenta de manera detallada la apuesta desarrollada en este contexto. Este documento permite visualizar de forma clara los avances, acciones y logros alcanzados durante dicho periodo. Acceda aquí para conocer el informe de investigación.

También, se presenta un preámbulo de los principales elementos que recoge el informe de investigación (Figura 395). Estas, también se retomaron en apartados anteriores del presente documento.

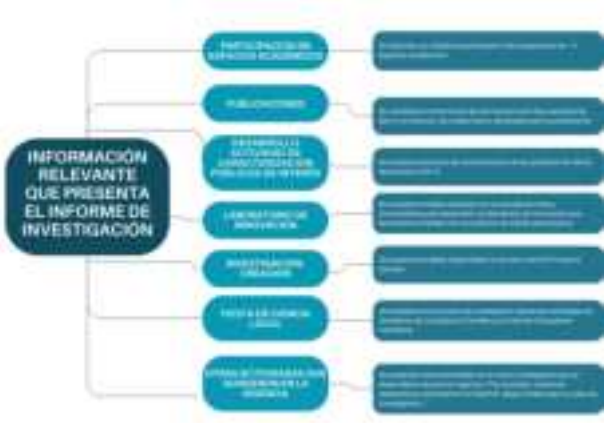


Figura 395: Principales actividades dentro de la apuesta investigativa del componente de Apropiación Social del Conocimiento.

El rol transformador de la investigación en contextos sociales

El ejercicio investigativo ha adquirido dentro del componente, un carácter transversal y movilizador de los procesos sociales. Desde las ciencias sociales y humanas, el trabajo con comunidades resulta ser una tarea compleja que requiere de estudios que evidencien si las estrategias desarrolladas generan, en alguna medida, efectos positivos que contribuyan a la transformación del territorio. En el marco de SIATA, como

proyecto de ciencia, tecnología e innovación, la investigación en apropiación social del conocimiento se consolidó durante la vigencia CCT 016 como un aspecto clave, debido a las potencialidades y aportes que brindó para el desarrollo de las actividades contractuales. Estas actividades investigativas, a su vez, posibilitaron un crecimiento sustancial del componente en este ámbito.

A lo largo de los últimos años, los acercamientos en investigación habían tenido como propósito principal visibilizar y fortalecer las iniciativas que se venían gestando desde las líneas social, educativa y de divulgación. Estos acercamientos han buscado, en primer lugar, abrir espacios de diálogo y colaboración que permitieran el intercambio de conocimientos entre distintos actores. Aunque los primeros intentos fueron limitados en términos de alcance y extensión, los resultados obtenidos habían sido significativos, no solo porque permitieron consolidar algunas de estas estrategias, sino también porque han abierto un camino hacia nuevas formas de entender e implementar la investigación social. Estos logros, aunque inicialmente modestos, marcaron la pauta para una evolución más robusta de los proyectos y estrategias, al establecer una base sólida sobre la cual continuar construyendo.

Para la vigencia CCT 016, estos esfuerzos alcanzaron un nivel de impacto considerable, logrando resultados de alto alcance que, hasta ese momento, no se habían materializado. Este período se presenta como un punto de inflexión, pues representa la primera vez en la que se lograron resultados significativos en términos de visibilidad y aplicación de las estrategias desarrolladas. Este hecho debe entenderse no sólo como un éxito puntual, sino como el fruto de un proceso acumulativo en el que el conocimiento generado fue clave para superar las barreras iniciales que limitaban el impacto de estas estrategias. Reflexionando sobre este panorama, se puede afirmar que los avances alcanzados en la vigencia CCT 016 ponen en evidencia la capacidad transformadora de la investigación aplicada en contextos sociales. Al lograr que las estrategias previamente concebidas se materializaran en resultados tangibles, se demuestra que la investigación puede ser una herramienta de alto valor para la creación de cambios reales en el territorio. Estos avances, señalan la consolidación de un enfoque más estructurado y coherente en la implementación de prácticas de investigación, capaces de generar cambios sustanciales en la realidad social y educativa. Además, deben considerarse como un paso inicial que es fundamental para la consolidación de un modelo de investigación más eficaz.

A continuación, se describen las actividades que se realizaron bajo una lente investigativa durante la vigencia.

Participación en espacios académicos y publicaciones

Las acciones investigativas se estructuran en torno a dos líneas principales: por un lado, la elaboración de publicaciones académicas que nutren y respaldan los procesos de apropiación del conocimiento; y por otro, la creación de espacios académicos destinados a la divulgación e intercambio de saberes, que permiten ajustar y fortalecer las estrategias sociales y educativas.

Durante la vigencia del contrato 016, se llevó a cabo un proceso de mapeo de eventos relevantes para el componente, con el fin de identificar aquellos que cumplían con criterios específicos para gestionar la participación del proyecto SIATA. La selección de estos eventos se basó en varios factores clave, entre los cuales se destacaron las líneas temáticas, los públicos participantes y las actividades a desarrollar en cada uno de ellos. En total, se identificaron seis eventos para la línea de educación y tres para la línea social. Cada uno de estos eventos ofreció una oportunidad para presentar el trabajo desarrollado en las estrategias del componente desde diferentes perspectivas, lo que permitió mostrar la diversidad de enfoques y contenidos que se abordan dentro del componente de Apropiación Social del Conocimiento. Además, se presentaron tres publicaciones. En la Tabla 71 se muestra con mayor de taller las principales actividades académicas realizadas durante la vigencia.



Tabla 71: Producción académica y participación en espacios académicos en el marco del componente de Apropiación Social del Conocimiento durante la vigencia.

Producto	Entidad organizadora	Nombre del evento/revista	Objetivo
Artículo. Línea de educación	Revista de Estudios y Experiencias en Educación		Visibilizar la estrategia de Semilleros de Ciudadanía Científica del proyecto SIATA.
Capítulo de libro. Línea de educación y social	UNGRD	Capítulo de libro: convocatoria para libro de investigación aplicada	Presentar algunos casos exitosos que se han fortalecido en el marco de la estrategia.
Capítulo de libro y ponencia. Línea de educación	Universidad de Córdoba	III Congreso Internacional de Pensamiento, Cultura y Sociedad	Socializar la estrategia de SIATA para la escuela como experiencia educativa territorial.
Ponencia. Línea de educación	Universidad de Antioquia	Expoeducación	Presentar experiencias exitosas en el marco de la apropiación del conocimiento.
Ponencia. Línea de educación	Universidad del Cauca	VIII Congreso Latinoamericano de Educación Ambiental	Presentar la línea educativa del proyecto SIATA como una apuesta que le aporta a la educación ambiental en el territorio metropolitano.
Póster. Línea de educación	Universidad del Cauca	VIII Congreso Latinoamericano de Educación Ambiental	Presentar la línea educativa del proyecto SIATA, así como la estrategia de la Red de Educadores Científicos, como una apuesta que le aporta a la educación ambiental en el territorio metropolitano.
Ponencia. Línea de educación	Universidad del Cauca	VIII Congreso Latinoamericano de Educación Ambiental	Favorecer la visibilización de proyectos que se han desarrollado con los públicos estratégicos del SIATA, para que a través de sus voces se den a conocer los procesos de apropiación social del conocimiento en el Valle de Aburrá para la gestión del riesgo de desastres.
Ponencia. Línea de educación	Office for Climate Education (OCE)	TeacherCOP	Presentar la apuesta de educación climática que desarrolla SIATA.

Continúa en la siguiente página

Producto	Entidad organizadora	Nombre del evento/revista	Objetivo
Ponencia. Línea social	GRD Geoconsultores S.A. de Perú, Red Iberoamericana de GRD y Universidad de Colombia	IX Congreso Iberoamericano sobre Gestión de Riesgo de Desastres	Socializar la experiencia del proyecto SIATA y el vínculo con los sistemas de alerta temprana.
Taller. Línea de educación	Comfama, Universidad EAFIT, Cosmo School, Movimiento STEM	Deeper Learning Latam 2024	Desarrollar y ejecutar una experiencia de formación docente en contextos escolares.
Taller. Línea de educación	Comfama, Universidad EAFIT, Cosmo School, Movimiento STEM	Deeper Learning Latam 2025	Socializar la apuesta del proyecto SIATA a partir del enfoque de accesibilidad para la apropiación social del conocimiento.
Ponencia. Línea social	Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres (DAGRD)	Simposio Nacional de la Gestión de Riesgo de Desastres. 12 años de la Ley 1523	Mostrar cómo la Apropiación Social del Conocimiento (ASC) se ha convertido en una estrategia fundamental del proyecto SIATA para fortalecer la resiliencia comunitaria y promover una gestión del riesgo de desastres más participativa, informada y contextualizada en el Valle de Aburrá.
Ponencia. Línea social	Institución Universitaria Jaime Isaza Cadavid	Conmemoración del Día Internacional para la Reducción del Riesgo de Desastres – Facultad de Ingeniería	Divulgar la estrategia específica de los SATC y destacar la importancia de los procesos sociales en la gestión del riesgo de desastres, a partir de la experiencia del Valle de Aburrá.

Desarrollo actividad de caracterización públicos de interés, apropiación social del conocimiento - ASC

Durante la vigencia del contrato 016, se desarrollaron una serie de actividades con la Escuela de Artes y Humanidades de la Universidad EAFIT. Una de ellas consistió en el diseño de una batería de indicadores sociales que permitieran caracterizar a los públicos de interés del proyecto SIATA, así como el levantamiento de información a partir de esta. Se priorizaron cinco públicos, estos son: comunidades SATC (comunidad el Pesebre), Unidades Municipales de Gestión del Riesgo (UMGRD) (cinco de los 10 municipios del Valle de Aburrá), Semilleros de Ciudadanos Científicos (una muestra representativa de los participantes del 2024), Red de Educadores Científicos (una muestra representativa de los 157 profesores que conforman el grupo de whatsApp) y Ciudadanos Científicos (una muestra representativa de los

integrantes con sensor en sus hogares, instituciones educativas, universidades, empresas y ciclistas).

Con la Escuela de Artes y Humanidades se tuvo una serie de reuniones, Ingrese aquí para visualizar las grabaciones y actas. El propósito de estos encuentros fue, primero, socializar el proyecto, dar un contexto de los grupos y definir los objetivos a lograr con esta actividad, y segundo, socializar los avances, espacios para el agendamiento y la organización de los diferentes instrumentos, entre otros momentos necesarios para el avance de dichas labores.

Si bien la Escuela no contaba con profesionales que pudiesen apoyar al proyecto en esta actividad, lograron suplir este requerimiento a través de la subcontratación de una persona con experiencia en estos temas.

Es importante resaltar que se tuvieron varios retos en el camino. Dentro de los principales desafíos, se puede mencionar la falta de personal suficiente en la Escuela de Artes y Humanidades para aplicar los instrumentos, fue necesario que los profesionales de SIATA tuvieran que asumir esa responsabilidad extra, lo cual llevó a que en algunos públicos no se lograra alcanzar una muestra representativa, ya que se requería una persona que tuviera una dedicación exclusiva al proceso de convocatoria (llamadas, mensajes, envío de links de la encuesta y agendamiento de las entrevistas semiestructuradas o grupos focales).

En este sentido, tener acercamientos en torno a las expectativas y la logística también abre la posibilidad de estar mejor preparados ante intervenciones posteriores. Una vez termina el proceso de caracterización, se concluye lo siguiente:

- Es importante destacar, que si bien el objetivo fue presentar una batería de indicadores para el proceso de caracterización, se logró ir más allá realizando levantamiento de información como prueba piloto, que permitió tener una impresión inicial de algunos públicos, además, desde el componente de apropiación social del conocimiento, se aportó el piso teórico para la construcción de las categorías desde las cuales se plantearon las preguntas de los instrumentos. Asimismo, dicho componente sumó esfuerzos para hacer posible el levantamiento de información. Sin embargo, cabe mencionar que esta fue una tarea que superó en gran medida las capacidades de los equipos.
- Después de realizar el ejercicio surgen logros significativos para el componente que posibilitan tener un panorama en torno a algunos de los públicos a los que está llegando el proyecto; conocer más de cerca sus realidades, es una de ellas, ya que posibilita replantear la forma en la que se han abordado las estrategias. Sería muy interesante y propicio realizar dicho ejercicio con las 40 comunidades SATC, esto permite conocer a qué personas está beneficiando el sistema ed manera directa y conocer otros aspectos que dan cuenta del impacto que tiene la estrategia en sus comunidades.
- Un proceso de caracterización en el que se cuenta con públicos ampliamente diversos requiere de un equipo interdisciplinario que permita diseñar y levantar la información; con experiencia no solo en caracterización de públicos, manejo de herramientas de investigación y análisis estadístico, sino también profesionales con dominio en plataformas de georreferenciación, experiencia en procesos etnográficos, temas de educación para la inclusión, primera infancia, así como de encuestadores para el levantamiento de información.

En el enlace se presenta el informe completo después de concluir el proceso de caracterización, en el que se pueden identificar hallazgos con un alto valor.

Otras actividades en el contexto de investigación

Se resaltan otras actividades con alto valor que surgieron en el camino y que le aportaron al crecimiento del componente de apropiación social del conocimiento, generando desafíos y aprendizajes que fortalecen la visión social y educativa del proyecto. Se pueden mencionar la formulación del proyecto de cooperación



internacional GUARDIAN; los avances en una revisión sistemática de la literatura con el objetivo de mapear enfoques académicos que han abordado la ciencia desde una perspectiva de accesibilidad, en la que se encontraron como resultados preliminares, que el tema de educación, ciencia y accesibilidad es una cuestión que ha comenzado a recibir atención en años recientes, pues entre 2014 y 2018 se encontraba más enfocado al tema de salud, esto resalta la necesidad de un trabajo significativo y sostenido para lograr transformaciones sustanciales, con el fin de alcanzar una verdadera democratización en el acceso a la educación científica. También se resalta la participación del componente de apropiación social del conocimiento a través de la Universidad de EAFIT en la Red de Popularización de la Ciencias en América Latina y el Caribe-RedPoP, lo que ha significado formar parte de un esfuerzo colectivo para democratizar el conocimiento científico y fomentar el pensamiento crítico en la sociedad, lo que va claramente en la vía de los objetivos que se tienen en el componente, en el marco de un proyecto de ciencia, tecnología e innovación para la gestión del riesgo de desastres. Finalmente, el ejercicio de investigación también implicó el desarrollo de las primeras ideas para un plan de investigación que permitiera configurar el proceso investigativo dentro del componente, si bien, esta propuesta fue preliminar, abre puertas para proyectar la investigación en ciencias sociales.

Actividades contractuales articuladas al marco investigativo

Cabe mencionar que el fortalecimiento progresivo de la apuesta investigativa dentro del componente ha generado un efecto integrador sobre diversas estrategias y actividades que, si bien fueron concebidas en etapas anteriores del proyecto, hoy se resignifican a la luz de esta nueva perspectiva. Ejemplos de ello son la **Fiesta de Ciencia Local**, el **Laboratorio de Innovación** y el programa **SIATA para la Escuela**, los cuales, aunque consolidados desde hace varios años, ahora se piensan también como escenarios valiosos para el desarrollo y aplicación de procesos investigativos. Estas experiencias no se detallan en este apartado, ya que han sido descritas en secciones anteriores del documento, y además, forman parte del informe específico de investigación, donde se analizan con mayor profundidad.

Principales resultados de las actividades a partir de la participación en espacios académicos

Durante la vigencia del contrato 016 se lograron importantes avances que evidencian el crecimiento y la consolidación del proyecto SIATA, particularmente en el ámbito de la educación científica y climática. Estos resultados reflejan el impacto de las estrategias implementadas y su contribución al fortalecimiento del componente educativo y social, donde se puede mencionar las primeras presentaciones presenciales desde la línea educativa, lo que posibilita espacios de intercambio con mayor significado, dichos espacios se dieron en eventos como Deeper Learning Latam 2024, Deeper Learning Latam 2025, Expoeducación 2024, VIII Congreso Iberoamericano de Educación Ambiental realizado en Cali. La interacción directa con los participantes permitió no solo la difusión de los contenidos generados, sino también una retro-alimentación valiosa que enriqueció las estrategias. Este tipo de espacios evidenció la importancia de crear plataformas de diálogo abiertas, donde diversos actores sociales puedan compartir experiencias y conocimientos, fortaleciendo los lazos entre la investigación, la comunidad y los actores institucionales.

Participación del profesorado en espacios académicos desde la Red de Educadores Científicos, tales como Expoeducación 2024 y el VIII Congreso Iberoamericano de Educación Ambiental realizado en Cali. Dichas participaciones fueron clave para dar protagonismo a los educadores en los procesos de generación de conocimientos científicos y ambientales del territorio. Como valor agregado, se resalta el fortalecimiento de los vínculos entre las estrategias educativas del proyecto y las necesidades y realidades locales, generando un mayor impacto en la práctica docente. De acuerdo con sus expresiones, la participación en estos espacios les motivaron a continuar trabajando para transformar el aula, empezar a ver la educación con un enfoque más investigativo y hacer otras actividades que les aporten a su desarrollo profesional.

Presentación de la Estrategia SIATA para la Escuela y un capítulo de libro en espacio internacional en el marco del III Congreso Internacional de Pensamiento, Cultura y Sociedad: Investigación, Divulgación, Transferencia (I+d+T), siendo la primera publicación del componente en este formato. Ambos espacios

permitieron compartir los enfoques y las metodologías desarrolladas por el proyecto, lo que contribuyó a visibilizar el trabajo realizado y posicionar al SIATA como un referente en el campo de la educación científica.

Reconocimiento en propuesta de educación climática en el evento TeacherCop, donde el proyecto SIATA logró el segundo lugar. Este logro subraya la calidad y la relevancia de las apuestas educativas del proyecto, especialmente en lo que respecta a la educación climática. La participación en este escenarios permitió demostrar el impacto de las estrategias de SIATA en la formación de educadores y en la promoción de la educación sobre el cambio climático, ganando visibilidad a nivel internacional.

La participación como ponentes en el IX Congreso Iberoamericano sobre Gestión del Riesgo de Desastres y Cambio Climático —organizado por GRD Geoconsultores S.A. (Perú), la Red Iberoamericana de Medio Ambiente (REIMA A.C.) de Ecuador y la Pan American Foundation for International Cooperation for Sustainable Development (PAFICSD) de Canadá— fue una oportunidad valiosa para presentar, desde la Línea Social, la experiencia del proyecto SIATA en torno a la gestión del riesgo en el Valle de Aburrá. Este espacio permitió visibilizar el trabajo realizado en el territorio, con especial énfasis en los sistemas comunitarios de alertas tempranas como herramientas clave para la reducción del riesgo. Además, la participación facilitó el intercambio de conocimientos, la identificación de enfoques innovadores aplicados en otros contextos y el fortalecimiento conceptual del proyecto, reafirmando la importancia de la apropiación social del conocimiento como eje estratégico para construir comunidades más resilientes e informadas frente a los desastres.

Ponencia en el evento de conmemoración del día internacional para la reducción del riesgo de desastres, organizado por la facultad de ingeniería de la institución universitaria Politécnico Jaime Isaza Cadavid. En este evento se participó como ponentes, socializando la importancia de los procesos sociales en la gestión del riesgo de desastres como un componente clave para la construcción de comunidades resilientes ante el cambio climático. La ponencia destacó cómo la participación activa de las comunidades, el fortalecimiento del tejido social y la apropiación del conocimiento son fundamentales para identificar vulnerabilidades, promover la prevención y fomentar la capacidad de respuesta ante eventos adversos. Además, se enfatizó en la necesidad de integrar enfoques interdisciplinarios que articulen saberes locales y científicos, permitiendo el desarrollo de estrategias adaptativas sostenibles. Esta reflexión contribuyó a visibilizar el papel crucial de la educación, la comunicación del riesgo y la participación ciudadana en la construcción de territorios más seguros y preparados frente a los desafíos climáticos actuales y futuros.

Este tipo de espacios, en colaboración con universidades, resultan especialmente valiosos para promover la divulgación de la ciencia, facilitar el intercambio de saberes entre distintos actores y fomentar el interés en la gestión del riesgo de desastres en nuevos públicos, como los estudiantes. Estas dinámicas no solo enriquecen el diálogo académico y comunitario, sino que también inspiran a las nuevas generaciones a involucrarse activamente en la construcción de sociedades más resilientes.

El componente de apropiación social del conocimiento del proyecto SIATA participó en el Simposio Nacional de Gestión del Riesgo de Desastres, conmemorando los 12 años de la Ley 1523. Este evento fue un espacio clave para discutir la transición en Colombia hacia una gestión integral y preventiva del riesgo y para compartir experiencias que fortalecen la resiliencia territorial. La intervención de SIATA destacó la importancia de articular ciencia, tecnología y comunidad, promoviendo una gestión del riesgo más participativa y corresponsable. Esta participación reafirma el valor de democratizar el conocimiento científico para que sea accesible y útil a las comunidades, consolidando así procesos sociales que contribuyen a enfrentar desafíos ambientales de manera colectiva y sostenible.

En la Figura 396 se presentan una serie de evidencias sobre las participaciones académicas y de investigación en las que participó el componente de apropiación social del conocimiento.



Figura 396: Algunas actividades académicas y de investigación, componente de apropiación social del conocimiento.

Resultados en torno a las publicaciones

Con respecto al desarrollo de artículos, capítulos de libro y otros documentos, uno de los logros más importantes fue la primera publicación del componente a partir de la participación en el III Congreso Internacional de Pensamiento, Cultura y Sociedad: Investigación, Divulgación, Transferencia; se publicó un capítulo de libro, como producto de la socialización de la estrategia SIATA para la Escuela, esto representó además la primera vez que los resultados del proyecto desde el componente de apropiación social del conocimiento fueron sistematizados y presentados en un formato académico reconocido. Dicha publicación permitió compartir los enfoques y las metodologías desarrolladas por el proyecto, lo que contribuyó a visibilizar el trabajo realizado por el SIATA, así como avanzar en el objetivo de posicionarlo como un referente en el campo de la educación científica.

Durante este ejercicio se presentaron desafíos importantes que merecen ser reflexionados. Uno de los principales retos estuvo relacionado con la postulación de publicaciones académicas. En particular, uno de los productos más trabajados durante la vigencia fue un artículo que socializa la estrategia de Semilleros de Ciudadanos Científicos. Este artículo fue inicialmente enviado a la Revista de Estudios Sociales de la Universidad de los Andes; sin embargo, la revista decidió no aceptar el manuscrito, argumentando que, aunque el tema era interesante, no se ajustaba al alcance de la publicación. Posteriormente, el artículo fue enviado a la Revista de Estudios y Experiencias en Educación, donde, a mayo de 2025, fue aceptado con ajustes. Tras implementar las correcciones sugeridas, el manuscrito se encuentra pendiente de edición para su publicación.

Por otro lado, se presentó una propuesta de capítulo de libro en respuesta a una convocatoria de la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD). En esta propuesta se contrastaban los procesos educativos desarrollados en la Red de Educadores Científicos y los Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios del proyecto, resaltando su aporte al diálogo entre comunidad y academia.

Haber apostado a la elaboración de publicaciones también le ha dejado al componente diversos aprendizajes que invitan a seguir trabajando en el fortalecimiento de este tipo de productos para consolidar al proyecto SIATA en el campo de las ciencias sociales. A medida que se envíen propuestas a diferentes revistas, se irá adquiriendo experiencia, no solo en los procesos editoriales y de revisión por pares, sino también en la articulación de los saberes técnicos con enfoques teóricos y metodológicos propios de las ciencias sociales. Esta trayectoria permitirá afinar las estrategias de comunicación académica, ampliar las redes de colaboración y posicionar con mayor claridad los aportes del proyecto en debates interdisciplinarios clave.

Logros

En general, los resultados alcanzados durante la vigencia del contrato 016 reflejan el esfuerzo continuo por consolidar al SIATA como un proyecto de impacto en la educación científica y climática, así como un referente en materia de gestión del riesgo dentro del sistema CTi. Cada uno de los logros mencionados no solo muestra el progreso del componente de Apropiación Social del Conocimiento, sino que también destaca la importancia de la colaboración entre los diferentes actores involucrados. La combinación de metodologías innovadoras, la participación activa de la comunidad y los primeros reconocimientos obtenidos a nivel nacional e internacional son indicadores claros del potencial transformador del proyecto. Estos avances permitieron vislumbrar un futuro prometedor para SIATA, con la posibilidad de ampliar su alcance y profundizar su impacto en la formación de nuevas generaciones comprometidas con el territorio y el medio ambiente.

Después de varios años de ejecución, se presentaron los primeros resultados tangibles de las metodologías desarrolladas para la educación climática. Estos, no sólo validaron las estrategias implementadas, sino que también permitieron evaluar su efectividad en el territorio. La implementación de las metodologías desarrolladas para la enseñanza de los temas climáticos mostró un avance significativo, con evidencias de su impacto positivo en las comunidades educativas, lo cual demuestra que las metodologías implementadas desde el componente de Apropiación Social del Conocimiento tienen el potencial de generar cambios reales en la percepción y el comportamiento de los estudiantes y las comunidades en relación con el cambio climático.

La participación en un espacio académico para socializar la apuesta del proyecto SIATA desde el enfoque de accesibilidad para la apropiación social del conocimiento representó una oportunidad valiosa para visibilizar una perspectiva emergente, con alto valor en la democratización de las ciencias. Este ejercicio permitió no solo compartir avances y aprendizajes, sino también contrastar la propuesta con otras miradas, recibir retroalimentación crítica de la línea de trabajo y formar a otros educadores a partir de dicho enfoque. Además, el espacio evidenció la necesidad y al mismo tiempo el potencial, de pensar la accesibilidad no como un componente aislado, sino como un eje transversal que transforme las formas en que se produce, comunica y vive el conocimiento científico en relación con las comunidades. Este tipo de escenarios contribuyen a consolidar redes y reafirmar el compromiso del proyecto con una ciencia más democrática, inclusiva y socialmente situada.

Asimismo, se evidenció el potencial investigativo del componente desde las diversas actividades que se desarrollan en el día a día, lo que sugiere fortalecer este ejercicio para que se consolide la investigación a partir de los lineamientos y categorías de Minciencias. Para ello, es importante trabajar de la mano con la academia, para que a través de la institucionalidad se logre una mayor visibilidad del conocimiento generado en el proyecto.

Aunque durante el proceso se presentaron diversos desafíos, como la necesidad de ajustar el ritmo de trabajo investigativo a los tiempos y exigencias del núcleo central del proyecto, estos retos permitieron fortalecer las capacidades del equipo, afinar la visión metodológica y conceptual del componente, y reafirmar la importancia de mantener una actitud adaptable y crítica frente a los procesos de investigación en contextos dinámicos y aplicados.

WP3.4.5. Brindar soporte tecnológico para la gestión documental y de información generada por los diferentes componentes del proyecto

Se propuso el almacenamiento de los documentos y la información generada por los diferentes componentes del proyecto en el repositorio que se reporta en la sub-actividad [WP2.3.9.]. Se sugiere al lector remitirse a tal numeral para conocer los logros de la sub-actividad.



WP4.1. Gestionar las labores de instalación, mantenimiento, verificación y calibración (según aplique) de las redes de instrumentación

WP4.1.1. Planificar la instalación de nuevas estaciones e instrumentos en las diversas redes del proyecto

Durante la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA, comprendida entre el 1 de febrero de 2024 y el 7 de julio de 2025, se llevó a cabo un total de **186 instalaciones de estaciones de monitoreo**. Estas actividades fueron registradas y clasificadas según su código, nombre de estación, municipio, descripción y fecha de instalación, permitiendo obtener un panorama claro sobre la distribución y alcance operativo de este componente.

Distribución mensual de instalaciones

La actividad de instalación mostró una variabilidad mensual significativa, evidenciando picos de alta ejecución en determinados periodos que pueden estar relacionados con la planeación operativa, la disponibilidad logística y atención de emergencias. El comportamiento mensual se visualiza en la Figura 397, en la cual se destacan los meses con mayor actividad y aquellos con menor intervención.

Tipos de instalación

El total de instalaciones fue clasificado principalmente como **"instalación"**, sin presentarse otras categorías significativas o diferenciadas, como por ejemplo mantenimientos. Esto sugiere una ejecución concentrada en montajes completos de estaciones, lo cual es coherente con los objetivos técnicos del contrato durante este periodo.

Distribución por municipio

El municipio con mayor número de instalaciones fue el **Distrito de Medellín**, con un total de **117 intervenciones**, lo que representa el núcleo principal de la operación. Le siguen municipios como **Bello (13 instalaciones)**, **Caldas (12)**, **Sabaneta (10)** e **Itagüí (10)**, evidenciando una cobertura representativa dentro del Valle de Aburrá, pero con un claro énfasis en la ciudad núcleo del proyecto.



Figura 397: Instalaciones por mes en la duracion total de la vigencia 016-2024 (febrero de 2024 - julio de 2025).

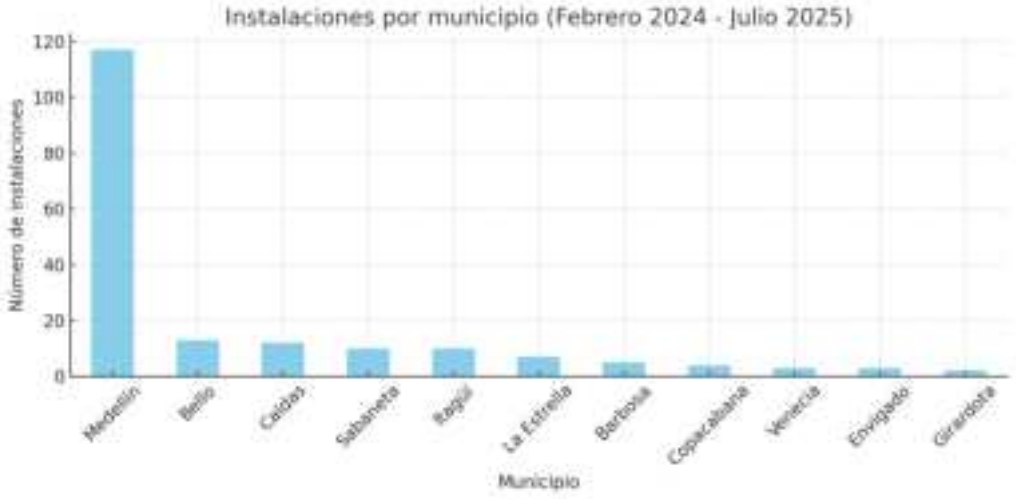


Figura 398: Instalaciones por municipio en la vigencia 016-2024 (febrero de 2024 - julio de 2025).

Este análisis permite identificar tendencias relevantes como la concentración geográfica de las intervenciones y los periodos de mayor actividad, constituyendo un insumo estratégico para la planeación futura de nuevas instalaciones, así como para evaluar la eficiencia del componente logístico-operativo del proyecto.

WP4.1.2. Gestionar y verificar la ejecución de compras necesarias en el proyecto

Durante la vigencia 016-2024, se realizaron en total **quinientas treinta y ocho (538)** solicitudes de compra relacionadas con repuestos y consumibles, para la correcta operación de los diferentes equipos que hacen parte de las redes de calidad del aire y riesgos del territorio, así como de las redes de ruido ambiental y Ciudadanos Científicos, las cuales corresponden a:

- **Trescientas ochenta (380) solicitudes** para riesgos con diecisiete (17) no aprobaciones por parte del AMVA, equivalente al 74 % de las compras ejecutadas.
- **Ochenta y nueve (89) solicitudes** para aire con dos (2) no aprobaciones por parte del AMVA, equivalente al 17 % de las compras ejecutadas.
- **Cincuenta (50) solicitudes** para el convenio AMVA-DARGD, las cuales fueron aprobadas en su totalidad, equivalente al 9 % de las compras ejecutadas. Ver figura 399.

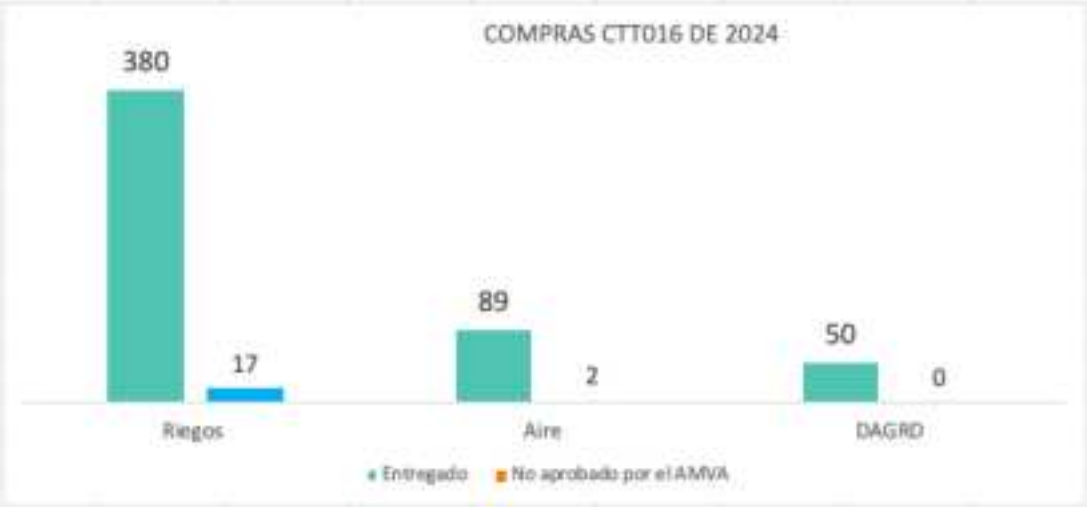


Figura 399: Consolidado final de compras de la vigencia 016-2024.

WP4.1.3. Gestionar la logística de transporte para la ejecución de las actividades del proyecto

Durante la vigencia, se veló por la optimización y el uso eficiente del recurso de transporte, priorizando el cumplimiento de cronogramas de actividades, la atención oportuna de encuentros con comunidades, emergencias, mantenimientos programados y sobrevuelos con dron en el marco del proyecto, entre otros.

La planificación logística tuvo como eje central garantizar el soporte logístico a las distintas áreas técnicas, maximizando la disponibilidad de los vehículos y articulando las rutas según las necesidades del proyecto SIATA para la optimización y garantía de la información.

En el siguiente enlace, se puede consultar el registro digitalizado de los formatos mensuales de transporte, los cuales evidencian el seguimiento detallado del recurso: Detalle transporte SIATA.

WP4.1.4. Gestionar protocolos de verificación y calibración inicial de los equipos adquiridos

Plan Metrológico. En la vigencia del contrato 103 se adquirieron equipos de medición para ser utilizados como equipos patrón, con el fin de comparar las meteorologías, pluviómetros y sensores de nivel. Para cada caso, se compró una (1) meteorológica, dos (2) verificadores de pluviómetros y un (1) sensor de distancia, respectivamente, calibrados en laboratorios acreditados. Se avanzó en la documentación e implementación de procesos que aportan en la construcción del Plan Metrológico para el componente riesgos. En la Figura 400 se muestra el registro fotográfico de algunas actividades desarrolladas.



Figura 400: Evidencia de actividades ejecutadas durante la vigencia 016-2024.

WP4.1.5. Planificar el mantenimiento de estaciones e instrumentos de las diversas redes del proyecto

La programación mensual de las visitas se organizó por semanas y se dividió por zonas y sub-zonas del valle de Aburrá. Cada cuadrilla fue asignada a una zona diferente durante cada semana de cada mes. En total, se cuenta con siete (7) cuadrillas para el componente de riesgos (equipo de Mantenimiento), cada una compuesta por dos (2) personas y un (1) vehículo para realizar los recorridos.

A continuación, se muestra un ejemplo de la programación de una cuadrilla:

Encargados: Hugo Gómez - Santiago Contrera.

- **Semana 1 del mes**: Zona 1 - 7
- **Semana 2 del mes**: Zona 2 - 5
- **Semana 3 del mes**: Zona 3 - 8
- **Semana 4 del mes**: Zona 4 - 6

Cada mes, el trabajo de las cuadrillas se ajustó de acuerdo a las sub-zonas asignadas en la programación semanal, asegurando que todas las áreas fueran cubiertas satisfactoriamente.

Estas zonas y encargados se pueden ver en el siguiente link: Detalle de estaciones e instrumentos por zonas.

WP4.1.6. Garantizar el adecuado funcionamiento de infraestructura de las estaciones de monitoreo

Red de monitoreo de calidad del aire. Durante la vigencia, se ejecutó de manera satisfactoria las siguientes actividades relacionadas con el mantenimiento de infraestructura, las cuales se ilustran en la Figura 401:

- **Tres mil cuatrocientos noventa y nueve (3499)** mantenimientos preventivos.
- **Dos mil quinientos cuarenta (2540)** verificaciones.
- **Cuarenta y cinco (45)** calibraciones.
- **Ciento treinta y un (131)** instalaciones.

El registro de los mantenimientos y calibraciones se actualiza en las bases de datos de las hojas de vida de las estaciones del proyecto.

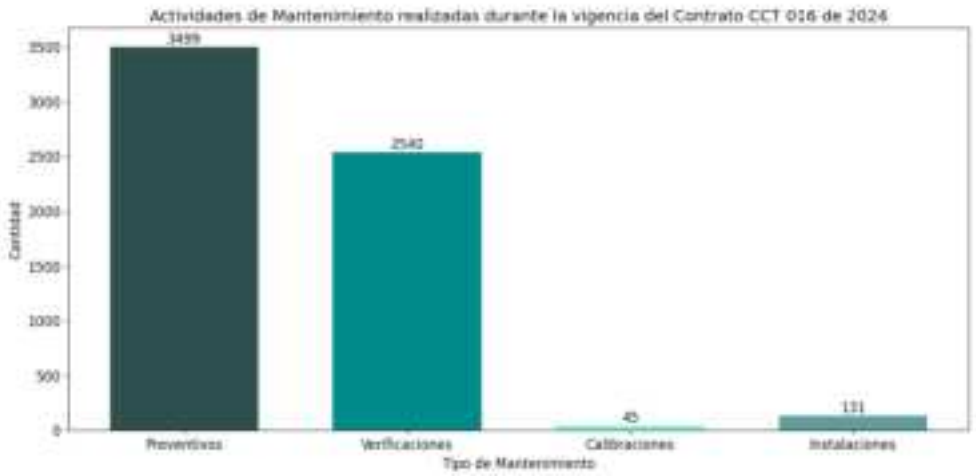


Figura 401: Total de actividades de mantenimiento realizadas en la vigencia 016-2024.

Programa de limpieza. Durante la vigencia 016-2024, se ejecutó, para la red de monitoreo de calidad del aire, un total de **trecientos sesenta (360)** actividades de mantenimientos locativos, que consistieron en:

- Aseo general (lavado de pisos y estructuras con hidro-lavadora, recolección y disposición de basuras).
- Mantenimiento de aires acondicionados de los shelter.
- Labores de jardinería.

En la Figura 402 se muestra la evidencia de algunas actividades de mantenimientos locativos realizadas en la estaciones de la red de calidad del aire.



Figura 402: Evidencia de la ejecución del programa de limpieza de la vigencia 016-2024.

WP4.1.7. (Calidad del aire) Garantizar el cumplimiento del plan de aseguramiento metrológico

Durante la vigencia, se llevó a cabo un total de **setenta y un (71)** servicios de calibración. En el link Plan Metrológico (PAME) se presenta la información de los equipos que fueron enviados a calibración con proveedores externos durante el contrato.

WP4.1.8. Revisar y formalizar las acometidas de la red del proyecto

Durante esta vigencia, se logró culminar el proceso de legalización de todas las acometidas que estaban planificadas, de acuerdo con el plan de formalización establecido para el Contrato CCT 016. En total, se registraron **63 acometidas**, de las cuales 26 ya se encuentran legalizadas y 37 en proceso de legalización.

La distribución por municipio es la siguiente: Medellín (30), Bello (8), La Estrella (6), Sabaneta (5), Itagüí (4), Caldas (5), Barbosa (2), Envigado (2) y Copacabana (1).

Para la consulta detallada de cada acometida —incluyendo ubicación, coordenadas, fecha de instalación, sensores asociados, proveedor y estado de legalización—, se puede acceder al archivo disponible en el siguiente enlace: Inventario de acometidas – Contrato CCT 016.

WP4.1.9. Velar por la gestión del inventario eficaz que garantice el suministro oportuno de insumos, consumibles, materiales, herramientas y repuestos

Se veló de manera efectiva por la gestión del inventario, garantizando el suministro oportuno de insumos, consumibles, materiales, herramientas y repuestos necesarios para el cumplimiento de las labores logísticas y contractuales. Durante el periodo evaluado, se realizaron informes mensuales detallados de ingresos y salidas del almacén, lo cual permitió mantener un control riguroso sobre los niveles de stock.

Este seguimiento constante facilitó la identificación oportuna de necesidades de reposición, asegurando así la disponibilidad continua de los elementos requeridos para la ejecución de los mantenimientos preventivos y correctivos. Así mismo, el control sobre los insumos permitió minimizar riesgos de desabastecimiento, optimizar los tiempos de respuesta y cumplir eficazmente con las exigencias de las instalaciones contractuales y operativas del día a día.

La implementación de este sistema de control contribuyó significativamente a la eficiencia operativa y a la calidad en la prestación del servicio. Para mayor información consultar el siguiente link: Inventario de consumibles.

Adicionalmente, durante la vigencia se implementó mensualmente un comparativo de consumos, en el cual se evidencian tanto las salidas como el gasto monetario mensual relacionado con las instalaciones contractuales. Este análisis permitió distinguir el tipo de consumo según su origen —mantenimiento correctivo o preventivo— y facilitó una mejor toma de decisiones en cuanto a la planificación presupuestal, el control de costos y la eficiencia en la gestión de recursos.

La implementación de estas prácticas fortaleció significativamente los procesos internos del almacén y contribuyó al cumplimiento de los objetivos operacionales de manera más eficiente y sostenible.

Para mayor información, el inventario de los consumibles se puede ver en el siguiente link: Comparativo inventario de consumibles.

WP4.2. Gestionar los procesos para garantizar continuidad a futuro en las actividades del proyecto, e.g., requerimientos de entes de control y renovación tecnológica para el monitoreo de variables prioritarias

WP4.2.1. Gestionar los requerimientos exigidos por los entes de control relacionados con el uso de VANTs

La gestión de requerimientos normativos RAC-100 representó uno de los desafíos más significativos durante la vigencia 016-2024, requiriendo una adaptación completa de los procesos operativos del equipo a las nuevas regulaciones de la Aeronáutica Civil de Colombia. El proceso se inició con un levantamiento exhaustivo de las nuevas regulaciones, identificando tres (3) componentes necesarios: certificación de pilotos, certificado de explotación y nuevos cargos en la estructura organizacional.

Se gestionó exitosamente la certificación de los pilotos del equipo, quienes presentaron y aprobaron los exámenes teóricos de licencias aeronáuticas UAS, completaron los exámenes médicos requeridos y obtuvieron sus certificados de idoneidad. Los pilotos Mauricio Fernández, Carlos Moreno y Edwin Córdoba culminaron satisfactoriamente el curso de Sistema de Gestión de Seguridad Operacional (SMS) y el curso de repaso con actualización de temas teóricos al RAC-100.

Se logró el registro oficial de todos los equipos UAS ante Aerocivil, incluyendo el Matrice 300 RTK, Mavic 3 Enterprise Multiespectral, Mavic 3 Enterprise Thermal y WingtraOne, junto con sus sensores asociados (Zenmuse P1, H20T, L1, antena RTK, módulos RTK y sensor RX1 RII).

El trabajo culminó con la contratación de CAMPER Aeronáutica para la elaboración de los manuales requeridos, a saber: Manual Operacional, Manual de Mercancías Peligrosas, Sistema de Gestión de la Seguridad Operacional (SMS), y documento de control y mantenimiento. Se diseñó y solicitó compra del dronpuerto y kit de emergencias como parte de los requisitos para la certificación como explotador de UAS.

Durante las emergencias del período, se gestionaron permisos especiales para operación a mayor altura en zonas restringidas y se mantuvo comunicación permanente con Aerocivil Regional Noroccidente para notificación de operaciones. El proceso de certificación del AMVA como explotador de UAS quedó en trámite final con la radicación de los documentos ante Aerocivil.

Para conocer más detalles sobre esta normativa y su estado de cumplimiento, se puede consultar el siguiente enlace:Cumplimiento normativo RAC 100.

WP4.2.2. Formular el plan de adquisiciones y reposición para la renovación tecnológica de variables prioritarias

En la formulación del plan de adquisiciones y reposición para la renovación tecnológica de variables prioritarias, se ha identificado y priorizado los sensores que actualmente han superado su vida útil y requieren programación para su renovación tecnológica. A continuación, se detallan los equipos vencidos por variable:

- Sensores de nivel: 58 unidades.
- Sensores de precipitación (pluviómetros): 135 unidades.
- Sensores meteorológicos Thies: 12 unidades.
- Cámaras: 56 unidades.
- Sirenas: 45 unidades.

No obstante, y con el fin de optimizar el uso de los recursos públicos, se ha determinado no reemplazar de manera inmediata los equipos únicamente por su obsolescencia de fábrica. Gracias a la implementación de mantenimientos preventivos periódicos, la mayoría de estos sensores y dispositivos continúan operando correctamente y suministrando datos verídicos y confiables.

Por lo anterior, la estrategia adoptada consiste en priorizar el reemplazo progresivo de los equipos que comiencen a presentar fallos en sus mediciones o en sus componentes críticos, permitiendo así extender la vida útil de los activos y maximizar el aprovechamiento de las inversiones realizadas.

Para conocer más detalles sobre este archivo de renovación, se puede consultar el siguiente enlace:Carpeta análisis vida útil.

WP4.3. Propender por una gestión eficaz de inventario general y activos fijos, y una evaluación técnica de vida útil y depreciación

A lo largo de la vigencia 016-2024, se procuró una gestión eficaz del inventario general y de los activos fijos, mediante un control riguroso y actualizado de las entradas y salidas de insumos y activos utilizados en el proyecto. Esta gestión incluyó la actualización permanente del inventario general, lo cual permitió tener trazabilidad y transparencia en el uso de los recursos. Adicionalmente, se realizó una evaluación técnica de los activos fijos, con el fin de determinar su vida útil y calcular su depreciación de manera adecuada, conforme a los lineamientos establecidos por la Entidad. Dicha depreciación se presenta en un listado previo requerido por la misma, lo que garantiza el cumplimiento de los requisitos técnicos y contables establecidos para el manejo de bienes en el marco del proyecto.

Para conocer más detalles sobre este archivo de informes de legalización, se puede consultar el siguiente enlace: Carpeta legalización.

WP4.4. Gestionar el Sistema de Gestión Integral (Calidad, Talento Humano, Administrativo y Financiero)

En el link Informe Final Sistema de Gestión de Calidad - Vigencia 016 de 2024, se encuentran las actividades detalladas del Sistema de Gestión de Calidad y de Seguridad y Salud en el Trabajo, relacionadas con las subactividades (o secciones) [WP4.4.1.] a [WP4.4.8.], las cuales se listan a continuación:

- WP4.4.1. Asegurar la actualización y mantenimiento permanente del Sistema de Gestión de Calidad (SGC)
- WP4.4.2. (Calidad del aire) Mejorar y actualizar de manera continua del SGC para la Red de Calidad del Aire
- WP4.4.3. Propender por la gestión de la Seguridad y Salud en el Trabajo
- WP4.4.4. Ejecutar planes de mejoramiento derivados de auditorías atendidas
- WP4.4.5. Garantizar la disponibilidad y el mantenimiento de infraestructura, espacios y recursos necesarios para la ejecución del proyecto
- WP4.4.6. Identificar necesidades desde la gestión estratégica, administrativa y financiera, marco normativo y cultura
- WP4.4.7. Llevar a cabo procesos formativos y de capacitación que sean requeridos
- WP4.4.8. Gestionar el talento humano a través de sus procesos relacionados

En términos generales, durante la vigencia 016 de 2024 se llevaron a cabo diversas actividades en el marco del Sistema de Gestión de la Calidad (SGC) y el Sistema de Gestión de Seguridad y Salud en el Trabajo (SG-SST), enfocadas en la gestión y sostenibilidad del proyecto SIATA. Estas acciones estuvieron alineadas con la planeación estratégica, el direccionamiento institucional, la transversalidad de procesos, el fortalecimiento de la capacidad instalada, la gestión integral, la continuidad operativa y el cumplimiento de los requisitos legales vigentes.

Entre las principales actividades realizadas por el equipo, se destaca la revisión continua, construcción y ajuste de la documentación de los diferentes procesos. Esta labor permitió avanzar en el desarrollo e implementación de estrategias orientadas a garantizar la actualización y mantenimiento del Sistema de Gestión Integral, cumpliendo con los requisitos de la norma NTC-ISO 9001:2015, especialmente en lo relacionado con la gestión de riesgos, en articulación con el SG-SST conforme al Decreto 1072 de 2015.

Así mismo, se realizaron actividades de revisión y actualización permanente de la documentación correspondiente al Sistema de Gestión de Calidad de la Red de Calidad del Aire, atendiendo a los requisitos establecidos por la norma NTC-ISO/IEC 17025:2017 y demás normativas aplicables.



Estas acciones se complementaron con procesos de formación orientados a fortalecer las competencias técnicas del personal, asegurando la idoneidad y confiabilidad en los resultados de ensayo y calibración. Lo anterior contribuyó al mantenimiento de la acreditación otorgada por el IDEAM a la Red de Calidad del Aire.

De forma paralela, se realizó un seguimiento continuo al Plan Metrológico y a todas las actividades asociadas, garantizando la gestión y revisión de registros en tiempo real para la generación de datos confiables y validados, fundamentales para una gestión eficiente del recurso aire.

En relación con los requisitos normativos, se llevó a cabo un monitoreo permanente del cumplimiento de las normas NTC-ISO/IEC 17025 y NTC-ISO 9001, aplicables a la Red de Calidad del Aire y al componente de riesgos, respectivamente. Esto incluyó la gestión y actualización de formatos, registros, procedimientos, instructivos y demás documentos que conforman el Sistema de Gestión.

También se gestionó la ejecución del programa de auditorías internas, conforme a los lineamientos de la NTC-ISO 9001 y el Decreto 1072. Durante la vigencia, se realizaron auditorías de control interno de bienes por parte del Área Metropolitana del Valle de Aburrá, así como auditorías de Seguridad y Salud en el Trabajo ejecutadas por la Universidad EAFIT.

En cumplimiento del cronograma establecido, se llevaron a cabo dos (2) auditorías internas en los meses de noviembre de 2024 y mayo de 2025. Así mismo, en julio de 2025 se desarrolló la auditoría externa de seguimiento por parte del IDEAM, bajo la norma NTC-ISO/IEC 17025 en su versión 2017, auditorías que permiten dar continuidad a la acreditación de la Red de Calidad del Aire. Además, se atendió oportunamente las solicitudes generadas por dicha auditoría, fortaleciendo la relación entre el proyecto SIATA y el IDEAM.

Como parte del mejoramiento continuo, se brindó apoyo en la construcción, diseño e implementación de acciones correctivas y preventivas, derivadas de las desviaciones identificadas durante la ejecución de procedimientos y las auditorías internas y externas. Esta información fue consolidada en un plan de acción, en el cual se documentó el análisis de causas y el seguimiento a las medidas implementadas.

Finalmente, se realizaron actividades de seguimiento y socialización en conjunto con los líderes de cada equipo, promoviendo un canal de comunicación permanente entre los diferentes procesos del Sistema de Gestión y los responsables de cada área. Este ejercicio facilitó la articulación y alineación estratégica en pro del fortalecimiento organizacional.

WP4.5. Proponer e implementar estrategias para garantizar la continuidad del proyecto

WP4.5.1. Revisar la estructura organizacional con sus diferentes niveles, roles, responsabilidades y funciones

En el marco del contrato CCT 016 de 2024, se implementó un organigrama estructurado con el fin de garantizar una gestión eficiente y una adecuada distribución de responsabilidades dentro del proyecto. Esta herramienta permitió contar con claridad de los roles y la jerarquía de los miembros del equipo, lo que permitió establecer líneas efectivas de comunicación, supervisión y toma de decisiones. El organigrama contempló instancias estratégicas, operativas y de apoyo, todas alineadas con los objetivos del proyecto y diseñadas para facilitar su ejecución, control y seguimiento. Ver Figura 403.



Figura 403: Organigrama – Proyecto SIATA, vigencia 016-2024.

WP4.5.2. Identificar oportunidades de prestación de servicios a actores públicos y/o privados, y otras partes interesadas

El número total de interacciones con actores públicos y/o privados, y otras partes interesadas, que el proyecto SIATA logró en el periodo de ejecución de la vigencia 016-2024, esto es, entre el 1 de febrero de 2024 y el 7 de julio de 2025, fue de **treinta y seis (36)**. Se aclara que los logros corresponden a aquellos alcanzados hasta el día 14 de febrero de 2025, momento en el cual finalizó esta sub-actividad. Ver Tabla 72. Estos espacios permitieron identificar oportunidades de prestación de servicios en el corto y mediano plazo.

Tabla 72: Interacciones con actores públicos y/o privados en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

Mes	Número	Actores
02-2024	1	Dirección de Planificación, Gestión y Ejecución de Proyectos de RAP-E Región Central
03-2024	1	Grupo EPM
04-2024	4	Departamento Administrativo de Gestión del Riesgo de Desastres - DAGRD, el Consejo Distrital Extendido Extraordinario de Gestión del Riesgo, la Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Cobertura Vegetal, y Gestión del Drenaje Urbano
05-2024	10	Comité de Manejo del DAGRD, CITRA-Movilidad, ARUS, Gestión del Drenaje Urbano, empresa privada Rappi, Secretaría de Gobierno de Copacabana, UNAL, UdeA, IDEAM, y Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
06-2024	5	Departamento de Caldas, Ministerio de Minas, Servicio Geológico Colombiano, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal, Consejo Municipal de Gestión del Riesgo de Desastres del municipio de Bello
07-2024	3	Comité Distrital de Manejo de Desastres, Junta de Acción Local de la comuna 4 de Itagüí, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
08-2024	3	Gestión del Drenaje Urbano, Cruz Roja colombiana, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
09-2024	4	Parque de la Conservación, DAGRD, CCP Comuna 8, Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA
10-2024	2	Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA, Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia - CTA
11-2024	2	Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA, Comisión Técnica Interinstitucional de Incendios de Incendios de Cobertura Vegetal
12-2024	1	Grupo de Riesgos Tecnológicos del AMVA
01-2025	0	–

WP4.5.3. Gestionar convenios de cooperación e intercambio de información técnica

En la vigencia 016-2024 se adelantaron actividades de interacción con diferentes actores en el territorio. Algunos relacionamientos abrieron la suscripción de convenios interadministrativos y otros condujeron a pactar estrategias de intercambio de información, sin requerir explícitamente de figuras jurídicas. Entre los actores con los que surgió el relacionamiento se identificaron: el DAGRD, el IDEAM, CITRA, AEROCIVIL, el Metro de Medellín, Mineros S.A., Defensa Civil, TUB, y Grupo EPM. A continuación, se presenta una síntesis del proceso que se adelantó con cada actor mencionado.

Convenio 277 de 2024 entre el AMVA y el DAGRD

Durante la vigencia, se realizó el ejercicio de validar las necesidades manifestadas desde la Administración Distrital a través del DAGRD para suscribir un convenio interadministrativo que permitió el desarrollo de actividades que aportan al cumplimiento de los indicadores propuestos por el Plan de Desarrollo del distrito para el cuatrenio.

En la primera etapa, se realizó la interacción con el AMVA en relación al recurso necesario que tenía el proyecto SIATA para el desarrollo de estas actividades.

En la segunda etapa, se apoyó el proceso de presentar la propuesta y elaboración de presupuesto para el desarrollo de las actividades desde la componente técnica.

En la etapa de desarrollo, se articuló el trabajo entre las supervisiones del contrato junto con las coordinaciones técnicas y líderes de grupos las actividades desarrolladas para los componentes planteados, y se presentaron los resultados en las reuniones de seguimiento y los informes pactados.

Durante esta vigencia, se consolidó la información y entrega de productos del CI 277 de 2024 entre AMVA y DAGRD, ejecutado por la Universidad EAFIT a través del proyecto SIATA.

La información compilada corresponde a cada uno de los tres (3) componentes que se abordaron en el contrato. Cada componente se desarrolló en la entrega final consignada en el siguiente enlace: `https://www.overleaf.com/read/sxsvhbgnmyxp#bdc2fd`.

- Componente 1: implementación de diez (10) puntos de monitoreo con proceso social y apoyo en la sostenibilidad de los existentes. En este componente, se abordan las dimensiones interdisciplinarias que permiten llevar a satisfacción el proceso social que en el proyecto SIATA se denomina Sistemas de Alerta Temprana Comunitarios - SATC. Este proceso social consta de las siguientes actividades:
  - Definición de esquema de instrumentación e instalación de equipos y sensores en cuencas torrenciales críticas del Distrito de Medellín. Esta actividad incluye los lineamientos para la selección de sitios de instalación, la visitas de campo para instrumentación en el marco del convenio, las instalaciones realizadas, y el mantenimiento a los sensores instalados, tanto a los nuevos como a los relacionados con SATC existentes.
  - Desarrollo de la estrategia de modelación para la definición de los umbrales correlacionables con niveles de alerta preestablecidos en función del aumento del nivel de agua de las quebradas instrumentadas.
  - Monitoreo y análisis en tiempo real de las variables hidrológicas y meteorológicas involucradas en el proceso de implementación de los sistemas.



- Comunicación en tiempo real a los diferentes actores involucrados en la gestión del riesgo de desastres, así como difusión de información técnica y científica a todo el público objetivo por medio de múltiples canales.
- Realización de las actividades vinculadas a los procedimientos de convocatoria, recorridos, talleres, ejercicios prácticos, en el contexto del proceso de apropiación social del conocimiento y preparación comunitaria, conforme a la metodología establecida por SIATA para tal fin. Lo anterior supone la adquisición de materiales, servicios e insumos para el trabajo con la comunidad.
- Sostenibilidad de SATC existentes.
- Generación de material educativo que permita apoyar los procesos formativos que se adelanten con las comunidades, con el fin de facilitar el aprendizaje de una manera didáctica y pedagógica.
- Diseño, producción e instalación de señalética para la identificación de puntos de encuentro y rutas de evacuación, como parte de una estrategia de comunicación visual que facilite el entendimiento y la comprensión de los protocolos de actuación en territorio. Incluye la impresión de piezas adhesivas para la marcación de diversos elementos.

- Componente 2: generación de material de apoyo especializado para el monitoreo de escenarios de riesgo. Este proceso de captura de información por vehículos aéreos no tripulados - VANT consta de las siguientes actividades:

  - Realización de veinticinco (25) sobrevuelos a demanda (diez SATC y quince a demanda) con vehículos aéreos no tripulados - VANT.
  - Generación de imágenes y videos aéreos de alta resolución como insumo primario para la identificación y caracterización de escenarios de riesgo.
  - Generación de productos cartográficos digitales como ortofotos, ortomosaicos, modelos de elevación digital, entre otros, como resultado del procesamiento de las imágenes obtenidas en los sobrevuelos realizados con VANT.
  - Cumplimiento normativo RAC-100.
  - Reproyección del sistema de coordenadas de los productos cartográficos levantados con VANT y procesados en el marco del convenio.
  - Adquisición de equipos que permitan el almacenamiento y procesamiento de información y las respectivas licencias.

- Componente 3: investigación aplicada al monitoreo de escenarios de riesgo por movimientos en masa. Esta componente incluye:

  - Definición del esquema de instrumentación complementaria en cuatro (4) sitios monitoreados a través del Sistema de Monitoreo de Escenarios de Riesgos (SIMER), según el criterio técnico de los profesionales del DAGRD y SIATA.
  - Monitoreo en tiempo real a partir de la instalación de sensores in-situ de humedad, acelerómetros, extensómetros, pluviómetros, entre otros, según el criterio técnico de los profesionales del DAGRD y SIATA.
  - Análisis continuo de la información de la precipitación obtenida a través del proyecto SIATA, con el fin de generar modelos de condiciones de lluvia crítica que pudieran detonar movimientos en masa en el Distrito de Medellín.
  - Categorización de precipitación antecedente en los escenarios de riesgo por movimientos en masa monitoreados por el DAGRD a través del Sistema de Monitoreo de Escenarios de Riesgos (SIMER). La categorización está sujeta a la disponibilidad de sensores para monitoreo de



lluvias en los puntos de interés o en zonas cercanas, o donde se puedan tener características de comportamientos similares.

- Inicio del desarrollo de un modelo con base física para la generación de resultados de movimientos en masa detonados por lluvia a escala del Valle de Aburrá, localizando los sitios críticos monitoreados por el DAGRD a través del SIMER. Una vez culminado este producto, deberá llevarse un proceso de validación por parte del personal de geotecnia de SIATA y del DAGRD, y a retroalimentación constante.

Convenio 196/2024 AMVA, 440/2024 IDEAM

De igual forma, durante la vigencia 016 de 2024, se recopilaron los documentos de vigencias anteriores que presentaban estudios previos e intenciones de retomar intercambio de información con el IDEAM. Se apoyó la construcción de los estudios previos y documentos requeridos por el AMVA para la presentación del convenio al comité de contratación de la entidad, y se articuló con la persona encargada del enlace con IDEAM el intercambio de documentación requerida por los comités de contratación para la suscripción final del convenio interadministrativo.

Como resultado del avance de las actividades pactadas, se realizaron las sesiones de puesta en común de avance en procesos de monitoreo, análisis y modelación de procesos para las diferentes amenazas abordadas por ambas partes, y finalmente se consolidó el listado de datos intercambiables para fines de acotar las actividades consignadas en el convenio y los alcances. Se cita a continuación la información que se considera de interés científico, aplicado en pro de mejorar las actividades misionales de la Entidad a través de los productos del proyecto, éstos bajo el visto bueno de las supervisiones de ambas instituciones.

- Datos pluviométricos históricos.
- Datos de disdrómetros.
- Datos históricos de caudales.
- Datos históricos de temperatura.
- Datos históricos de radiación.
- Radiosondeos.
- Datos radares de IDEAM (reflectividad, velocidad y algunas variables polares de todas las rutinas de escaneo) en tiempo real.
- Datos históricos del radar de Santa Elena para almacenar en nube (AWS).
- Información de otros sensores remotos.
- Campañas de lanzamiento de radiosondeo vs. radiómetro.
- Salidas de los modelos de pronóstico meteorológico.
- Capa de salida de alertas de movimientos en masa y variables relacionadas para las alertas positivas en el Valle de Aburrá.
- Eventos validados de movimientos en masa (inventario) con metadatos como: fecha, hora, en caso de que se tengan.



- Revisión diaria de tres (3) archivos, en proceso de automatización para información recibida en IDEAM desde UNGRD.
- Zonas de alerta por incendios forestales y variables relacionadas para las alertas positivas en Colombia.
- Reporte de UNGRD de incendios a nivel nacional.
- Registro de alertas históricas nivel nacional.
- Registro de variables del modelos de alertas por incendios.
- Información FAC-SAT con la que se cuente para incendios en el país.

Otras instancias de intercambios de información

Durante la vigencia, se abordaron reuniones de intercambio de conocimiento e información con las entidades mencionadas anteriormente, con las que se suscribió un convenio interadministrativo de intercambio de información.

- El Centro Integrado de Tráfico y Transporte - CITRA abrió el espacio para expresar aquellas necesidades en información de tiempo real y archivos históricos que requieren para sus procesos. Para la integración, se articuló con productos que se generan desde el proyecto SIATA y el equipo de TI para la entrega en un flujo constante de información.
- Con Aerocivil se llevó un proceso continuo con miras a alcanzar un convenio interadministrativo; es decir, se realizaron los documentos correspondientes a actividades que aportaron a los estudios previos. Sin embargo, en el intercambio entre AMVA y AEROCIVIL surgieron inquietudes que no se pudieron resolver. Por tanto, el convenio existente es de hecho ya que se ocupa el predio donde opera el radar y está por formalizarse mediante contrato interadministrativo.
- Con el Metro de Medellín, se formalizaron apoyos en relación a entrega de información para incorporar en sus planes de mantenimiento. Este contacto fue realizado a través de la Unidad de Gestión de Riesgos del AMVA y el enlace con Metro de Medellín.
- Mineros S.A. manifestó, a través de uno de sus contratistas, la intención de articular la información que recolecta con sus estrategias de monitoreo con la información que adquiere el proyecto SIATA. Se sostuvo una reunión con este enlace y se le informó el proceso para establecer el relacionamiento con AMVA. Luego de esta reunión no se conocieron novedades.
- Defensa Civil de Antioquia contactó a la Coordinación General del proyecto para conocer el procedimiento para acceder a información en tiempo real. Se realizó el envío al correo electrónico indicado con el proceso para realizar convenios de intercambio de información con el AMVA. No se recibió correo de respuesta ni nuevas intenciones de contacto.
- Docentes investigadores de la Universidad Técnica de Berlín - TUB, a raíz de su relacionamiento académico con algunos investigadores en el proyecto SIATA, y por medio del AMVA, se acercaron al proyecto a invitarle a participar de un proyecto de cooperación internacional para aplicar a los fondos Horizonte de la Unión Europea. En este caso, se acompañó y asesoró el proceso de elaboración de propuesta que tenía que ver con el AMVA y el proyecto, y se contó con el apoyo de profesionales en formulación de la Dirección de Innovación y Desarrollo Tecnológico de EAFIT para cuantificar los paquetes de trabajo contenidos en la propuesta. Finalmente la propuesta resultó no elegible.



- De parte del enlace técnico de anteriores convenios con EPM, se recibió nuevamente un correo dirigido a la supervisión del contrato CCT 016 de 2024 en AMVA, manifestando la intención de realizar un convenio que tuviera una serie de alcances. Este desarrollo buscaba emplear las capacidades instaladas del proyecto en completar algunas actividades de investigación aplicada alineadas con las actividades misionales tanto del AMVA como aquellas delineadas para el proyecto SIATA en dicha vigencia. Una vez se recibieron dichas actividades, se inició un proceso de validación con los líderes y coordinadores del proyecto SIATA, con miras a determinar si se contaba con la capacidad técnica para adelantar estas actividades y cuantificar los recursos que hicieran falta para lograr los alcances planteados. Este ejercicio se adelantó y se procuró la actualización hasta el momento en que se definieron los cambios en la capacidad instalada para el proyecto. Sin embargo, no se ha recibido visto bueno de parte de la supervisión al enlace de EPM hasta el momento.

WP4.5.4. Articular, en conjunto con el AMVA, una estrategia para que el proyecto SIATA continúe en el tiempo

El número total de interacciones con actores estratégicos que la Coordinación General del proyecto SIATA logró en el periodo de ejecución de la vigencia 016-2024, esto es, entre el 1 de febrero de 2024 y el 7 de julio de 2025, fue de **cuarenta y seis (46)**. Ver Tabla 73. Estos espacios permitieron crear el relacionamiento necesario para el desarrollo de muchas de las actividades del proyecto.

Tabla 73: Interacciones con actores estratégicos en la vigencia 016-2024 del proyecto SIATA.

Mes	Número	Actores
02-2024	0	–
03-2024	3	Programa Improving Inclusive Innovation Outcomes (I30), African Development Bank, Technical University of Munich
04-2024	3	Secretaría de Integración Regional y Vinculación Institucional de Córdoba (Argentina), MURARTE Global Innovation, Defensa Civil
05-2024	2	Alcaldía de Marinilla, Industrial ConConcreto
06-2024	0	–
07-2024	1	Escuela de Ciencias Aplicadas e Ingeniería de la Universidad EAFIT
08-2024	0	–
09-2024	4	Proyecto GUARDIAN, Expo Educación 2024, Cornare
10-2024	6	COP-16 CBD, VIII Foro Departamental de Educación Ambiental, proyecto Ciudades Resilientes (Ecuador), Agencia de Cooperación Internacional del Gobierno de Tailandia, Escuela Politécnica Nacional del Ecuador
11-2024	0	–
12-2024	2	Subdirección Ambiental del AMVA, Dirección General del AMVA
01-2025	1	Expertos jurídicos AMVA
02-2025	2	Consejo Ambiental Ampliado, Agency for International Cooperation - APC (Colombia)
03-2025	4	Municipio de El Retiro, equipo de ciberseguridad de asesoría al SIATA, propuesta GUARDIAN, FUTUMED

Continúa en la siguiente página

Tabla 73 – Continuación de la página anterior

Mes	Número	Actores
04-2025	8	Concejo Municipal de Sabaneta, Smart Cities LATAM 2025, DAGRD, Comité Distrital para el Conocimiento y la Reducción del Riesgo de Desastres 2025, Olarte-Moure, Universidad Pontificia Bolivariana de Montería, Unidad de Gestión del Riesgo y Cambio Climático del AMVA, Consejo Extraordinario Ampliado de Riesgos, Ambiental y Movilidad
05-2025	4	Consejo Distrital para la Gestión del Riesgo de Desastres, Consejo Metropolitano Extraordinario de Gestión del Riesgo de Desastres
06-2025	6	Consejo Metropolitano de Gestión del Riesgo de Desastres, Cuerpos de Bomberos del Valle de Aburrá, Dirección de Innovación y Desarrollo Tecnológico de Universidad EAFIT, EDU, Centro de Inteligencia Corporativa del Grupo Reditos/GANA

Referencias

(2022). Definición de los indicadores de la línea base ambiental de caldas.

Abatzoglou, J. T., Dobrowski, S. Z., Parks, S. A., and Hegewisch, K. C. (2018). Terraclimate, a high-resolution global dataset of monthly climate and climatic water balance from 1958–2015. *Scientific data*, 5(1):1–12.

Ager, A. A., Vaillant, N. M., and Finney, M. A. (2011). Integrating fire behavior models and geospatial analysis for wildland fire risk assessment and fuel management planning. *Journal of Combustion*, 2011(1):572452.

Alam, M., McGregor, L., and Harrison, R. (2024). A review of organic aerosol speciation by comprehensive two-dimensional gas chromatography. *Trends in Analytical Chemistry*, 175:117718.

Albrecht, R. I., Goodman, S. J., Buechler, D. E., Blakeslee, R. J., and Christian, H. J. (2016). Where are the lightning hotspots on earth? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 97(11):2051–2068.

All, J., Medler, M., Arques, S., Cole, R., Woodall, T., King, J., Yan, J., and Schmitt, C. (2017). Fire response to local climate variability: Huascarán national park, peru. *Fire Ecology*, 13:85–104.

Alshari, E. A. and Gawali, B. W. (2021). Development of classification system for lulc using remote sensing and gis. *Global Transitions Proceedings*, 2(1):8–17.

Alvarez, M. S., Vera, C., Kiladis, G. N., and Liebmann, B. (2016). Influence of the madden julian oscillation on precipitation and surface air temperature in south america. *Climate Dynamics*, 46:245–262.

Alvarez-Vanhard, E., Corpetti, T., and Houet, T. (2021). Uav & satellite synergies for optical remote sensing applications: A literature review. *Science of Remote Sensing*, 3:100019.

AMVA, P. (2019). Aunar esfuerzos tÉcnicos y financieros para evaluar los componentes claves de aerosoles atmosfÉricos en la contaminaciÓn atmosfÉrica en el valle de aburrÁ fase ii, a partir de la generaciÓn de conocimiento obtenido en un estudio de caracterizaciÓn quÍmica, convenio interadministrativo 734 de 2019. Technical report, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Politécnico Jaime Isaza Cadavid.

AMVA, S. (2024). Informe de cierre segundo periodo de gestión de episodios de contaminación atmosférica de 2024. Technical report, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Sistema de Alerta Temprana de Medellín y el Valle de Aburrá - SIATA.

AMVA, U. (2018). ContaminaciÓn atmosfÉrica y sus efectos sobre la salud de los habitantes del valle de aburrÁ 2008-2017. anÁlisis de la exposiciÓn de corto y largo plazo. contrato no. cct 1133 de 2018. Technical report, Área Metropolitana del Valle de Aburrá, Universidad de Antioquia.

AMVA, U. (2020). Actualización inventario de emisiones atmosféricas del valle de aburrá - año 2018. Technical report, Área Metropolitana del Valle de Aburrá Universidad Pontificia Bolivariana.

AMVA & Universidad de los Andes (2019). Estudio del riesgo Sísmico del Valle de Aburrá. Technical report, Área Metropolitana del Valle de Aburrá - Universidad de los Andes, Sede Bogotá.

Andelsman, F., Masuelli, S., and Tamarit, F. (2023). Detection and classification of rainfall in south america using satellite images and machine learning techniques. *Papers in Physics*, 15:150006–150006.

Andrews, P. L. (2007). Behaveplus fire modeling system: past, present, and future. In *In: Proceedings of 7th Symposium on Fire and Forest Meteorology; 23-25 October 2007, Bar Harbor, Maine. Boston, MA: American Meteorological Society. 13 p.*

Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2023). Aportes por fuente a las emisiones de contaminantes criterio y gei. Technical report, AMVA.

Arias, P. A., Martínez, J. A., and Vieira, S. C. (2015). Moisture sources to the 2010–2012 anomalous wet season in northern south america. *Climate Dynamics*, 45:2861–2884.

Arias, P. A. and Poveda, G. (2005). Efecto de la desagregación temporal sobre la coherencia espacial de la precipitación en colombia. *Avances en Recursos Hidráulicos*, (12):135–148.

Arias Gómez, P. A., Ortega Villamizar, G. M., Villegas Villa, L. D., and Martínez Agudelo, J. A. (2021). Colombian climatology in cmip5/cmip6 models: Persistent biases and improvements.

Baño-Medina, J., Manzanas, R., and Gutiérrez, J. M. (2021). On the suitability of deep convolutional neural networks for continental-wide downscaling of climate change projections. *Climate Dynamics*, 57(11-12):2941–2951.

Benson, R. P., Roads, J. O., and Weise, D. R. (2008). Climatic and weather factors affecting fire occurrence and behavior. *Developments in environmental science*, 8:37–59.

Berry, G., Thorncroft, C., and Hewson, T. (2007). African easterly waves during 2004—analysis using objective techniques. *Monthly Weather Review*, 135(4):1251–1267.

Blazejczyk, K., Epstein, Y., Jendritzky, G., Staiger, H., and Tinz, B. (2012). Comparison of utci to selected thermal indices. *International journal of biometeorology*, 56:515–535.

Brammer, A. and Thorncroft, C. D. (2015). Variability and evolution of african easterly wave structures and their relationship with tropical cyclogenesis over the eastern atlantic. *Monthly Weather Review*, 143(12):4975–4995.

Breiman, L. (2001). Random forests. *Machine Learning*, 45(1):5–32.

Brunner, M. I., Viviroli, D., Furrer, R., Seibert, J., and Favre, A.-C. (2018). Identification of flood reactivity regions via the functional clustering of hydrographs. *Water Resources Research*, 54(3):1852–1867.

Bruyère, C. L., Done, J. M., Holland, G. J., and Fredrick, S. (2014). Bias corrections of global models for regional climate simulations of high-impact weather. *Climate Dynamics*, 43:1847–1856.

Burpee, R. W. (1972). The origin and structure of easterly waves in the lower troposphere of north africa. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 29(1):77–90.

Burpee, R. W. (1975). Some features of synoptic–scale waves based on a compositing analysis of gate data. *Monthly Weather Review*, 103(10):921–925.

Camia, A. and Amatulli, G. (2009). Weather factors and fire danger in the mediterranean. *Earth observation of wildland fires in Mediterranean ecosystems*, pages 71–82.

Cape York, N. (2014). Modelling reductions of pollutant loads due to improved management practices in the great barrier reef catchments.

Cardil, A., Monedero, S., Schag, G., de Miguel, S., Tapia, M., Stoof, C. R., Silva, C. A., Mohan, M., Cardil, A., and Ramirez, J. (2021). Fire behavior modeling for operational decision-making. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 23:100291.

Carrillo-Soto, G., Cely-Calixto, N., and Ayala-Ibarra, M. (2019). Hydrological similarity of catchments in the southern area of colombian andean region. *Journal of Physics: Conference Series*, 1388:012042.

Carvalho, A., Flannigan, M. D., Logan, K., Miranda, A. I., and Borrego, C. (2008). Fire activity in portugal and its relationship to weather and the canadian fire weather index system. *International Journal of Wildland Fire*, 17(3):328–338.

Catchpole, W., Catchpole, E., Butler, B., Rothermel, R., Morris, G., and Latham, D. (1998). Rate of spread of free-burning fires in woody fuels in a wind tunnel. *Combustion Science and Technology*, 131(1-6):1–37.

Chase, R., Harrison, D., Lackmann, G., and McGovern, A. (2022a). A machine learning tutorial for operational meteorology, part ii: Neural networks and deep learning, arxiv.

Chase, R. J., Harrison, D. R., Burke, A., Lackmann, G. M., and McGovern, A. (2022b). A machine learning tutorial for operational meteorology. part i: Traditional machine learning. *Weather and Forecasting*, 37(8):1509 – 1529.

Chase, R. J., Harrison, D. R., Lackmann, G. M., and McGovern, A. (2023). A machine learning tutorial for operational meteorology. part ii: Neural networks and deep learning. *Weather and Forecasting*, 38(8):1271 – 1293.

Chelli, S., Maponi, P., Campetella, G., Monteverde, P., Foglia, M., Paris, E., Lolis, A., and Panagopoulos, T. (2015). Adaptation of the canadian fire weather index to mediterranean forests. *Natural Hazards*, 75(2):1795–1810.

Chen, H., Chandrasekar, V., Cifelli, R., and Xie, P. (2019a). A machine learning system for precipitation estimation using satellite and ground radar network observations. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 58(2):982–994.

Chen, L., Huang, Y., Xue, Y., Cao, J., and Wang, W. (2018). Effect of oligomerization reactions of criegee intermediate with organic acid/peroxy radical on secondary organic aerosol formation from isoprene ozonolysis. *Atmospheric Environment*, 187:218 – 229.

Chen, T., Liu, Y., Chu, B., Liu, C., Liu, J., Ge, Y., Ma, Q., Ma, J., and He, H. (2019b). Differences of the oxidation process and secondary organic aerosol formation at low and high precursor concentrations. *Journal of Environmental Sciences*, 79:256 – 263.

Chen, Y.-L., Tu, C.-C., Hsiao, F., Chen, C.-S., Lin, P.-L., and Lin, P.-H. (2022). An overview of low-level jets (lljs) and their roles in heavy rainfall over the taiwan area during the early summer rainy season. *Meteorology*, 1(1):64–112.

Chiew, F. and McMahon, T. (1993). Assessing the adequacy of catchment streamflow yield estimates. *Soil Research*, 31(5):665–680.

Chu, M. and Chen., C. (2002). Evaluation and estimation of potential carcinogenic risks of polynuclear aromatic hydrocarbons (pah). Technical report, U.S. Environmental Protection Agency - EPA.

Cintineo, J. L., Pavolonis, M. J., and Sieglaff, J. M. (2022). Probsevere lightningcast: A deep-learning model for satellite-based lightning nowcasting. *Weather and Forecasting*, 37(7):1239 – 1257.

Coen, J. L., Cameron, M., Michalakes, J., Patton, E. G., Riggan, P. J., and Yedinak, K. M. (2013). Wrf-fire: coupled weather–wildland fire modeling with the weather research and forecasting model. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(1):16–38.

Commission, E. (2016). Edgar - emissions database for global atmospheric research. Technical report, European Commission.

Correa, I. C., Arias, P. A., Vieira, S. C., and Martínez, J. A. (2024). A drier orinoco basin during the twenty-first century: the role of the orinoco low-level jet. *Climate Dynamics*, 62(3):2369–2398.

Crespo, P. J., Feyen, J., Buytaert, W., Bücker, A., Breuer, L., Frede, H.-G., and Ramírez, M. (2011). Identifying controls of the rainfall–runoff response of small catchments in the tropical andes (ecuador). *Journal of Hydrology*, 407(1):164–174.

Cruz-Bernal, A. S., Torres-Sánchez, H., Aranguren-Fino, H., and Inampués-Borda, J. C. (2018). Lightning mortality rate in colombia for the period 1997–2014. *Revista UIS Ingenierías*, 17(2):65–74.

Dai, J., Liu, Y., Wang, P., Fu, X., Xia, M., and Wang, T. (2020). The impact of sea-salt chloride on ozone through heterogeneous reaction with n2o5 in a coastal region of south china. *Atmospheric Environment*, 236:117604.

Das, S. and Subudhi, S. (2021). A review on different methodologies to study thermal comfort. *International Journal of Environmental Science and Technology*, pages 1–17.

De Jong, M. C., Wooster, M. J., Kitchen, K., Manley, C., Gazzard, R., and McCall, F. F. (2016). Calibration and evaluation of the canadian forest fire weather index (fwi) system for improved wildland fire danger rating in the united kingdom. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(5):1217–1237.

Dentoni, M., Muñoz, M., and Marek, D. (2015). Fire danger rating as a tool for fire management. implementation of the cffdrs: the argentine experience. *Current international perspectives on wildland fires, mankind and the environment. Nova Publishers*, pages 101–120.

Di Napoli, C., Barnard, C., Prudhomme, C., Cloke, H. L., and Pappenberger, F. (2021). Era5-heat: a global gridded historical dataset of human thermal comfort indices from climate reanalysis. *Geoscience data journal*, 8(1):2–10.

Dobrinkova, N. and Dobrinkov, G. (2013). Farsite and wrf-fire models, pros and cons for bulgarian cases. In *International Conference on Large-Scale Scientific Computing*, pages 382–389. Springer.

Dovrou, E., Bates, K., Moch, J., Mickley, L., Jacob, D., and Keutsch, F. (2021). Catalytic role of formaldehyde in particulate matter formation. *EARTH, ATMOSPHERIC, AND PLANETARY SCIENCES - PNAS*, 119(6).

Erickson, M. J., Charney, J. J., and Colle, B. A. (2016). Development of a fire weather index using meteorological observations within the northeast united states. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 55(2):389–402.

Espinoza, J. C., Garreaud, R., Poveda, G., Arias, P. A., Molina-Carpio, J., Masiokas, M., Viale, M., and Scaff, L. (2020). Hydroclimate of the andes part i: main climatic features. *Frontiers in Earth Science*, 8:64.

Espinoza, J. C., Segura, H., Ronchail, J., Drapeau, G., and Gutierrez-Cori, O. (2016). Evolution of wet-day and dry-day frequency in the western a mazon basin: Relationship with atmospheric circulation and impacts on vegetation. *Water Resources Research*, 52(11):8546–8560.

Faxon, C. and Allen, D. (2013). Chlorine chemistry in urban atmospheres: a review. *Environmental Chemistry*, 10:221 – 233.

Fernandes, A., Riffler, M., Ferreira, J., Wunderlec, S., Borrego, C., and Tchepel, O. (2015). Comparisons of aerosol optical depth provided by seviri satellite observations and camx air quality modelling. In *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.*

Fernandez, J. P., Franchito, S. H., and Rao, V. B. (2019). Future changes in the aridity of south america from regional climate model projections. *Pure and Applied Geophysics*, 176:2719–2728.

Feron, S., Cordero, R. R., Damiani, A., MacDonell, S., Pizarro, J., Goubanova, K., Valenzuela, R., Wang, C., Rester, L., and Beaulieu, A. (2024). South america is becoming warmer, drier, and more flammable. *Communications Earth & Environment*, 5(1):501.

Fink, A. H., Engel, T., Ermert, V., Van Der Linden, R., Schneidewind, M., Redl, R., Afiesimama, E., Thiaw, W. M., Yorke, C., Evans, M., et al. (2017). Mean climate and seasonal cycle. *Meteorology of tropical West Africa: The forecasters' handbook*, pages 1–39.

Finney, M. A. (1998). Farsite: Fire area simulator - model development and evaluation. *US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.*

Finney, M. A. (2006). An overview of flammap fire modeling capabilities. In *In: Andrews, Patricia L.; Butler, Bret W., comps. 2006. Fuels Management-How to Measure Success: Conference Proceedings. 28-30 March 2006; Portland, OR. Proceedings RMRS-P-41. Fort Collins, CO: US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station. p. 213-220.*

Flannigan, M. D., Logan, K. A., Amiro, B. D., Skinner, W. R., and Stocks, B. J. (2005). Future area burned in canada. *Climatic change*, 72(1):1–16.

Forthofer, J. M. (2007). *Modeling wind in complex terrain for use in fire spread prediction.* PhD thesis, Citeseer.

Forthofer, J. M., Butler, B. W., and Wagenbrenner, N. S. (2014). A comparison of three approaches for simulating fine-scale surface winds in support of wildland fire management. part i. model formulation and comparison against measurements. *International Journal of Wildland Fire*, 23(7):969–981.

Fujimoto, K. and Tebakari, T. (2023). A new image segmentation model for precipitation estimation using meteorological satellite infrared images and geographic information. *Hydrological Research Letters*, 17(4):77–84.

Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2(1):1–21.

Gao, J., Wei, Y., Shi, G., Yu, H., Zhang, Z., Song, S., Wang, W., Liang, D., and Feng, Y. (2020). Roles of rh, aerosol ph and sources in concentrations of secondary inorganic aerosols, during different pollution periods. *Atmospheric Environment*, 241:117770.

Gavidia-Calderon, M., Schuch, D., Vara-Vela, A., Inoue, R., D. Freitas, E., Toledo de A. Albuquerque, T., Zhang, Y., Andrade, M., and L. Bell, M. (2024). Air quality modeling in the metropolitan area of sao paulo, brazil: A review. *Atmospheric Environment*, 319:123031.

Grimm, A. M. (2019). Madden–julian oscillation impacts on south american summer monsoon season: precipitation anomalies, extreme events, teleconnections, and role in the mjo cycle. *Climate Dynamics*, 53(1):907–932.

Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P. I., and Geron, C. (2006). Estimates of global terrestrial isoprene emissions using megan (model of emissions of gases and aerosols from nature). *Atmospheric Chemistry and Physics*, 6(11):3181–3210.

Gupta, H. V., Kling, H., Yilmaz, K. K., and Martinez, G. F. (2009). Decomposition of the mean squared error and nse performance criteria: Implications for improving hydrological modelling. *Journal of hydrology*, 377(1-2):80–91.

Guzmán Echavarría, G. (2018). *Análisis de la influencia del diseño urbano en la meteorología del Valle de Aburrá*. PhD thesis.

Ha, Y., Kim, J., Lee, S., Cho, K., Shin, J., Kang, G., Song, M., Lee, J., Jang, K., Lee, K., Ahn, J., Wu, Z., Matsuki, A., Tang, N., Sadanaga, Y., Natsagdorj, A., and Kim, C. (2023). Spatiotemporal differences on the real-time physicochemical characteristics of pm2.5 particles in four northeast asian countries during winter and summer 2020–2021. *Atmospheric Research*, 283:106581.

Haarsma, R. J., Roberts, M. J., Vidale, P. L., Senior, C. A., Bellucci, A., Bao, Q., Chang, P., Corti, S., Fučkar, N. S., Guemas, V., et al. (2016). High resolution model intercomparison project (highresmip v1. 0) for cmip6. *Geoscientific Model Development*, 9(11):4185–4208.

Haines, D. A. (1986). *Fire-danger rating and observed wildfire behavior in the northeastern United States*, volume 274. US Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest ....

Hall, N. M., Kiladis, G. N., and Thorncroft, C. D. (2006). Three-dimensional structure and dynamics of african easterly waves. part ii: Dynamical modes. *Journal of the Atmospheric Sciences*, 63(9):2231–2245.

Hamad, R. (2020). An assessment of artificial neural networks, support vector machines and decision trees for land cover classification using sentinel-2a data. *Applied Ecology and Environmental Sciences*, 8(6):459–464.

Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Loveland, T. R., et al. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *science*, 342(6160):850–853.

Haralick, R. M., Shanmugam, K., and Dinstein, I. (1973). Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, 3(6):610–621.

Hargreaves, G. H. and Samani, Z. A. (1985). Reference crop evapotranspiration from temperature. *Applied engineering in agriculture*, 1(2):96–99.

He, B., Yu, Y., Bao, Q., Lin, P., Liu, H., Li, J., Wang, L., Liu, Y., Wu, G., Chen, K., et al. (2020). Cas fgoals-f3-l model dataset descriptions for cmip6 deck experiments. *Atmospheric and Oceanic Science Letters*, 13(6):582–588.

Henao, J. J., Rendón, A. M., Hernández, K. S., Giraldo-Ramirez, P. A., Robledo, V., Posada-Marín, J. A., Bernal, N., Salazar, J. F., and Mejía, J. F. (2021). Differential effects of the covid-19 lockdown and regional fire on the air quality of medellín, colombia. *Atmosphere*, 12(9):1137.

Herrera-Mejía, L. and Hoyos, C. D. (2019). Characterization of the atmospheric boundary layer in a narrow tropical valley using remote-sensing and radiosonde observations and the wrf model: the aburrá valley case-study. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 145(723):2641–2665.

Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., et al. (2020). The era5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146(730):1999–2049.

Hodzic, A., Madronich, S., Kasibhatla, P., Tyndall, G., Aumont, B., Jimenez, J., Lee-Taylor, J., and Orlando, J. (2015). Organic photolysis reactions in tropospheric aerosols: effect on secondary organic aerosol formation and lifetime. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15:9253 – 9269.

Hollis, J. J., Matthews, S., Anderson, W. R., Cruz, M. G., Fox-Hughes, P., Grootemaat, S., Kenny, B. J., and Sauvage, S. (2024). A framework for defining fire danger to support fire management operations in australia. *International Journal of Wildland Fire*, 33(3):NULL–NULL.

Holst, J. and Mayer, H. (2011). Impacts of street design parameters on human-biometeorological variables. *Meteorologische Zeitschrift*, 20(5):541.

Hong, Z., Zhang, H., Zhang, Y., Xu, L., Liu, T., Xiao, H., Hong, Y., Chen, J., Li, M., Deng, J., Wu, X., Hu, B., and Chen, X. (2016). Ion-induced nucleation of pure biogenic particles. *Nature*, 533:521 – 526.

Hoyos, I., Cañón-Barriga, J., Arenas-Suárez, T., Dominguez, F., and Rodríguez, B. (2019). Variability of regional atmospheric moisture over northern south america: patterns and underlying phenomena. *Climate Dynamics*, 52:893–911.

Hoyos, I., Dominguez, F., Cañón-Barriga, J., Martínez, J., Nieto, R., Gimeno, L., and Dirmeyer, P. (2018). Moisture origin and transport processes in colombia, northern south america. *Climate dynamics*, 50:971–990.

Hsieh, J.-S. and Cook, K. H. (2005). Generation of african easterly wave disturbances: Relationship to the african easterly jet. *Monthly weather review*, 133(5):1311–1327.

Hu, W., Zhao, T., Bai, Y., Kong, S., Shen, L., Xiong, J., Zhou, Y., Gu, Y., Shi, J., Zheng, H., et al. (2022). Regulation of synoptic circulation in regional pm2. 5 transport for heavy air pollution: Study of 5-year observation over central china. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 127(13):e2021JD035937.

Hu, X.-M., Klein, P. M., Xue, M., Zhang, F., Doughty, D. C., Forkel, R., Joseph, E., and Fuentes, J. D. (2013). Impact of the vertical mixing induced by low-level jets on boundary layer ozone concentration. *Atmospheric Environment*, 70:123–130.

Huffman, G. J., Bolvin, D. T., Nelkin, E. J., and Tan, J. (2015). Integrated multi-satellite retrievals for gpm (imerg) technical documentation. *Nasa/Gsfc Code*, 612(47):2019.

Janiga, M. A. and Thorncroft, C. D. (2014). Convection over tropical africa and the east atlantic during the west african monsoon: Regional and diurnal variability. *Journal of Climate*, 27(11):4159–4188.

Jendritzky, G., de Dear, R., and Havenith, G. (2012). Utci—why another thermal index? *International journal of biometeorology*, 56:421–428.

Jia, X., Quan, J., Zhao, X., Pan, Y., Cheng, Z., Wei, Y., Liao, Z., Dou, Y., and Ma, P. (2024). Regional transport of aerosol above boundary layer and its radiation effect trigger severe haze pollution in beijing. *Atmospheric Research*, 298:107145.

Jiang, H., Li, J., Tang, J., Mo, Y., and Zhang, G. (2018). Applications of high-resolution mass spectrometry in studies of brown carbon. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 46.

Jiang, Y., Zhao, T., Tan, C., Li, F., Zheng, Q., Shu, Z., Ma, X., Zheng, H., and Lv, Q. (2022). Haze pollution in the unstable atmospheric boundary layer over the west bank of taiwan strait induced by regional transport of pm2. 5. *Earth and Space Science*, 9(10):e2022EA002505.

Jiménez-Sánchez, G., Markowski, P. M., Jewtoukoff, V., Young, G. S., and Stensrud, D. J. (2019). The orinoco low-level jet: An investigation of its characteristics and evolution using the wrf model. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(20):10696–10711.

Jiménez-Jiménez, S. I., Ojeda-Bustamante, W., Ontiveros-Capurata, R. E., and Marcial-Pablo, M. d. J. (2020). Rapid urban flood damage assessment using high resolution remote sensing data and an object-based approach. *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, 11(1):906–927.

Jo, Y., Jang, M., Han, S., Madhu, A., Koo, B., Jia, Y., Yu, Z., Kim, S., and Park, J. (2024). Camx–unipar simulation of secondary organic aerosol mass formed from multiphase reactions of hydrocarbons under the central valley urban atmospheres of california. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24:487–508.

Jones, M. W., Kelley, D. I., Burton, C. A., Di Giuseppe, F., Barbosa, M. L. F., Brambleby, E., Hartley, A. J., Lombardi, A., Mataveli, G., McNorton, J. R., et al. (2024). State of wildfires 2023–2024. *Earth System Science Data*, 16(8):3601–3685.

Kántor, N. and Unger, J. (2011). The most problematic variable in the course of human-biometeorological comfort assessment—the mean radiant temperature. *Central European Journal of Geosciences*, 3:90–100.

Kiladis, G. N., Thorncroft, C. D., and Hall, N. M. (2006). Three-dimensional structure and dynamics of african easterly waves. part i: Observations. *Journal of the atmospheric sciences*, 63(9):2212–2230.

Kirkby, J., Duplissy, J., Sengupta, K., Frege, C., Gordon, H., Williamson, C., and et. al (2019). Secondary organic aerosol of pm2.5 in mountainous forest area in southeastern china: Molecular compositions and tracers implication. *Science of the Total Environment*, 653:496 – 503.

Kodama, C., Ohno, T., Seiki, T., Yashiro, H., Noda, A., Nakano, M., Yamada, Y., Roh, W., Satoh, M., Nitta, T., et al. (2021). The nonhydrostatic icosahedral atmospheric model for cmip6 highresmip simulations (nicam16-s): experimental design, model description, and impacts of model updates, geosci. model dev., 14, 795–820.

Kucuk, O. and Sevinc, V. (2023). Fire behavior prediction with artificial intelligence in thinned black pine (pinus nigra arnold) stand. *Forest Ecology and Management*, 529:120707.

Kudláčková, L., Bartošová, L., Linda, R., Bláhová, M., Poděbradská, M., Fischer, M., Balek, J., Žalud, Z., and Trnka, M. (2024). Assessing fire danger classes and extreme thresholds of the canadian fire weather index across global environmental zones: a review. *Environmental Research Letters*.

Kurbán, A., Tosetti, S., Cúnsulo, M., Montilla, E., and Ortega, A. (2023). Evaluación del confort bioclimático del verde urbano árido mediante simulaciones micrometeorológicas y el índice utci. *Informes de la Construcción*, 75(571):e504–e504.

Kurmi, R. and Gupta, J. (2006). A textbook of refrigeration and air conditioning. fist multicolour revised & updated edition.

Lavers, D. A., Simmons, A., Vamborg, F., and Rodwell, M. J. (2022). An evaluation of era5 precipitation for climate monitoring. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 148(748):3152–3165.

Lawson, B. D. and Armitage, O. (2008). Weather guide for the canadian forest fire danger rating system.

Lawton, Q. A., Majumdar, S. J., Dotterer, K., Thorncroft, C., and Schreck III, C. J. (2022). The influence of convectively coupled kelvin waves on african easterly waves in a wave-following framework. *Monthly Weather Review*, 150(8):2055–2072.

Li, J., Han, Z., Sun, Y., Li, J., and Liang, L. (2021a). Chemical formation pathways of secondary organic aerosols in the beijing-tianjin-hebei region in wintertime. *Atmospheric Environment*, 244:117996.

Li, J., Wang, W., Li, K., Zhang, W., Peng, C., Zhou, L., Shi, B., Chen, Y., Liu, M., Li, H., and Ge, M. (2020). Temperature effects on optical properties and chemical composition of secondary organic aerosol derived from n-dodecane. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 20(13):8123 – 8137.

Li, N., Guo, J., Wu, M., Zhang, F., Guo, X., Sun, Y., Zhang, Z., Liang, H., and Chen, T. (2024). Low-level jet and its effect on the onset of summertime nocturnal rainfall in beijing. *Geophysical Research Letters*, 51(20):e2024GL110840.

Li, X., Yang, Y., Mi, J., Bi, X., Zhao, Y., Huang, Z., Liu, C., Zong, L., and Li, W. (2021b). Leveraging machine learning for quantitative precipitation estimation from fengyun-4 geostationary observations and ground meteorological measurements. *Atmospheric Measurement Techniques*, 14(11):7007–7023.

Liang, L., Engling, G., Cheng, Y., Zhang, X., Sun, J., Xu, W., Liu, C., Zhang, G., Xu, H., Liu, X., and Ma, Q. (2019). Influence of high relative humidity on secondary organic carbon: Observations at a background site in east china. *Journal of Meteorological Research*, 33:905 – 913.

Lin, P., Liu, J., Shilling, J., Kathmann, S., Laskin, J., and Laskin, A. (2015). Molecular characterization of brown carbon (brc) chromophores in secondary organic aerosol generated from photo-oxidation of toluene. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 17:23312 – 23325.

Liu, S., Tsona, N., Zhang, Q., Jia, L., Xu, Y., and Du, L. (2019). Influence of relative humidity on cyclohexene soa formation from oh photooxidation. *Chemosphere*, 231:478 – 486.

Luo, H., Guo, Y., Shen, H., Huang, D., Zhang, Y., and Zhao, D. (2024). Effect of relative humidity on the molecular composition of secondary organic aerosols from a- pinene ozonolysis. *Environmental Science: Atmospheres*, 4:519 – 530.

Lv, Z., Wei, W., Cheng, S., Han, X., and Wang, X. (2020). Meteorological characteristics within boundary layer and its influence on pm2. 5 pollution in six cities of north china based on wrf-chem. *Atmospheric environment*, 228:117417.

Madden, R. A. and Julian, P. R. (1971). Detection of a 40–50 day oscillation in the zonal wind in the tropical pacific. *Journal of the atmospheric sciences*, 28(5):702–708.

Madden, R. A. and Julian, P. R. (1972). Description of global-scale circulation cells in the tropics with a 40–50 day period. *Journal of the atmospheric sciences*, 29(6):1109–1123.

Mahilang, M., Kanti Deb, M., and Pervez, S. (2021). Biogenic secondary organic aerosols: A review on formation mechanism, analytical challenges and environmental impacts. *Chemosphere*, 262:127771.

Marcial-Pablo, M. d. J., Gonzalez-Sanchez, A., Jimenez-Jimenez, S. I., Ontiveros-Capurata, R. E., and Ojeda-Bustamante, W. (2019). Estimation of vegetation fraction using rgb and multispectral images from uav. *International Journal of Remote Sensing*, 40(2):420–438.

Marin Pineda, D., Marín Ochoa, B., Lopez Lopez, L., Hincapie Reyes, R., Aristizabal Gomez, L., Rueda Vallejo, Z., Sanchez Garcia, O., Amaya Fernandez, F., Toro Gomez, M., Oviedo Carrascal, A., Muñoz, D. A., Orozco Jiménez, L., Ortiz Trujillo, I., Molina, F., Ramos, C. D., Agudelo, J., Morales-Betancourt, R., Narváez, D., Groot De Restrepo, H., and Rodriguez-Villamizar, L. (2024). Informe final: Promesa fase 1:procedencia del material particulado y su efecto en la salud de los niños, diseño de un sistema de monitoreo de tercera generación para estimar carga atribuible por contaminación atmosférica. Technical report, Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación - Minciencias, Universidad Pontificia Bolivariana.

Martínez, J., Vega-Garcia, C., and Chuvieco, E. (2009). Human-caused wildfire risk rating for prevention planning in spain. *Journal of environmental management*, 90(2):1241–1252.

Martínez-Gomariz, E., Valentin, M., and Russo, B. (2016). Experimental study of the stability of pedestrians exposed to urban pluvial flooding. *Natural Hazards*, 82:1–20.

Martínez-Gomariz, E., Valentin, M., and Russo, B. (2019). Estabilidad de vehículos frente a inundaciones: estudio numérico-experimental. *Ribagua*, 6:1–15.

Masinda, M. M., Li, F., Qi, L., Sun, L., and Hu, T. (2022). Forest fire risk estimation in a typical temperate forest in northeastern china using the canadian forest fire weather index: case study in autumn 2019 and 2020. *Natural hazards*, pages 1–17.

Massada, A. B., Radeloff, V. C., Stewart, S. I., and Hawbaker, T. J. (2009). Wildfire risk in the wildland–urban interface: a simulation study in northwestern wisconsin. *Forest Ecology and Management*, 258(9):1990–1999.

Matzarakis, A., Rutz, F., Chen, Y., and Fröhlich, D. (2017). Rayman pro, a tool for applied climatology, rayman manual version 0.1.

Matzarakis, A., Rutz, F., and Mayer, H. (2010). Modelling radiation fluxes in simple and complex environments: basics of the rayman model. *International journal of biometeorology*, 54:131–139.

Mekonnen, A., Thorncroft, C. D., and Aiyyer, A. R. (2006). Analysis of convection and its association with african easterly waves. *Journal of Climate*, 19(20):5405–5421.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017). Relación 2254 del 2017. (Noviembre).

Miranda, V. F., dos Santos, D. M., Peres, L. F., Salvador, C., Nieto, R., Müller, G. V., Thielen, D., and Libonati, R. (2024). Heat stress in south america over the last four decades: a bioclimatic analysis. *Theoretical and Applied Climatology*, 155(2):911–928.

Mizuta, R., Yoshimura, H., Murakami, H., Matsueda, M., Endo, H., Ose, T., Kamiguchi, K., Hosaka, M., Sugi, M., Yukimoto, S., et al. (2012). Climate simulations using mri-agcm3. 2 with 20-km grid. . *2* , 90(0):233–258.

Montoya, J. J. (2008). Desarrollo de un modelo conceptual de producción, transporte y depósito de sedimentos. *Universidad Politécnica de Valencia*.

Moraux, A., Dewitte, S., Cornelis, B., and Munteanu, A. (2019). Deep learning for precipitation estimation from satellite and rain gauges measurements. *Remote Sensing*, 11(21):2463.

Moriasi, D. N., Gitau, M. W., Pai, N., and Daggupati, P. (2015). Hydrologic and water quality models: Performance measures and evaluation criteria. *Transactions of the ASABE*, 58(6):1763–1785.

Muñoz, E., Arumí, J., Wagener, T., Oyarzun, R., and Parra, V. (2016). Unraveling complex hydrogeological processes in andean basins in south-central chile: An integrated assessment to understand hydrological dissimilarity: Unraveling hydrogeological processes in the chilean andes. *Hydrological Processes*, 30.

National Centers for Environmental Prediction, National Weather Service, NOAA, U.S. Department of Commerce (2007). Ncep global forecast system (gfs) analyses and forecasts.

Nenes, A., Pandis, S., and Pilinis, C. (1998). Isorropia: A new thermodynamic equilibrium model for multiphase multicomponent inorganic aerosols. *Aquatic Geochemistry*, 4:123 – 152.

Nenes, A., Pandis, S., and Pilinis, C. (1999). Continued development and testing of a new thermodynamic aerosol module for urban and regional air quality models. *Atmospheric Environment*, 33:1553 – 1560.

Neteler, M. (2022). Jupyter notebook: Grass gis 8 and processing of multitemporal eo data. `https://github.com/neteler/jupyter_sentinel2_grass_gis`.

Ortega, G. and Arias, P. (2018). Evaluación de la representación de la precipitación y la temperatura media por modelos cmip5 sobre colombia y el neotrópico: implicaciones en regímenes hidrológicos. *XXIII seminario nacional de hidráulica e hidrología*, pages 1–14.

Ortega, G., Arias, P. A., Villegas, J. C., Marquet, P. A., and Nobre, P. (2021). Present-day and future climate over central and south america according to cmip5/cmip6 models. *International Journal of Climatology*, 41(15):6713–6735.

Pais, C., Carrasco, J., Martell, D. L., Weintraub, A., and Woodruff, D. L. (2021). Cell2fire: A cell-based forest fire growth model to support strategic landscape management planning. *Frontiers in Forests and Global Change*, 4:692706.

Pani S.K., Chantara S., K. C. L. C.-T. L. N.-H. (2019). Biomass burning in the northern peninsular southeast asia: Aerosol chemical profile and potential exposure. *Atmospheric Research*, 224.

Patricola, C. M., Saravanan, R., and Chang, P. (2018). The response of atlantic tropical cyclones to suppression of african easterly waves. *Geophysical Research Letters*, 45(1):471–479.

Pausas, J. G. and Keeley, J. E. (2021). Wildfires and global change. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 19(7):387–395.

Pérez, I. A., García, M. Á., Sánchez, M. L., Pardo, N., and Fernández-Duque, B. (2020). Key points in air pollution meteorology. *International journal of environmental research and public health*, 17(22):8349.

Perez-Morales, G., Morales, P., and Haza, A. (2016). Polycyclic aromatic hydrocarbons (pahs) i: Toxicity, population exposure and involved foods. *Revista Complutense de Ciencias Veterinarias*, 10(1):1–15.

Polade, S. D., Pierce, D. W., Cayan, D. R., Gershunov, A., and Dettinger, M. D. (2014). The key role of dry days in changing regional climate and precipitation regimes. *Scientific reports*, 4(1):4364.

Poveda, G. (2004). La hidroclimatología de colombia: una síntesis desde la escala inter-decadal hasta la escala diurna.

Poveda, G., Alvarez, D. M., and Rueda, O. A. (2011). Hydro-climatic variability over the andes of colombia associated with enso: a review of climatic processes and their impact on one of the earth's most important biodiversity hotspots. *Climate Dynamics*, 36:2233–2249.

Poveda, G., Espinoza, J. C., Zuluaga, M. D., Solman, S. A., Garreaud, R., and van Oevelen, P. J. (2020). High Impact Weather Events in the Andes.

Poveda, G., Mesa, O., Agudelo, P., Álvarez, J., Arias, P., Moreno, H., Salazar, L., Toro, V., and Vieira, S. (2002). Influencia del enso, oscilación madden–julian, ondas del este, huracanes y fases de la luna en el ciclo diurno de la precipitación en los andes tropicales de colombia. *Meteorología Colombiana*, 5(0124-6984):3–12.

Poveda, G., Waylen, P. R., and Pulwarty, R. S. (2006). Annual and inter-annual variability of the present climate in northern south america and southern mesoamerica. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 234(1):3–27.

Puricelli, M. M. (2003). Estimación y distribución de parámetros del suelo para la modelación hidrológica. *Universidad Politécnica de Valencia*.

Quilcaille, Y., Batibeniz, F., Ribeiro, A. F., Padrón, R. S., and Seneviratne, S. I. (2022). Fire weather index data under historical and ssp projections in cmip6 from 1850 to 2100. *Earth System Science Data Discussions*, 2022:1–31.

Ramírez-Cardona, Á. and Jiménez Mejía, J. F. (2023). The nocturnal boundary layer of aburra's valley, a tropical urban area with complex topography. *Dyna*, 90(229):9–18.

Recalde-Coronel, G. C., Zaitchik, B., and Pan, W. K. (2020). Madden–julian oscillation influence on sub-seasonal rainfall variability on the west of south america. *Climate dynamics*, 54(3):2167–2185.

Reed, R., Klinker, E., and Hollingsworth, A. (1988). The structure and characteristics of african easterly wave disturbances as determined from the ecmwf operational analysis/forecast system. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 38:22–33.

Reed, R. J., Norquist, D. C., and Recker, E. E. (1977). The structure and properties of african wave disturbances as observed during phase iii of gate. *Monthly Weather Review*, 105(3):317–333.

Rodell, C., Howard, R., Jain, P., Moisseeva, N., Chui, T., and Stull, R. (2024). Forecasting hourly wildfire risk: Enhancing fire danger assessment using numerical weather prediction. *Weather and Forecasting*, 39(6):925–941.

Rojo Hernandez, J. and Mesa, O. (2018). Mjo influence over northern south american. observations and modeling. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, volume 2018, pages A41M–3171.

Roldán-Henao, N., Hoyos, C. D., Herrera-Mejía, L., and Isaza, A. (2020). An investigation of the precipitation net effect on the particulate matter concentration in a narrow valley: Role of lower-troposphere stability. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 59(3):401–426.

Rothermel, R. C. (1972). *A mathematical model for predicting fire spread in wildland fuels*, volume 115. Intermountain Forest & Range Experiment Station, Forest Service, US ....

Rumelhart, D. E., Hinton, G. E., and Williams, R. J. (1986). Learning representations by back-propagating errors. *nature*, 323(6088):533–536.

Sarchosidis, C. and Klöwer, M. (2016). The influence of low-level wind shear on the surface turbulence kinetic energy production in adventdalen, svalbard. Technical report, Report AGF-350/850, University Centre in Svalbard, 14pp. http://milank. de ....

Scott, C., Rap, A., Sprackeln, C., Forster, P., Carslaw, K., Mann, G., Pringle, K., Kivekas, N., Kulmala, M., Lihavainen, H., and Tunved, P. (2014). The diarect and indirect radiative effects of biogenic secondary organic aerosol. *Atmospheric chemistry and physics*, 14:447–470.

Scott, J. H. (2005). *Standard fire behavior fuel models: a comprehensive set for use with Rothermel's surface fire spread model*. US Department of Agriculture, Forest Service, Rocky Mountain Research Station.

Sepúlveda (2016). Estimación cuantitativa de precipitación a partir de la información de radar meteorológico del Área metropolitana del valle de aburrá.

Serra, Y. L., Kiladis, G. N., and Hodges, K. I. (2010). Tracking and mean structure of easterly waves over the intra-americas sea. *Journal of Climate*, 23(18):4823–4840.

Shen, Z., Yong, B., Gourley, J. J., Qi, W., Lu, D., Liu, J., Ren, L., Hong, Y., and Zhang, J. (2020). Recent global performance of the climate hazards group infrared precipitation (chirp) with stations (chirps). *Journal of Hydrology*, 591:125284.

Sierra, J. P., Arias, P. A., Durán-Quesada, A. M., Tapias, K. A., Vieira, S. C., and Martínez, J. A. (2021). The choco low-level jet: past, present and future. *Climate Dynamics*, 56:2667–2692.

Stäubli, A., Nussbaumer, S. U., Allen, S. K., Huggel, C., Arguello, M., Costa, F., Hergarten, C., Martínez, R., Soto, J., Vargas, R., et al. (2018). Analysis of weather-and climate-related disasters in mountain regions using different disaster databases. *Climate change, extreme Events and disaster risk reduction: towards sustainable development goals*, pages 17–41.

Stocks, B. J., Lawson, B., Alexander, M., Wagner, C. V., McAlpine, R., Lynham, T., and Dube, D. (1989). The canadian forest fire danger rating system: an overview. *The Forestry Chronicle*, 65(6):450–457.

Stockwell, W. R., Kirchner, F., Kuhn, M., and Seefeld, S. (1997). A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D22):25847–25879.

Stull, R. B. (2012). *An introduction to boundary layer meteorology*, volume 13. Springer Science & Business Media.

Sun, X., Zhao, T., Tang, G., Bai, Y., Kong, S., Zhou, Y., Hu, J., Tan, C., Shu, Z., Xu, J., et al. (2023). Vertical changes of pm2. 5 driven by meteorology in the atmospheric boundary layer during a heavy air pollution event in central china. *Science of the Total Environment*, 858:159830.

Thomsen, D., Iversen, E., Skonager, J., Luo, Y., Li, L., Roldin, P., Priestley, M., Pedersen, H., Hallquist, M., Ehn, M., Bilde, M., and M, G. (2024). The effect of temperature and relative humidity on secondary organic aerosol formation from ozonolysis of d3 -carene. *Environmental Science: Atmospheres*, 4:88 – 103.

Thorncroft, C. and Hodges, K. (2001). African easterly wave variability and its relationship to atlantic tropical cyclone activity. *Journal of Climate*, 14(6):1166–1179.

Thornthwaite, C. W. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical review*, 38(1):55–94.

Thrasher, B., Wang, W., Michaelis, A., Melton, F., Lee, T., and Nemani, R. (2022). Nasa global daily downscaled projections, cmip6. *Scientific data*, 9(1):262.

Tolan, J., Yang, H.-I., Nosarzewski, B., Couairon, G., Vo, H. V., Brandt, J., Spore, J., Majumdar, S., Haziza, D., Vamaraju, J., et al. (2024). Very high resolution canopy height maps from rgb imagery using self-supervised vision transformer and convolutional decoder trained on aerial lidar. *Remote Sensing of Environment*, 300:113888.

Torres-Pineda, C. E. and Pabón-Caicedo, J. D. (2017). Variabilidad intraestacional de la precipitación en colombia y su relación con la oscilación de madden-julian. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 41(158):79–93.

Van Wagner, C., Pickett, T., et al. (1985). *Equations and FORTRAN program for the Canadian forest fire weather index system*, volume 33.

Varela, V., Sfetsos, A., Vlachogiannis, D., and Gounaris, N. (2018). Fire weather index (fwi) classification for fire danger assessment applied in greece. *Tethys*, 15:31–40.

Velásquez-García, M. P., Hernández, K. S., Vergara-Correa, J. A., Pope, R. J., Gómez-Marín, M., and Rendón, A. M. (2024). Long-range transport of air pollutants increases the concentration of hazardous components of pm 2.5 in northern south america. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(20):11497–11520.

Venkatram, A. and Schulte, N. (2018). Fundamentals of micrometeorology and dispersion.

Ventrice, M. J., Thorncroft, C. D., and Roundy, P. E. (2011). The madden–julian oscillation's influence on african easterly waves and downstream tropical cyclogenesis. *Monthly Weather Review*, 139(9):2704–2722.

Wagenbrenner, N. S., Forthofer, J. M., Lamb, B. K., Shannon, K. S., and Butler, B. W. (2016). Downscaling surface wind predictions from numerical weather prediction models in complex terrain with windninja. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(8):5229–5241.

Waliser, D. and Lau, W. K.-M. (2005). Intraseasonal variability in the atmosphere-ocean climate system. *Intraseasonal Variability in the Atmosphere-Ocean Climate System*, page 80.

Wang, H., Lu, K., Tan, Z., Chen, X., Liu, Y., and Zhang, Y. (2023). Formation mechanism and control strategy for particulate nitrate in china. *Journal of Environmental Sciences*, 123:476 – 486.

Wang, H., Wang, X., Yang, X., Li, W., Xue, L., Wang, T., Chen, J., and Wang, W. (2017). Mixed chloride aerosols and their atmospheric implications: A review. *Aerosol and Air Quality Research*, 17:878 – 887.

Wang, W., Barker, D., Bray, J., BruyÃšre, C., Duda, M., Dudhia, J., Gill, D., and Michalakes, J. (2007). Weather research forecasting.

Wang, Y., Zhuang, G., Tang, A., Yuan, H., Sun, Y., Chen, S., and Zheng, A. (2005). The ion chemistry and the source ofpm 2.5 aerosol in beijing. *Atmospheric Environment*, 39:3771 – 3784.

Wardlow, B. D., Tadesse, T., Brown, J. F., Callahan, K., Swain, S., and Hunt, E. (2012). Vegetation drought response index an integration of satellite, climate, and biophysical data.

Wei, W., Zhang, H., Cai, X., Song, Y., Bian, Y., Xiao, K., and Zhang, H. (2020). Influence of intermittent turbulence on air pollution and its dispersion in winter 2016/2017 over beijing, china. *Journal of Meteorological Research*, 34(1):176–188.

Wei, W., Zhang, H., Zhang, X., and Che, H. (2023). Low-level jets and their implications on air pollution: A review. *Frontiers in Environmental Science*, 10:1082623.

Wei, Z. and Tahrin, N. (2024). Aerosol acidity and its impact on sulfate and nitrate of pm2.5 in southern city of beijing-tianjin-hebei region. *Atmospheric Pollution Research*, 15.

Wheeler, M. C. and Hendon, H. H. (2004). An all-season real-time multivariate mjo index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly weather review*, 132(8):1917–1932.

Woolnough, S. J. (2019). Chapter 5 - the madden-julian oscillation. In Robertson, A. W. and Vitart, F., editors, *Sub-Seasonal to Seasonal Prediction*, pages 93 – 117. Elsevier.

Wu, M.-L. C., Reale, O., and Schubert, S. D. (2013). A characterization of african easterly waves on 2.5–6-day and 6–9-day time scales. *Journal of Climate*, 26(18):6750–6774.

Wyard, C., Beaumont, B., Grippa, T., Georganos, S., and Hallot, E. (2021). Uavs for fine-scale open-source landfill mapping. In *Proc. IEEE IGARSS*, pages 8217–8220.

Xiao, Z., Miao, Y., Du, X., Tang, W., Yu, Y., Zhang, X., and Che, H. (2020). Impacts of regional transport and boundary layer structure on the pm2. 5 pollution in wuhan, central china. *Atmospheric environment*, 230:117508.

Xu, L., Tsona, N., You, B., Zhang, Y., Wang, S., Yang, Z., Xue, L., and Du, L. (2020). Nox enhances secondary organic aerosol formation from nighttime -terpinene ozonolysis. *Atmospheric Environment*, 225:117375.

Xu, Z., Han, Y., Tam, C.-Y., Yang, Z.-L., and Fu, C. (2021). Bias-corrected cmip6 global dataset for dynamical downscaling of the historical and future climate (1979–2100). *Scientific Data*, 8(1):293.

Yamin, L. E., Ghesquiere, F., Cardona, O. D., and Ordaz, M. G. (2013). *Modelación probabilista para la gestión del riesgo de desastre: El caso de Bogotá, Colombia*. Banco Mundial, Bogotá, Colombia.

Yan, J., Wang, X., Gong, P., Wang, C., and Cong, Z. (2018). Review ofbrown carbon aerosols:recent progress and perspectives. *Science of the Total Environment*, 634:1475 – 1485.

Yan, J., Wang, X., Gong, P., Wang, C., and Cong, Z. (2021). Effect of nox on secondary organic aerosol formation from the photochemical transformation of allyl acetate. *Atmospheric Environment*, 255:118426.

Ye, Z., Yang, K., Lin, Y., Guo, S., Sun, Y., Chen, X., Lai, R., and Zhang, H. (2023). A comparison between pixel-based deep learning and object-based image analysis (obia) for individual detection of cabbage plants based on uav visible-light images. *Computers and Electronics in Agriculture*, 209:107822.

Yepes Palacio, L. J. (2012). *Variabilidad climática intraestacional y su efecto sobre la precipitación en colombia: Diagnóstico y pronóstico*. PhD thesis.

Yoneyama, K. and Zhang, C. (2020). Years of the maritime continent. *Geophysical Research Letters*, 47(12):e2020GL087182.

Zhai, X., Zhang, Y., Zhang, Y., Guo, L., and Liu, R. (2021). Simulating flash flood hydrographs and behavior metrics across china: Implications for flash flood management. *Science of The Total Environment*, 763:142977.

Zhang, C. (2015). Climate and climate change — global impacts of the madden–julian oscillation. In North, G. R., Pyle, J., and Zhang, F., editors, *Encyclopedia of Atmospheric Sciences (Second Edition)*, pages 73 – 79. Academic Press, Oxford, second edition edition.

Zhang, W., Hai, S., Zhao, Y., Sheng, L., Zhou, Y., Wang, W., and Li, W. (2021). Numerical modeling of regional transport of pm2. 5 during a severe pollution event in the beijing–tianjin–hebei region in november 2015. *Atmospheric Environment*, 254:118393.

Zhou, K., Ming, D., Lv, X., Fang, J., and Wang, M. (2019). Cnn-based land cover classification combining stratified segmentation and fusion of point cloud and very high-spatial resolution remote sensing image data. *Remote Sensing*, 11(17).

Zubieta, R., Prudencio, F., Ccanchi, Y., Saavedra, M., Sulca, J., Reupo, J., and Alarco, G. (2021). Potential conditions for fire occurrence in vegetation in the peruvian andes. *International journal of wildland fire*, 30(11):836–849.

Anexo A: Campaña de medición de aerosoles secundarios en el Valle de Aburrá

Introducción

La composición del PM2.5 puede tener un origen primario o secundario. El primero se debe principalmente a la combustión de combustibles fósiles y quemas de biomasa, mientras que el segundo se debe a la interacción química de contaminantes primarios en la atmósfera, favoreciendo la producción de aerosoles, que pueden tener una composición orgánica o inorgánica (Gao et al. (2020)). Entre las emisiones primarias se destacan los óxidos de nitrógeno (NO_X) y el dióxido de azufre (SO_2), los cuales son precursores de nitratos y sulfatos, que son compuestos aportantes al PM2.5 secundario.

En el Valle de Aburrá se han realizado campañas de caracterización química a cargo del Politécnico Jaime Isaza Cadavid, en convenio con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las cuales han cuantificado las fracciones orgánica y elemental del PM2.5, en las estaciones correspondientes a MED-BEME, MED-SELE, MED-PJIC, MED-LAYE, GIR-SOSN e ITA-CJUS (AMVA (2019)). Adicionalmente, se han identificado los elementos que componen las fracciones mayoritaria, minoritaria, trazas y ultratrazas, así como también los cationes y aniones tales como fluoruros, cloruros, nitratos y sulfatos.

En el territorio metropolitano es de gran interés caracterizar el PM2.5 y poder evaluar el aporte tanto de emisiones primarias como de precursores, que permitan orientar diferentes acciones de prevención, reducción, y control por parte de la autoridad ambiental, teniendo en cuenta que el PM2.5 es el contaminante más crítico del Valle de Aburrá, debido a que sus concentraciones han alcanzado niveles dañinos para la población. Las propuestas de mejoramiento de la calidad del aire en períodos de gestión de episodios de contaminación atmosférica están muy soportadas desde lo técnico, en la reducción de las emisiones aportadas por el sector con más carga de emisión de PM2.5 primario, y se consideran con menos fuerza (debido entre otras causas a la poca información), a agentes contaminantes precursores del PM2.5 secundario (NO_X, SO_2, COVs) y otros compuestos químicos que participan en los mecanismos de reacción, ya sea como catalizadores, como es el caso del formaldehido.

Objetivos

I. Aproximarse al ciclo diurno de las concentraciones de aerosoles secundarios y especies reactivas que aportan a la formación del PM2.5 secundario en el Valle de Aburrá.

II. Generar información que aporte al estudio de la formación del PM2.5 secundario en dos sitios de monitoreo en la región.

Metodología

Puntos de muestreo

Para la campaña de caracterización química de PM2.5 secundario, fueron seleccionados dos puntos de medición que conforman la Red de Monitoreo de Calidad del Aire. Una de las estaciones se encuentra ubicada en los tanques de agua de EPM del municipio de Girardota (GIR-EPM), mientras que la otra estación se encuentra en la sede de la Casa de Justicia del municipio de Itagüí (ITA-CJUS). Estos puntos de monitoreo se escogieron basados en los registros históricos de las concentraciones de precursores como el SO_2 que en el caso del punto de GIR-EPM, se presentan los valores más altos de este contaminante de acuerdo con las mediciones de la Red de Monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá, además los estudios de inventario de emisiones atmosféricas con año base 2022 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2023)), indican que en este municipio se dan las mayores emisiones de este contaminante. Por otro lado, en la estación ITA-CJUS se han presentado mediciones importantes del carbono orgánico (OC) mayores a las del carbono elemental (EC), registrado también por equipos que conforman la Red de Monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá, evidenciando una notable actividad química favoreciendo la formación de aerosoles secundarios en esta zona del Valle de Aburrá.

Período de medición

Las mediciones fueron realizadas los días 1 y 7 de noviembre de 2024, con una resolución temporal de cada 3 horas. La toma de muestra se efectuó de forma continua en ambas fechas, sin embargo, para el día viernes 1 de noviembre, la jornada de monitoreo fue de 12 horas, mientras que para el día jueves 7 de noviembre se realizó una medición durante 24 horas desde las 06:00 horas. La campaña de medición se realizó al final del segundo período de gestión de episodios de contaminación atmosférica definido por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. En la recolección de muestras para el caso del formaldehido y del tolueno, se emplearon filtros de carbón activado, mientras que para la cuantificación de los aniones se emplearon filtros de cuarzo de PM2.5 en equipos de medición manual de referencia PQ200. Es importante mencionar que los valores de las concentraciones de las especies químicas reportadas, corresponden a las tres horas previas al registro.

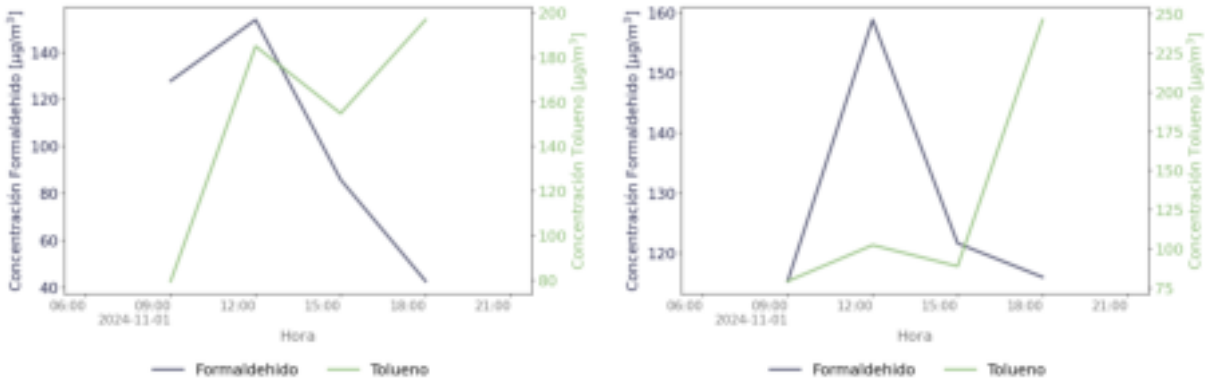
Caracterización química

La logística para la toma de muestra estuvo a cargo del personal técnico del componente de calidad del aire del proyecto SIATA. La cuantificación de las concentraciones del formaldehido y tolueno fueron realizadas por el laboratorio Conhintec, mediante la técnica de cromatografía de gases (FID), con los métodos de NIOSH 2541 y NIOSH 1501M respectivamente, el laboratorio cuenta con acreditación para dichos procesos. Por otro lado, los análisis de los iones (sulfatos, nitratos y cloruros) fueron realizados por el Laboratorio Instrumental de Alta Complejidad (LIAC) de la Universidad de la Salle, con el método implementado más no acreditado de cromatografía líquida y por detección de conductividad. Una vez recolectada las muestras, los filtros fueron reservados manteniendo una cadena de frio a una temperatura inferior a 4 °C, hasta el momento de su entrega al laboratorio.

Resultados

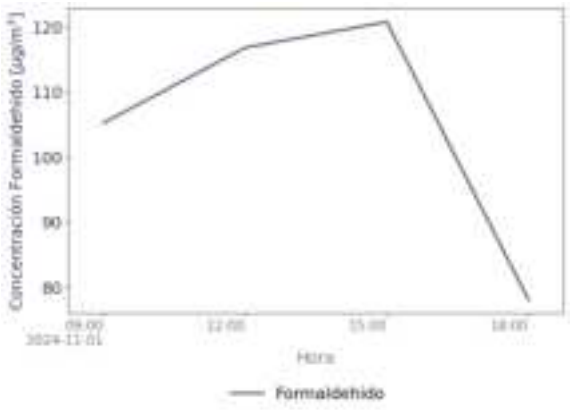
Concentraciones de especies reactivas

En la cuantificación de compuestos químicos de interés se destaca la medición del formaldehido y el tolueno, como especies reactivas que favorecen las reacciones de formación de aerosoles secundarios. En el caso del formaldehido como catalizador en la formación de sulfatos y el tolueno como intermediario de reacción de aerosoles secundarios (Dovrou et al. (2021); Lin et al. (2015)). Debido a su importancia en la cinética química para la formación de aerosoles secundarios, en las Figuras 404 y 405 se observan las concentraciones medidas para los días 1 y 7 de noviembre de 2024, respectivamente.



(a) ITA-CJUS

(b) GIR-EPM

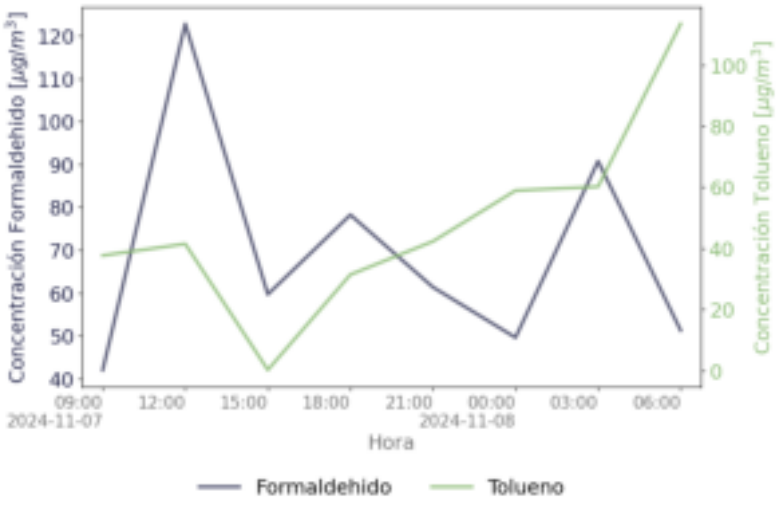


(c) CEN-TRAF

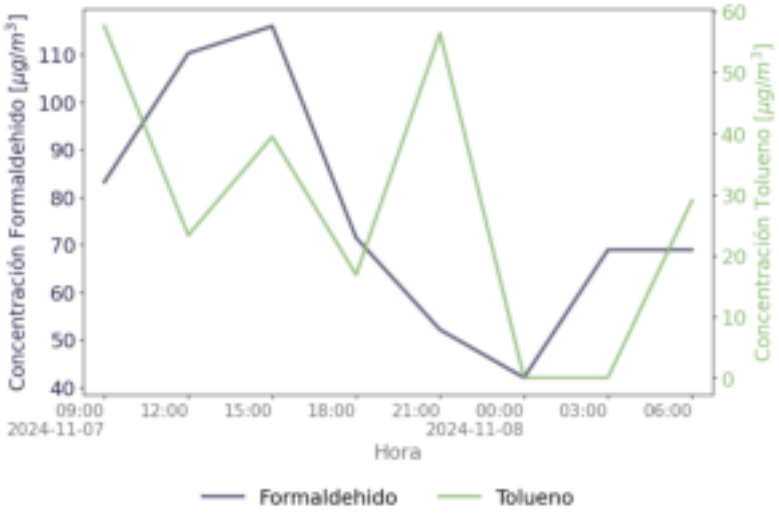
Figura 404: Ciclo diurno de las concentraciones de formaldehido y tolueno en las estaciones (a) ITA-CJUS, (b) GIR-EPM y (c) CEN-TRAF el 1 de noviembre de 2024.

Las concentraciones obtenidas el día 1 de noviembre muestran que se presentan picos de concentración para el formaldehido alrededor de las 12:00 horas para las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM (155 $\mu g/m^3$ aproximadamente), mientras que en la estación CEN-TRAF el valor más alto se alcanza a las 15:00 horas (120 $\mu g/m^3$). La estación CEN-TRAF corresponde a una estación de tráfico, mientras que en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM hay una mayor influencia del sector industrial. Estos valores máximos

de formaldehido podrían evidenciar una actividad importante en la formación de sulfatos en dichos puntos, observando adicionalmente una reducción importante de este compuesto en el transcurso de la tarde.



(a) ITA-CJUS



(b) GIR-EPM

Figura 405: Ciclo diurno de las concentraciones de formaldehido y tolueno en las estaciones (a) ITA-CJUS y (b) GIR-EPM del 7 al 8 de noviembre de 2024.

En el caso del tolueno se puede notar una diferencia importante en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM. Mientras que en ITA-CJUS presenta concentraciones altas al medio dia de 180 $\mu g/m^3$ aproximadamente, en GIR-EPM son del orden de 100 $\mu g/m^3$. Destacando que en ambos puntos de medición, las concentraciones alcanzan un valor máximo a las 18:00 horas en el período de evaluación, de hasta 200 $\mu g/m^3$ en ITA-CJUS y de 245 $\mu g/m^3$ en GIR-EPM. Lo anterior podría indicar una mayor actividad de fuentes de emisión asociadas a procesos de combustión de combustibles fósiles, lo que estaría aportando a las

concentraciones de tolueno.

Por otro lado, para la jornada de medición del día 7 de noviembre, que fue por un período de 24 horas en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM, se pueden observar otros máximos de concentración de formaldehido en el transcurso del día, específicamente a las 03:00 horas en ambos puntos de monitoreo. Al igual que en la campaña de medición del 1 de noviembre, se observan altas concentraciones al medio día, sin embargo, el orden de magnitud de las concentraciones, es inferior, con valores de 120 $\mu g/m^3$ aproximadamente.

El tolueno presentó un comportamiento más aleatorio en ambos puntos, evidenciando máximos a diferentes horas del día. Se destaca que en el caso de la estación ITA-CJUS presentó incrementos progresivos desde las 15:00 hasta las 06:00 horas del día siguiente, en un rango de concentración entre 5 y 110 $\mu g/m^3$, mientras que en la estación GIR-EPM se obtuvieron valores de concentraciones desde 5 hasta 57 $\mu g/m^3$, menos de la mitad de los valores obtenidos el día 1 de noviembre.

Concentraciones de especies secundarias

A partir de las concentraciones medidas de aniones sulfatos y nitratos, se obtuvieron los ciclos diurnos para una jornada de monitoreo de 24 horas partiendo desde las 06:00 horas del día jueves 7 hasta el viernes 8 de noviembre del 2024, como se observan en la Figura 406.

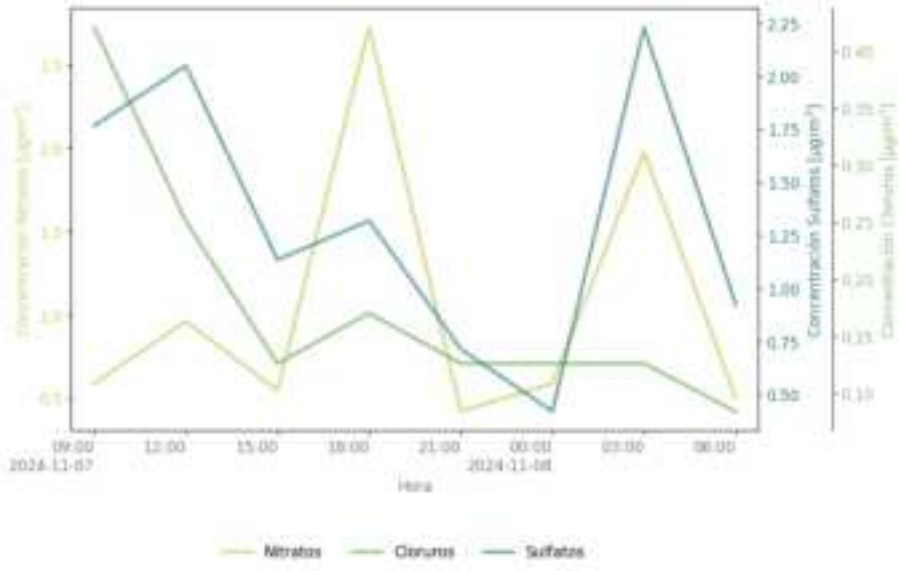
Para la estación ITA-CJUS se observan picos en las concentraciones de sulfatos cerca de las 12:00 horas con valores de 2 $\mu g/m^3$, y otro menos pronunciado a las 18:00 horas de 1.25 $\mu g/m^3$ del día 7 de noviembre de 2024. Adicionalmente, el máximo de concentración se registró a las 03:00 del día siguiente con una concentración de 2.25 $\mu g/m^3$.

En relación con el comportamiento de los nitratos en la estación ITA-CJUS, el pico de concentración más alta se presenta a las 18:00 horas con un valor de 2.7 $\mu g/m^3$. Sin embargo, otros picos de concentración de nitratos se presentaron a las 12:00 del 7 de noviembre y a las 03:00 del 8 de noviembre, con concentraciones de 1 y 2 $\mu g/m^3$ respectivamente.

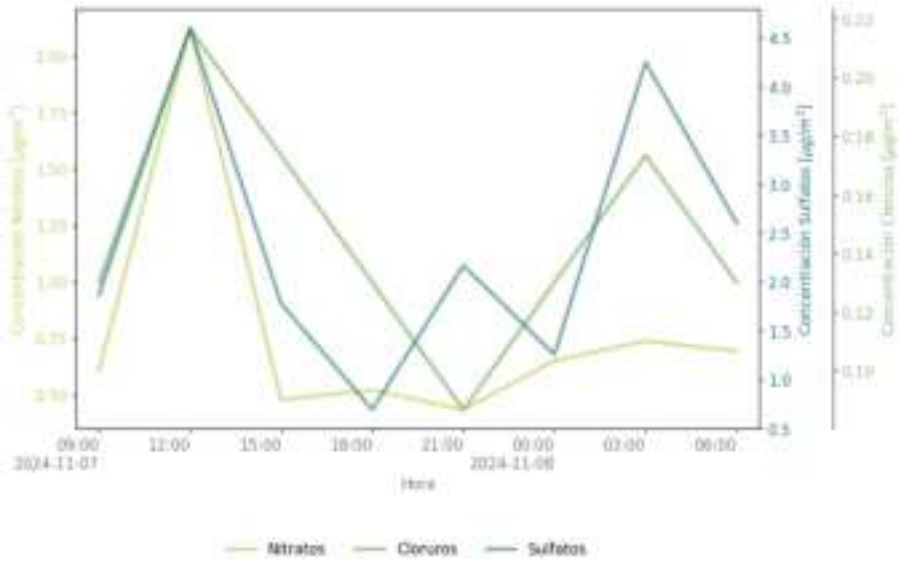
Adicionalmente en el punto de ITA-CJUS, las concentraciones de cloruros presentaron una reducción continua desde las horas de la mañana del día 7 de noviembre hasta el día siguiente, desde un valor máximo de 0.42 $\mu g/m^3$ hasta un mínimo de 0.1 $\mu g/m^3$ aproximadamente.

Por otro lado, en la estación GIR-EPM las concentraciones de sulfatos poseen un comportamiento similar al presentado de la estación ITA-CJUS. A las 12:00 del 7 de noviembre presentó un valor de 4.5 $\mu g/m^3$ y de 4.3 $\mu g/m^3$ a las 03:00 del 8 de noviembre, seguido de otro pico a las 21:00 del 7 de noviembre con una concentración de 2.1 $\mu g/m^3$. Mientras que para las concentraciones de nitratos se obtuvo un registro de mayor concentración de 2.2 $\mu g/m^3$ a las 12:00 del 7 de noviembre con leves aumentos alrededor de las 03:00 del 8 de noviembre aproximadamente hasta 0.75 $\mu g/m^3$.

Por último, las concentraciones de cloruros en GIR-EPM tuvo dos máximos de concentración a las mismas horas que se presentaron en los aniones de sulfatos, correspondientes a las 12:00 del 7 de noviembre y a las 03:00 del 8 de noviembre, con valores de 0.21 y 0.17 $\mu g/m^3$ respectivamente.



(a) ITA-CJUS



(b) GIR-EPM

Figura 406: Ciclo diurno de las concentraciones de sulfatos, nitratos y cloruros en las estaciones (a) ITA-CJUS y (b) GIR-EPM del 7 al 8 de noviembre de 2024.

Los análisis correspondientes a la influencia de precursores de PM2.5 secundario y factores meteorológicos sobre el comportamiento de las concentraciones de sulfatos, nitratos y cloruros se explican con mayor detalle en el documento de la investigación del Estudio de la formación de PM2.5 secundario en el Valle de Aburrá.

Consideraciones futuras

Con base en las experiencias de esta primera campaña de medición de aerosoles secundarios en el Valle de Aburrá, se sugieren las siguientes consideraciones para ejercicios de monitoreo futuro:

I. Continuar con la cuantificación de concentraciones de iones secundarios a una resolución temporal fina, que permita obtener valores a una escala de hasta 1 hora, considerando los límites de detección analíticos por parte de los laboratorios acreditados.

II. Adicionar otras especies mayoritarias en el ejercicio de caracterización química del PM2.5 secundario, específicamente la cuantificación del ión amonio, el cual es un ion importante en las dinámicas de reacción y formación de aerosoles secundarios.

III. Para obtener un análisis más profundo y aporte de especies químicas, será necesario cuantificar la concentración de PM2.5 inicial, con el objetivo de poder realizar un seguimiento al porcentaje de aporte de especies mayoritarias en puntos de monitoreo de interés a través del tiempo.

IV. Estudiar la posibilidad de implementar la cuantificación de aerosoles secundarios en la vertical mediante la implementación.

Anexo B: Campaña de caracterización química de compuestos tóxicos (HAPs) en el Valle de Aburrá

Introducción

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs) son un grupo especial de los compuestos orgánicos volátiles, de interés por su afectación a la salud pública al ser compuestos potencialmente cancerígenos (Chu and Chen. (2002)). En la Resolución Nacional 2254 de 2017 se establecen los límites permisibles de compuestos tóxicos o especiales en una escala anual. Para el caso de los HAPs se especifica un límite de 1 ng/m^3 expresado en términos de benzo-a-pireno (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2017)).

En el Valle de Aburrá se han realizado campañas de monitoreo de contaminantes atmosféricos tóxicos, específicamente (HAPs), destacando las campañas del 2017 realizadas por la Universidad de Antioquia con apoyo entre otros, del Área Metropolitana del Valle de Aburrá y la Alcaldía de Medellín y en el 2021 por el proyecto PROMESA (Marin Pineda et al. (2024)) con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación.

Por otro lado, las mediciones de los compuestos HAPs en la región se han realizado principalmente en muestras de PM10, en estaciones de monitoreo de calidad del aire como el Hospital del municipio de Barbosa (BAR-HSVP), Corantioquia (MED-CORA) y Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid (MED-PJIC) y en zonas residenciales como Manrique y Guayabal. Esta campaña tuvo como motivación la evaluación de las concentraciones de compuestos tóxicos establecidos en la normatividad actual, para estimar el riesgo potencial cancerígeno en los municipios del Valle de Aburrá por exposición a HAPs.

Objetivos

I. Monitorear las concentraciones de compuestos tóxicos, específicamente de hidrocarburos aromáticos policíclicos en filtros de PM10 en el Valle de Aburrá.

II. Comparar los resultados del monitoreo con los límites de emisión permisibles establecidos en la Resolución Nacional 2254 de 2017.

Metodología

Puntos de muestreo

La Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá cuenta con 9 equipos de medición manual de PM10, en los cuales se han realizado cuantificación de HAPs, por lo que fueron seleccionados puntos particulares para realizar una comparación en la evolución de la concentración de estos compuestos tóxicos.

Las mediciones de compuestos tóxicos se realizaron en muestras de PM10 en los equipos manuales ubicados en las estaciones del Hospital San Vicente de Paúl en el municipio de Barbosa (BAR-HSVP); en la sede de Corantioquia en el Distrito de Medellín (MED-CORA); en la Planta de Tratamiento de Aguas Residuales (ITA-PTAR) y la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) ambas en el municipio de Itagüí, y en la I.E. Santa María Goretti (EST-MAGO) en el municipio de la Estrella.

Los puntos de medición cuentan con equipos de muestreo de alto flujo de volumen (equipos High Vol), diseñados para mantener una velocidad de flujo total durante el tiempo de recolección de muestra de 24 horas.

Período de medición

El monitoreo de las concentraciones de compuestos tóxicos fue llevada a cabo entre los meses de octubre y noviembre de 2024. Específicamente, la toma de muestra fue cada tres días durante un periodo de 24 horas por personal técnico del proyecto SIATA, recolectadas entre el 17 de octubre y el 19 de noviembre de 2024, obteniendo un valor de 12 muestras por punto de monitoreo, para un total de 60 muestras analizadas.

Cuantificación analítica

El análisis de las muestras contemplan la cuantificación de las concentraciones de la familia de 16 compuestos asociados a HAPs en ng/m^3.

Para la toma de muestra y almacenamiento de los filtros de cuarzo antes de su análisis, se tuvieron en cuenta las condiciones técnicas asociadas al mantenimiento de la cadena de frio y manipulación de filtros. Los filtros fueron entregados fueron analizados por el laboratorio del Grupo de Investigación en Gestión y Modelación Ambiental- GAIA de la Universidad de Antioquia, el cual es el único laboratorio que cuenta con acreditación en el Valle de Aburrá para el análisis de HAPs en muestras de material particulado por parte del IDEAM, empleando la técnica de extracción líquido-líquido asistida por vortex y de cromatografía de gases acoplado a un espectrómetro de masas. En el enlace Cuantificación HAPS pueden consultarse más detalles sobre la metodología de estimación de las concentraciones de HAPS por parte del laboratorio GAIA.

Resultados

En la Figura 407 se puede observar los resultados generales de las concentraciones obtenidas en los cinco puntos de medición en la campaña realizada en el segundo semestre del 2024. En términos generales, la estación de monitoreo ITA-POGO presentó las concentraciones más altas de la sumatoria de los 16 HAPs analizados, con un valor máximo de 169 ng/m^3, mientras que en los demás puntos de medición los valores de las concentraciones se mantuvieron por debajo de los 30 ng/m^3.

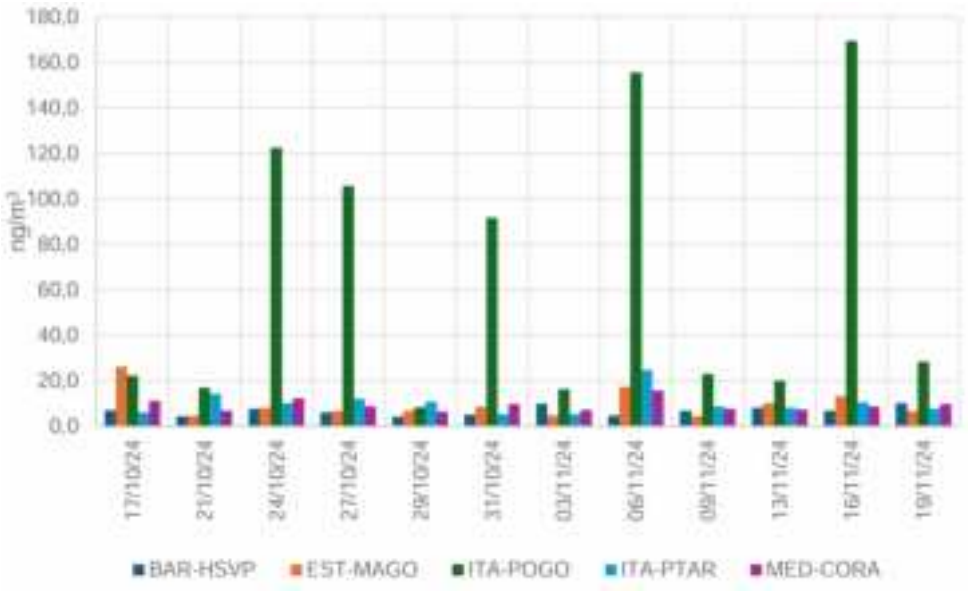


Figura 407: Concentración de HAPs en cinco puntos de monitoreo del Valle de Aburrá en el 2024. Fuente: reporte de resultados del laboratorio GAIA.

Teniendo en cuenta el período de medición de la campaña (aproximadamente 1 mes), no es posible comparar con el límite máximo permisible (1 ng/m^3 establecido para un periodo de 1 año, por la Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible). Sin embargo, estos resultados evidencian concentraciones significativamente altas, específicamente en la estación ITA-POGO, mostrando el riesgo que se podría llegar a alcanzar durante períodos críticos de contaminación atmosférica, por lo que es recomendable mantener un control especial en esta zona por la alerta de presencia de compuestos tóxicos.

Por otro lado, es importante mencionar que los compuestos que se encontraron en mayor proporción corresponden a aquellos con 4 a 6 anillos aromáticos en su composición química, tales como el benzo-a-antraceno, benzo-b-fluoranteno y benzo-k-fluoranteno, clasificados por la Agencia para la Investigación del Cáncer (IARC) como posibles carcinógenos para las personas (Perez-Morales et al. (2016)).

En la Figura 408 se detalla el tipo de fuente de emisión que estaría aportando a las concentraciones de HAPs en los cinco puntos de medición seleccionados. Los resultados muestran cómo la combustión de combustibles fósiles líquidos usados principalmente por fuentes móviles, estarían generando en mayor proporción la emisión al ambiente de HAPs en los diferentes puntos de monitoreo de la campaña realizada. Sin embargo, en el caso de la estación ITA-POGO que se presentaron las concentraciones más altas de estos compuestos, son atribuibles también a procesos de combustión en fuentes fijas industriales (puntos

verdes en la región No Tráfico), que usan combustibles sólidos como la madera, el carbón y biomasa.

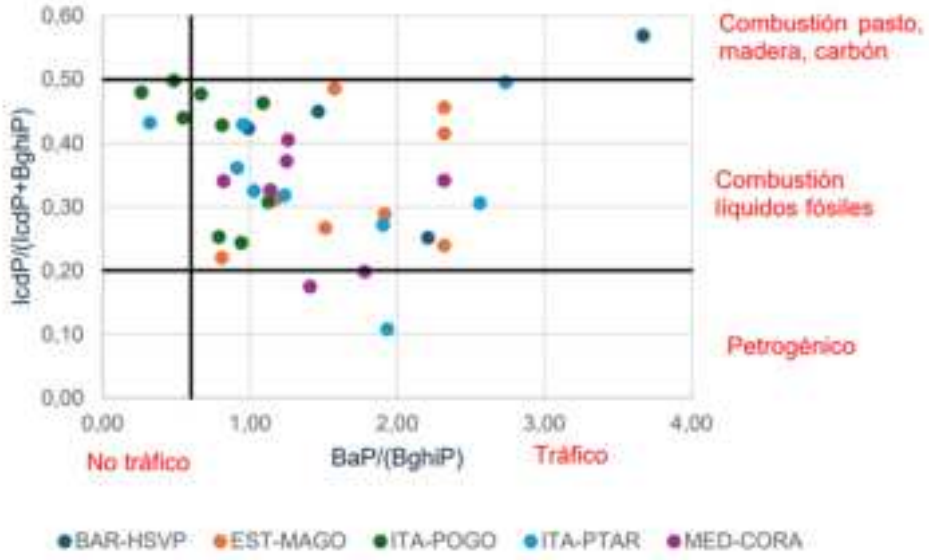


Figura 408: Relación molecular de HAPs y su aporte por fuente de emisión en cinco puntos de monitoreo del Valle de Aburrá en el 2024.

Para conocer en detalle los resultados por puntos de medición de la campaña de medición de las concentraciones de HAPs en el Valle de Aburrá, se puede remitir al reporte técnico emitido por el laboratorio GAIA de la Universidad de Antioquia en el siguiente enlace.

Basado en los resultados presentados anteriormente, se hace necesario realizar una caracterización de fuentes de emisión cercana a los puntos de medición, especialmente en la estación ITA-POGO del municipio de Itagüí, con el objetivo de estimar el proceso que estaría generando el aumento considerable de los niveles de HAPs. Así mismo, los resultados muestran la necesidad de seguir realizando mediciones de forma periódica en estos sectores del Valle de Aburrá, para determinar el riesgo al que se estarían enfrentando los habitantes del sector de la estación de policía los Gómez.

Consideraciones futuras

A partir de los resultados presentados previamente de la campaña de medición de hidrocarburos aromáticos policíclicos en el Valle de Aburrá en el 2024, se sugieren las siguientes acciones para ejercicios de monitoreo posteriores:

I. Continuar con el monitoreo de compuestos tóxicos, en especial los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAPs), en el Valle de Aburrá para la evaluación de la susceptibilidad a la exposición de estos compuesto tóxicos.

II. Evaluar las concentraciones de HAPs en períodos de gestión de episodios por contaminación atmosférica, preferiblemente en puntos de interés y que históricamente hayan presentado registros altos de este tipo de compuestos, como lo es la estación ITA-POGO ubicada en el sector de los Gómez del municipio de Itagüí.

III. Realizar campañas de monitoreo para la caracterización de HAPs en zonas urbanas del Valle de Aburrá que tengan presencia o influencia del subsector ladrillero, el cual mostró según los resultados del presente informe altas concentraciones de HAPs que pueden ser potencialmente peligrosas para la salud pública.

Anexo C. Campaña de monitoreo de fuentes de emisión a partir de cámaras térmicas

Introducción

La calidad del aire en una estación de monitoreo puede verse afectada por el transporte de masas de aire desde fuentes de emisión fijas. La evaluación de las posibles fuentes de emisión cercanas en los alrededores de estaciones como Los Gómez en el municipio de Itagüí, y Belén Las Mercedes y Belén Altavista en el Distrito Especial de Medellín, han permitido identificar que cerca de estos puntos de medición existen fuentes industriales asociadas probablemente al subsector ladrillero cuyas emisiones al parecer afectan los registros de PM10 y PM2.5.

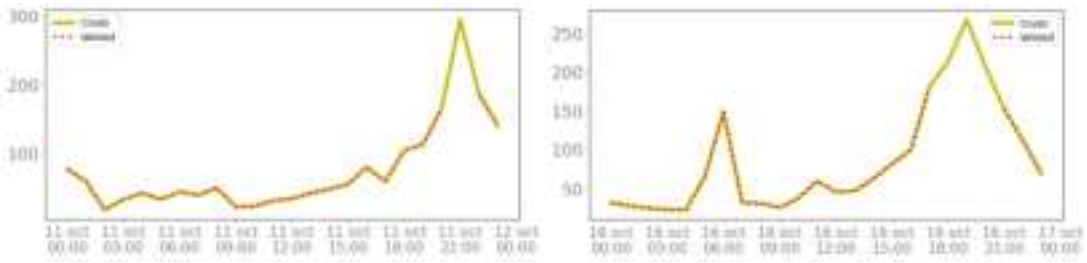
La Red de Cámaras Térmicas del proyecto SIATA permite hacer seguimiento, en su campo de visualización, de puntos de calor como chimeneas e incendios y poder así asociar con el comportamiento de contaminantes registrados en las estaciones de monitoreo. De esta manera, en el mes de diciembre se hizo el seguimiento de las imágenes generadas por las cámaras térmicas que están instaladas en el Centro Comercial Viva de Envigado (cámara Itagüí) y de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea en el sector de Belén Las Mercedes, en el Distrito de Medellín (cámara Las Mercedes). La cámara instalada en el Viva Envigado, permite visualizar las chimeneas activas ubicadas en la ladera suroccidental, en la Vereda Los Gómez del municipio de Itagüí.

A continuación, se exponen los registros observados en el seguimiento de las fuentes de emisión de interés para cada uno de los meses de la vigencia del CCT 016 de 2024.

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de octubre de 2024

En el mes de octubre se hizo el seguimiento de las imágenes generadas por la cámara térmica que está instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado. Esta cámara permite visualizar las chimeneas activas ubicadas en la ladera suroccidental, especialmente en la Vereda Los Gómez del municipio de Itagüí.

La Figura 409 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) para los días 11 y 16 de octubre, días seleccionados por presentar, en términos generales, los valores horarios más altos en el mes.



(a) 11 de octubre. (b) 16 de octubre.

Figura 409: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 11 y (b) 16 de octubre de 2024.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica mencionada anteriormente, disponibles en el enlace videos cámara. La Figura 410 muestra una imagen del video generado en las primeras horas de la madrugada del 10 de octubre. En términos generales, el video permite evidenciar que estas chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura) permanecen activas especialmente durante la noche, siendo más intensos en la madrugada. Particularmente para el 11 de octubre, el video sugiere que las chimeneas posiblemente aumentan su emisión sobre las 19:00. Es probable que los cambios en la intensidad de las chimeneas, de acuerdo con el video, esté asociado a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en cada una de estas industrias. En el caso del video generado para el 16 de octubre, los resultados muestran que se mantienen activas, desde las horas de la madrugada, 4 de los cinco puntos mostrados en la Figura 410, siendo el más activo, el ubicado en el extremo superior derecho de esta imagen, lo cual explicaría los dos picos de concentraciones mostrados en la Figura 409, teniendo en cuenta además que estas emisiones coinciden con períodos de estabilidad de la atmósfera por lo que no se facilita la dispersión de los contaminantes emitidos. Finalmente se resalta, que la intensidad de estas chimeneas puede estar asociada a la tasa de operación o quema de combustible, de igual forma, la afectación de las plumas de estas chimeneas en los registros de la estación ITA-POGO puede depender de las dinámicas meteorológicas del lugar.

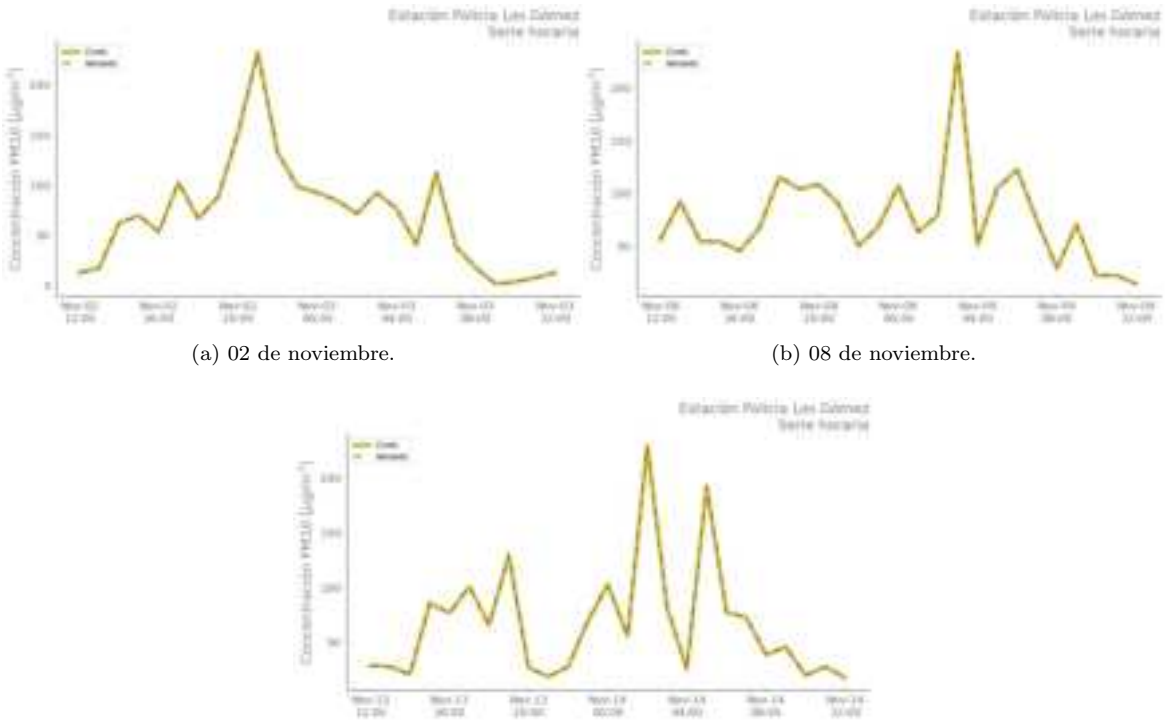


Figura 410: Imagen cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles chimeneas. La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.

Para el próximo mes se espera tener resultados del monitoreo con cámara térmica instalada en el sector de Belén Las Mercedes en el Distrito de Medellín. Es importante aclarar que esta evaluación con cámaras térmicas a fuentes de emisión fijas, permite tener mejor evidencia del aporte a la calidad del aire, lo cual puede ser usado para hacer gestión por parte de las autoridades ambientales, con los responsables de esas fuentes.

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de noviembre de 2024

La cámara instalada en Viva Envigado, permite visualizar las chimeneas activas ubicadas en la ladera suroccidental, en la Vereda Los Gómez del municipio de Itagüí, así la Figura 411 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) para los días 02, 08 y 13 de noviembre. Las Figuras se construyeron iniciando a las 12:00 horas de cada día y terminando a las 12:00 horas del día siguiente. Estos días se seleccionaron por presentar, en términos generales, los valores horarios de PM10, más altos en el mes.



(a) 02 de noviembre.

(b) 08 de noviembre.

(c) 13 de noviembre.

Figura 411: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 02, (b) 08 y (c) 13 de noviembre de 2024.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10, en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.

La Figura 412 muestra una imagen del video generado entre las 12:00 horas del 02 de noviembre y las 12:00 horas del 03 de noviembre. En términos generales, el video permite evidenciar que estas chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura) permanecen activas especialmente durante la noche, siendo más intensas sus emisiones, en la noche del 02 de noviembre. Particularmente para el 03 de noviembre, el video sugiere que las chimeneas aumentan su emisión sobre las 03:00 horas. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar esta información, la **??** (a) muestra las rosas de viento construidas para la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez entre las 12:00 horas del 02 de noviembre y las 12:00 horas del 03 de noviembre. De acuerdo con esta Figura, las masas de aire que llegaron a la estación durante el período de análisis provenían desde el sur, especialmente entre las 02:00 y las 04:00 del 03 de noviembre, y el occidente de la estación, por lo cual, es probable que el pico de PM10 en este punto de medición esté afectado por las emisiones de estas chimeneas.

En el caso del video generado para el 08 de noviembre, del cual se muestran varias imágenes en la Figura 413, los resultados obtenidos para el período de análisis muestran que las posibles chimeneas se mantienen activas desde las 12:00 horas del 08 de noviembre, alcanzando las mayores intensidades en la madrugada

del día siguiente. De los cinco puntos que se observan en los videos (enmarcados en recuadros rojos), para este día, el más intenso fue el ubicado hacia el sur de la estación (tercero de izquierda a derecha). La rosa de vientos construida para este día, mostrada en la Figura 414, sugiere que las masas de aire que llegaron a la estación provenían principalmente del sur-suroccidente y del occidente, por lo que es probable que el aumento en las concentraciones de PM10 en la estación ITA-POGO durante la madrugada del 09 de noviembre esté asociado, al transporte regional de masas de aire, además del material contaminado emitido por las chimeneas ubicadas en el extremo sur del punto de medición.

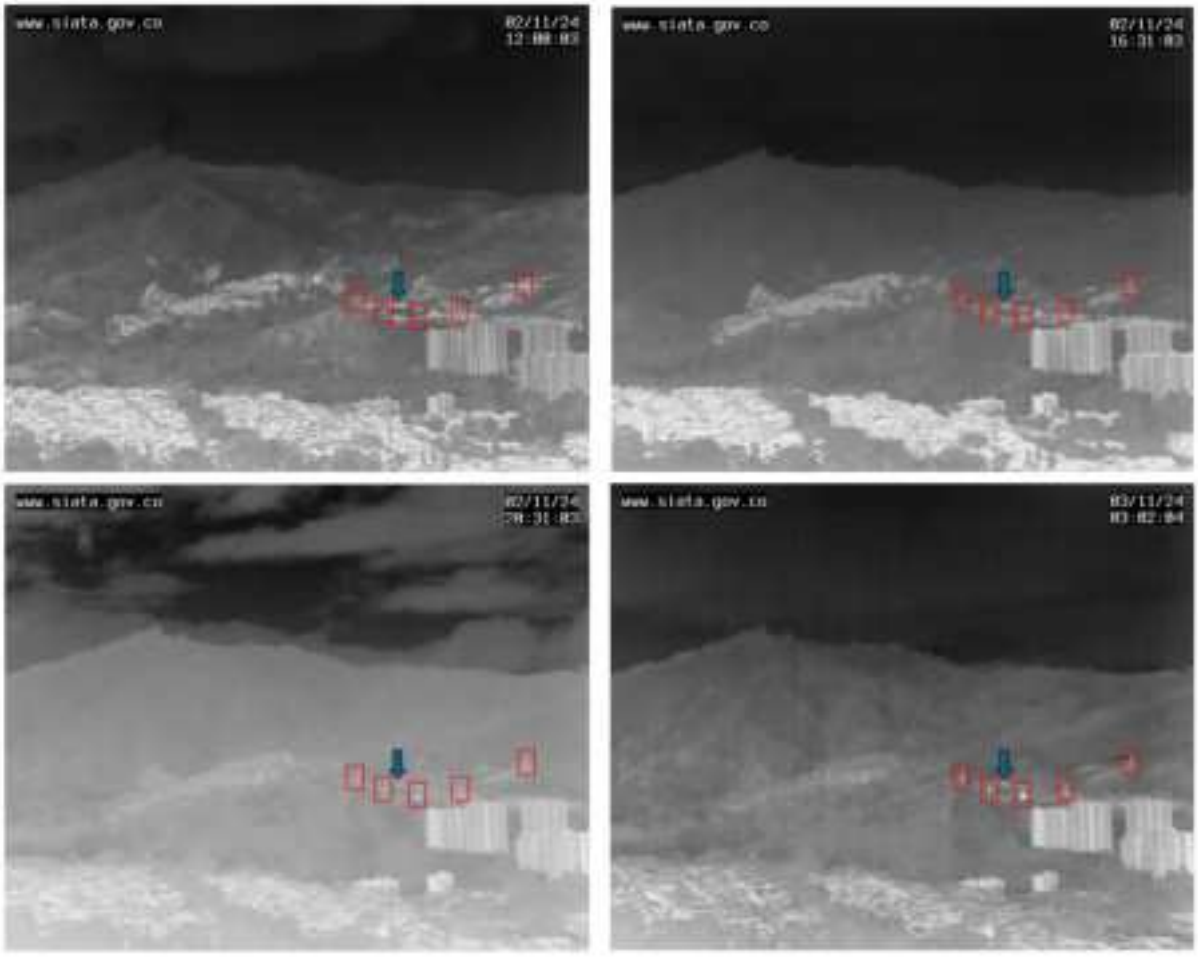


Figura 412: Imagen de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí, para el período 12:00 horas del 02 de noviembre a 12:00 horas del 03 de noviembre de 2024. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.

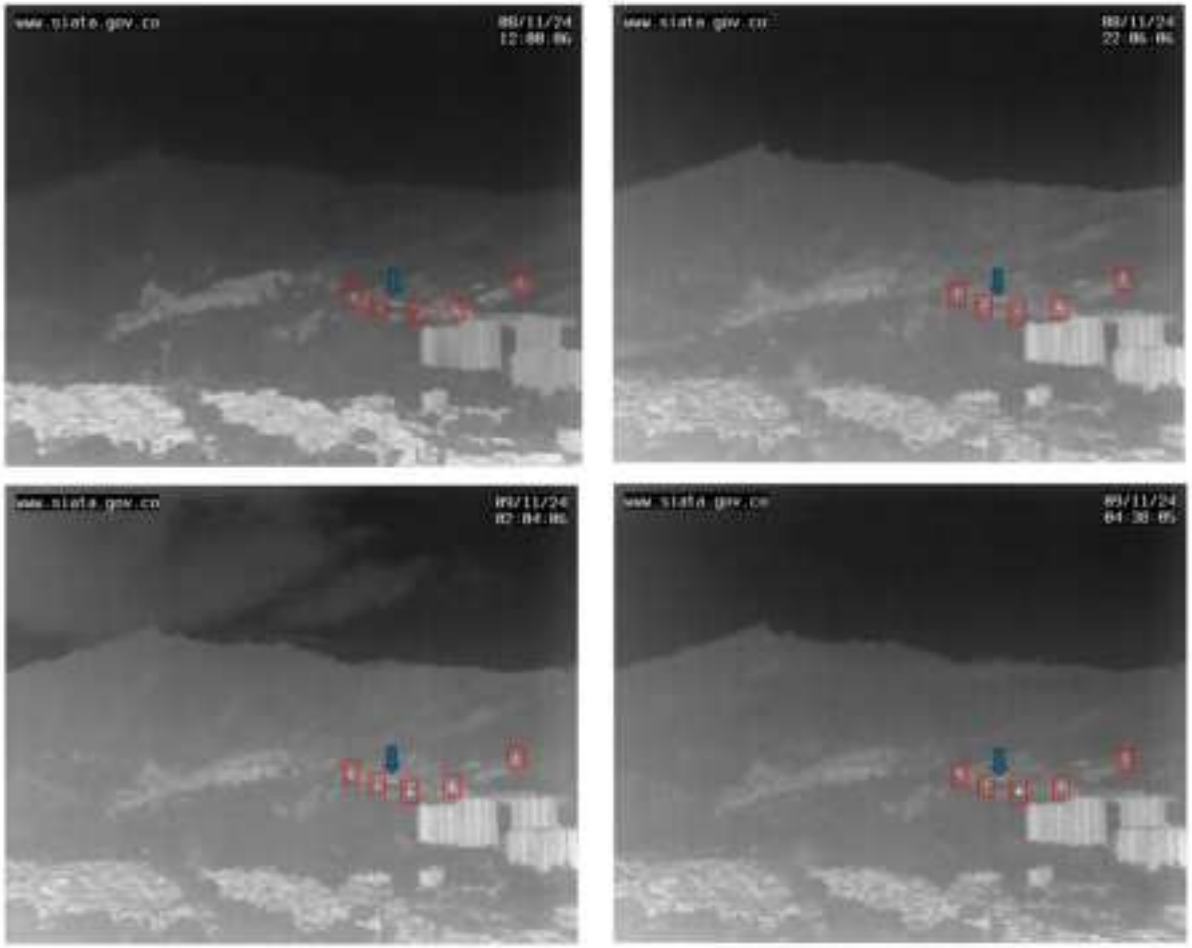
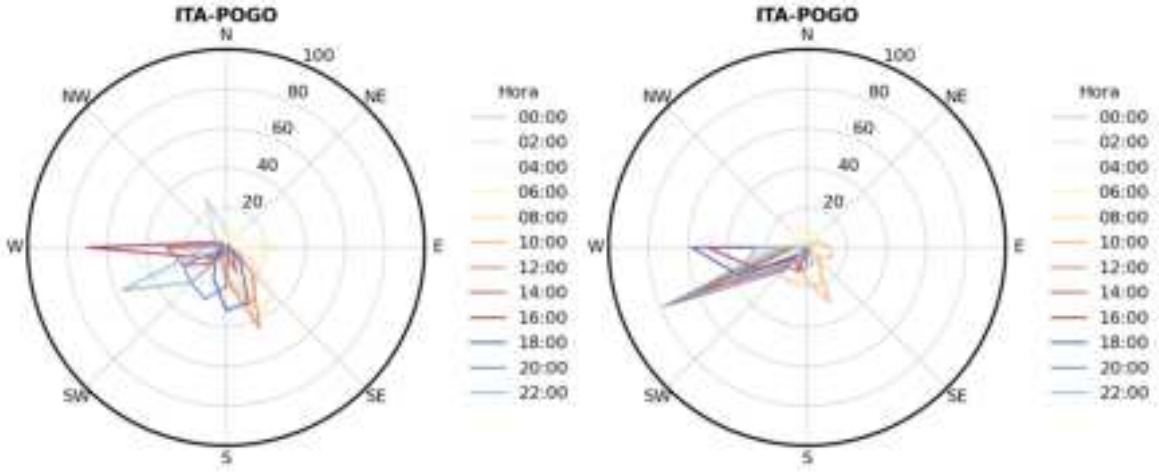


Figura 413: Imagen de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí, para el período 12:00 horas del 08 de noviembre a 12:00 horas del 09 de noviembre de 2024. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.



(a) 02 de noviembre.

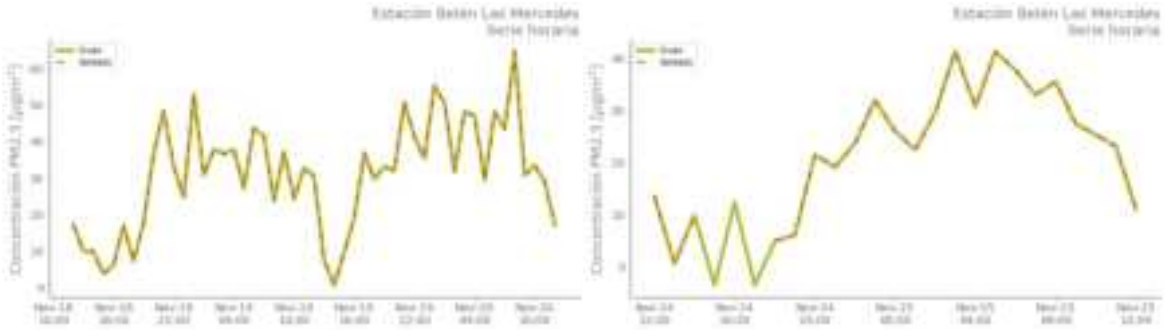
(b) 08 de noviembre.

Figura 414: Rosas de viento construidas para la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados del 02 y el 08 de noviembre. Las rosas se construyeron 12:00 horas de cada día y las 12:00 horas del día siguiente.

En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 415 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas durante las visitas en campo realizadas en este sector. La cámara térmica instalada en este punto, cuyos registros iniciaron el 12 de noviembre de 2024, permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 18 a 20 de noviembre, y 24 a 25 del mismo mes. La Figura 416 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



Figura 415: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



(a) 18 - 20 de noviembre.

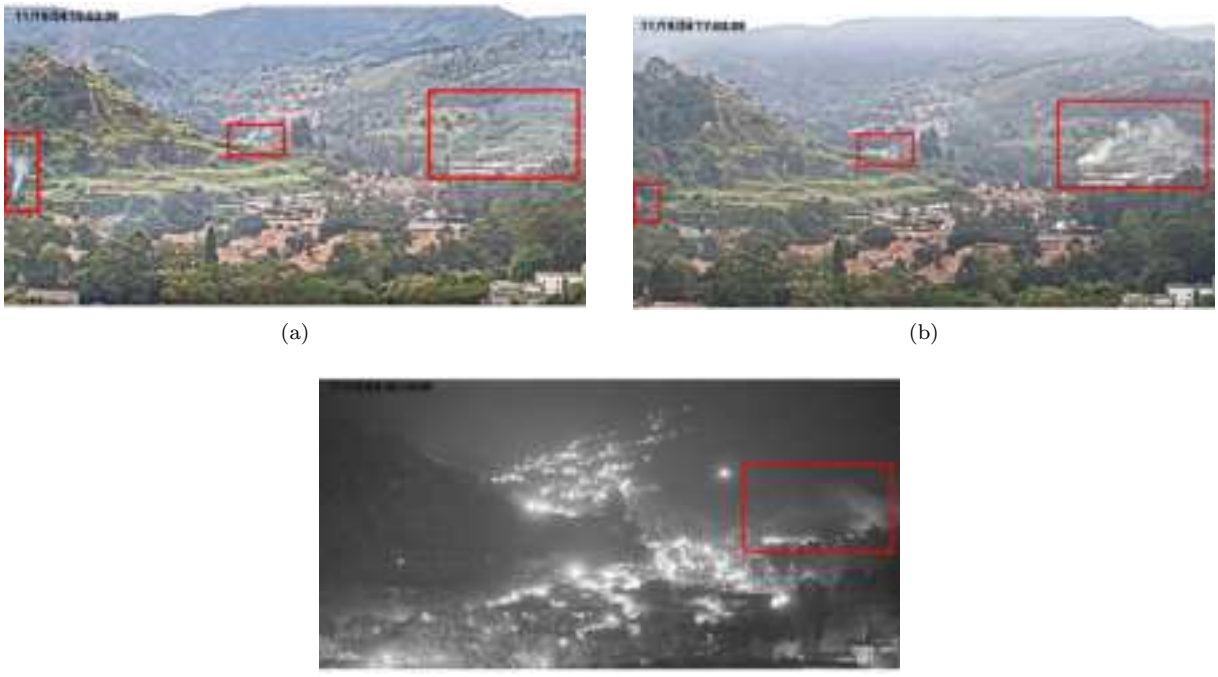
(b) 24 - 25 de noviembre.

Figura 416: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 18 - 20 y (b) 24- 25 de noviembre de 2024.

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad Residencial Azalea del Parque para los días comprendidos entre el 19 y el 20 de noviembre (Figura 417, *VisibleLasMercedes1920Noviembre.mp4*), así como para el 24 y el 25 de noviembre (*CamaraBelenLasMercedesNov2425.mp4*). Según, estos videos, cerca de las 14:00 horas del 19 de noviembre se activan varios puntos de emisión (recuadro rojo en la Figura) visualizándose incluso su pluma. Estas chimeneas permanecen visiblemente activas hasta cerca del medio día del 20 de noviembre. Es probable que los tiempos de emisión de la chimenea sean superiores a los descritos, considerando los períodos para los que se construyeron los videos.

La emisión constante de las chimeneas sugiere el desarrollo de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar estas emisiones con la dirección del viento

en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de esta chimenea haya afectado, especialmente en la noche del 19 y la madrugada del 20 de noviembre, las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.



(a) (b)

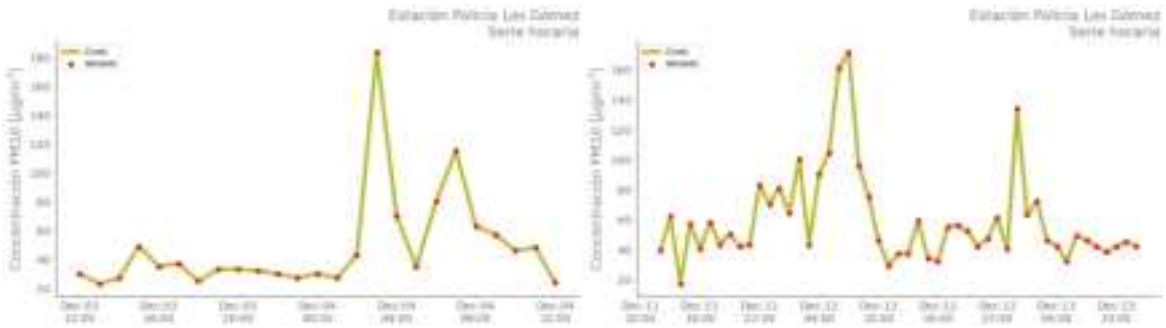
(c)

Figura 417: Imagen de la cámara visible ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque con visual hacia el occidente, para los días 19 y 20 de noviembre. El cuadro rojo hace referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La estación MED-BEME, aunque no se incluye en la imagen, se ubica al costado derecho de esta cámara.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de diciembre de 2024

La Figura 418 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) en el municipio de Itagüí para diferentes días del mes de diciembre en el que se identificaron aumentos en las concentraciones de PM10. Se incluyó el período del 15 a 17 de diciembre, con el fin de comparar los resultados obtenidos para días sin aumentos atípicos en las concentraciones de este contaminante.



(a) Diciembre 03 - 04 (b) Diciembre 11 - 13

Figura 418: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 03 - 04 y (b) 11 - 13 de 2024.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10 en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.

La Figura 419 muestra una imagen del video generado para los días 03 y 04 de diciembre. En términos generales, el video permite evidenciar que estas chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura) permanecen activas especialmente durante la noche, siendo más intensas sus emisiones, durante la noche del 03 y la madrugada del 04 de diciembre. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar esta información, la Figura 420 muestra el comportamiento de los vientos monitoreados en la estación de Policía Los Gómez desde el medio día del 03 de diciembte hasta el medio día del 04 de diciembre. De acuerdo con esta Figura, predominaron los vientos con componente suroccidente, especialmente desde las 15:00 del 03 hasta las 03:00 horas del 04 de diciembre. Para este último, la velocidad del viento disminuyó significativamente entre a las 04:00 y a las 06:00 horas. De acuerdo con lo anterior, es altamente probable que el pico de PM10 registrado en este punto de medición para las 03:00 horas del 04 de diciembre, esté afectado por las emisiones de estas chimeneas. Cabe agregar que de los cinco puntos que se observan en los videos (enmarcados en recuadros rojos), para el período de análisis no se visualizó uno de ellos, específicamente el segundo cuadro rojo de izquierda a derecha en la Figura 419.

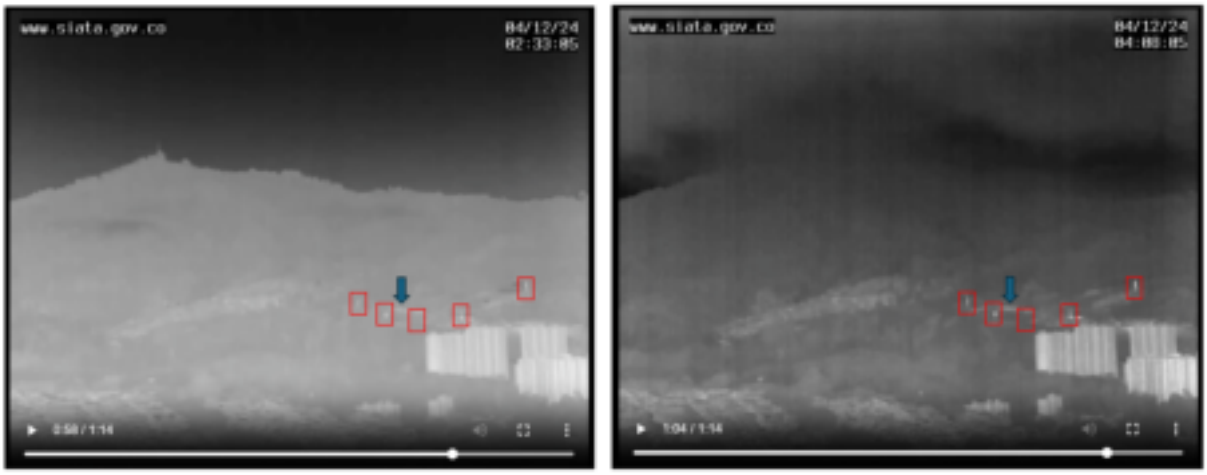


Figura 419: Imagen de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí, para el período 12:00 horas del 03 de diciembre a 06:00 horas del 04 de diciembre de 2024. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.



Figura 420: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados del 03 y el 04 de diciembre. La gráfica se construyó para el período comprendido entre las 12:00 horas de cada día y las 12:00 horas del día siguiente.

En el caso de las altas concentraciones de PM10 registradas en este punto de medición para los días comprendidos entre el 11 y el 13 de diciembre (Figura 418), el video generado para estos días muestra que las chimeneas permanecen activas durante todo el período y se intensifican durante las tardes y las noches, especialmente finalizando la noche del día 12. Cabe agregar que la chimenea que más se intensifica es la de la mitad de la imagen (el tercer cuadro rojo de izquierda a derecha). La Figura 421 muestra varias imágenes del video. Adicionalmente, la Figura 422 muestra el comportamiento de la velocidad y dirección del viento monitoreados en la estación, los cuales fueron predominantes desde el sur, suroccidente. En este sentido, es probable que los aumentos en las concentraciones de PM10 que se registraron en este punto de medición estén asociados a las afectaciones de las chimeneas, en el caso de los valores máximos registrados en la noche, y a la modulación propia del ciclo diurno de este contaminante en el Valle de Aburrá.

Cabe resaltar que la intensidad de las emisiones de estos puntos fijos (chimeneas) puede estar asociada a la tasa de operación o quema de combustible, de igual forma, la afectación de las masas de aire contaminado

que salen de estas chimeneas, en los registros de la estación ITA-POGO, puede depender de las dinámicas meteorológicas del lugar.



Figura 421: Imagen de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí, para el período 12:00 horas del 11 de diciembre a las 13:00 horas del 13 de diciembre de 2024. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación de monitoreo de PM10.

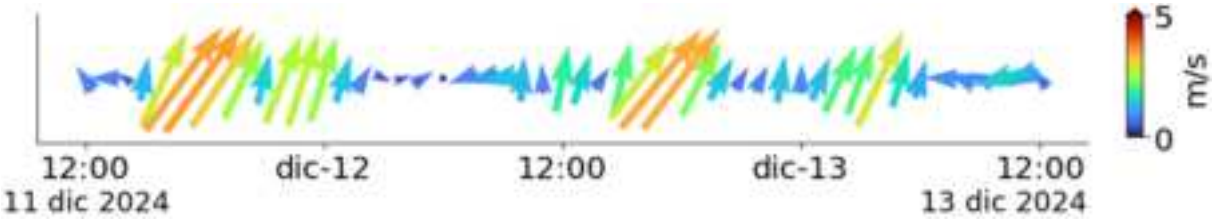
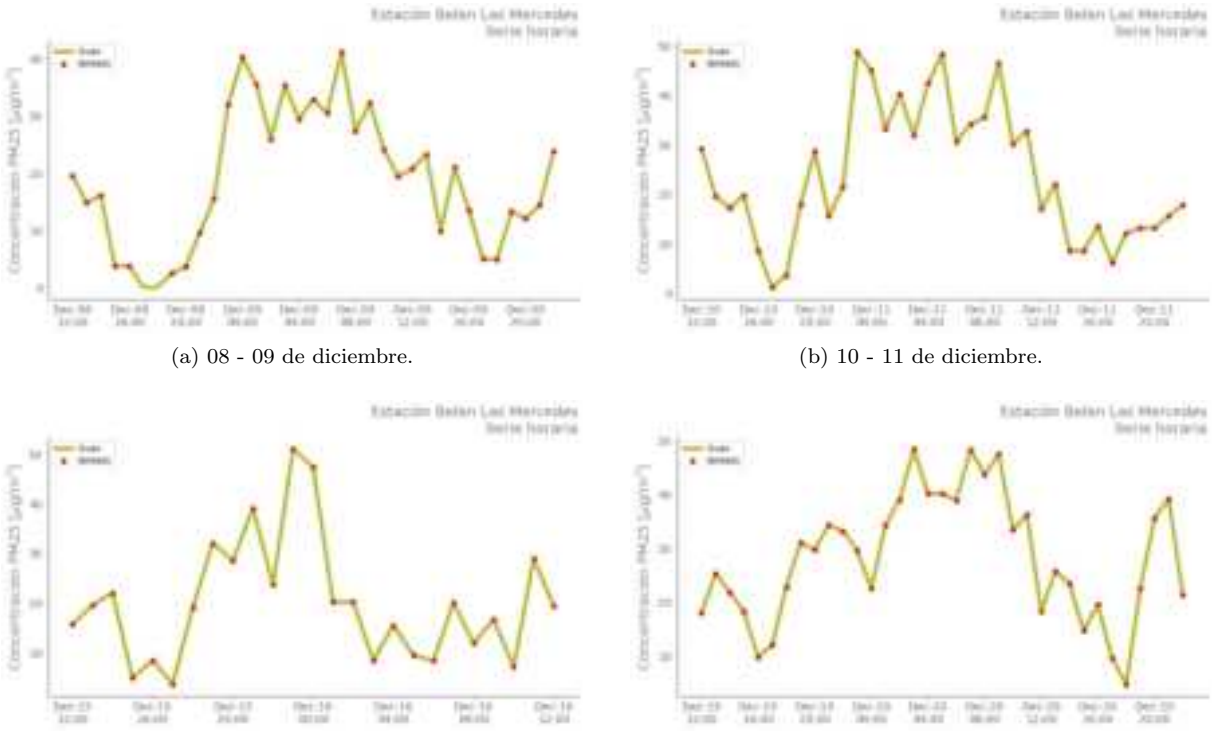


Figura 422: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados entre las 12:00 horas del 11 y las 12.00 horas del 13 de diciembre.

En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 423 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas también durante las visitas en campo realizadas en este sector. La cámara térmica instalada en este sitio, permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación MED-BEME. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 08 a 09, 10 a 11, 15 a 16 y 19 a 20 de diciembre de 2024. La Figura 424 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



Figura 423: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



(a) 08 - 09 de diciembre.

(b) 10 - 11 de diciembre.

(c) 15 - 16 de diciembre.

(d) 19 - 20 de diciembre.

Figura 424: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 08 - 09, (b) 10 - 11, (c) 15 - 16 y (d) 19 - 20 de diciembre de 2024.

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad Residencial Azalea del Parque para los días anteriormente mencionados. Según los videos construidos para las fechas definidas, si bien las chimeneas estuvieron, en términos generales activas durante todo el día, en las noches el movimiento de las plumas emitidas, especialmente por las chimeneas ubicadas a la derecha de la Figura 423, coincide con la dirección en la que está ubicada la estación MED-BEME, por lo cual, es probable que el aumento en las concentraciones de PM2.5 que se registra en esta estación en las horas de la noche, y que se mantiene muy constante durante la madrugada, esté asociado a la afectación de las plumas emitidas por estas fuentes fijas. En la Figura 425 se muestra una imagen de la cámara térmica cerca de la media noche del 08 y del 10 de diciembre.



(a) Diciembre 08 - 09.



(b) Diciembre 10 - 11.

Figura 425: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 08 a 09 y (b) 10 a 11 de diciembre de 2024. En rojo se resalta una de las chimeneas evidenciadas para este sector.

Cabe agregar que la visibilidad de la pluma que sale constantemente por las chimeneas sugiere el desarrollo

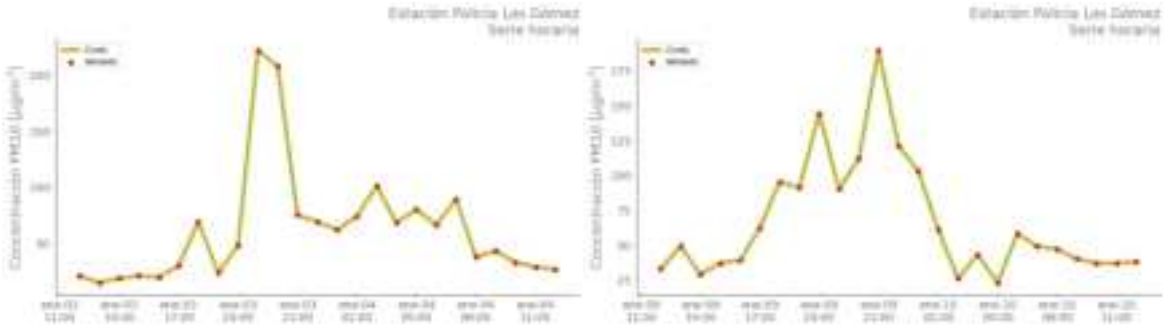
de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar éstas con la dirección del viento en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de contaminantes por estas chimeneas haya afectado las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de enero de 2025

Durante este mes además, se hizo un análisis exploratorio de la cámara térmica ubicada en la estación de calidad del aire del municipio de Girardota.

La Figura 426 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) en el municipio de Itagüí para diferentes días del mes de enero en el que se identificaron aumentos en las concentraciones de PM10.



(a) Enero 03 - 04 (b) Enero 09 - 10

Figura 426: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 03 - 04 y (b) 09 - 10 de enero de 2025.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10 en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.

La Figura 427 muestra una imagen del video generado para los días 03 y 04 de enero. En términos generales, el video permite evidenciar una chimenea (marcada con cuadro rojo en la Figura), la cual permanece activa durante todo el video y desde el principio del mismo (12:00 horas del 03 de enero). Después de las 19:00 se activa una segunda chimenea (cuadro rojo de la derecha en la Figura), mientras que en la madrugada, la cámara permite evidenciar un tercer punto caliente (cuadro rojo del medio en la Figura); sin embargo, la intensidad de este último es muy intermitente. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar

esta información, la Figura 428 muestra el comportamiento de los vientos monitoreados en la estación de Policía Los Gómez desde el medio día del 03 de enero hasta el medio día del 04 del mismo mes. De acuerdo con esta Figura, predominaron los vientos con componente sur y occidente, especialmente desde las 16:00 horas del 03 de enero. De igual forma se evidencia una disminución en la velocidad del viento particularmente en las horas de la noche. De acuerdo con lo anterior, es altamente probable que el pico de PM10 registrado en este punto de medición para las 21:00 y 22:00 horas del 03 de enero, esté afectado por las emisiones de fuentes fijas, específicamente de la chimenea ubicada al extremo izquierdo de la imagen. Cabe resaltar que los videos que se han generado para esta estación típicamente muestran cinco posibles chimeneas (puntos calientes), de los cuales, para la fecha analizada, solamente se visualizaron dos.



Figura 427: Imágenes de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos entre el 03 de enero a las 12:00 horas y el 04 de enero de 2025 a las 12:00 horas. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.

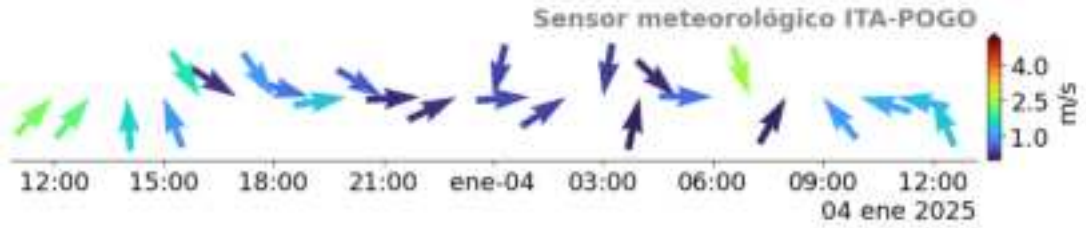


Figura 428: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados del 03 y el 04 de enero de 2025. La gráfica se construyó para el período comprendido entre las 12:00 horas de cada día y las 12:00 horas del día siguiente.

En el caso de las altas concentraciones de PM10 registradas en este punto de medición para la noche del 09 de enero de 2025 y parte de la madrugada del 10 del mismo mes (Figura 426), el video generado para

estos días muestra que las chimeneas (recuadros rojo en la Figura 429) se activan finalizando la tarde y se intensifican durante la noche. Cabe agregar que la chimenea que más se intensifica es la cercana a la mitad de la imagen (el tercer cuadro rojo de izquierda a derecha). Adicionalmente, la Figura 430 muestra el comportamiento de la velocidad y dirección del viento monitoreados en la estación mencionada, los cuales fueron predominantes desde el occidente especialmente desde las 17:00 horas hasta la media noche del 10 de enero. En este sentido, es probable que los aumentos en las concentraciones de PM10 que se registraron en este punto de medición estén asociados a las emisiones provenientes de puntos de emisión fijos.

Cabe resaltar que la intensidad de las emisiones de estos puntos fijos (chimeneas) puede estar asociada a las condiciones de operación de equipos de combustión externa como hornos y calderas, de igual forma, la afectación de las masas de aire contaminado que salen de estas chimeneas, en los registros de la estación ITA-POGO, depende también de las dinámicas meteorológicas del lugar.



Figura 429: Imágenes de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos entre el 09 de enero a las 12:00 horas y el 10 de enero de 2025 a las 12:00 horas. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.

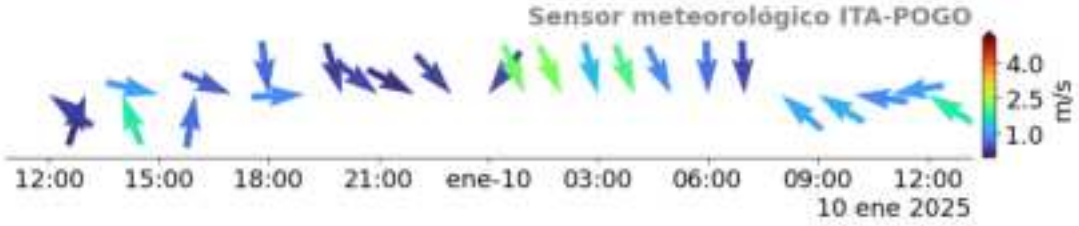
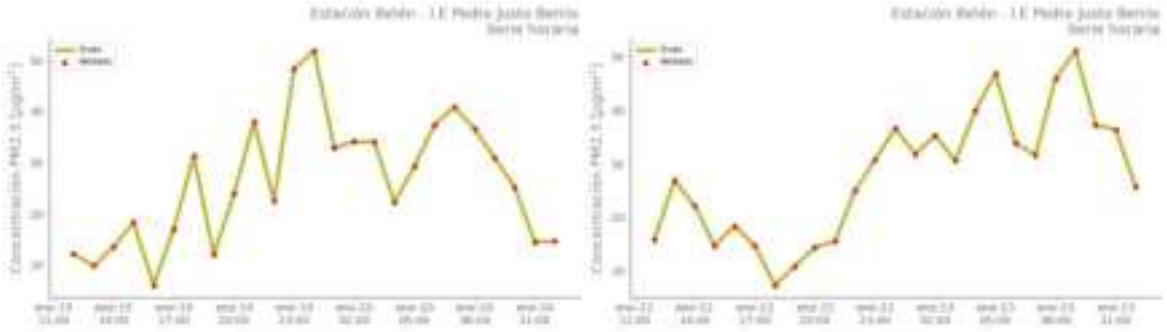


Figura 430: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados entre las 12:00 horas del 09 y las 12:00 horas del 10 de enero de 2025.

En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 431 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas también en forma general durante las visitas de campo realizadas en este sector. La cámara térmica instalada en este sitio permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles asociadas a puntos fijos, durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación MED-BEME. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 19 a 20, 22 a 23 y 24 a 25 de enero de 2025. La Figura 432 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



Figura 431: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



(a) Enero 19 - 20. (b) Enero 22 - 23.

Figura 432: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 19 - 20 y (b) 22 - 23.

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad

Residencial Azalea del Parque para los días anteriormente mencionados. Según los videos construidos para las fechas definidas, si bien las chimeneas estuvieron en términos generales, activas durante todo el día, en las noches el movimiento de las plumas emitidas, especialmente por las chimeneas ubicadas a la derecha de la Figura 431, coincide con la dirección en la que está ubicada la estación MED-BEME, por lo cual, es probable que el aumento en las concentraciones de PM2.5 que se registra en esta estación en las horas de la noche, y que se mantiene muy constante durante la madrugada, esté asociado a la afectación de las plumas emitidas por estas fuentes fijas. En la Figura 433 se muestra una imagen de la cámara térmica cerca de las 05:00 horas del 23 de enero de 2025.



(a) Enero 19 - 20.



(b) Enero 23 - 24.

Figura 433: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 19 a 20 y (b) 23 a 24 de enero de 2025. En rojo se resalta una de las chimeneas evidenciadas para este sector.

Cabe agregar que la visibilidad de la pluma que sale constantemente por las chimeneas sugiere el desarrollo de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar éstas con la dirección del viento en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de contaminantes por estas chimeneas

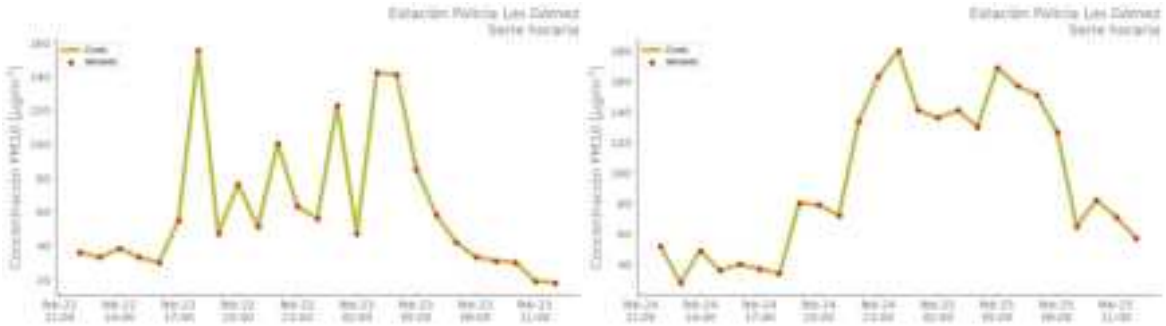
haya afectado las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de febrero de 2025

Durante este mes además, se hizo un análisis exploratorio de la cámara térmica ubicada en la estación de calidad del aire del municipio de Girardota.

La Figura 434 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) en el municipio de Itagüí entre los días 22 y 25 del mes de febrero, días en los que se identificaron aumentos en las concentraciones de PM10 en este punto de medición.



(a) Febrero 22 - 23 (b) Febrero 24 - 25

Figura 434: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 22 - 23 y (b) 24 - 25 de febrero de 2025.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10 en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.

La Figura 435 muestra una imagen del video generado para los días 22 y 23 de febrero. En términos generales, el video permite evidenciar que varias chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura), permanecen activas durante todo el video y desde el principio del mismo (12:00 horas del 22 de febrero) y se vuelven más intensas en el transcurso de la tarde y en la madrugada. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar esta información, la Figura 436 muestra el comportamiento de los vientos monitoreados en la estación de Policía Los Gómez desde el medio día del 22 de febrero hasta el medio día del 23 del mismo mes. De acuerdo con esta Figura, predominaron los vientos con componente norte y occidente, especialmente desde las 18:00 del 22 de febrero. De igual forma se evidencia una disminución en la velocidad del viento particularmente en las horas de la madrugada. De acuerdo con lo anterior, es altamente probable que el

pico de PM10 registrado en este punto de medición para el 22 de febrero a las 18:00 y para las 03:00 y 04:00 del 23 de febrero, esté afectado por las emisiones de fuentes fijas, específicamente por las chimeneas ubicada al extremo izquierdo de la imagen.



Figura 435: Imágenes de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos entre el 22 de febrero a las 12:00 y el 23 de febrero de 2025 a las 12:00. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.

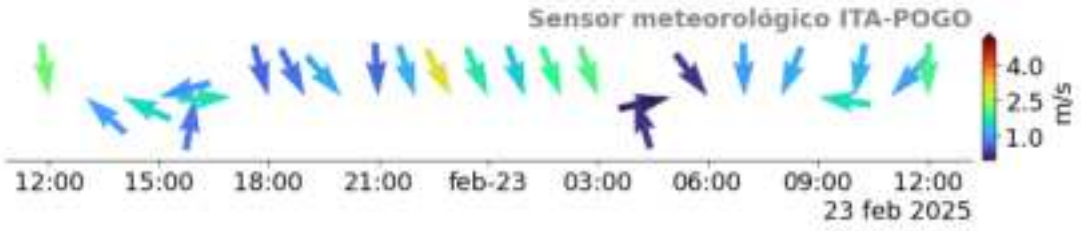


Figura 436: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados del 22 y el 23 de febrero de 2025. La gráfica se construyó para el período comprendido entre las 12:00 de cada día y las 12:00 del día siguiente.

En el caso de las altas concentraciones de PM10 registradas en este punto de medición para la noche del 24 de febrero de 2025 y parte de la madrugada del 25 del mismo mes (Figura 434), el video generado para estos días muestra que las chimeneas (recuadros rojo en la Figura 437) se activan finalizando la tarde y se intensifican durante la noche. Cabe agregar que salvo la chimenea cercana a la mitad de la imagen (el tercer cuadro rojo de izquierda a derecha), el resto permanecen activas durante toda la noche. La Figura 438 muestra el comportamiento de la velocidad y dirección del viento monitoreados en la estación mencionada, los cuales fueron predominantes desde el occidente especialmente desde las 18:00 hasta las 05:00 del día siguiente. De acuerdo con lo anterior, es probable que los aumentos en las concentraciones de PM10 que se registraron en este punto de medición estén asociados a las emisiones provenientes de puntos de emisión fijos.

Cabe resaltar que la intensidad de las emisiones de estos puntos fijos (chimeneas) puede estar asociada a las condiciones de operación de equipos de combustión externa como hornos y calderas, de igual forma, la afectación de las masas de aire contaminado que salen de estas chimeneas, en los registros de la estación ITA-POGO, depende también de las dinámicas meteorológicas del lugar.



Figura 437: Imagen de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos entre el 24 de febrero a las 12:00 y el 25 de febrero de 2025 a las 12:00. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.

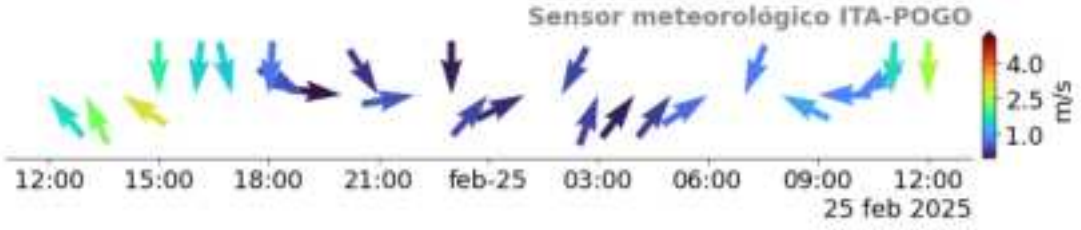


Figura 438: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados entre las 12:00 del 24 y las 12:00 del 25 de febrero de 2025.

En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 439 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas también en forma general durante las visitas de campo realizadas en este sector. La cámara térmica instalada en este sitio permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles asociadas a puntos fijos, durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación MED-BEME. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 5, 6 21, 24 y 27 de febrero de 2025. La Figura 440 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



Figura 439: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



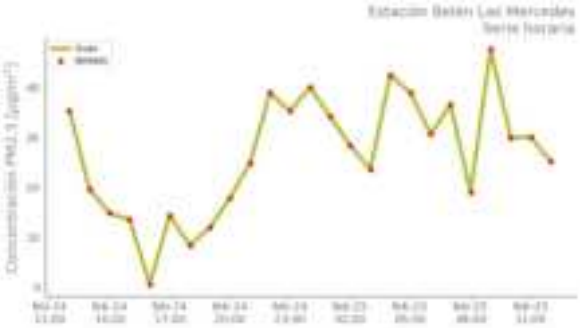
(a) Febrero 5 - 6.



(b) Febrero 6 - 7.



(c) Febrero 21 - 22.



(d) Febrero 24 - 25.



(e) Febrero 27 - 28.

Figura 440: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 5 - 6, (b) 6 - 7, (c) 21 - 22, (d) 24 - 25 y (e) 27 - 28 de febrero de 2025.

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad Residencial Azalea del Parque para los días mencionados. Según los videos construidos, si bien las chimeneas estuvieron en términos generales, activas durante todo el día, en las noches el movimiento de las plumas emitidas, especialmente por las chimeneas ubicadas a la derecha de la Figura 439, coincide con la dirección en la que está ubicada la estación MED-BEME, por lo cual, es probable que el aumento en las concentraciones de PM2.5 que se registra en esta estación en las horas de la noche, y que se mantiene muy constante durante la madrugada, esté asociado a la afectación de las plumas emitidas por estas fuentes fijas. En la Figura 441 se muestra algunas imágenes de la cámara térmica.



(a) Febrero 05 - 06.



(b) Febrero 06 - 07.



(c) Febrero 24 - 25.

Figura 441: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 05 a 06, (b) 06 a 07 y (c) 24 a 25 de febrero de 2025. En rojo se resalta una de las chimeneas evidenciadas para este sector.

Cabe agregar que la visibilidad de la pluma que sale constantemente por las chimeneas sugiere el desarrollo de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar éstas con la dirección del viento en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de contaminantes por estas chimeneas haya afectado las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.

Finalmente, en el caso de la estación de calidad del aire de PM2.5 ubicada en el municipio de Girardota (estación GIR-EPM), la cámara visible instalada en este punto de medición (Figura 442) ha permitido identificar, especialmente en las horas de la noche, la ocurrencia de una pluma probablemente ubicada hacia la zona industrial del municipio.



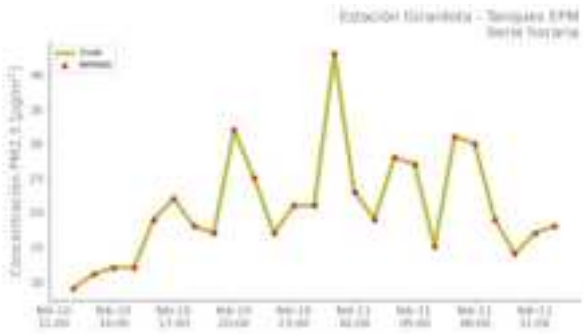
(a) Febrero 6 - 7. (b) Febrero 10 - 11.

Figura 442: Imágenes de la cámara visible de la estación ubicada en los Tanques de EPM del municipio de Girardota para los días (a) 6 - 7 y (b) 27 - 28 de febrero de 2025. Los cuadros rojos corresponden a plumas identificadas.

En la Figura 443 se muestran las concentraciones horarias de PM2.5 para varias fechas del mes de febrero de 2025. La distribución de vientos para estas mismas fechas se muestra en la Figura 444, según la cual, los vientos en esta estación provienen desde direcciones con componentes norte y oriente, por lo cual, es probable que las plumas evidenciadas estén afectando la calidad del aire en la estación. Lo anterior es coherente con los resultados de las rosas de vientos bivariadas construidas para PM2.5 y SO_2 en el mes de febrero, según las cuales, las mayores concentraciones de estos contaminantes en estos puntos de medición están asociados a direcciones norte y este (Figura 445).



(a) Febrero 6 - 7.

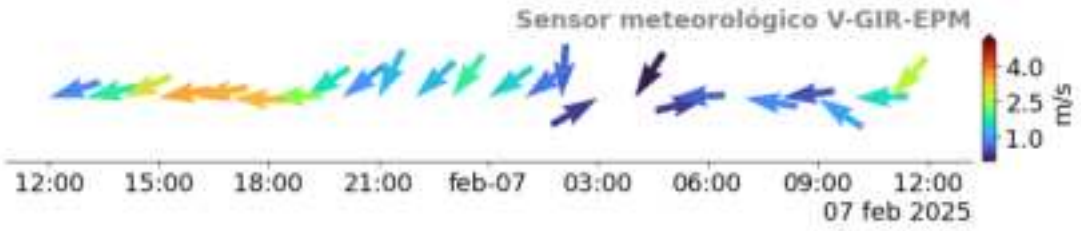


(b) Febrero 10 - 11.

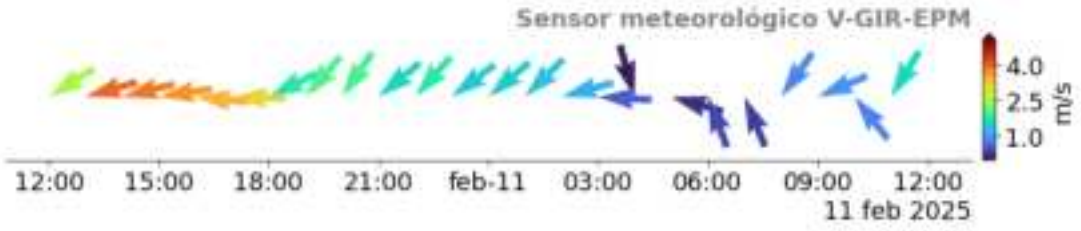


(c) Febrero 27 - 28.

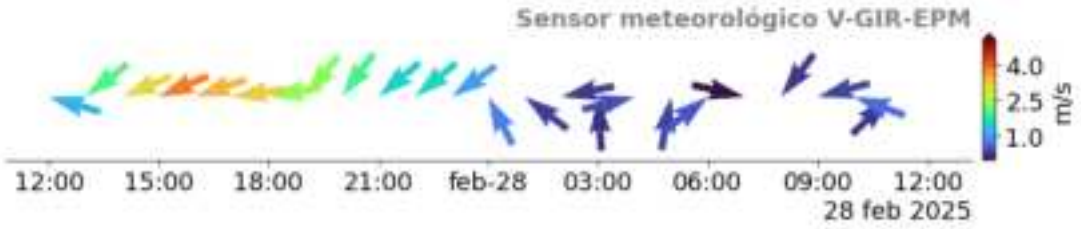
Figura 443: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Tanques EPM del municipio de Girardota para los días (a) 6 - 7, (b) 10 - 11 y (c) 27 - 28 de febrero.



(a) Febrero 6 - 7.

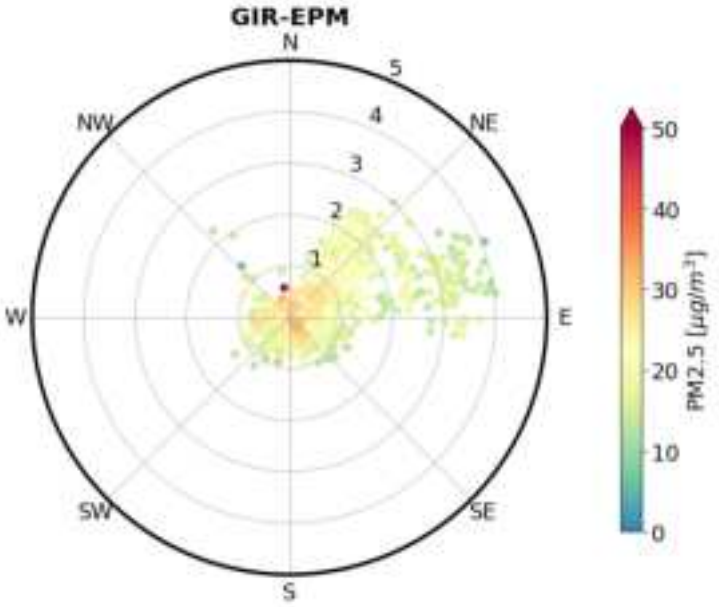


(b) Febrero 10 - 11.

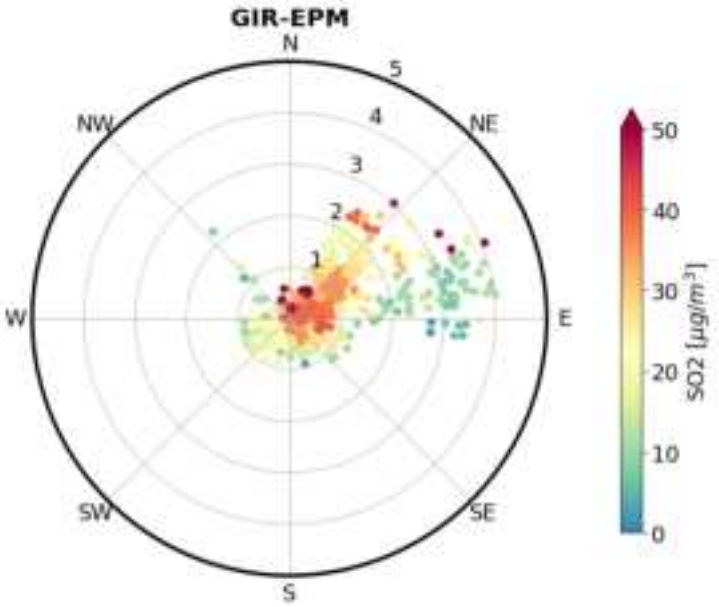


(c) Febrero 27 - 28.

Figura 444: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación Tanques EPM de Girardota para los días (a) 6 - 7, (b) 10 - 11 y (c) 27 - 28 de febrero de 2025.



(a) PM2.5

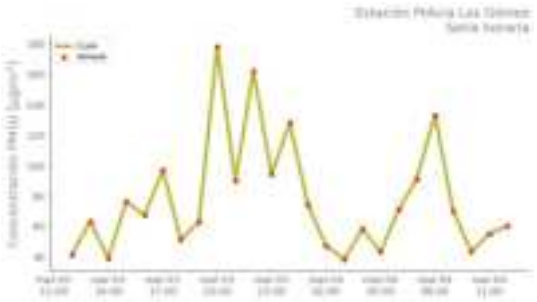


(b) SO_2

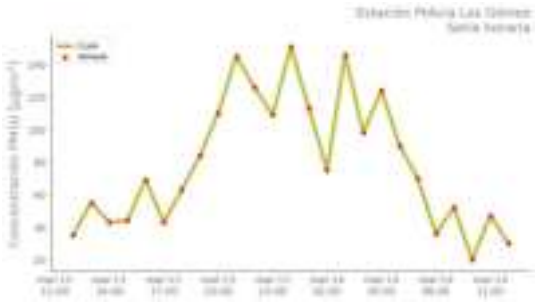
Figura 445: Rosas de vientos bivariadas para PM2.5 y SO_2 en la estación Tanques EPM de Girardota para el mes de febrero de 2025.

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de marzo de 2025

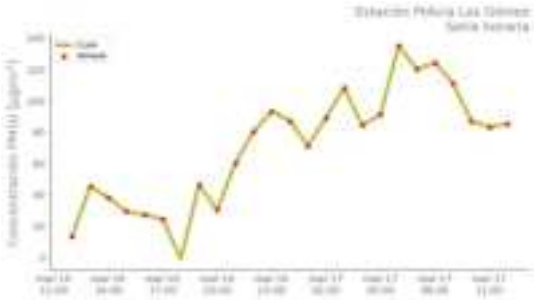
La Figura 446 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) en el municipio de Itagüí para diferentes días del mes de marzo en los que se identificaron aumentos en las concentraciones de PM10 en este punto de medición.



(a) Marzo 03 - 04



(b) Marzo 13 - 14



(c) Marzo 16 - 17

Figura 446: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 03 - 04, (b) 13 - 14 y (c) 16 - 17 de marzo de 2025.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10 en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.

La Figura 447 muestra una imagen del video generado para los días 03 y 04 de marzo. En términos generales, el video permite evidenciar que la intensidad de varias chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura) se hace visible después de las 15:00 y se vuelven más intensas en el transcurso de la tarde y en la madrugada. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar esta información, la Figura 448 muestra el comportamiento de los vientos monitoreados en la estación de Policía Los Gómez desde el medio día del 03 de marzo hasta el medio día del 04 del mismo mes. De acuerdo con esta Figura, predominaron los vientos con componente norte y occidente, especialmente entre las 15:00 y las 22:00. De acuerdo con lo anterior, es altamente probable que los picos de PM10 registrados en este punto de medición para el 03 de marzo entre las 19:00 y las 23:00 estén afectados por las emisiones de fuentes fijas, específicamente por las chimeneas ubicadas cerca a la estación. Una situación similar se presenta para los días entre el 13 y el 14, y el 16 y el 17 de marzo en este mismo punto de medición.



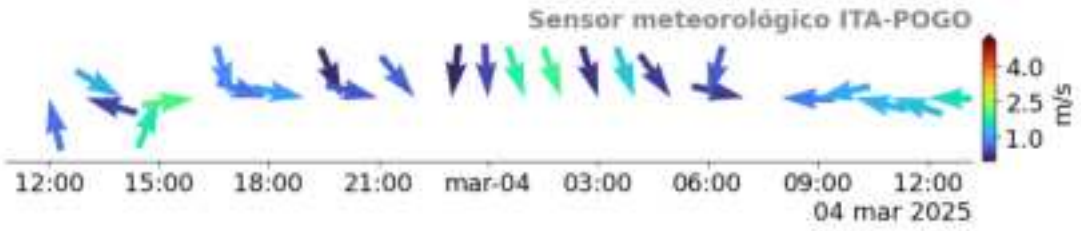
(a) Marzo 03 -04.

(b) Marzo 13 - 14.

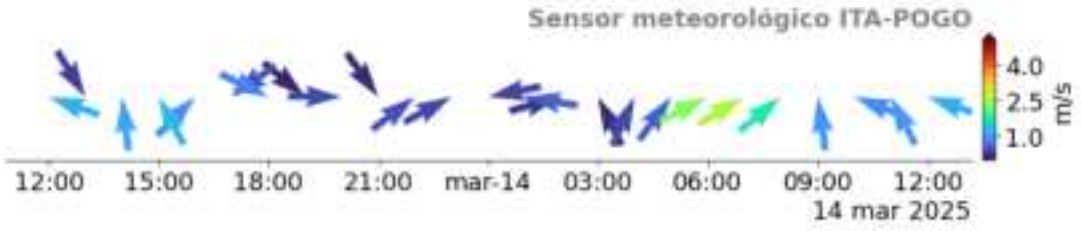


(c) Marzo 16 - 17.

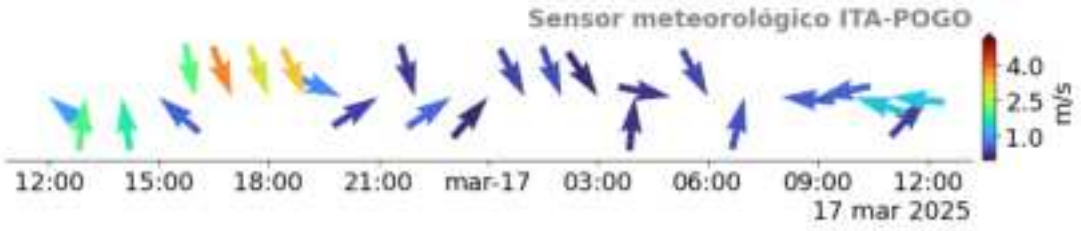
Figura 447: Imágenes de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos de los días (a) 03 - 04, (b) 13 - 14 de marzo de 2025. a las 12:00. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.



(a) Marzo 03 -04.



(b) Marzo 13 - 14.



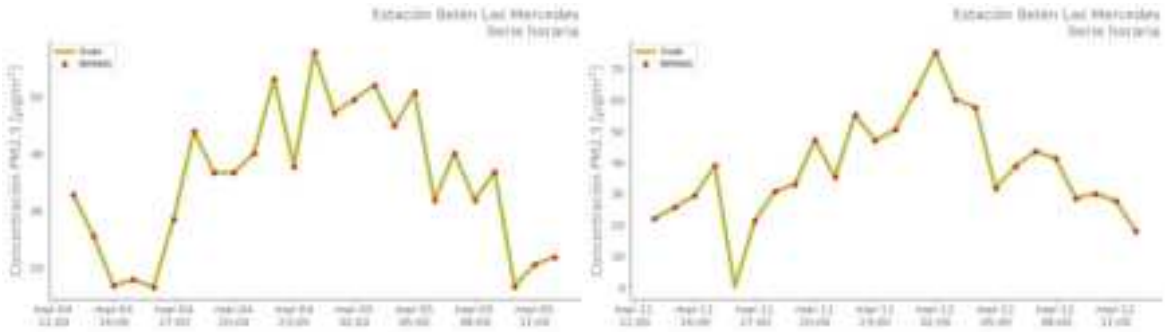
(c) Marzo 16 - 17.

Figura 448: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados de (a) 03 - 04, (b) 13 - 14 de marzo de 2025 y (c) (b) 16 - 17 de marzo de 2025. La gráfica se construyó para el período comprendido entre las 12:00 de cada día y las 12:00 del día siguiente.

Cabe resaltar que la intensidad de las emisiones de estos puntos fijos (chimeneas) puede estar asociada a las condiciones de operación de equipos de combustión externa como hornos y calderas, de igual forma, la afectación de las masas de aire contaminado que salen de estas chimeneas, en los registros de la estación ITA-POGO, depende también de las dinámicas meteorológicas del lugar. En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 449 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas también en forma general durante las visitas de campo realizadas en este sector. La cámara instalada en este sitio permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles asociadas a puntos fijos, durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación MED-BEME. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 04 - 05, 11 - 12 y 27 - 28 de marzo de 2025. La Figura 450 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



Figura 449: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



(a) Marzo 4 - 5.

(b) Marzo 11 - 12.



(c) Marzo 27 - 28.

Figura 450: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 04 - 05, (b) 11 - 12 y (c) 27 - 28 de marzo

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad Residencial Azalea del Parque para los días anteriormente mencionados. Según los videos construidos para las fechas definidas, si bien las chimeneas estuvieron en términos generales, activas durante todo el día, en las noches el movimiento de las plumas emitidas, especialmente por las chimeneas ubicadas a la derecha de la Figura **??**, coincide con la dirección en la que está ubicada la estación MED-BEME, por lo cual, es probable que el aumento en las concentraciones de PM2.5 que se registra en esta estación en las horas de la noche, y que se mantiene muy constante durante la madrugada, esté asociado a la afectación de las plumas emitidas por estas fuentes fijas. En la Figura 451 se muestra algunas imágenes de la cámara térmica.

Cabe agregar que la visibilidad de la pluma que sale constantemente por las chimeneas sugiere el desarrollo de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar éstas con la dirección del viento en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de contaminantes por estas chimeneas haya afectado las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.



(a) Marzo 04 - 05.



(b) Marzo 11 - 12.



(c) Marzo 27 - 28.

Figura 451: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 04 - 05, (b) 11 - 12 y (c) 27 - 28 de marzo de 2025. En rojo se resaltan las chimeneas evidenciadas para este sector.

Finalmente, en el caso de la estación de calidad del aire de PM2.5 ubicada en el municipio de Girardota (estación GIR-EPM), la cámara visible instalada en este punto de medición (Figura 452) ha permitido identificar, especialmente en las horas de la noche, la ocurrencia de una pluma probablemente ubicada hacia la zona industrial del municipio.

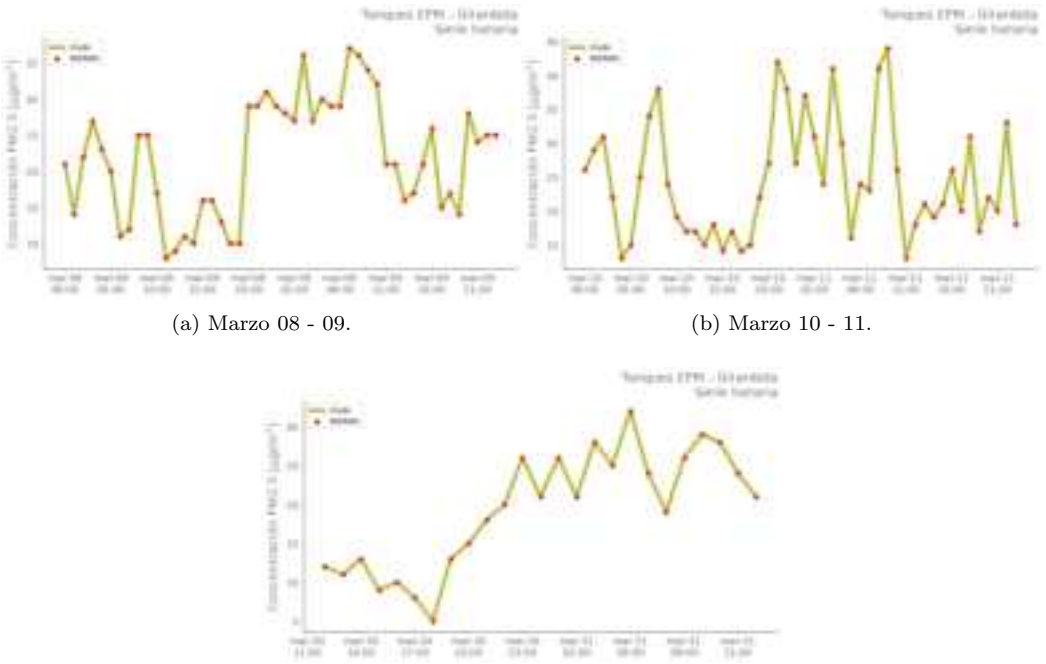


(a) Marzo 08 - 09.

(b) Marzo 30 - 31.

Figura 452: Imágenes de la cámara visible de la estación ubicada en los Tanques de EPM del municipio de Girardota para los días (a) 08 - 09 y (b) 30 - 31 de marzo de 2025. Los cuadros rojos corresponden a plumas identificadas.

En la Figura 453 se muestran las concentraciones horarias de PM2.5 para varias fechas del mes de marzo de 2025. La distribución de vientos para estas mismas fechas se muestra en la Figura 454, según la cual, los vientos en esta estación provienen desde direcciones con componentes oriente y sur, por lo cual, para los días analizados, no hay evidencia suficiente para afirmar que las plumas evidenciadas estén afectando la calidad del aire en la estación, especialmente en las horas de la noche en las que se evidenciaron los aumentos en las concentraciones de PM2.5. De esta manera, es probable que la calidad del aire asociada a este contaminante durante las noches analizadas haya estado relacionada con dinámicas de transporte regional y las dinámicas de emisión locales de esta estación.

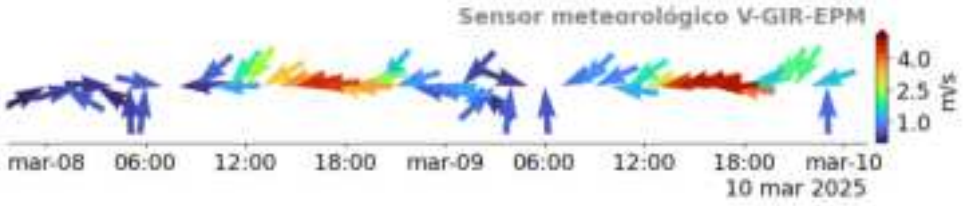


(a) Marzo 08 - 09.

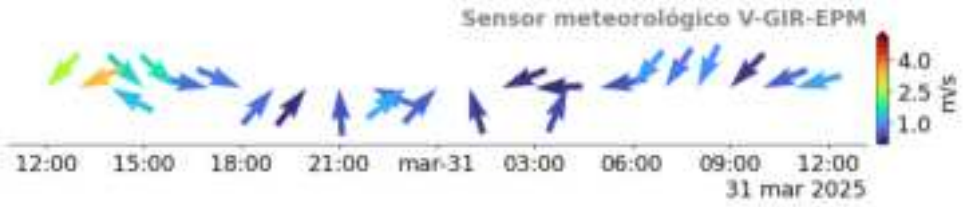
(b) Marzo 10 - 11.

(c) Marzo 30 - 31.

Figura 453: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Tanques EPM del municipio de Girardota para los días (a) 08 - 09, (b) 10 - 11 y (c) 30 - 31 de marzo de 2025.



(a) Marzo 08 - 09.

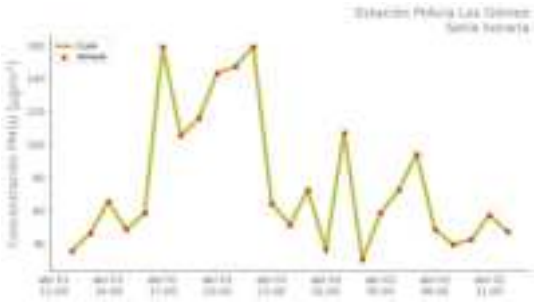


(b) Marzo 30 - 31.

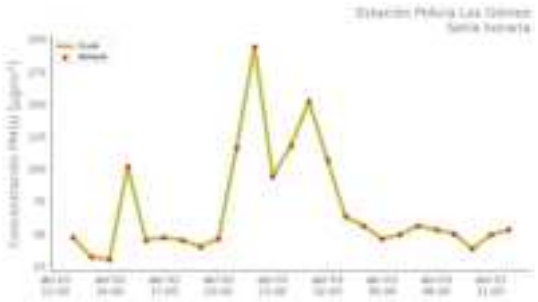
Figura 454: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación Tanques EPM de Girardota para los días (a) 08 - 09 y (c) 30 - 31 de marzo de 2025.

Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de abril de 2025

La Figura 455 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) en el municipio de Itagüí para diferentes días del mes de abril en los que se identificaron aumentos en las concentraciones de PM10 en este punto de medición.



(a) Abril 01 - 02



(b) Abril 02 - 03



(c) Abril 09 - 10

Figura 455: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 01 - 02, (b) 02 - 03 y (c) 09 - 10 de abril de 2025.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10 en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.

La Figura 456 muestra una imagen del video generado para los días 01 y 02 de abril. En términos generales, el video permite evidenciar que la intensidad de las chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura) es visible casi que para todo el período analizado y se vuelven más fuertes en el transcurso de la tarde y en la madrugada. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar esta información, la Figura 457 muestra el comportamiento de los vientos monitoreados en la estación de Policía Los Gómez desde el medio día del 01 de abril hasta el medio día del 02 del mismo mes. De acuerdo con esta Figura, predominaron los vientos con componente norte y occidente, especialmente entre las 16:00 y las 22:00. De acuerdo con lo anterior, es altamente probable que los picos de PM10 registrados en este punto de medición para el 01 de abril entre las 17:00 y las 23:00 estén afectados por las emisiones de fuentes fijas, específicamente por las chimeneas ubicadas cerca a la estación. Una situación similar se presenta para los días entre el 02 y el 03, y el 09 y el 10 de abril en este mismo punto de medición. La variación de la dirección del viento

para estas fechas puede observarse en la Figura 457.



(a) Abril 01 -02.

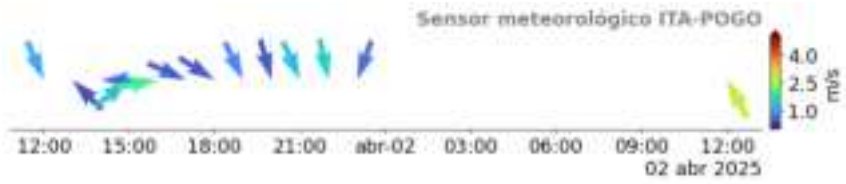


(b) Abril 02 - 03.

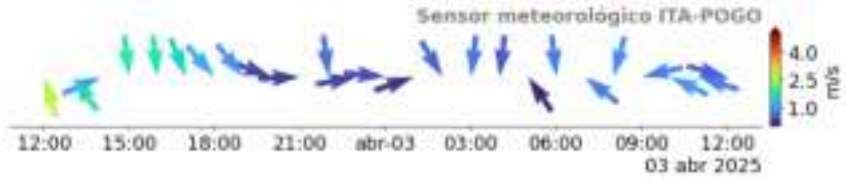


(c) Abril 09 - 10.

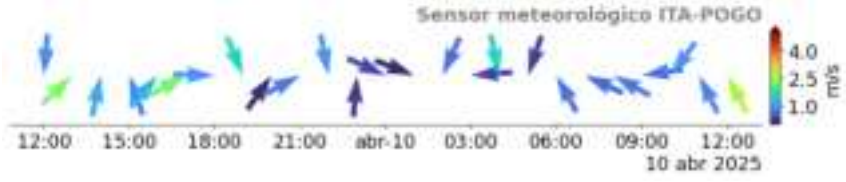
Figura 456: Imágenes de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos de los días (a) 01 - 02, (b) 02 - 03 y (c) 09 - 10 de abril de 2025. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.



(a) Abril 01 - 02.



(b) Abril 02 - 03.



(c) Abril 09 - 10.

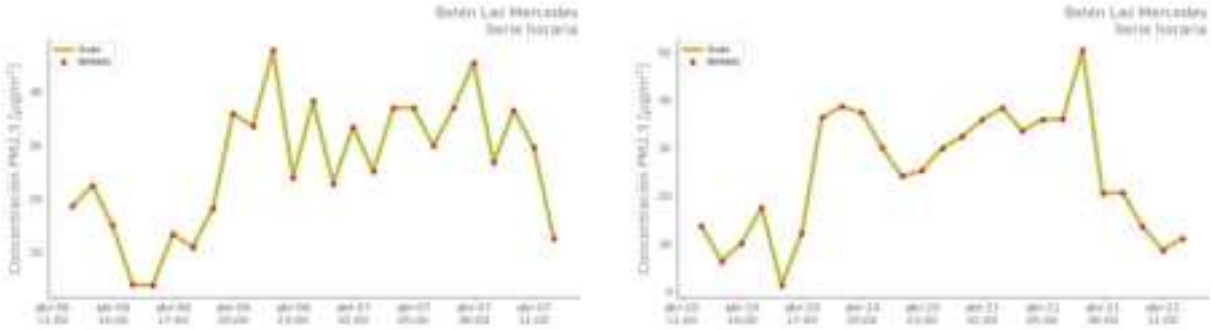
Figura 457: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados para los días (a) 01 - 02, (b) 02 - 03 y (c) 09 - 10 de abril de 2025. La gráfica se construyó para el período comprendido entre las 12:00 de cada día y las 12:00 del día siguiente.

Cabe resaltar que la intensidad de las emisiones de estos puntos fijos (chimeneas) puede estar asociada a las condiciones de operación de equipos de combustión externa como hornos y calderas, de igual forma, la afectación a la calidad del aire asociadas a las masas de aire contaminado que salen de estas chimeneas, de acuerdo con los registros de la estación ITA-POGO, depende también de las dinámicas meteorológicas del lugar.

En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 458 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas también en forma general durante las visitas de campo realizadas en este sector. La cámara instalada en este sitio permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles asociadas a puntos fijos, durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación MED-BEME. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 06 - 07 y 20 - 21 de abril de 2025. La Figura 459 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



Figura 458: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



(a) Abril 6 - 7.

(b) Abril 20 - 21.

Figura 459: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 06 - 07 y (b) 20 - 21 de abril de 2025.

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad Residencial Azalea del Parque para los días anteriormente mencionados. Según los videos construidos para las fechas definidas, si bien las chimeneas estuvieron en términos generales, activas durante todo el día, en las noches el movimiento de las plumas emitidas, especialmente por las chimeneas ubicadas a la derecha de la Figura 458, coincide con la dirección en la que está ubicada la estación MED-BEME, por lo cual, es probable que el aumento en las concentraciones de PM2.5 que se registra en esta estación en las horas de la noche, y que se mantiene muy constante durante la madrugada, esté asociado a la afectación de las plumas emitidas por estas fuentes fijas. En la Figura 460 se muestra algunas imágenes de la cámara térmica.



(a) Abril 06 - 07.



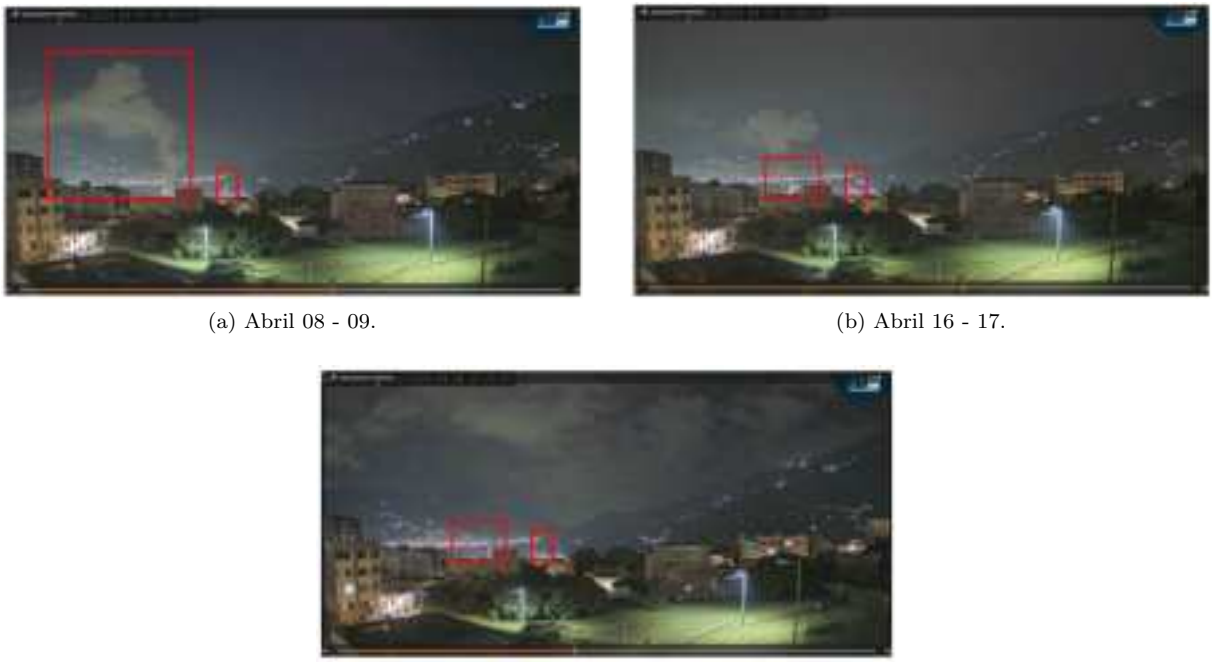
(b) Abril 20 - 21.

Figura 460: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 06 - 07 y (b) 20 - 21 de abril de 2025. En rojo se resaltan las chimeneas evidenciadas para este sector.

Cabe agregar que la visibilidad de la pluma que sale constantemente por las chimeneas sugiere el desarrollo de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar éstas con la dirección del viento en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de contaminantes por estas chimeneas haya afectado las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.

Finalmente, en el caso de la estación de calidad del aire de PM2.5 ubicada en el municipio de Girardota (estación GIR-EPM), la cámara visible instalada en este punto de medición (Figura 461) ha permitido identificar, especialmente en las horas de la noche, la ocurrencia de una pluma probablemente ubicada hacia la zona industrial del municipio. En la Figura 462 se muestran las concentraciones horarias de PM2.5 para varias fechas del mes de abril de 2025. La distribución de vientos para estas mismas fechas se muestra en la Figura 463, según la cual, los vientos en esta estación provienen desde direcciones con componentes oriente y sur, por lo cual, para los días analizados, no hay evidencia suficiente para afirmar que las plumas evidenciadas estén afectando la calidad del aire en la estación, especialmente en las horas de la noche en las que se evidenciaron los aumentos en las concentraciones de PM2.5. De esta manera, es probable que la calidad del aire asociada a este contaminante durante las noches analizadas haya estado relacionada con dinámicas de transporte regional y las dinámicas de emisión locales de esta estación. Cabe resaltar que de las tres plumas analizadas, la de la noche del 08 de abril fue la más intensa.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.

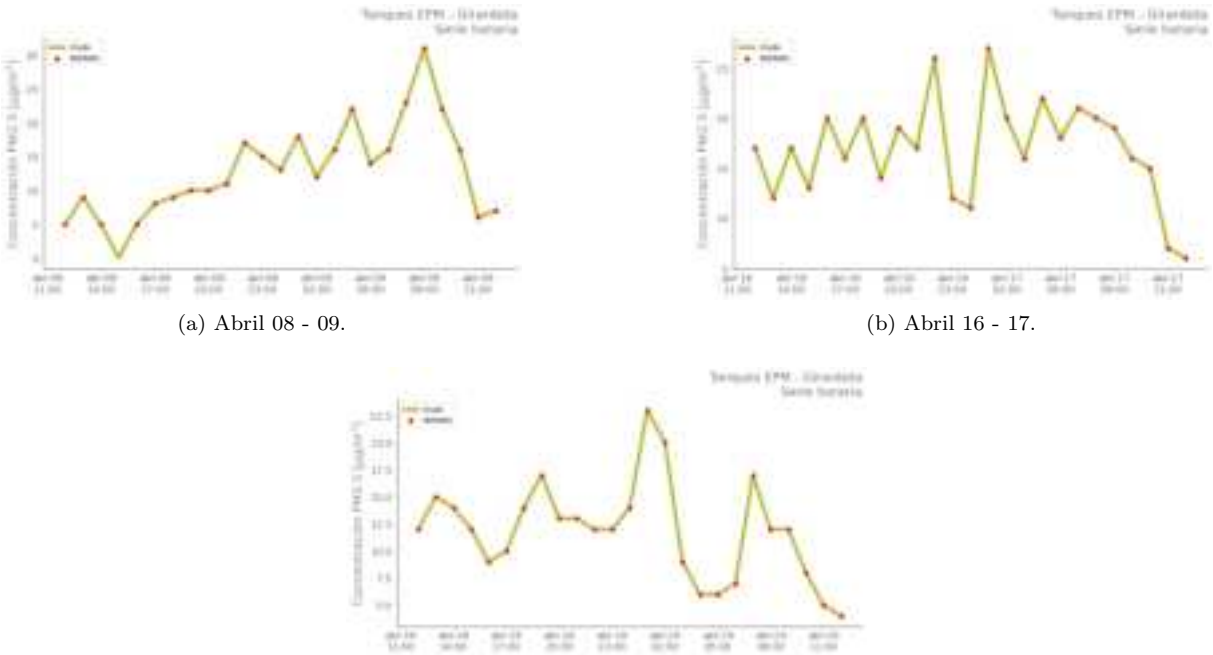


(a) Abril 08 - 09.

(b) Abril 16 - 17.

(c) Abril 28 - 29.

Figura 461: Imágenes de la cámara visible de la estación ubicada en los Tanques de EPM del municipio de Girardota para los días (a) 08 - 09, (b) 16 - 17 y (c) 28 - 29 de abril de 2025. Los cuadros rojos corresponden a plumas identificadas.

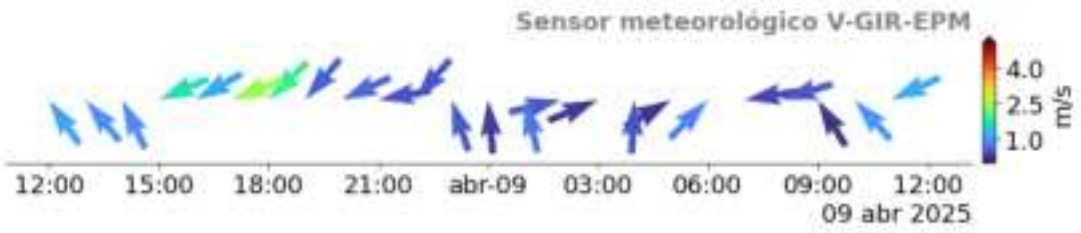


(a) Abril 08 - 09.

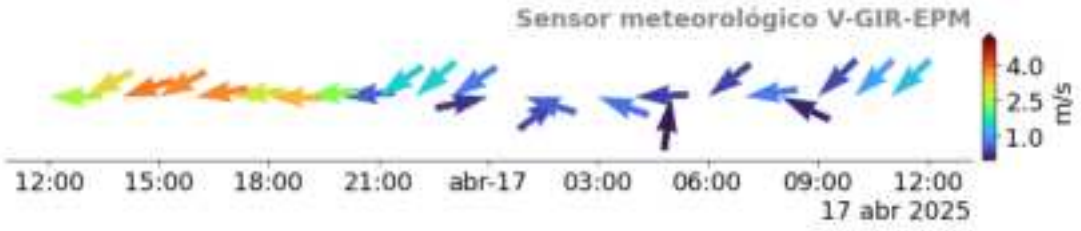
(b) Abril 16 - 17.

(c) Abril 28 - 29.

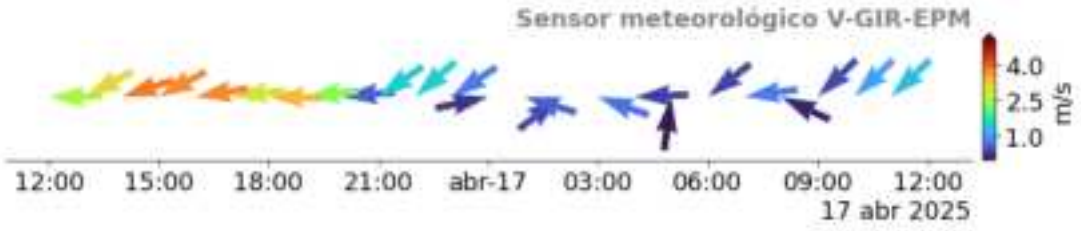
Figura 462: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Tanques EPM del municipio de Girardota para los días (a) 08 - 09, (b) 16 - 17 y (c) 28 - 29 de abril de 2025.



(a) Abril 08 - 09.



(b) Abril 16 - 17.



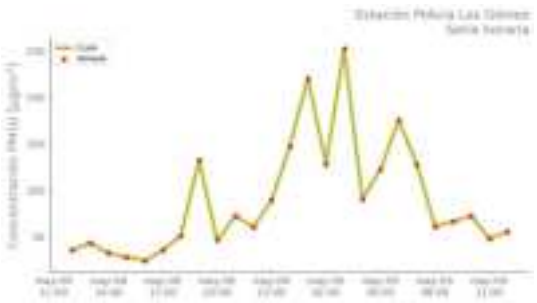
(c) Abril 28 - 29.

Figura 463: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación Tanques EPM de Girardota para los días (a) 08 - 09, (b) 16 - 17 y (c) 28 - 29 de abril de 20255.

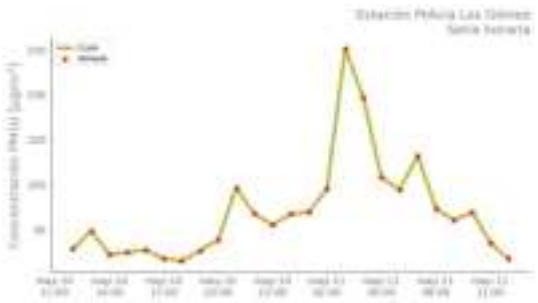
Seguimiento a fuentes de emisión en el mes de mayo de 2025

La Figura 464 presenta las concentraciones horarias de PM10 obtenidas en la Estación de Policía Los Gómez (ITA-POGO) en el municipio de Itagüí para diferentes días del mes de mayo en los que se identificaron aumentos en las concentraciones de PM10 en este punto de medición.

Teniendo en cuenta las concentraciones horarias de PM10 en la estación ITA-POGO para los días mencionados, se generaron los videos de la cámara térmica instalada en el Centro Comercial Viva de Envigado, disponibles en el enlace videos cámara.



(a) Mayo 08 - 09



(b) Mayo 10 - 11



(c) Mayo 28 - 29

Figura 464: Concentraciones horarias de PM10 en la estación Los Gómez para los días (a) 01 - 02, (b) 02 - 03 y (c) 09 - 10 de abril de 2025.

La Figura 465 muestra imágenes de los videos generados para los días 08 - 09, 10 - 11 y 28 - 29 de mayo. En términos generales, el video permite evidenciar que la intensidad de las chimeneas (marcadas con cuadros rojos en la Figura) es visible casi que para todos los períodos analizados y se vuelven más fuertes en el transcurso de la tarde y en la madrugada. Es probable que los cambios en la intensidad de estas emisiones de las chimeneas, de acuerdo con el video, estén asociados a las dinámicas de operación y a la quema de combustible en industrias del sector. Con el fin de complementar esta información, la Figura 466 muestra el comportamiento de los vientos monitoreados en la estación de Policía Los Gómez para los mismos días para los que se construyeron los videos de la cámara. De acuerdo con esta Figura, predominaron los vientos con componente norte y occidente, especialmente después de las 18:00. De acuerdo con lo anterior, es altamente probable que los picos de PM10 registrados en este punto de medición durante las madrugadas de los días analizados estén afectados por las emisiones de fuentes fijas, específicamente por las chimeneas ubicadas cerca a la estación. La variación de la dirección del viento para estas fechas puede observarse en la Figura 466.



(a) Mayo 08 - 09.

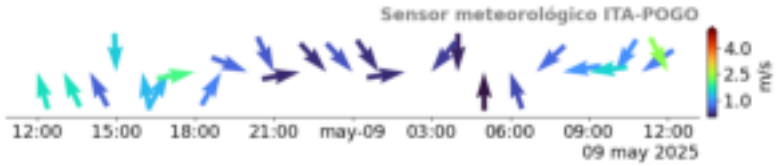


(b) Mayo 10 - 11.

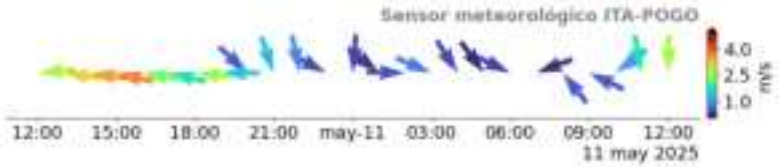


(c) Mayo 28 - 29.

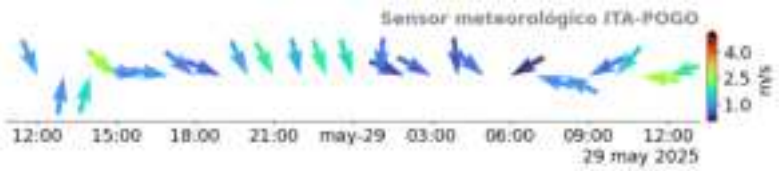
Figura 465: Imágenes de la cámara térmica ubicada en el Centro Comercial Viva de Envigado con visual hacia la vereda Los Gómez del municipio de Itagüí para diferentes momentos de los días (a) 08 - 09, (b) 10 - 11 y (c) 28 - 29 de mayo de 2025. Los cuadros rojos hacen referencia a posibles puntos fijos de emisión de contaminantes (chimeneas). La flecha azul muestra la ubicación aproximada de la estación.



(a) Mayo 08 - 09.



(b) Mayo 10 - 11.



(c) Mayo 28 - 29.

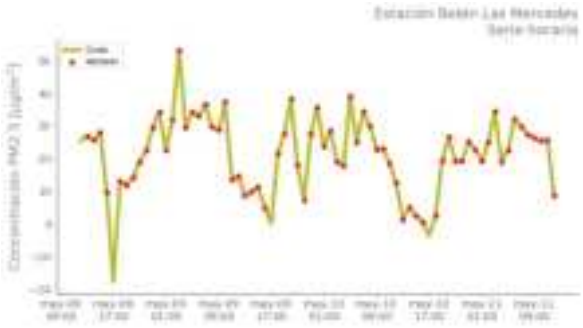
Figura 466: Comportamiento de la velocidad y dirección del viento medidos en la estación meteorológica ubicada en la Estación de Policía Los Gómez del municipio de Itagüí. Se muestran los resultados para los días (a) 08 - 09, (b) 10 - 11 y (c) 28 - 29 de mayo de 2025. La gráfica se construyó para el período comprendido entre las 12:00 de cada día y las 12:00 del día siguiente.

Cabe resaltar que la intensidad de las emisiones de estos puntos fijos (chimeneas) puede estar asociada a las condiciones de operación de equipos de combustión externa como hornos y calderas, de igual forma, la afectación a la calidad del aire asociadas a las masas de aire contaminado que salen de estas chimeneas, de acuerdo con los registros de la estación ITA-POGO, depende también de las dinámicas meteorológicas del lugar.

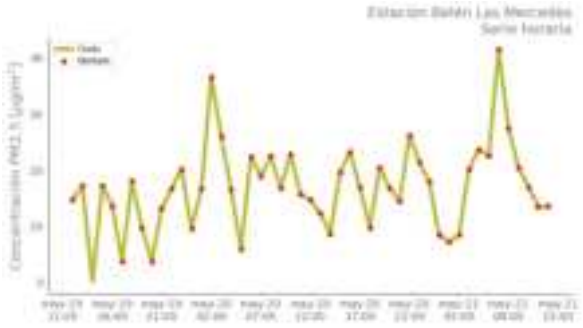
En el caso de la cámara ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque, en el sector de Belén Las Mercedes del Distrito de Medellín, la Figura 467 muestra varias fuentes fijas de emisión ubicadas al occidente de la unidad, identificadas también en forma general durante las visitas de campo realizadas en este sector. La cámara instalada en este sitio permite ver puntos de emisión de contaminantes asociados a diferentes industrias, con plumas muy visibles asociadas a puntos fijos, durante varias horas y que coinciden con los picos de concentración de PM2.5 que se registran en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío (MED-BEME), ubicada al costado norte de la Unidad Residencial Azalea del Parque. De manera similar a lo realizado para la estación de Policía Los Gómez, se llevó a cabo la identificación de picos en los registros de concentraciones de PM2.5 de la estación MED-BEME. De acuerdo con esto, se generaron los videos para los días 08 - 11, 19 - 21 y 26 - 28 de mayo de 2025. La Figura 468 muestra la variación de las concentraciones de PM2.5 en la estación MED-BEME para los días considerados.



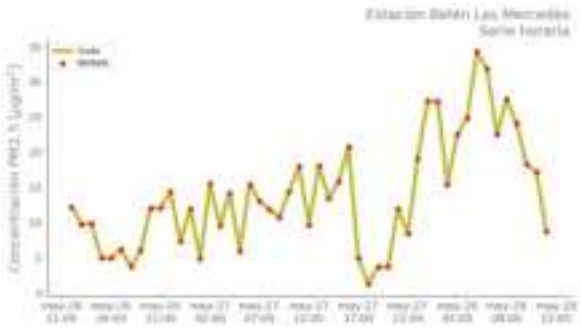
Figura 467: Visualización de puntos fijos de emisión de contaminantes atmosféricos, en sector cercano a la estación MED-BEME.



(a) Mayo 08 - 11.



(b) Mayo 19 - 21.



(c) Mayo 26 - 28.

Figura 468: Concentraciones horarias de PM2.5 en la estación Belén Las Mercedes para los días (a) 08 - 11, (b) 19 - 21 y (c) 26 - 28 de mayo de 2025.

En el enlace cámaras térmicas se pueden consultar los videos generados para la cámara de la Unidad Residencial Azalea del Parque para los días anteriormente mencionados. Según los videos construidos para las fechas definidas, si bien las chimeneas estuvieron en términos generales, activas durante todo el día, en las noches el movimiento de las plumas emitidas, especialmente por las chimeneas ubicadas a la derecha de la Figura 467, coincide con la dirección en la que está ubicada la estación MED-BEME, por lo cual, es probable que el aumento en las concentraciones de PM2.5 que se registra en esta estación en las horas de la noche, y que se mantiene muy constante durante la madrugada, esté asociado a la afectación de las plumas emitidas por estas fuentes fijas. En la Figura 469 se muestra algunas imágenes de la cámara térmica.



(a) Mayo 08 - 11.



(b) Mayo 19 - 21.

Figura 469: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 08 - 11, (b) 19 - 21 y (c) 26 - 28 de mayo de 2025. En rojo se resaltan las chimeneas evidenciadas para este sector.



(a) Mayo 26 - 28.

Figura 469: Imagen de la cámara térmica ubicada en la Unidad Residencial Azalea del Parque en el sector de Belén Las Mercedes, para el período (a) 08 - 11, (b) 19 - 21 y (c) 26 - 28 de mayo de 2025. En rojo se resaltan las chimeneas evidenciadas para este sector - Continuación.

Cabe agregar que la visibilidad de la pluma que sale constantemente por las chimeneas sugiere el desarrollo de procesos que implican emisión de cargas contaminantes a la atmósfera y, aunque no es posible relacionar éstas con la dirección del viento en esta zona, dado que no se instaló una estación meteorológica y tampoco existe una cercana, es probable que la emisión continua de contaminantes por estas chimeneas haya afectado las concentraciones de PM2.5 en la estación de la I.E. Pedro Justo Berrío, la cual, si bien no se muestra en la Figura, queda ubicada hacia la derecha de la imagen.

La información aportada permite a la autoridad ambiental orientar acciones de control y vigilancia en períodos del día y días de la semana, para lo cual se deberá continuar con el análisis a partir de los registros de la cámara, así como del comportamiento de las concentraciones de material particulado, de tal manera que se logre evidenciar una periodicidad marcada frente al aporte a la calidad del aire, asociada a fuentes fijas específicas.

Anexo D. Estudio de la formación de PM2.5 secundario en el Valle de Aburrá

Lista de Abreviaturas

Abreviación	Significado
$PM_{2,5}$	Partículas menores a 2.5 micras
NO_X	Óxidos de nitrógeno
NO_2	Dióxido de nitrógeno
NO	Monóxido de nitrógeno
SO_2	Dióxido de azufre
O_3	Ozono troposférico
CO	Monóxido de carbono
O_3	Ozono
HCHO	Formaldehido
VOC	Compuestos orgánicos volátiles
SVOC	Compuestos orgánicos primarios semivolátiles
IVOC	Compuestos orgánicos volátiles intermedios
LVOC	Compuestos orgánicos de menor volatilidad
BVOC	Compuestos orgánicos volátiles de origen biogénico
SOA	Aerosoles orgánicos secundarios
SIA	Aerosoles inorgánicos secundarios
SCI	Intermediarios de Criegee estables
OH^-	Radical hidroxilo
N_2O_5	Pentaóxido de dinitrógeno
NO_3^-	Nitratos
SO_4^{-2}	Sulfatos
NH_4^+	Amonio
Cl^-	Cloruros
NH_4Cl	Cloruro de amonio
NaCl	Cloruro de sodio
KCl	Cloruro de potasio
$ZnCl_2$	Cloruro de zinc
OC	Carbono orgánico
EC	Carbono elemental
BrC	Brown carbon
BTEX	Benceno, tolueno, etilbenceno y xileno
SOR	Tasa de oxidación de azufre
NOR	Tasa de oxidación de nitrógeno

Introducción

En el Valle de Aburrá, el PM2.5 es el contaminante más crítico que afecta a la calidad del aire, al presentar históricamente concentraciones que pueden poner en riesgo la salud de la población (AMVA (2024)). El PM2.5 se asocia a las partículas con un diámetro aerodinámico inferior o igual a 2.5 micras, lo que puede generar riesgos al sistema respiratorio y cardiovascular. Adicionalmente, debido a su composición química puede tener otros impactos en salud, en función de la toxicidad de sus componentes (AMVA (2018)).

Las fuentes del PM2.5 pueden ser de origen primario o secundario, el primero se debe principalmente a la combustión de combustibles fósiles y de biomasa, mientras que el segundo se debe a la interacción química de contaminantes primarios en la atmósfera, favoreciendo la producción de aerosoles, que pueden tener una composición orgánica o inorgánica (Gao et al. (2020)). Los aerosoles orgánicos secundarios (SOA) adicional a los procesos de condensación en la interfase acuosa en la atmósfera, también se forman a partir de la oxidación de compuestos orgánicos volátiles (VOC) (con origen antropogénico y biogénico) y la partición o segmentación subsecuente de compuestos orgánicos semivolátiles desde la fase gaseosa hacia la fase aerosol o sobre partículas pre-existentes (Alam et al. (2024)).

Adicionalmente, el transporte regional de masas de aire y las condiciones meteorológicas, son factores que contribuyen con la acumulación del PM2.5 en la atmósfera, por lo que comprender la composición química y las fuentes de emisión del PM2.5 tiene relevancia en la gestión de la calidad del aire.

Dada la importancia de iniciar un estudio para profundizar en el conocimiento del PM2.5 de origen secundario, se planteó una investigación para la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024, definiendo como objeto general: *Realizar un estudio que permita determinar aproximadamente los perfiles verticales de concentración del PM2.5, SO_2 y NO_X principalmente, y realizar un acercamiento a la evaluación de los compuestos orgánicos volátiles.*

Para poder llevar a cabo este objetivo, se propuso como metodología en la primera fase, estudiar en detalle los mecanismos de reacción fotoquímica de contaminantes primarios, tales como el SO_2 y el NO_x, que son precursores de la formación del PM2.5 secundario, con el objetivo de analizar variables relevantes que contribuyen con esta formación, tales como parámetros meteorológicos y el gradiente de la concentración de estos precursores (SO_2 y el NO_x) y subproductos en la vertical de la capa límite.

La segunda fase del estudio, se realizará a partir de datos satelitales de diferentes fuentes de información y otras investigaciones, en torno a la estimación de los perfiles verticales de contaminantes atmosféricos, los cuales se compararán con los resultados preliminares mediante correlación de mediciones realizadas por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá.

Durante la vigencia del CCT 016 de 2024 se avanzó en la primera fase de la investigación planteada, iniciando con la revisión de la información que permitiera entender los mecanismos de reacción química mediante los cuales se da la formación de aerosoles secundarios. De esta manera se hizo un análisis de la información asociada con los modelos matemáticos que posibilitan acercarse al conocimiento de los mecanismos de formación secundaria de PM2.5, ya que dada la complejidad de éstos es necesario usar herramientas de modelación matemática. A continuación, se presentan los modelos que facilitaron acercarse a este conocimiento.

Revisión de los mecanismos de reacción de los Modelos de Transporte Químico de Calidad del Aire

Los modelos de calidad del aire actualmente son usados para estimar las concentraciones de contaminantes criterio o especiales, los cuales simulan o representan las dinámicas y los procesos físicos, químicos y

radiativos en la atmósfera. Sin embargo, es necesario comprender que estos modelos poseen incertidumbres asociadas a la calidad de los datos de entrada y al conocimiento limitado para la descripción de ciertos fenómenos (Gavidia-Calderon et al. (2024)). A continuación, se exponen las características de reacción más relevantes, tales como especies químicas y reacciones, que brindarán detalles de la dinámica de formación atmosférica, principalmente de los aerosoles secundarios, para su estudio en el Valle de Aburrá.

Modelo de transporte químico Isorropía

En la actividad del estudio de los mecanismos de reacción de formación de aerosoles secundarios, se han analizado los parámetros de entrada y evaluación inicialmente del modelo de Isorropía, tales como las especies químicas precursoras de mayor relevancia. Isorropía es un modelo de equilibrio termodinámico de aerosoles inorgánicos multifásico, donde el mecanismo de reacción química propuesto por Isorropía ha sido usado para alimentar diferentes modelos químicos computacionales de calidad del aire, que estiman las concentraciones y el estado físico de aerosoles atmosféricos inorgánicos, a partir de la información de inventarios de emisiones tanto a escala local como global (Nenes et al. (1998, 1999)).

Las especies analizadas por el modelo Isorropía son los aerosoles compuestos por sodio, amonio, cloro, sulfatos, nitratos y agua, en las fases sólida, líquida y gaseosa. En la fase sólida se consideran principalmente las sales de estos elementos, en la fase líquida se analizan los cationes, aniones y agua y por último en la fase gaseosa están el amoniaco, el ácido nítrico, el ácido clorhídrico y el agua. Estas especies están involucradas en un set de 15 reacciones en el equilibrio. En la investigación para la implementación del modelo (Nenes et al. (1999)) se exponen cuáles son estas reacciones, asociando las constantes y parámetros termodinámicos para el cálculo de los factores necesarios para determinar las concentraciones en el equilibrio de los aerosoles bajo condiciones de humedad relativa específicas. Cabe anotar que, el modelo fue utilizado para estimar las características atmosféricas en estudios de calidad del aire específicamente el de la cuenca del sur de California (Nenes et al. (1998)).

A partir del set total de especies que evalúa el modelo Isorropía, se propone la clasificación de 4 tipos de aerosoles en función de las concentraciones de los iones de sodio, amonio y sulfato. El primero tiene un alto contenido de sulfato altamente ácido, el segundo es rico en sulfato medianamente acidificado, el tercero pobre en concentración tanto en sulfato como de sodio, y un cuarto que es pobre en sulfato pero alto en concentración de sodio. Adicional a esta clasificación, en el modelo se contempla otra división de aerosoles, siendo de tipo urbano, continental remoto, continental no urbano y marino. La clasificación de los aerosoles del modelo Isorropía han evidenciado la relevancia del azufre en la tipología de diversos aerosoles, permitiendo inferir la importancia de entender la actividad química del azufre en las dinámicas atmosféricas.

El modelo de Isorropía (Nenes et al. (1998, 1999)) menciona el concepto de la delicuescencia química que es una propiedad de un compuesto, especialmente sales, para atraer o captar humedad del aire y formar una disolución acuosa. La anterior propiedad, es relevante en el análisis termodinámico para la estabilidad de las fases acuosa y gaseosa de los aerosoles, en un sistema multicomponente o individual, ya que el modelo estima el estado de disolución de los aerosoles en función de la humedad relativa del sistema, siendo esta propiedad, de las más representativas en el proceso de formación de PM2.5 secundario.

En conclusión, el modelo de Isorropía provee información de la formación química especialmente de aerosoles secundarios inorgánicos, entre los que se encuentran los sulfatos y nitratos, que son de gran interés para el Valle de Aburrá por las dinámicas de emisión de sus precursores.

Modelo de transporte químico RAQMS

Entre la información secundaria sobre los modelos de calidad del aire, se revisó también el Sistema de modelización de la calidad del aire regional (RAQMS), el cual es un modelo euleriano tridimensional tipo esfera y con un sistema coordenado sobre el terreno (Li et al. (2021a)). Este modelo evalúa los principales procesos químicos y físicos tanto de los gases como de los aerosoles en la tropósfera, incluidos el movimiento advectivo, la difusión, la deposición y la química multifase. Emplea el mecanismo de reacción CBM-IV (mecanismo carbon bond IV) que es usado para representar las reacciones químicas en fase gaseosa y ha sido modificado al incluir especies orgánicas y reacciones de oxidación para producir productos orgánicos condensables. En este modelo se toman en cuenta además, 9 reacciones químicas entre el polvo mineral y otros gases y 3 reacciones entre sal marina y gases, adicionalmente se complementa con las reacciones que proporciona el modelo de Isorropía para el equilibrio termodinámico de aerosoles inorgánicos. Acorde al mecanismo CBM-IV, las emisiones totales de compuestos orgánicos volátiles-VOC fueron clasificadas en alcanos, alquenos, tolueno, xileno, formaldehido y acetaldehido. Por otro lado, es importante destacar que el modelo incorpora un mecanismo de reacción en medio acuoso considerando los compuestos orgánicos primarios semivolátiles (SVOC) e intermedios (IVOC) para la formación de SOA. De los SVOC e IVOC se resaltan tanto el glioxal como el metilglioxal, los cuales se consideran precursores claves en la formación de SOA, mediante absorción acuosa que se producen a partir de fuentes primarias y oxidación química tanto de especies aromáticas como del isopreno.

El modelo RAQMS es capaz de reproducir variables meteorológicas, adicionalmente mejora la simulación de los SOA de forma significativa mediante la inclusión de aerosoles primarios semivolátiles e intermedios (SVOC+IVOC) y reacciones acuosas (Li et al. (2021a)).

Los anteriores modelos resaltan la necesidad e importancia de estudiar los compuestos intermedios de reacción secundaria y los procesos de oxidación de estas especies. Por lo anterior, se efectuó una revisión bibliográfica de este requerimiento de información, tal y como se muestra a continuación.

Análisis de las características de los compuestos químicos intermedios en la formación de aerosoles atmosféricos secundarios

La formación de aerosoles orgánicos secundarios se puede dar a través de reacciones de oligomerización (unión de dos o más monómeros) de intermediarios de Criegee, que son radicales u óxidos de carbonilo (Chen et al. (2018)). Se resalta también la importancia de las reacciones de ozonólisis de los alquenos, obteniendo intermediarios de Criegee estables (SCI). Los SOA están conformados principalmente por oligómeros, los cuales se obtienen como producto de las reacciones que tienen lugar entre los SCI con los radicales peroxi. Es así como las reacciones entre SCI y ácidos orgánicos son de suma importancia en la nucleación de aerosoles, que se presentan en regiones como en la zona ecuatorial, donde se alcanzan a tener altas concentraciones de SCI. Entre los alquenos de mayor abundancia en la atmósfera se encuentra el isopreno (de origen biogénico), el cual a partir de reacciones de oxidación, es una de las fuentes de producción de SOA a escala tanto regional como global. La ozonólisis del isopreno, es la principal ruta de oxidación en la tropósfera (Chen et al. (2018)). El isopreno también participa en la producción de ozono troposférico.

Por otro lado, si bien los SOA se pueden producir debido a reacciones de oxidación con radicales hidroxilo (OH), estos también pueden ser destruidos por reacciones de fotólisis. Debido a que ambas reacciones se presentan de forma simultánea y durante el ciclo de vida de los aerosoles orgánicos en la atmósfera, es difícil cuantificar el efecto individual tanto de la producción de SOA como del envejecimiento a partir de experimentos en el laboratorio (Li et al. (2021a); Hodzic et al. (2015)). Es importante destacar que la fotólisis genera un proceso de fragmentación de las moléculas a compuestos más pequeños de mayor

volatilidad, lo que modifica la composición y otras propiedades de los SOA de forma importante en su etapa de envejecimiento en la atmósfera (Hodzic et al. (2015); Chen et al. (2019b)).

El estudio de Hodzic et al. (2015) detalla la estimación de la formación y el tiempo de vida de los aerosoles orgánicos secundarios (SOA) mediante modelación del efecto potencial de las reacciones de fotólisis orgánica de las fases tanto gas como de la partícula. La investigación analizó las reacciones del α-pineno, tolueno y alcanos de C_{12} y C_{16} con iones hidroxilo (OH) a bajas y altas concentraciones de NO_X. Los resultados de dichas simulaciones mostraron que después de 4 días de envejecimiento químico, equivalente a 8 días de verano en las latitudes medias, la fotólisis en la fase gaseosa alcanzó una leve reducción en la producción de SOA. La fotólisis en la fase condensada posee un importante efecto tanto en la formación como del envejecimiento o tiempo de vida de los SOA, con una disminución del 40 al 60 % luego de 10 días. Los procesos que ocurren dentro de la fase partícula, tales como reacciones de oligomerización, pueden modificar la composición química y otras propiedades, lo que puede aumentar o reducir la habilidad de absorber radiación y facilitar los procesos de fotólisis (Hodzic et al. (2015)). De lo anterior se deduce que también es necesario comprender la distribución de volatilidades de los productos intermedios de oxidación.

Análisis de procesos de oxidación sobre los compuestos intermedios en la formación de aerosoles atmosféricos secundarios

El estudio de los mecanismos de reacción implica evaluar las diferentes especies químicas involucradas en el set de reacciones presentes en la atmósfera. Por lo anterior, durante la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024, el estudio del material particulado PM2.5 secundario se centró en el análisis de las características consideradas por los diferentes modelos de calidad del aire, para estimar la composición de las fracciones orgánicas del PM2.5 y otros contaminantes en el ambiente. Con base en resultados específicamente de los modelos termodinámicos, se destaca el papel que juegan los compuestos orgánicos primarios semivolátiles (SVOC) e intermedios (IVOC) como precursores de los aerosoles orgánicos secundarios (SOA), y las variables medioambientales que los puedan afectar ya sea en su etapa de formación, envejecimiento y/o degradación.

Los aerosoles orgánicos están compuestos de un amplio rango de compuestos orgánicos con diferentes pesos moleculares, estructuras químicas diversas, funcionalidad, volatilidad y reactividad (Alam et al. (2024)). Estos compuestos al tener grupos funcionales con elementos como el oxígeno e hidrógeno dentro de su estructura, sufren diferentes procesos de oxidación, obteniendo productos con propiedades fisicoquímicas diferentes. En la Figura 470 se detalla de forma simplificada, el proceso de formación de SOA mediante reacciones de oxidación de los compuestos orgánicos volátiles (VOC) y subproductos intermedios (Chen et al. (2019b)). La secuencia expone que inicialmente se forman los productos intermedios (IVOC) que poseen una volatilidad relativamente alta mediante una reacción de oxidación, seguido por otro proceso de mayor oxidación para obtener productos de volatilidad menor (LVOC), los cuales generarán un proceso de nucleación de partículas a través de un proceso de fraccionamiento gas-partícula, dando como resultado la formación de SOA.

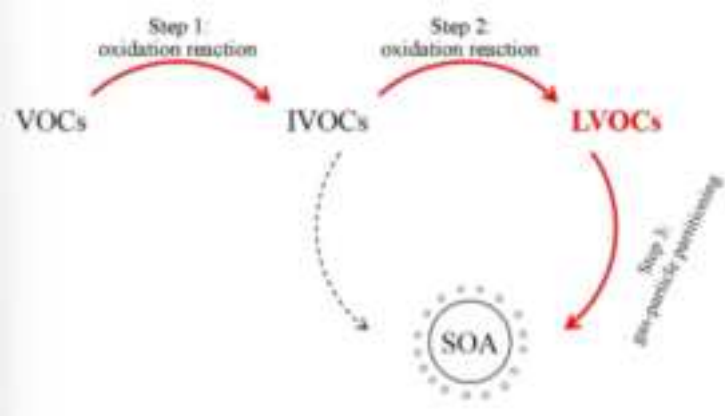


Figura 470: Proceso de formación de SOA mediante reacciones de oxidación de los VOC. Fuente: Chen et al. (2019b).

La investigación de Chen et al. (2019b) destaca que los productos de los procesos de fotooxidación del tolueno como precursor de los SOA, variaron en función de su concentración inicial. En el escenario en el que se tenían concentraciones iniciales bajas (37 ppb) de tolueno y posterior al proceso de oxidación de 480 minutos, se obtuvieron principalmente LVOC siendo más fácil el proceso de nucleación final aportando directamente a la formación de SOA, mientras que en el caso en el que las concentraciones iniciales de tolueno fueron altas (690 ppb) luego del mismo período de tiempo, los productos eran de tipo IVOC, lo que no necesariamente podría resultar en un aumento de SOA, debido a la partición limitada del sistema gas-partícula en los núcleos iniciales formados por la nucleación homogénea de IVOC. Otros estudios han demostrado que la oxidación de vapores de LVOC pueden aumentar en gran medida la masa de SOA y contribuir al crecimiento inicial de partículas en la atmósfera (Hong et al. (2016)). Los estudios relacionados con la oxidación de especies químicas se realizan normalmente en cámaras cerradas para llevar a cabo experimentos de formación de aerosoles secundarios a partir de la fotooxidación de diferentes concentraciones de precursores.

Adicional al tolueno como un agente de formación secundaria, debido a su papel en los procesos de oxidación, otro de los VOC representativos como se expuso anteriormente es el isopreno aportado por fuentes biogénicas, siendo este compuesto trazador de estas fuentes para la formación de SOA. En la investigación de Kirkby et al. (2019) en la zona rural de Wuyi, China, obtuvieron picos de alta concentración de este compuesto debido al efecto de las altas temperaturas e intensa radiación solar características del verano.

Con la revisión de la información asociada a los modelos de transporte químico Isorropía y RAQMS, se identificaron las reacciones químicas de interés en la formación de sulfatos y nitratos, así como de los productos intermedios de los SOA, lo cual es fundamental para definir las reacciones más representativas, que podrían ser comparadas con los resultados arrojados por los modelos CAMx y por el WRF-CHEM, siendo el primero, un modelo operativo en el Valle de Aburrá implementado por la Universidad Pontificia Bolivariana. Ahora bien, teniendo en cuenta que todos los sistemas de modelación tienen asociado un grado de incertidumbre, es probable que el desempeño de modelos como el CAMx y/o el WRF-Chem dependan de los mecanismos de reacción química seleccionados y de la resolución de los inventarios de emisiones alimentados a los modelos, lo que plantea la necesidad de tener diferentes modelos operativos para el Valle de Aburrá que posibiliten la mejor toma de decisiones, teniendo en cuenta además que cada modelo puede tener mayor fortaleza para modelar/predecir una u otra especie.

Para el objetivo principal planteado al inicio de la investigación (asociado a los perfiles verticales de PM2.5,

NO_X y SO_2), se usaron los resultados obtenidos con el modelo CAMx. Este modelo fue implementado por la Universidad Pontificia Bolivariana mediante la suscripción de diferentes convenios con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, con el fin de evaluar escenarios de emisión atmosféricas para el estudio de la calidad del aire en el territorio, con la información obtenida a partir de los inventarios de emisiones atmosféricas de fuentes móviles, fijas industriales, de área y biogénicas, sin embargo, es importante aclarar que el CAMx aun no considera la influencia del aporte de fuentes externas asociadas a quemas de cobertura vegetal. Los resultados obtenidos a partir del modelo CAMx (los cuales están basados en modelaciones con año base 2018), permitirían tener una aproximación al conocimiento del comportamiento vertical de diferentes especies químicas.

Los modelos de transporte químico han sido implementados a escalas globales y regionales para predecir la contribución de la masa de SOA a la cantidad de aerosoles orgánicos atmosféricos. Por lo anterior, es necesario mejorar los métodos de modelación de formación de SOA debido a la complejidad de la mezcla de VOC así como de los mecanismos de su degradación química. A lo anterior se suman las incertidumbres asociadas a emisiones de fuentes externas u otros mecanismos de remoción en la atmósfera (Jo et al. (2024)).

La concentración y composición de los aerosoles atmosféricos tienen una alta variabilidad a diferentes escalas tanto temporales como espaciales (incluyendo la atmósfera vertical), las cuales dependen del tamaño de partícula y de condiciones meteorológicas. Se resalta que este informe se concentra en la caracterización de los componentes atmosféricos en la columna vertical. Los resultados del modelo de CAMx pueden generar información de la composición química de los aerosoles, distribución de tamaños de partículas y perfiles verticales (Fernandes et al. (2015)).

Los resultados de estas simulaciones con el modelo CAMx permiten conocer el perfil vertical de las concentraciones de diferentes especies químicas, como se puede observar especialmente para los SOA en la Figura 471 en la estación GIR-SOSN. Este escenario fue evaluado con datos del inventario de emisiones con año base 2018 para un día con condiciones meteorológicas adversas, específicamente el 9 de noviembre de 2019. Los resultados pueden ser consultados de forma libre en el portal de calidad del aire de la UPB, el cual está siendo actualizado a través del convenio de asociación 167 de 2025 con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá.

El perfil vertical de SOA en la estación GIR-SOSN permite observar que las concentraciones de estos aerosoles disminuyen con respecto a alturas mayores. Los picos de concentración se presentan con mayor intensidad en las horas de la mañana entre las 05:00 y 10:00, posteriormente en las horas de la tarde entre las 16:00 y 19:00. El comportamiento en estas franjas horarias puede ser atribuible a las características de las dinámicas de movilidad en el Valle de Aburrá, permitiendo inferir un mayor aporte de las fuentes móviles a estas especies químicas secundarias. Las simulaciones solo tienen en cuenta el aporte por emisiones locales, por lo que sería importante estudiar el comportamiento de las concentraciones de SOA con influencia de fuentes externas, tales como afectación por incendios de cobertura vegetal o transporte de masas de aire, con ayuda de datos satelitales de modelos globales.

Debido a que los resultados de la evaluación de escenarios de modelación con CAMx están siendo actualizados, se propone realizar un análisis detallado de éstos, en una próxima vigencia del contrato Siata, con el fin de comparar dichos resultados con los obtenidos en otras campaña de caracterización química en puntos de interés del Valle de Aburrá y poder continuar con la investigación de mecanismos de reacción química y evaluación del impacto de variables meteorológicas en la formación de aerosoles secundarios.

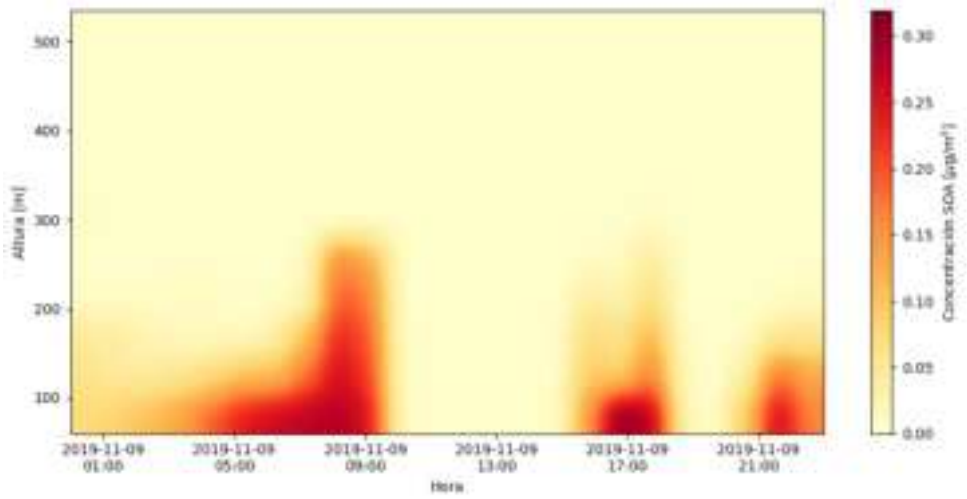


Figura 471: Comportamiento de las concentraciones de SOA a diferentes alturas en la estación GIR-SOSN.

Dentro de la investigación llevada a cabo durante la vigencia del CCyT 016 de 2024, se realizaron diferentes análisis asociados al comportamiento de las concentraciones de los precursores tanto de PM2.5 como del ozono, y otras especies químicas constituyentes del PM2.5 secundario, así como del análisis de la influencia de las variables meteorológicas en la formación de aerosoles secundarios. Por otra parte, se realizó un análisis del aporte de las emisiones generadas localmente, a partir de los registros de la red de monitoreo de calidad del aire del Valle de Aburrá incluyendo las mediciones de los equipos de carbono total en 2 estaciones, como se presenta a continuación.

Análisis del comportamiento de las concentraciones de los precursores y otras especies químicas constituyentes del PM2.5 secundario con registros en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá

En los centros urbanos, las fuentes móviles son los responsables del mayor aporte a las emisiones de NO_X y de compuestos orgánicos volátiles (VOC) generados por la combustión de la gasolina y el diésel principalmente. Para el Valle de Aburrá, según los resultados del inventario de emisiones atmosféricas con año base 2022 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2023)), se generó una emisión de 18384 toneladas de NO_X y 37864 ton de VOC, de las cuales las fuentes móviles aportaron el 93 y 97 % de las emisiones, respectivamente. Por otra parte, según los estudios de caracterización química realizados en el Valle de Aburrá, los aniones nitratos junto con los sulfatos, son los constituyentes más representativos en la composición del PM2.5 (AMVA (2019)), acorde con lo presentado en los modelos analizados.

De acuerdo con la literatura, se puede inferir para el análisis del comportamiento diurno de los óxidos de nitrógeno, que en las horas de la mañana el dióxido de nitrógeno (NO_2) reacciona con los radicales OH de la atmósfera para producir ácido nítrico que posteriormente reacciona con el amonio para formar nitrato de amonio en un proceso de fraccionamiento gas-partícula en una fase acuosa (Wang et al. (2023); Xu et al. (2020)). Por otro lado, en las horas de la noche, el NO_2 reacciona con el ozono remanente que se formó en el día produciendo nitratos (NO_3). Este último mediante reacciones de equilibrio térmico con el NO_2 que da como resultado el pentaóxido de dinitrógeno, N_2O_5 y, secuencialmente, forma nitratos

acuosos, siendo éste una fuente de radicales de nitrato en la formación de SOA y nitratos orgánicos a partir de la oxidación de BVOC, (Wang et al. (2023)).

Con base en lo expuesto, se realizó el análisis del comportamiento de las concentraciones de los contaminantes PM2.5, NO_2, NO, SO_2 y carbono orgánico-OC en 3 estaciones ubicadas en el Distrito especial de Medellín (CEN-TRAF), en el municipio de Itagüí (ITA-CJUS) y en el municipio de Girardota (GIR-EPM). Las estaciones mencionadas fueron seleccionadas, teniendo en cuenta las diferentes características de fuentes de emisión cercanas: en el caso de CEN-TRAF principalmente por el aporte de fuentes móviles, en GIR-EPM se destacan las emisiones industriales de SO_2 y por último en ITA-CJUS, existe un aporte significativo tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles. Se consideraron períodos de alta contaminación (miércoles 6 de marzo de 2024), así como de baja contaminación (miércoles 3 y 10 de julio de 2024). El 6 de marzo se presentaron en estas estaciones y en general en toda la Red de Monitoreo de PM2.5, las concentraciones más altas, alcanzando un índice de calidad del aire -ICA- Naranja o dañino para grupos sensibles. Mientras que el 3 y 10 de julio las estaciones presentaron índices de calidad del aire bueno (ICA Verde) y aceptable (ICA Amarillo).

En las estaciones CEN-TRAF e ITA-CJUS se muestran adicionalmente las mediciones de carbono orgánico (OC), el cual es una de las fracciones del carbono total que componen la concentración del PM2.5, siendo el OC el que está constituido de diferentes especies químicas orgánicas enlazadas al elemento de carbono y puede tener origen tanto primario como secundario.

Evaluación de contaminantes atmosféricos en la estación CEN-TRAF

La estación CEN-TRAF se destaca por las características de movilidad en su área de influencia en el centro de Medellín, siendo las emisiones vehiculares, las de mayor aporte a la calidad del aire registrada en esta estación. Con el ingreso de contaminantes externos asociados a quemas de cobertura vegetal, sumado a las condiciones meteorológicas adversas que se presentan durante el primer período de gestión de episodios del año (entre ellas condiciones de estabilidad atmosférica prolongada y baja radiación solar), las concentraciones de PM2.5 aumentan más de 40 $\mu g/m^3$ (Ver Figura 472 (a) y (b)).

Para los días 6 de marzo (miércoles) y 10 de julio (miércoles) de 2024, las emisiones tanto de NO como de NO_2 estarían relacionadas principalmente con las dinámicas locales de movilidad, lo anterior teniendo en cuenta que el centro de Medellín está afectado por el alto tráfico vehicular y que de acuerdo con el inventario de emisiones (año base 2022), estas fuentes aportan más del 90 % a las emisiones de NO_X Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2023). A medida que aumenta la radiación solar, se logra ver la reducción en las concentraciones de la familia de los NO_X producto de la activación de los procesos de remoción de contaminantes por ascenso vertical y de las transformaciones fisicoquímicas que contribuyen a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOA) y de ozono troposférico. Se resalta el incremento en las concentraciones de NO en cerca de 20 $\mu g/m^3$ (Ver Figura 472 (a) y (b)) para el día de alta contaminación atmosférica debido al aporte de emisiones vehiculares, y sus concentraciones en el aire se ven influenciadas por las condiciones meteorológicas. El aumento en las concentraciones del PM2.5 al igual que del OC cerca de las 13:00 horas (Ver Figura 472 (c) y (e)), puede estar indicando el aporte de NO_X a la formación secundaria (tanto para el PM2.5 como para el OC entre otros). Basado en revisiones en la literatura de los mecanismos de reacción Chen et al. (2018); Nenes et al. (1998); Li et al. (2021a); Chen et al. (2019b), se puede inferir que este aumento también se presentaría por las diferentes reacciones que involucran los compuestos orgánicos semivolátiles primarios (SVOC) e intermedios (IVOC) remanentes que posiblemente no reaccionaron en la formación del ozono troposférico. Por otro lado, se observa en la Figura 472 (f) el agotamiento del NO_X, visto como el comportamiento del NO y el NO_2, en las horas de la noche, el cual estaría relacionado con la posible participación en la formación del PM2.5 secundario.

Bajo ambos escenarios (día de alta y baja contaminación atmosférica), el aumento en las concentraciones

de PM2.5 registrados en las horas de la noche, puede ser favorecido por reacciones secundarias de especies químicas diferentes a los precursores del OC secundario (es decir, componentes que en su estructura química no está presente el carbono tales como los aerosoles inorgánicos y sales conjugadas tanto de nitratos como de sulfatos); así como también, a la formación de pentaóxido de dinitrógeno (N_2O_5).

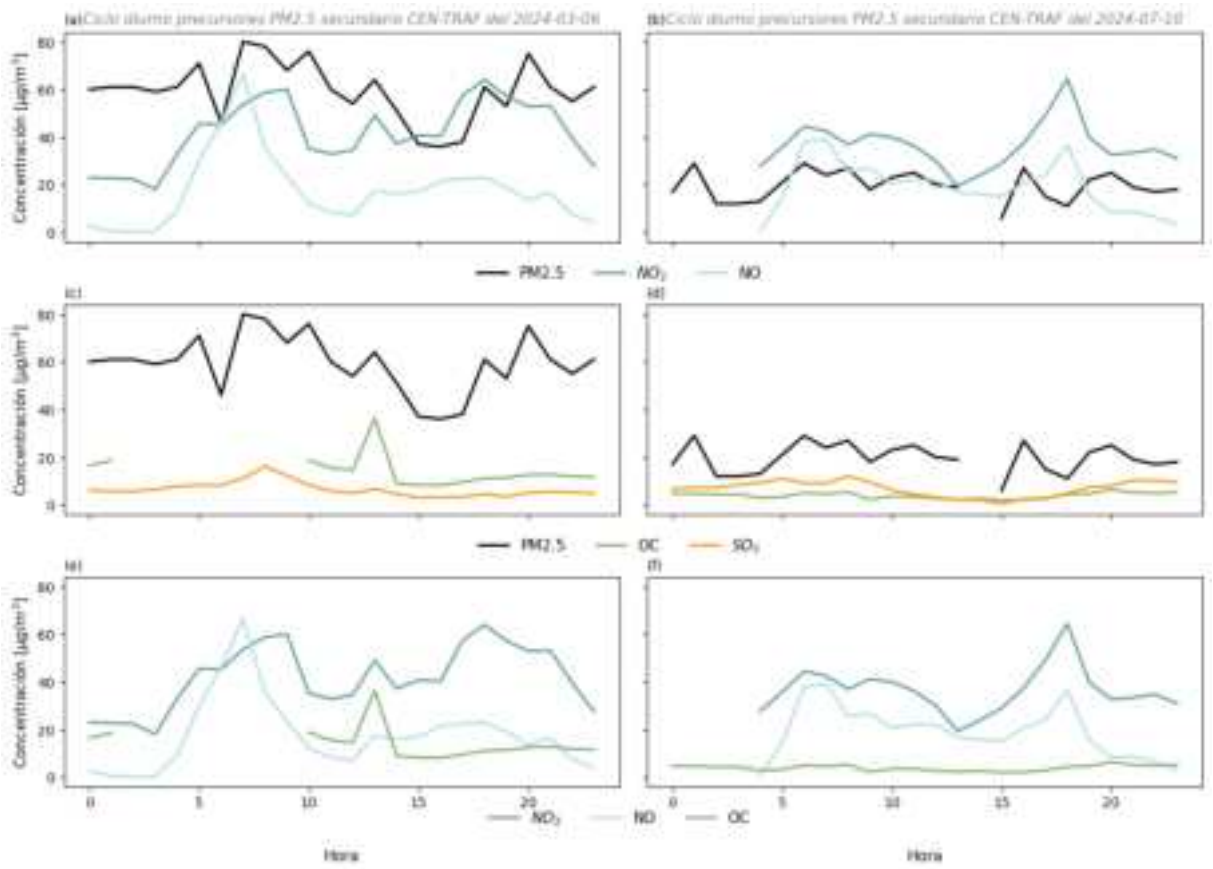


Figura 472: Comportamiento de las concentraciones del PM2.5 y otros contaminantes atmosféricos en la estación CEN-TRAF en el Distrito Especial de Medellín en el 2024.

Evaluación de contaminantes atmosféricos en la estación GIR-EPM

La estación GIR-EPM es de interés en el Valle de Aburrá debido a que en este municipio se presentan altas emisiones de dióxidos de azufre, de acuerdo con los resultados del inventario de emisiones atmosféricas local año base 2022 (Área Metropolitana del Valle de Aburrá (2023)), así como también las concentraciones más altas de SO_2 medidas por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire. Por lo anterior, las dinámicas de reacción que se presenten en este municipio en relación con la producción de sulfatos podría brindar información relevante del aporte del SO_2 a las concentraciones de PM2.5 de origen secundario.

En la Figura 473 se presenta el ciclo diurno de las concentraciones de PM2.5, NO, NO_2 y SO_2 medidas para los días 6 de marzo (alta contaminación atmosférica) y 3 de julio (baja contaminación atmosférica). Las concentraciones de SO_2 para el día de alta contaminación alcanzaron valores mayores a 100 $\mu g/m^3$

en comparación al día de baja contaminación, donde no se superan los 40 $\mu g/m^3$. Este resultado indica además del aporte de emisiones asociados a las dinámicas del sector industrial, una posible intrusión de aerosoles provenientes de fuentes externas.

Por otro lado, en el día de baja contaminación, se puede observar cómo la tendencia del NO, el NO_2 y el SO_2 es similar al comportamiento del PM2.5, mostrando un pico entre las 05:00 y las 12:00 horas. Este comportamiento puede sugerir que las fuentes de emisión son similares. El leve incremento al final del día del PM2.5, asociado también a la leve disminución del NO_2, sugiere el aporte de este precursor al PM2.5 de origen secundario, como parece ser que ocurre también, con el SO_2 cerca de las 22 horas.

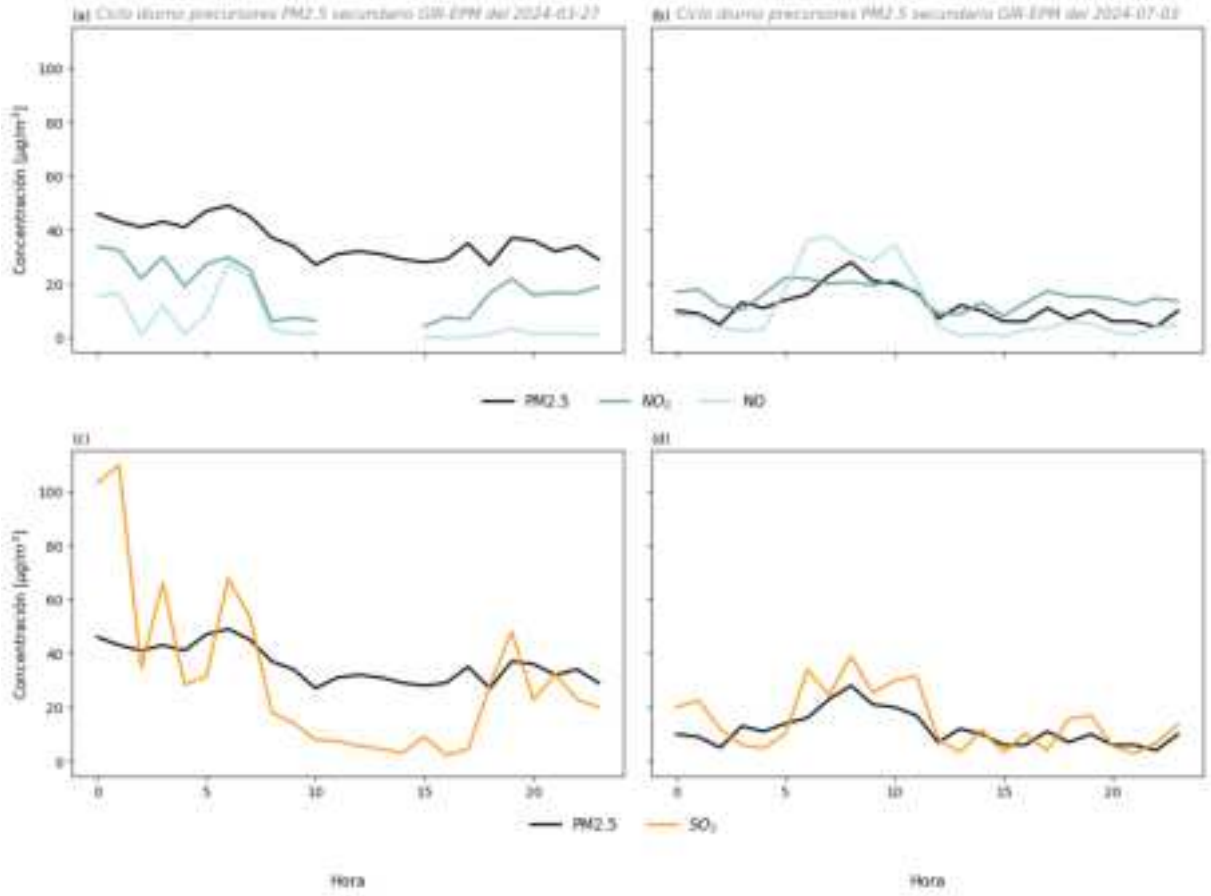


Figura 473: Comportamiento de las concentraciones del PM2.5 y otros contaminantes atmosféricos en la estación GIR-EPM del municipio de Girardota en el 2024.

Evaluación de contaminantes atmosféricos en la estación ITA-CJUS

La estación ITA-CJUS se encuentra ubicada en una zona con influencia importante de tránsito de vehículo y adicionalmente la presencia del sector industrial, especialmente del subsector ladrillero y textil, donde la biomasa es una de las alternativas para la generación de energía. Lo anterior podría explicar las mayores concentraciones del carbono orgánico (OC) frente al carbono elemental (EC) que se registran en este

sitio, en comparación con los resultados de la estación Tráfico Centro, además de la posible formación secundaria del OC, con participación de emisiones vehiculares, cuyo mecanismo de formación es complejo y no se conoce aún.

Al igual que en las estaciones GIR-EPM y CEN-TRAF, las concentraciones de NO_2 muestran la tendencia normal del ciclo del nitrógeno, con altas concentraciones en las mañanas y al finalizar la tarde, contribuyendo en la mañana a la formación de ozono troposférico. Sin embargo, las concentraciones de NO y el SO_2 durante el primer período de gestión de episodios por contaminación atmosférica (Ver Figura 474 (a) y (c)), muestran una alta concentración en las horas de la mañana, mientras que en la tarde y noche las concentraciones fueron menores con un comportamiento casi constante y aún así se obtuvieron incrementos en las concentraciones de PM2.5, lo que infiere que además del posible aporte a las concentraciones de este contaminante desde fuera del territorio, asociado a quema de cobertura vegetal, también pudo haber contribución a la formación secundaria del PM2.5, de precursores emitidos localmente. Adicionalmente, el comportamiento de NO_2 después de las 15:00 horas, podría indicar aporte de emisiones primarias producidas por el flujo vehicular de la tarde y una mayor conversión del NO a NO_2

En el caso del día de alta contaminación (Ver Figura 474 (a)), se puede observar cómo al finalizar la tarde el NO_2 aumenta su concentración hasta un punto máximo aproximadamente a las 18:00 horas y posteriormente disminuye. De igual forma, las concentraciones de PM2.5 se incrementan desde la noche, además de registrarse un leve aumento de las concentraciones del OC (Ver Figura 474 (e)), lo que puede indicar actividad química de los NO_X aportando de forma importante al PM2.5 de origen secundario, especialmente de tipo inorgánico, como se infirió en la estación CEN-TRAF. Por su parte, los SO_2 tienen relativa baja concentración durante el día, sin superar los 20 $\mu g/m^3$ que se pueden presentar en las horas de la mañana, pero que disminuyen un poco, posiblemente aportando a la formación de PM2.5 secundario.

En el escenario del día de baja contaminación, las concentraciones medidas del NO y NO_2, muestran una tendencia similar a las del PM2.5, con picos entre las 5 y 10 horas y entre las 15 y 20 horas, acorde con la dinámica del flujo vehicular en el Valle de Aburrá. Las disminuciones de NO_2, cerca del medio día pueden estar indicando aporte de este precursor a la formación tanto de ozono troposférico como del PM2.5 secundario. Las concentraciones de SO_2 a lo largo del día son muy similares, aunque un poco mayores en la mañana, con un decaimiento cerca de las 10:00 que puede deberse al aporte en la formación de sulfatos como constituyentes al PM2.5 secundario. Las concentraciones de OC son superiores durante el día de alta contaminación, corroborando el aporte asociado a quema de cobertura vegetal característico de este período.

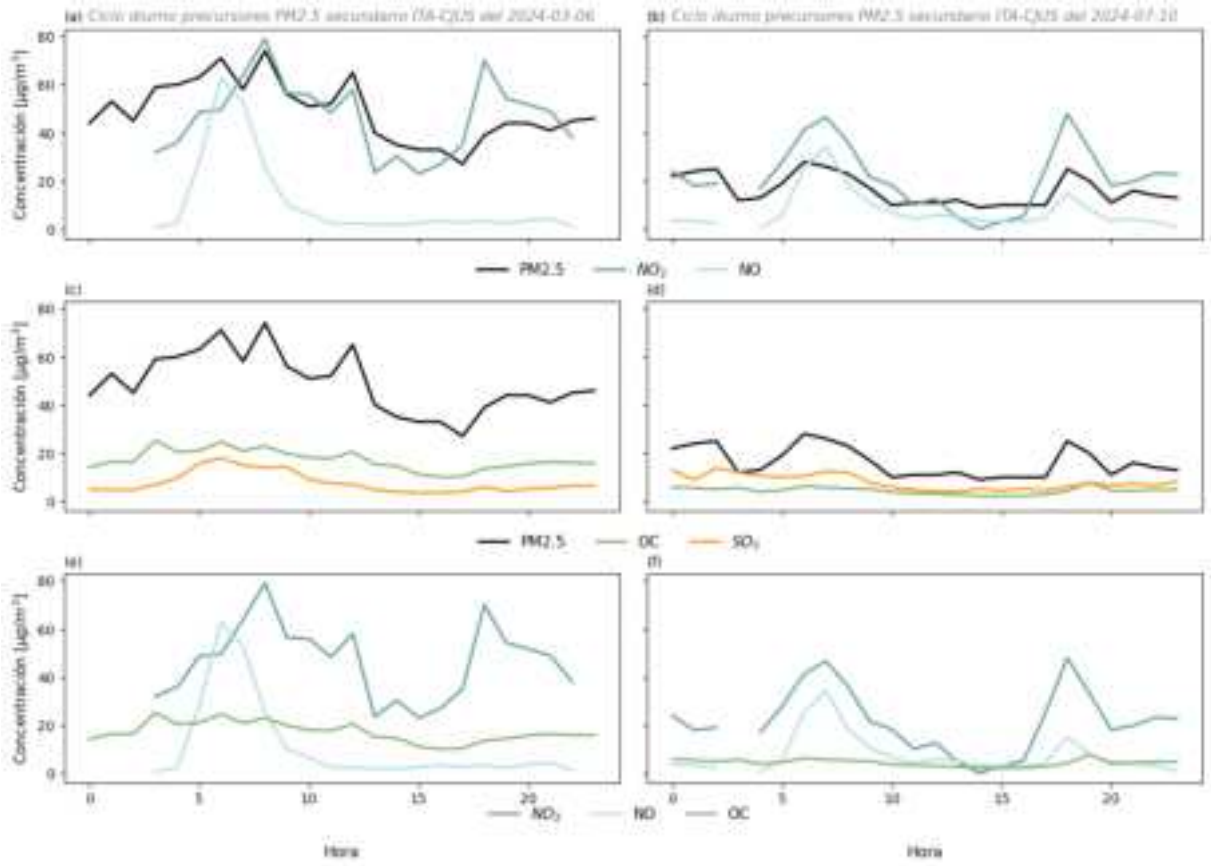


Figura 474: Comportamiento de las concentraciones del PM2.5 y otros contaminantes atmosféricos en la estación ITA-CJUS del municipio de Itagüí en el 2024.

Evaluación del comportamiento de aerosoles carbonáceos absorbentes de luz (Brown Carbon-BrC), en las estaciones de monitoreo de calidad del aire

Los aerosoles secundarios poseen propiedades ópticas características asociadas a la absorción de luz. Aquellos aerosoles carbonáceos orgánicos que absorben radiación solar en el espectro visible, se engloban dentro del brown carbon (BrC) el cual afecta directamente al forzamiento radiativo, contribuyendo con el cambio climático (Jiang et al. (2018)). El BrC proviene tanto de emisiones primarias como de reacciones secundarias en la atmósfera, en los que están involucrados los compuestos orgánicos volátiles. La fuente de origen primario de mayor importancia del BrC es la quema de biomasa (Yan et al. (2018)). De acuerdo con lo anterior y debido a las diferentes fuentes de emisión, el BrC posee una compleja composición química.

Investigadores han realizado experimentos para identificar la composición química y propiedades ópticas de estos aerosoles, destacando compuestos oxigenados, nitroaromáticos y otros azufrados. Entre los compuestos conjugados se han identificado los ácidos vanílico y ferúlico así como también el aldehído de coniferilo. Mientras que por procesos secundarios se destaca la fotooxidación del tolueno y el m-cresol (Yan et al. (2018)).

En el Valle de Aburrá, el material particulado PM2.5 tiene un aporte significativo asociado a la materia carbonácea expresada como carbono elemental (EC) y carbono orgánico (OC) (AMVA (2019)). Teniendo en cuenta que el brown carbon (BrC) es un constituyente importante a los registros del OC Yan et al. (2018), se analizan los patrones mensuales de las concentraciones del BrC en la estación CEN-TRAF para el año 2022. Estos análisis se realizaron considerando al tolueno como precursor del BrC en presencia de óxidos de nitrógeno (NO_X). El tolueno como compuesto orgánico volátil, es aportado por la quema de combustibles fósiles así como también por la quema de biomasa y es un contaminante que es monitoreado desde la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá (medición de BTEX en la estación CEN-TRAF), lo cual favorece la evaluación de la información, conjuntamente con lo que se podría evaluar con los resultados de los equipos etalómetro y de carbono total (TCA), ubicados en la misma estación.

Los resultados mostrados de BrC en esta sección, se obtuvieron a partir del modelo de cálculo implementado en el estudio de aerosoles carbonáceos y la evaluación del aporte de fuentes externas en la calidad del aire del Valle de Aburrá, el cual se está desarrollando en el marco del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024 del proyecto SIATA.

En la Figura 475 se observan los ciclos diurnos promedio mensuales del carbono orgánico (OC), el Brown Carbon (BrC) y el tolueno para el año 2022. El BrC a lo largo del año posee un comportamiento bimodal, con los mayores picos alrededor de las 06:00 y a las 20:00 horas. Se logra apreciar además, que los meses de febrero y marzo alcanzan valores más altos en comparación al resto del año, asociado probablemente a la afectación por el ingreso de material particulado transportado desde regiones en el norte del país, donde se reportan, típicamente para estos meses, un alto número de puntos calientes con alta probabilidad de estar asociados a incendios de cobertura vegetal.

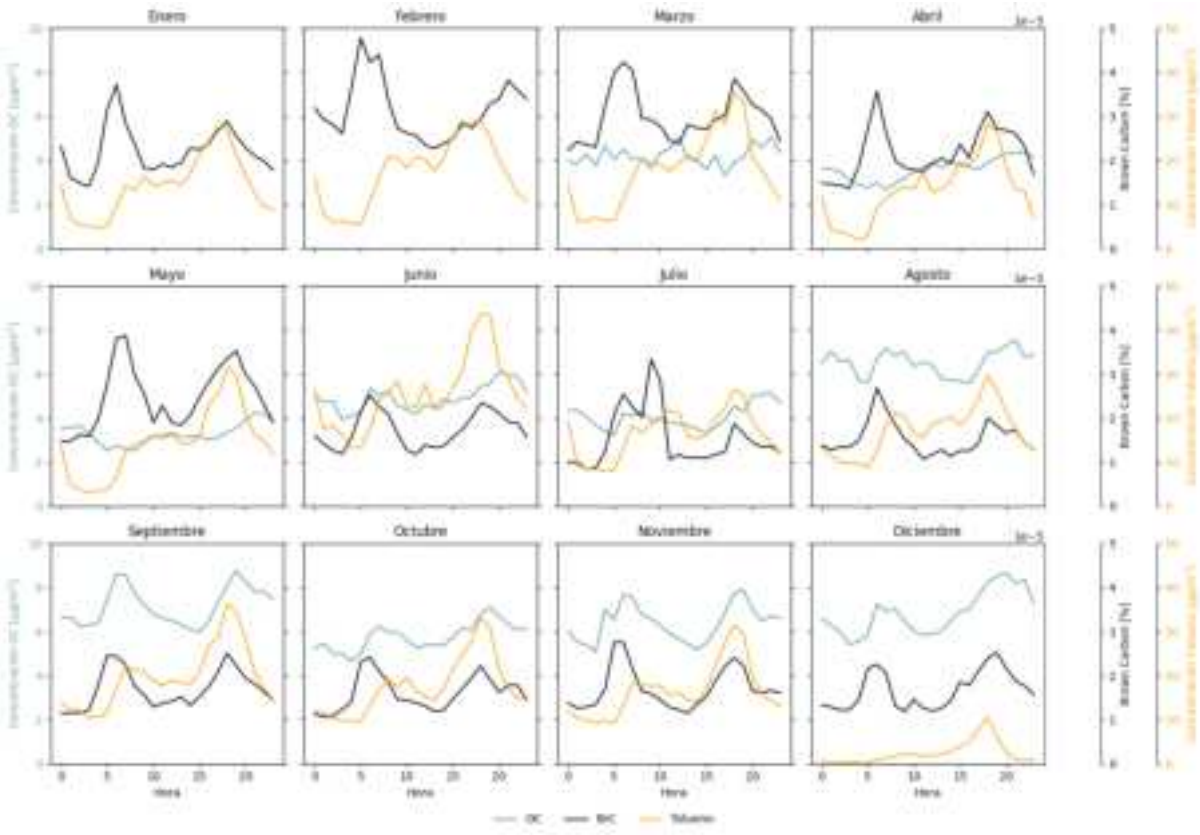


Figura 475: Comportamiento mensual de los compuestos de brown carbon (BrC), tolueno y carbono orgánico en la estación CEN-TRAF en el año 2022.

El BrC tiene un origen primario principalmente debido a la quema de biomasa, lo que podría explicar las altas concentraciones en el primer trimestre del año, para el segundo semestre las altas concentraciones pueden estar relacionadas con procesos de reacción química donde se forman contaminantes secundarios en la atmósfera. Diferentes investigaciones han mostrado que el aporte de la fotooxidación del tolueno al BrC es significativo (Lin et al. (2015)). Lo anterior se puede observar con mayor claridad en el mes de febrero, donde el comportamiento promedio del tolueno de la Figura 475, indica el pico máximo nocturno entre las 15:00 y 20:00 horas, y le sigue a una degradación al final del día coincidiendo con un pico de BrC. Esta reducción en las concentraciónes de tolueno, durante los primeros cinco meses del año, coinciden también con el primer pico o máximo del BrC desplazado a la derecha, en las horas de la mañana. Para el segundo semestre del año los picos de tolueno superan los picos de BrC en las horas de la tarde, lo cual puede estar asociado a temperaturas mas altas que inciden en la volatilización de este compuesto, manteniéndolo en su forma gaseosa. El tolueno también reacciona con otros compuestos orgánicos volátiles presentes en la atmósfera, favoreciendo la formación de aerosoles orgánicos. Por otro lado, se presenta un comportamiento bimodal del OC en el último cuatrimestre del año, indicando que, probablemente, las condiciones meteorológicas favorecen la formación de aerosoles orgánicos secundarios en este período. Se aclara que la medición que permite obtener el valor de OC inició a partir del mes de marzo de 2022.

Los valores mínimos de las concentraciones de BrC alrededor de las 10:00 horas, podrían deberse, además

de la activación de los procesos de remoción de contaminantes por ascenso vertical, a que los precursores del BrC (tolueno entre otros) pueden estar participando en la formación de ozono troposférico favorecidos por la presencia de radiación solar y transformándose a su vez en VOCs diferentes. Por otra parte, considerando que diferentes estudios han demostrado que los niveles de NO_X en el ambiente pueden afectar la formación de aerosoles secundarios (Xu et al. (2020); Yan et al. (2021)), es de esperarse entonces que las concentraciones de NO_X en el ambiente puedan facilitar el orden de reacción de ciertos compuestos o especies químicas, incidiendo en la selectividad de la formación secundaria de diferentes tipos de contaminantes.

Los comportamientos mostrados evidencian la necesidad de estudiar a fondo la relación de precursores como el tolueno y su papel en la formación de aerosoles secundarios, de tal forma que pueda brindar información para el control de fuentes de emisión de este contaminante (combustión de los combustibles fósiles). Lo anterior, teniendo en cuenta la relación entre las concentraciones de NO_X y tolueno en el aporte al OC. De igual forma, es importante resaltar que se deben analizar variables meteorológicas y las concentraciones de otros compuestos, que puedan ayudar a entender los resultados mostrados anteriormente. Lo anterior, debido a que no se logró llegar a afirmaciones concluyentes del comportamiento del BrC en relación con el tolueno y el OC, por la complejidad de los parámetros que inciden en los resultados.

Análisis de variables meteorológicas en la formación de aerosoles secundarios

Gao et al. (2020) realizó un estudio de la relación entre el pH, la humedad relativa y el tipo de fuente de emisión, sobre las concentraciones de aerosoles inorgánicos secundarios (SIA) en la ciudad de Tianjin, China entre mayo de 2017 y noviembre de 2018. El estudio concluye que altos valores de humedad relativa inciden en una mayor concentración de los SIA, debido a que el contenido de agua en los aerosoles en la atmósfera favorece las reacciones en fase líquida. El estudio implementó métodos estadísticos y de Machine Learning para analizar los factores que influyen en la formación de estos aerosoles, cuyos resultados muestran que los precursores, condiciones húmedas, capacidad de oxidación atmosférica y acidez, favorecen la formación tanto de los sulfatos como de los nitratos, así mismo se determinó que los cambios que sufren los precursores gaseosos, la humedad relativa y la temperatura, son variables de mayor peso para clasificar el nivel de contaminación por PM2.5.

En el caso de Liu et al. (2019) se evaluó la influencia de la humedad relativa en la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOA) bajo diferentes razones de concentración de ciclohexeno y de iones hidroxilo (OH). Inicialmente obtuvieron que la tasa de producción de SOA basada en ciclohexeno se incrementa con el aumento en la concentración inicial de los iones hidroxilo, tanto a bajas como altas humedades relativas. Los oligómeros formados mediante la esterificación entre los ácidos dicarboxílicos y compuestos a base de ciclohexeno, fueron los responsables del incremento en la formación de los SOA. Finalmente, se concluye que a niveles suficientes de iones hidroxilo, se presenta una inhibición en la formación de estos oligómeros y otras reacciones de aerosoles secundarios, por lo que resulta en una formación levemente menor bajo condiciones húmedas.

Mahilang et al. (2021) realizó una investigación de los factores que afectan los mecanismos de reacción de aerosoles orgánicos secundarios biogénicos-BSOA, los cuales se forman a partir de la oxidación de las emisiones de isopreno, monoterpenos y sesquiterpenos provenientes de la vegetación. Estas reacciones de oxidación se ven fuertemente influenciadas principalmente por la radiación solar, la humedad relativa y la temperatura, por lo que la química involucrada en la formación de BSOA difiere de las horas nocturnas a las horas diurnas. El estudio menciona que, diferentes investigaciones han obtenido que en las horas de la mañana la formación de BSOA es dominada por las concentraciones de iones hidroxilo (OH) y ozono (O_3), mientras que en las horas de la noche la producción de BSOA se inicia con el ciclo del NO_X.

Cabe resaltar que la relación entre las condiciones meteorológicas y la formación de aerosoles, es una relación de doble vía; la concentración de aerosoles presentes en la atmósfera pueden alterar las condiciones físicas y termodinámicas de ésta. En este sentido, Scott et al. (2014) evaluó el efecto radiativo sobre los aerosoles orgánicos secundarios biogénicos (BSOA) utilizando un modelo de procesamiento de aerosoles global GLOMAP, obteniendo como resultado que la presencia de BSOA incrementa la concentración promedio anual global de los núcleos de condensación de nubes entre un 4 % a un 21 %, esto dependiendo de la formación de SOA proveniente de los compuestos orgánicos volátiles biogénicos (BVOC) y otras emisiones carbonáceas primarias. El aumento en los núcleos de condensación de nubes, provoca un aumento en la concentración media anual global del número de gotas en las nubes (CDNC) entre un 1.9 % a 5.2 %.

A partir de lo expuesto previamente, se evidencia que la temperatura, la humedad relativa y la radiación solar, son variables meterorológicas que influyen en la formación de PM2.5 secundario. Con el fin de analizar la relevancia que poseen los factores meteorológicos sobre las especies químicas para la formación de aerosoles secundarios en el Valle de Aburrá, se inició la evaluación de la incidencia de la humedad relativa y la temperatura en las concentraciones del PM2.5 y el carbono orgánico (OC) en las estaciones de monitoreo ubicadas en el municipio de Itagüí (ITA-CJUS) y en el Distrito Especial de Medellín (CENTRAF), como se muestra a continuación.

Evaluación de la dependencia entre las concentraciones de contaminantes atmosféricos y la meteorología en la estación ITA-CJUS

En la estación ubicada en la Casa de Justicia (ITA-CJUS) en el municipio de Itagüí, se evaluó el efecto de las variables temperatura y humedad relativa sobre las concentraciones del PM2.5 y el carbono orgánico (OC), para el segundo semestre del 2024 (entre el 1 de julio y el 30 de noviembre).

En la Figura 476 se presenta el ciclo diurno de la humedad relativa y de las concentraciones de PM2.5 y OC para el período de análisis. El comportamiento de las 3 variables muestra un comportamiento bimodal a lo largo del día, con un pico máximo alrededor de las 07:00 horas y un segundo máximo aproximadamente a las 20:00 horas, asociado principalmente a las condiciones de movilidad típicas del Valle de Aburrá. Cabe destacar que las concentraciones de PM2.5 y OC exciben el mismo comportamiento en función de la variabilidad de la humedad relativa, con excepción en las últimas horas del día luego de las 20:00 horas, que en el caso de la humedad relativa tiende a aumentar progresivamente hasta un valor máximo del otro día, mientras que las concentraciones de PM2.5 y OC tienden a disminuir durante la noche y empiezan a aumentar desde las 04:00 horas aproximadamente.

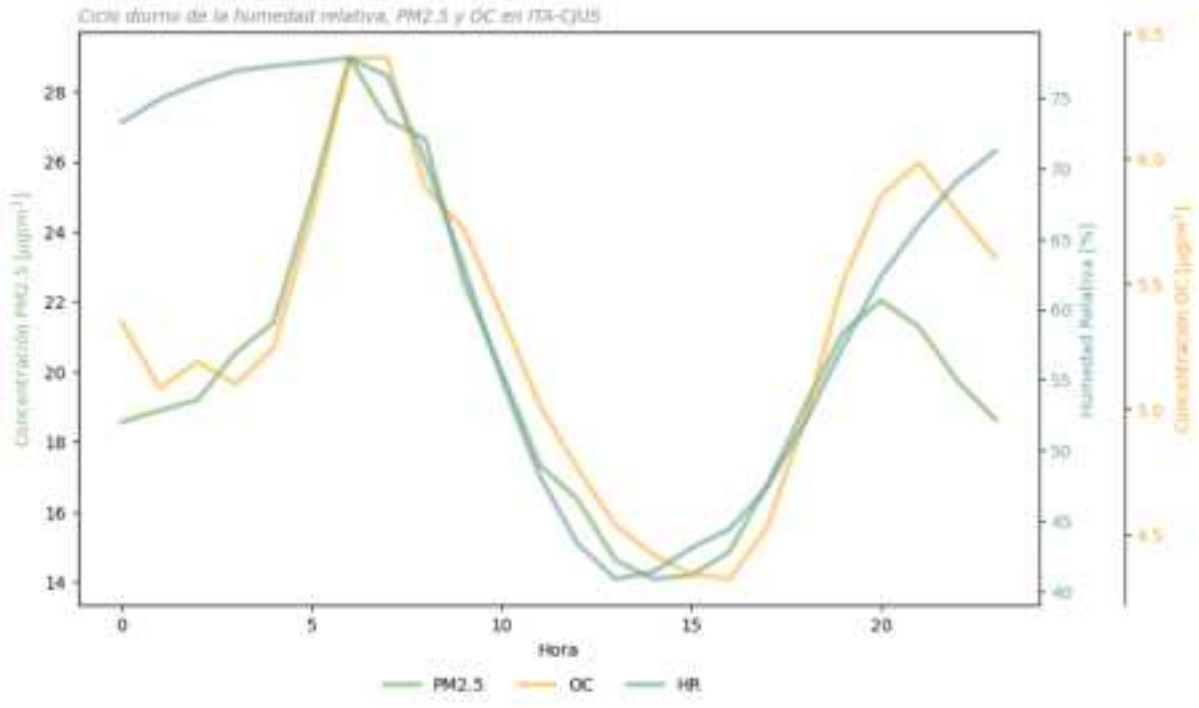


Figura 476: Ciclo diurno de la humedad relativa y de las concentraciones de PM2.5 y OC en la estación ITA-CJUS en el segundo semestre del 2024

De la Figura 476 se puede observar que las máximas concentraciones tanto de PM2.5 como del OC coinciden con el registro máximo de la humedad relativa así como también de los respectivos mínimos de cada variable. Para verificar la anterior dependencia, en la Figura 477 se puede observar el comportamiento de las concentraciones del PM2.5 y el OC en función del valor de la humedad relativa ambiente. En esta figura se puede observar claramente como las concentraciones de PM2.5 aumentan con el aumento de la humedad relativa, con mayores registros en un rango de humedad relativa entre el 60 y el 80 % aproximadamente, mientras que para el OC las concentraciones poseen un comportamiento ligeramente constante a humedades mayores al 40 %. Cabe destacar que, las concentraciones más bajas en el periodo de evaluación en términos generales, se presentaron a bajos valores de humedad relativa (menor al 35 %).

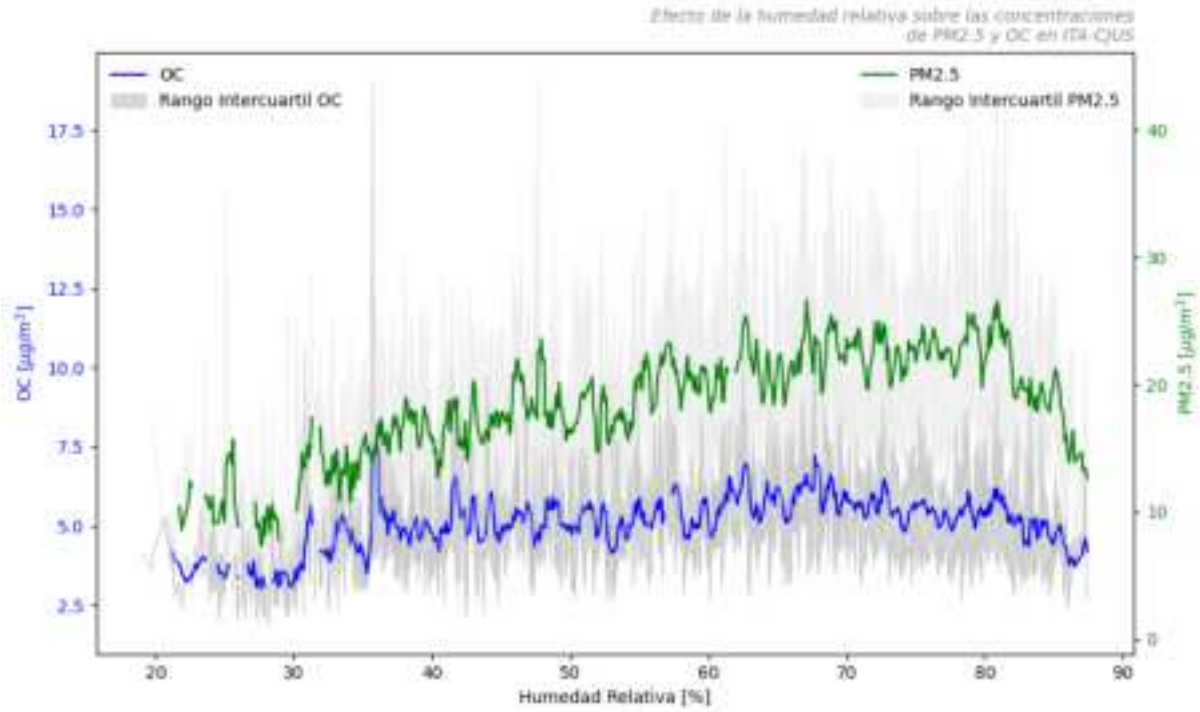


Figura 477: Efecto de la humedad relativa sobre las concentraciones de PM2.5 y el OC en la estación ITA-CJUS en el segundo semestre del 2024

El perfil de concentración del OC en función de la humedad relativa en la estación ITA-CJUS no muestra influencia en la formación de aerosoles secundarios bajo condiciones húmedas. Comportamiento opuesto a lo esperado, dado que teóricamente la humedad relativa afecta la partición de las fases gas-partícula de los compuestos orgánicos semivolátiles menos oxigenados y facilita la química de ambas fases lo que se traduce en un aumento de SOA (Luo et al. (2024)), sin embargo, algunos estudios han reportado comportamientos opuestos, como lo es el efecto negativo para la producción química de SOA bajo condiciones de humedad relativa alta, dejando a los procesos fotoquímicos como principal medio para su formación (Liang et al. (2019); Liu et al. (2019)).

Adicional a lo expuesto anteriormente, las investigaciones han encontrado que la humedad relativa si bien puede darse el caso de que no altere la concentración en masa de SOA, ésta sí afecta la composición específica de los SOA formados (Luo et al. (2024)).

Realizando un análisis similar al anterior, pero enfocado al efecto de la temperatura, se muestra en la Figura 478, en la cual se evaluó las concentraciones al PM2.5 y del OC bajo diferentes condiciones de temperatura. Se realizó una regresión lineal de las concentraciones de PM2.5 y OC a temperaturas mayores y menores a un valor de 20 °C (altas y bajas temperaturas respectivamente). Como producto del análisis se obtuvo que se presentaron concentraciones mayores tanto de PM2.5 como del OC a bajas temperaturas, con una diferencia aproximada del 14 %. Lo anterior puede mostrar la formación de diferentes tipos de oligómeros que es favorecido por el incremento de la razón de nucleación de partículas Thomsen et al. (2024), que según investigaciones se pueden diferenciar principalmente en características ópticas de los aerosoles formados (Li et al. (2020)).

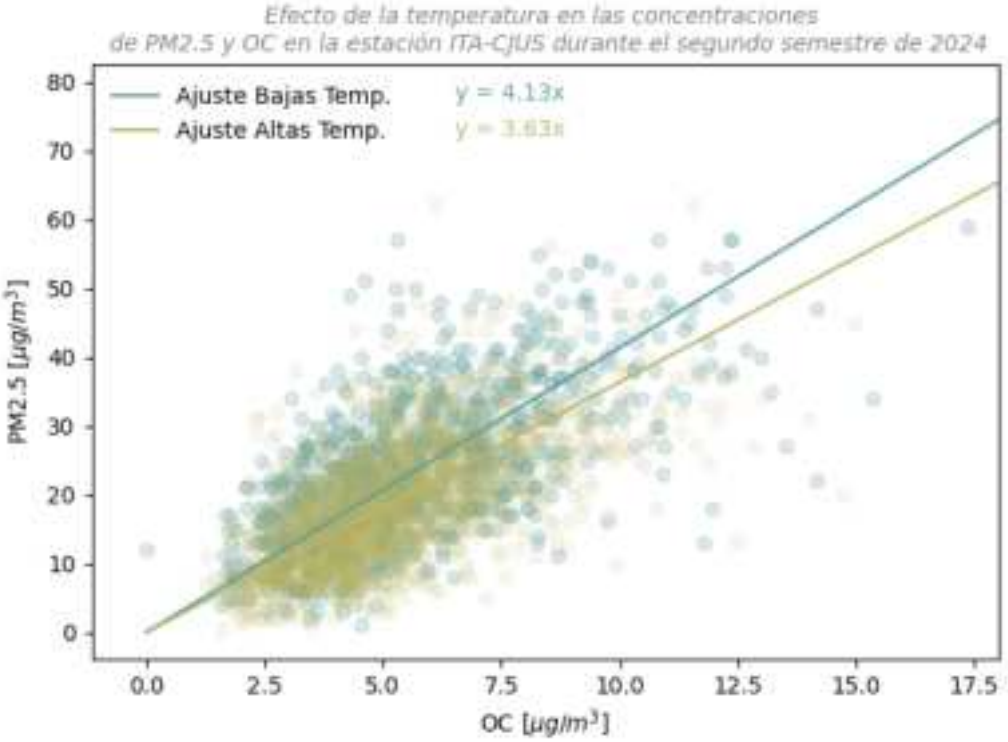


Figura 478: Dependencia del PM2.5 y el OC con respecto a la temperatura en la estación ITA-CJUS en el segundo semestre del 2024

Los resultados presentados anteriormente sugieren una alta influencia del PM2.5 con la humedad relativa sin presentar tendencias de acumulación o formación del carbono orgánico (OC). Este comportamiento puede sugerir que otros constituyentes del PM2.5 diferentes al OC están influenciados por reacciones de condensación o interacciones gas-partícula en una interfase acuosa, tales como los sulfatos o nitratos inorgánicos. De igual manera sería necesario realizar análisis más exhaustivos de la composición química del OC, lo que podría brindar información de cuáles especies (monómeros u otros oligómeros) puedan ser modulados o dependan de la humedad relativa. Lo anterior puede brindar información referente a qué tipo de especies, que conforman al OC, puedan mostrar cambios importantes con la humedad relativa o temperatura, ya sean los aerosoles de origen primario o aquellos de origen secundario.

Evaluación de la dependencia entre las concentraciones de contaminantes atmosféricos y la meteorología en la estación CEN-TRAF

En la estación ubicada en Tráfico centro (CEN-TRAF) en el Distrito Especial de Medellín, se evaluó el efecto de las variables de la temperatura y humedad relativa sobre las concentraciones del PM2.5 y el carbono orgánico (OC), para todo el período del 2024. Destacando que este punto de monitoreo se clasifica como estación urbana de tráfico.

En la Figura 479 se puede observar el ciclo diurno de las concentraciones de PM2.5 y el OC así como también de la humedad relativa de la estación CEN-TRAF para el periodo 2024. La Figura muestra cómo

en este punto de medición, se presentan dos máximos en las concentraciones tanto de PM2.5 como del OC, uno a las 07:00 horas y otro a las 21:00 horas, al parecer en un primer momento condicionados a los valores más altos de la humedad relativa.

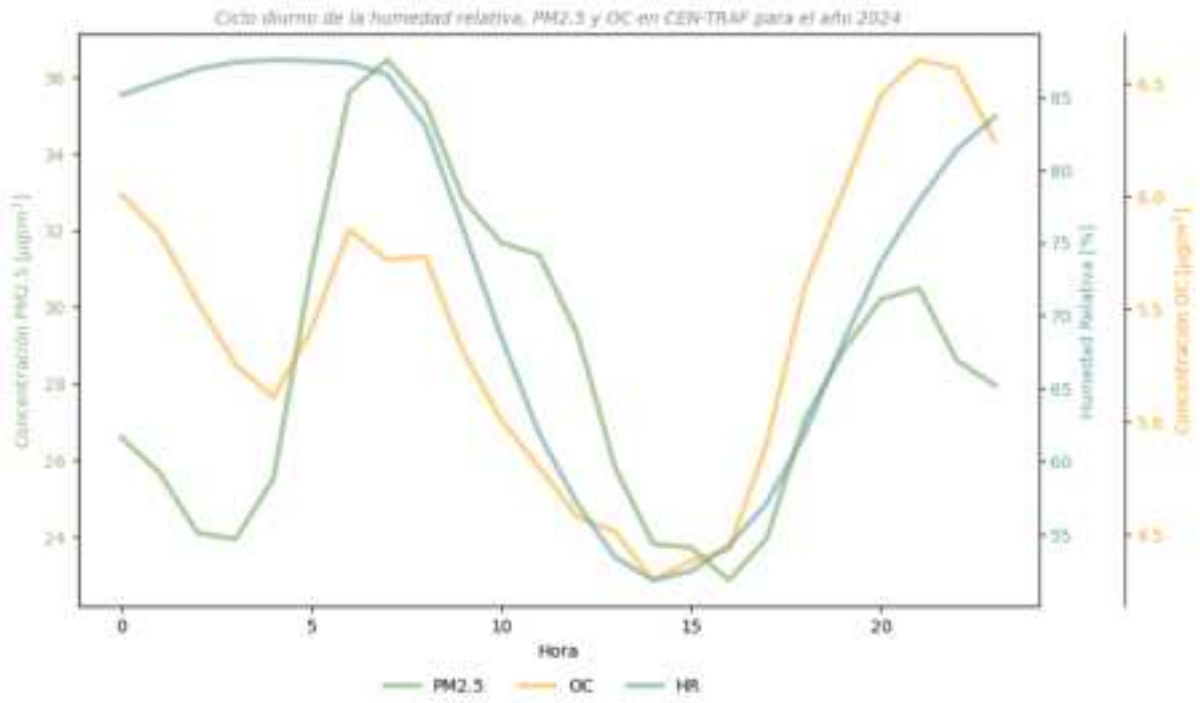


Figura 479: Ciclo diurno promedio del PM2.5, el OC y la Humedad Relativa en la estación CEN-TRAF para el 2024.

En el caso del PM2.5 el pico más alto se presenta en las horas de la mañana, mientras que para el caso del OC el pico más alto se presenta en las horas de la noche, comportamiento contrario a lo que se presentó en la estación ITA-CJUS. Siendo el punto de medición de CEN-TRAF una estación caracterizada por el flujo vehicular, las concentraciones de PM2.5 están muy marcadas por las condiciones de movilidad del sector del centro de Medellín, al considerar que el flujo vehicular es mayor en las horas de la mañana y se ve reducido sustancialmente en las horas de la noche. Si bien las concentraciones de OC reflejan el aporte de fuentes móviles, también se evidencia una actividad química particular lo que favorece la formación de agentes secundarios en las horas de la noche, que puede ser influenciado adicionalmente por la actividad industrial del sector y condiciones meteorológicas que podrían facilitar la formación de nitratos, sulfatos y otro tipo de aerosoles constituyentes del PM2.5 secundario.

Con el fin de verificar el comportamiento de las concentraciones tanto del PM2.5 como del OC con respecto a la humedad relativa, se muestra en la Figura 480 dicha dependencia. Esta Figura muestra una alta variabilidad en las concentraciones principalmente para el PM2.5, ya que para el OC se logra presentar una tendencia casi constante en los rangos de humedad relativa entre 40 y el 90 % aproximadamente. Este último comportamiento del OC podría invalidar lo reflejado en el ciclo diurno de la concentración del OC, sin embargo, es necesario tener en cuenta que el rango de concentraciones de esta especie es pequeño ya que varía entre 4 y 6.5 $\mu g/m^3$.

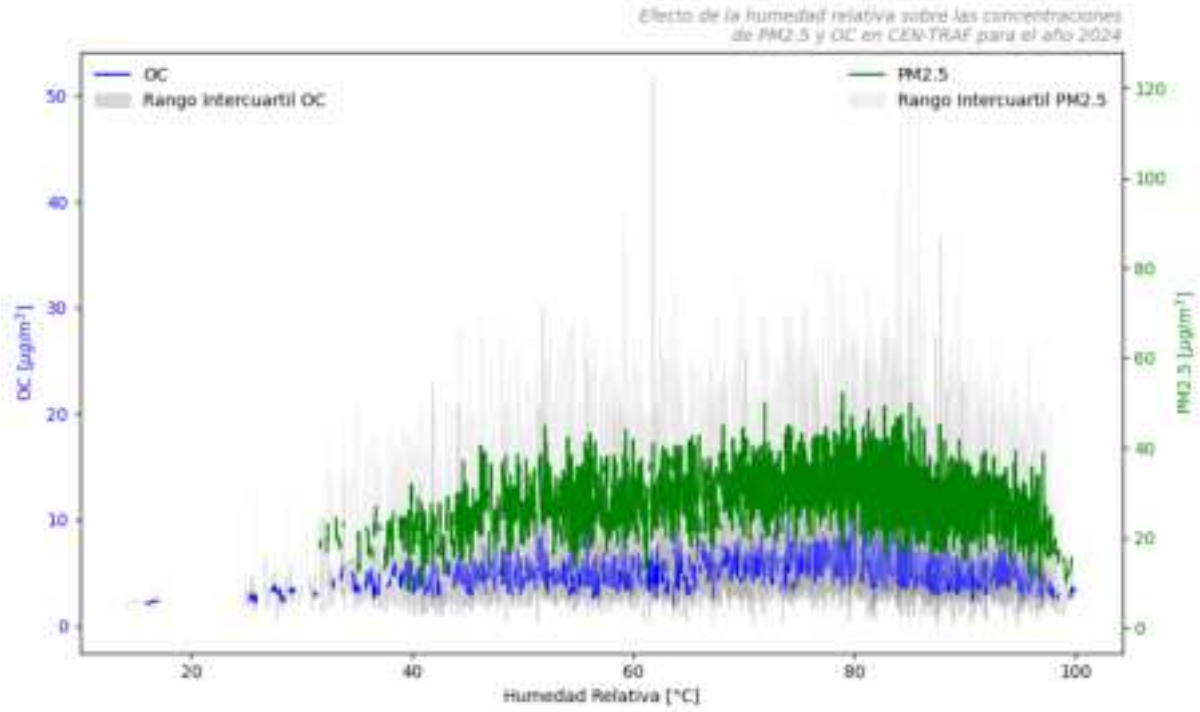


Figura 480: Influencia de la humedad relativa sobre las concentraciones del PM2.5 y el OC en la estación CEN-TRAF para el 2024.

La tendencia del OC estaría exponiendo que posiblemente en las horas de la noche, se presentan mayores reacciones para el origen o mayor formación de compuestos o aerosoles orgánicos secundarios (SOA) constiruyentes al OC (Luo et al. (2024)), sin embargo, como la magnitud de este contaminante es baja, no se ve reflejado en las concentraciones de PM2.5 registrado por la estación de monitoreo. A pesar de estas magnitudes, es necesario considerar el transporte por efecto de la velocidad del viento de estos contaminantes a otros puntos del Valle de Aburrá.

Adicionalmente, está la dependencia de la formación de SOA en función de la temperatura, por lo que se realizó una regresión lineal de las concentraciones de PM2.5 y OC a temperaturas mayores y menores a un valor de 20 °C (altas y bajas temperaturas respectivamente), como se observa en la Figura 481. Al igual como se presentó en la estación ITA-CJUS, para la estación CEN-TRAF las temperaturas inferiores a 20 °C favorecen las altas concentraciones tanto de OC como de PM2.5 en un 18 % aproximadamente, en comparación con un 14 % presentado en la estación ITA-CJUS. Lo anterior puede exponer la formación de diferentes tipos de oligómeros en ambos puntos de medición, dado que la estación del municipio de Itagüí se caracteriza por la actividad industrial cercana, en comparación a la zona comercial del centro de Medellín.

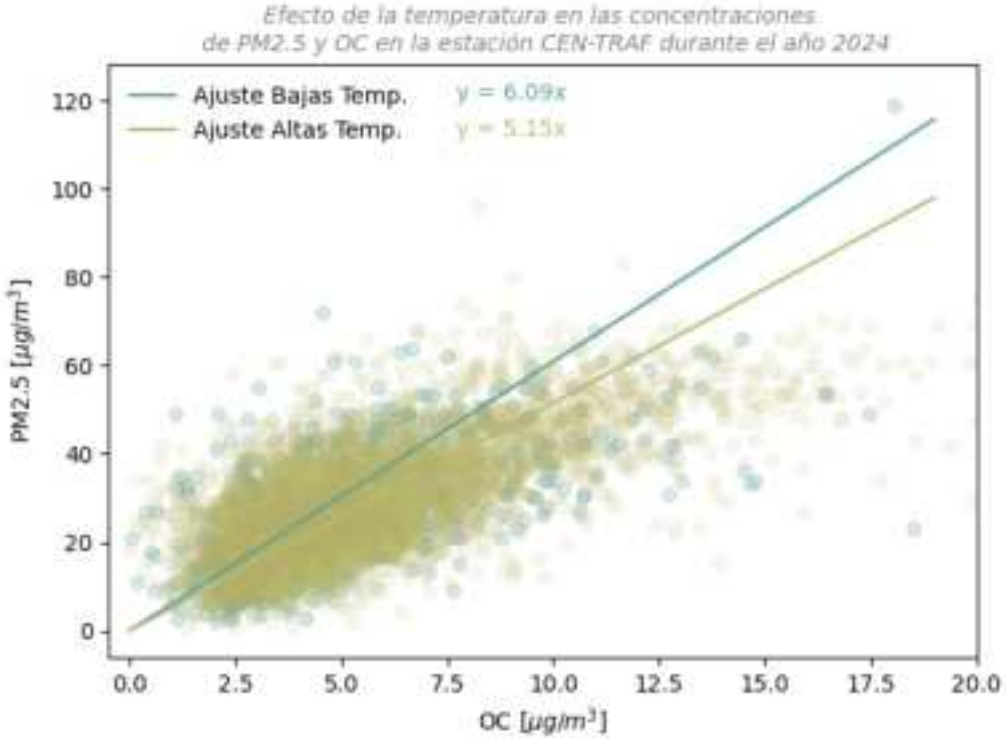


Figura 481: Dependencia de la temperatura sobre las concentraciones del PM2.5 y el OC en la estación CEN-TRAF para el 2024.

Estas dependencias muestran claramente una alta influencia del PM2.5 con la humedad relativa, mientras que para el OC no muestra una tendencia notoria si se analiza desde la magnitud de sus concentraciones. Sin embargo, es destacable la actividad química diferenciable en los puntos de monitoreo de ITA-CJUS con la estación CEN-TRAF. Estas diferencias pueden sugerir además, dinámicas particulares en las reacciones de condensación o interacciones gas-partícula en una interfase acuosa, que repercuten en la formación de sulfatos o nitratos inorgánicos.

Adicional a los comportamientos observados en las estaciones ITA-CJUS y CEN-TRAF, a continuación de presentan los análisis preliminares del ozono con respecto a sus precursores, NO_2 y NO, y la meteorología (precipitación y radiación solar) en algunas de las estaciones de monitoreo del Valle de Aburrá.

Análisis del comportamiento de las concentraciones de ozono en las estaciones de monitoreo del Valle de Aburrá

Considerando que algunos de los precursores del PM2.5 también son precursores del ozono, tales como los NO_X y los COV, se analizó el comportamiento de las concentraciones de ozono en 2 estaciones, ubicadas en el Distrito especial de Medellín (MED-FISC) y en el municipio de Girardota (GIR-EPM). La selección de estas dos estaciones de monitoreo obedece al hecho de que en estos dos puntos se miden tanto ozono como sus precursores, los óxidos de nitrógeno (NO y NO_2). Se pretende analizar el comportamiento de las concentraciones de estos contaminantes y el efecto de variables meteorológicas como la precipitación y la

radiación solar. Para esto se seleccionaron dos días, uno con un evento de intensidad baja de precipitación (sábado 9 de marzo de 2024) y otro con alta intensidad de precipitación (jueves 13 de junio de 2024 para MED-FISC y el miércoles 26 de junio de 2024 para GIR-EPM).

Análisis del comportamiento del ozono y de gases precursores, en la estación MED-FISC

La estación MED-FISC se encuentra ubicada en la sede Caribe de la Fiscalía General de la Nación en el Distrito Especial de Medellín, la cual tiene una importante afectación tanto por la zona industrial cercana, como por la movilidad del sector influenciado por la autopista norte, siendo una vía de alto flujo vehicular donde se tiene el tránsito de vehículos de diferentes categorías.

En la Figura 482 (a) y (b), se puede visualizar el ciclo diurno de las concentraciones de ozono y sus precursores NO y NO_2 para los días de baja y alta precipitación, respectivamente. Se destaca en el ciclo diurno que la máxima concentración de NO se presentó durante el período entre las 05:00 y las 09:00 horas, coincidente con el mayor flujo vehicular, dando a entender que el NO es un contaminante primario producto de las reacciones de la combustión incompleta de los combustibles fósiles. Posterior a esta hora, se identifican los máximos en las concentraciones de ozono aproximadamente a las 15:00 horas (el NO se interconvierte a NO_2 y posteriormente a ozono troposférico), formación que se facilita por la presencia de radiación solar. Se observa además que los picos de NO y NO_2 son mayores que los picos de ozono, lo que se podría entender que la emisión de contaminantes primarios de la familia de los NO_X es superior a la transformación química en el ozono, quedando un remanente que puede contribuir a la formación de PM2.5 secundario (nitratos). Cabe resaltar que la formación de NO_2 fue inferior en el día con lluvia, desfavoreciendo además la formación de ozono, que pudo haber sido mayor considerando que hubo mayor radiación solar (800 W/m^2) (Figura 482 (d)) en comparación al día sin lluvia (400 W/m^2, Figura 482 (c))

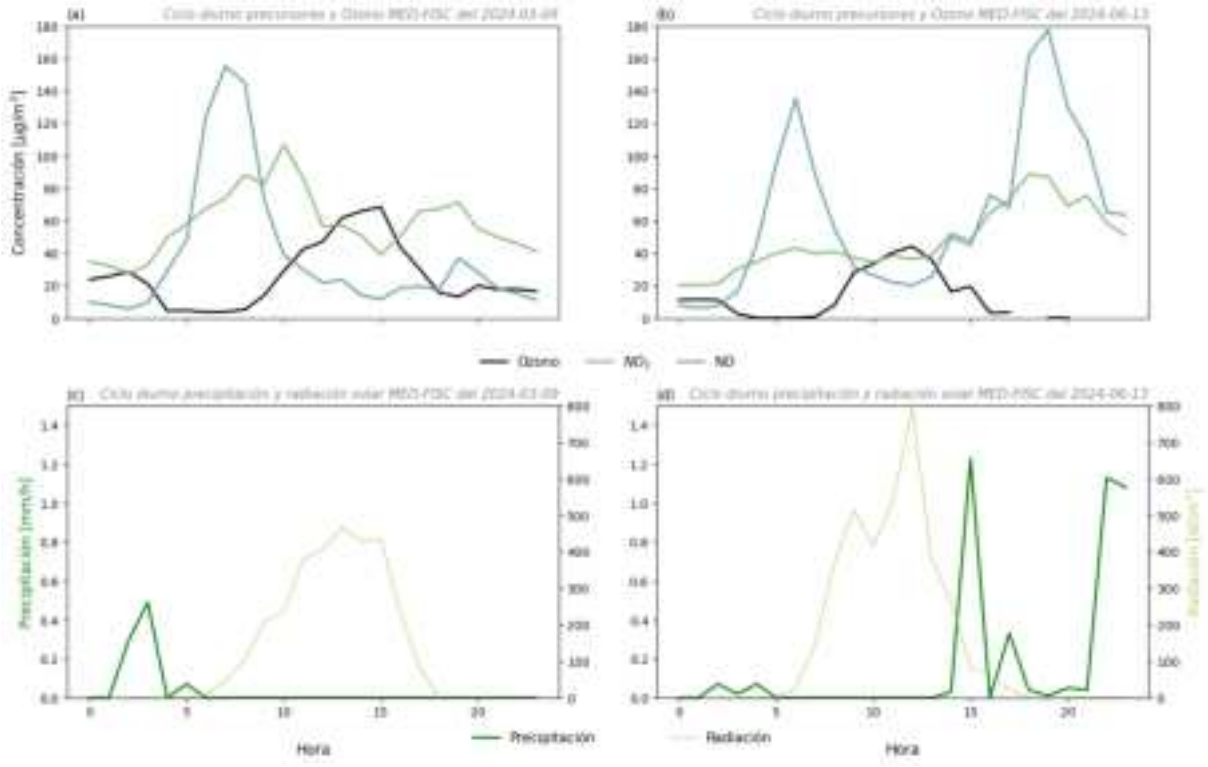


Figura 482: Comportamiento de las concentraciones del ozono y otros contaminantes atmosféricos bajo condiciones de intensidad de precipitación baja (a y c) y alta (b y d) en la estación MED-FISC en el 2024

Durante las horas de la noche del día con alta intensidad de precipitación (Figura 482 (b)) se logra apreciar que desde las 15:00 horas, con un evento de lluvia con intensidades de 1.2 mm/h, las concentraciones tanto de NO como de NO_2 aumentaron considerablemente, lo cual está también asociado al aumento de las emisiones vehiculares que se dan durante eventos de precipitación. El día 9 de marzo (sábado) caracterizado por la disminución del flujo vehicular y donde no se presentaron precipitaciones, exceptuando en la madrugada, las concentraciones de estos contaminantes descienden desde las 19:00 h, atribuible a menores emisiones de NO (dinámica de los días sábado) y a la formación de pentaóxido de dinitrógeno (N_2O_5) y nitratos acorde al ciclo regular del nitrógeno en su ciclo nocturno.

Cabe destacar dos momentos del ciclo diurno de las concentraciones de ozono y precursores para el 13 de junio, día con altas intensidades de precipitación, el primero, después de las lluvias de las 15:00 horas, se presentaron altas concentraciones de NO y NO_2 asociado a altas emisiones. En un segundo momento de precipitaciones, alrededor de las 21:00, (con ausencia de radiación solar), se observó un descenso en las concentraciones de estos contaminantes, favoreciendo otros procesos de transformación, como por ejemplo la formación de nitratos, ácido nítrico (formación de lluvia ácida) y deposición húmeda.

Análisis del comportamiento del ozono y de precursores, en la estación GIR-EPM

La estación GIR-EPM se encuentra ubicada en una zona afectada principalmente por la actividad industrial y adicionalmente, se observa la presencia de un entorno con alta cobertura vegetal.

En las Figuras 483 (a) y (b), se puede visualizar el ciclo diurno de las concentraciones de ozono y sus precursores NO y NO_2 para los días de baja y alta intensidad de precipitación, 3 de marzo y 26 de junio respectivamente. De forma similar a lo que se presenta en la estación MED-FISC, los máximos de NO se registran entre las 05:00 y las 09:00 horas, consistente con el flujo vehicular. Los picos de ozono entre las 10 y las 15 horas, evidencian la participación del NO (el cual presenta decaimiento en su concentración, frente al pico de las primeras horas de la mañana), en la formación de ozono troposférico, favorecidos por la presencia de radiación solar. Considerando también que el NO también produce NO_2, que participa en otras reacciones químicas como por ejemplo en la formación de PM2.5 secundario.

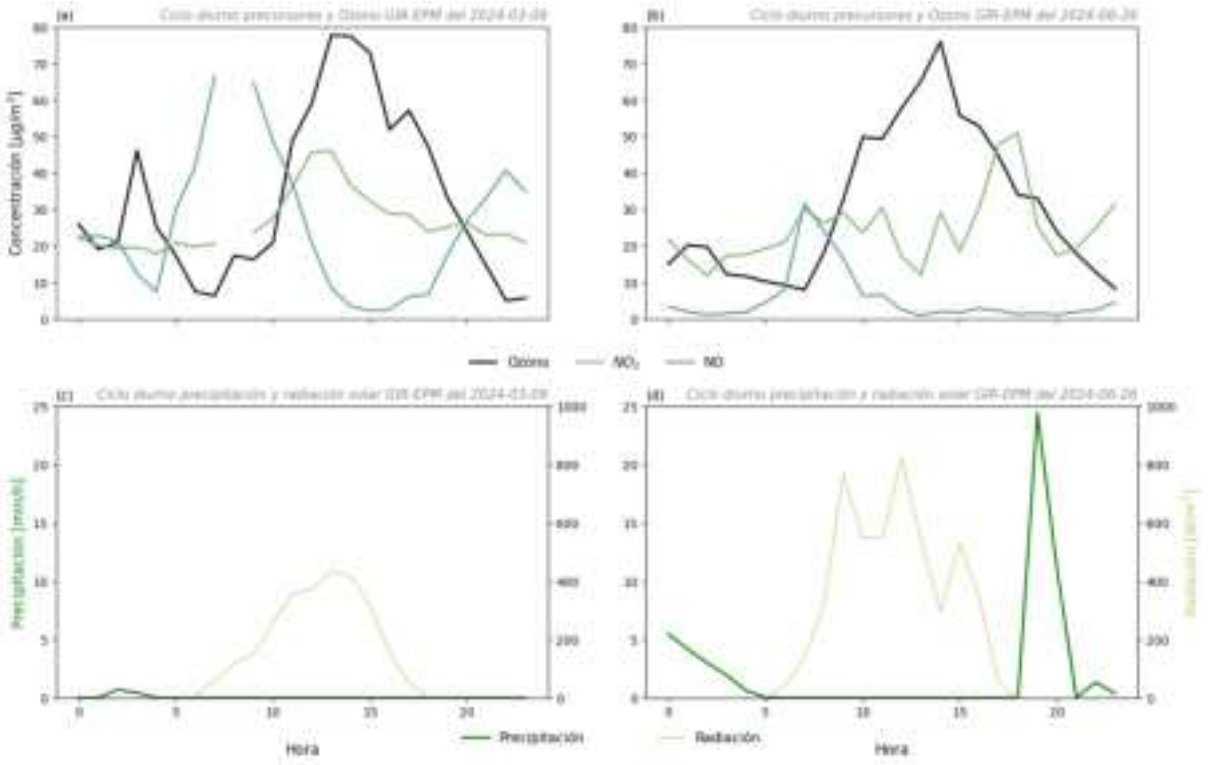


Figura 483: Comportamiento de las concentraciones del ozono y otros contaminantes atmosféricos bajo condiciones de intensidad de precipitación baja (a y c) y alta (b y d) en la estación GIR-EPM en el 2024

Por otro lado, se identifican concentraciones relativamente altas de ozono troposférico durante las primeras horas del día 9 de marzo (03:00 a 04:00 h, Figura 483 (a)), lo cual puede estar relacionado con el ingreso de este contaminante al Valle de Aburrá más que asociarlo a formación local debido a la ausencia de la radiación solar. Adicionalmente, no es claro el mecanismo de degradación del NO durante estas horas, se intuye que pudo estar relacionado a su participación como precursor en la formación de PM2.5 secundario.

En el ciclo diurno del día de alta precipitación (Figura 483 (b)), se observan muy bajas concentraciones de NO asociadas probablemente al período de vacaciones del sector académico, el cual influye directamente en la reducción del flujo vehicular y las pocas emisiones generadas fueron favorecidas para transformarse posiblemente a ozono y PM2.5 secundario.

Los comportamientos anteriores muestran una variabilidad importante en diferentes puntos del Valle de Aburrá con respecto al comportamiento o tendencia de precursores como el NO y el NO_2, bajo condiciones

de radiación solar y ocurrencia de precipitaciones, principalmente las condiciones en el ciclo nocturno de los NO_X. Los casos evaluados de forma preliminar permiten mencionar que la precipitación posiblemente no incide en la formación de ozono troposférico, pero afecta las dinámicas de movilidad que inciden en la emisión de precursores de ozono. Sin embargo, es necesario realizar un análisis más robusto de tal forma que se pueda comprobar lo mencionado anteriormente.

Es necesario considerar las características de localización de ambas estaciones, dado que la estación MED-FISC tiene una influencia del tráfico vehicular mayor que en la estación GIR-EPM, incidiendo en el aporte de precursores como los NO_X y los COV, y la presencia de cobertura vegetal, cerca de la estación del municipio de Girardota puede facilitar las reacciones con compuestos orgánicos volátiles (VOC) de origen biogénico.

Con el objetivo de complementar el análisis preliminar expuesto en las secciones previas de este informe de las tendencias de las concentraciones de contaminantes atmosféricos secundarios en el Valle de Aburrá con la meteorología y sus precursores, se realizó una campaña de caracterización de especies químicas secundarias en el segundo semestre del año 2024. En la siguiente sección se presentan los principales resultados de esta campaña de monitoreo.

Análisis de las concentraciones de especies secundarias a partir de una campaña de caracterización química en el Valle de Aburrá

En el Valle de Aburrá se han realizado campañas de caracterización química a cargo del Politécnico Jaime Isaza Cadavid, generalmente en convenio con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, las cuales han cuantificado las fracciones orgánica y elemental del PM2.5, en las estaciones correspondientes a MED-BEME, MED-SELE, MED-PJIC, MED-LAYE, GIR-SOSN e ITA-CJUS (AMVA (2019)). Adicionalmente, se han identificado los elementos que componen las fracciones mayoritaria, minoritaria, trazas y ultratrazas, así como también los cationes y aniones tales como fluoruros, cloruros, nitratos y sulfatos.

Con el objetivo de cuantificar las especies químicas de interés en el territorio, acercarnos al ciclo diurno de las concentraciones de especies químicas reactivas en la atmósfera y poder correlacionar con la formación de especies mayoritarias constituyentes al PM2.5 secundario como sulfatos, nitratos y cloruros así como también del formaldehido y tolueno se realizó una campaña de caracterización química en 2 puntos del Valle de Aburrá. Estas mediciones podrán dar cuenta de la actividad química a nivel de superficie, de aquellos compuestos aportantes a la fracción secundaria del PM2.5, facilitando el soporte técnico para la toma de decisiones en el control y seguimiento a las fuentes de emisión local, además de proporcionar información relevante para la caracterización de zonas para la medición de contaminantes atmosféricos.

Los puntos seleccionados para la campaña de caracterización química de PM2.5, fueron las estaciones de monitoreo ubicadas en los municipios de Girardota (GIR-EPM) e Itagüí (ITA-CJUS), realizando las mediciones con una escala temporal de cada 3 horas los días 1 y 7 de noviembre de 2024. Cabe aclarar que para el día viernes 1 de noviembre, el período de medición fue de 12 horas, mientras que para el día jueves 7 de noviembre se realizó una medición continua durante 24 horas desde las 06:00 horas. Por lo anterior, es importante mencionar que los valores de las concentraciones de iones (sulfatos y nitratos) reportadas, corresponden a lo recolectado tres horas previas al registro. A continuación, se presentan los resultados más relevantes y relaciones con otras variables de importancia en la formación de aerosoles secundarios en el Valle de Aburrá.

Comportamiento de las concentraciones de sulfatos y nitratos con respecto a las mediciones de sus precursores (SO_2 y NO_x) en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM

A partir de las concentraciones medidas de aniones sulfatos y nitratos, se obtuvieron inicialmente los ciclos diurnos para una jornada de monitoreo de 24 horas partiendo desde las 06:00 horas del día jueves 7 hasta el viernes 8 de noviembre del 2024, como se observa en las Figuras 484 a la 487.

Para la estación ITA-CJUS se observaron picos en las concentraciones de sulfatos (ver Figura 484) cerca de las 12:00, y otro menos pronunciado a las 18:00 horas del día 7 de noviembre de 2024. Adicionalmente, el máximo de concentración se registró a las 03:00 horas del día siguiente. Los picos de sulfatos a las 12:00 del 7 de noviembre y a las 03:00 del 8 de noviembre, coinciden con una reducción progresiva en las concentraciones de PM2.5 y de SO_2.

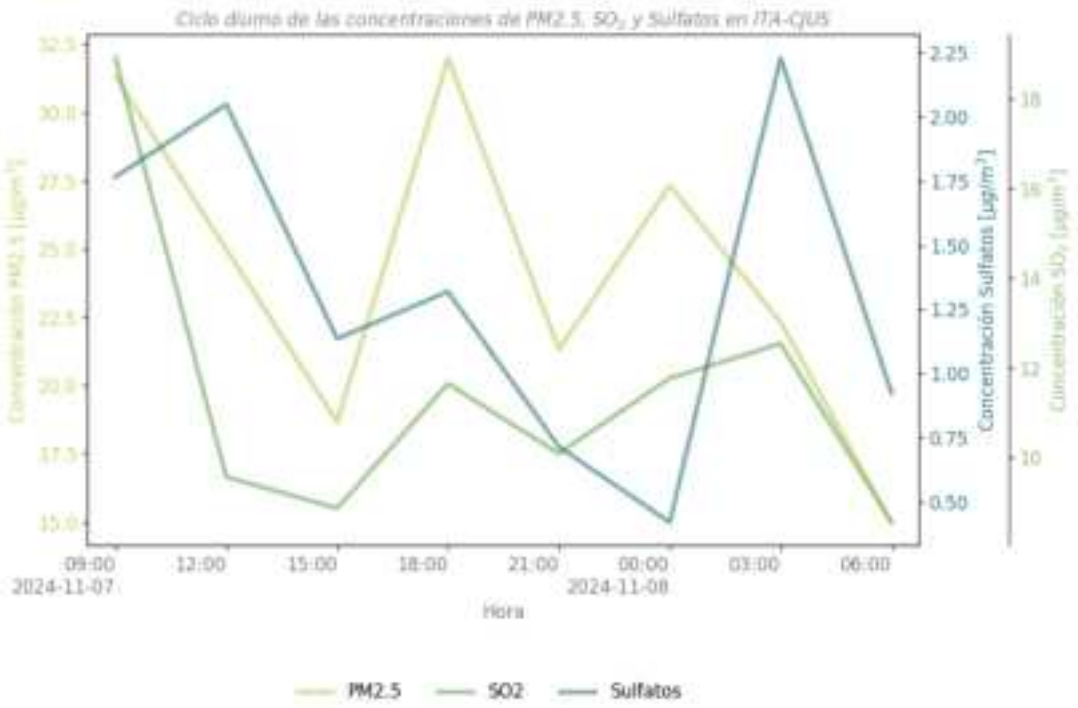


Figura 484: Ciclo diurno de las concentraciones de iones sulfato y de dióxido de azufre en la estación ITA-CJUS del 7 de noviembre de 2024.

Inicialmente analizando los resultados de los sulfatos de la estación ITA-CJUS, se puede observar cómo las concentraciones de SO_2 y PM2.5 antes del medio día disminuyen radicalmente, asociado a un aumento de las concentraciones de los sulfatos desde las 09:00 hasta las 12:00 horas. Esto permite inferir que las emisiones de SO_2 se fueron agotando y progresivamente pudieron haber reaccionado para dar paso a la formación de sulfatos. Además se debe tener en cuenta que en esa franja horaria hay mejores condiciones para la dispersión de contaminantes. Este comportamiento tan marcado se logró observar también a las 03:00 horas del día viernes 8 de noviembre. Lo anterior puede indicar procesos de nucleación que permitieron la formación de partículas en la interfase acuosa de los aerosoles (Ha et al. (2023)). Es importante evaluar las condiciones meteorológicas que podrían haber afectado la formación de sulfatos,

las cuales serán analizadas en una sección más adelante en el presente informe.

En relación con el comportamiento de los nitratos en la estación ITA-CJUS (ver Figura 485), el pico de concentración más alta se presenta a las 18:00 horas coincidente con las concentraciones mayores tanto de NO como de NO_2 en el período de medición. Sin embargo, otros picos de concentración de nitratos se presentaron a las 12:00 horas del 7 de noviembre y a las 03:00 del 8 de noviembre, los cuales estuvieron asociados a bajas concentraciones de precursores (NO y NO_2). La diferencia entre los picos de alta concentración de nitratos con respecto a las concentraciones de NO_2 y NO, se pudieron haber presentado por dinámicas dominantes especiales en la formación de ozono favorecidas por las reacciones fotoquímicas o condiciones particulares asociadas al ciclo nocturno de los óxidos de nitrógeno.

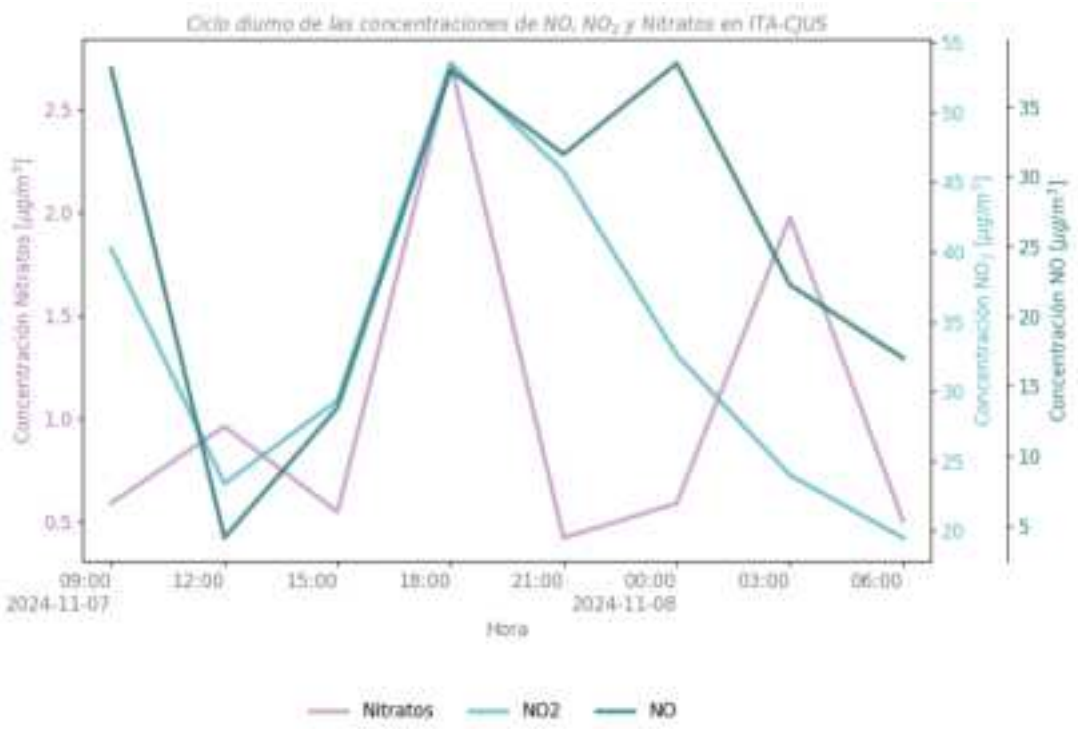


Figura 485: Ciclo diurno de las concentraciones de iones nitratos y de óxidos de nitrógeno en la estación ITA-CJUS el 7 de noviembre de 2024.

Por otro lado, para la estación GIR-EPM, el día 7 de noviembre de 2024, se presenta un pico máximo de sulfatos cerca de las 12:00 (ver Figura 486), coincidente con bajas concentraciones tanto de PM2.5 como de SO_2, comportamiento similar presentado en la estación ITA-CJUS. Mientras que para el 8 de noviembre de 2024, las concentraciones más altas de sulfatos cerca de las 03:00 horas, corresponden con un mínimo de SO_2 a esa misma hora y el valor más alto de PM2.5 durante el período de medición.

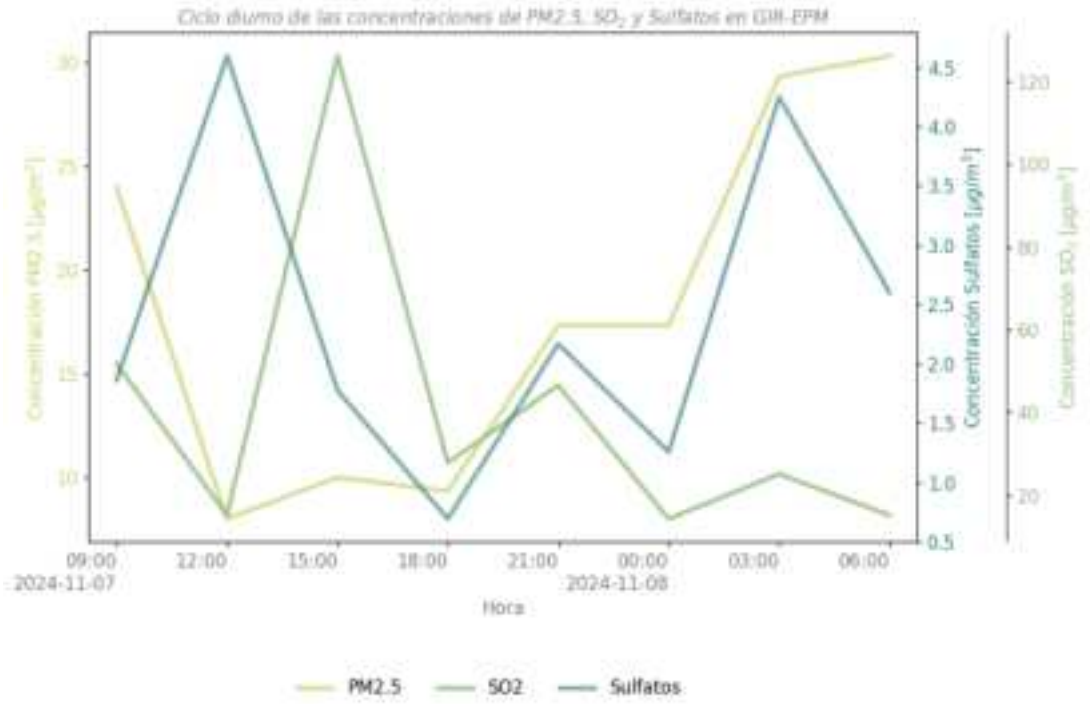


Figura 486: Ciclo diurno de las concentraciones de iones sulfato y de dióxido de azufre en la estación GIR-EPM del 7 de noviembre de 2024.

Para esta estación las concentraciones faltantes de NO_2 y NO correspondieron a labores de calibración. En relación con el comportamiento de los nitratos en la estación GIR-EPM (ver Figura 487) el 8 de noviembre, se identificó un pico de concentración cerca de las 03:00 horas, lo cual relativamente corresponde con aumentos en las concentraciones de NO y al mismo tiempo una disminución en las de NO_2. Se puede observar cómo antes de las 00:00 del día 8 de noviembre, las concentraciones de NO_2 y NO decrecen mientras que las concentraciones de nitratos empiezan a aumentar hasta las 03:00 de este mismo día, lo cual permite deducir una proceso de formación de aerosoles secundarios a partir de la reacción de moléculas de NO_X.

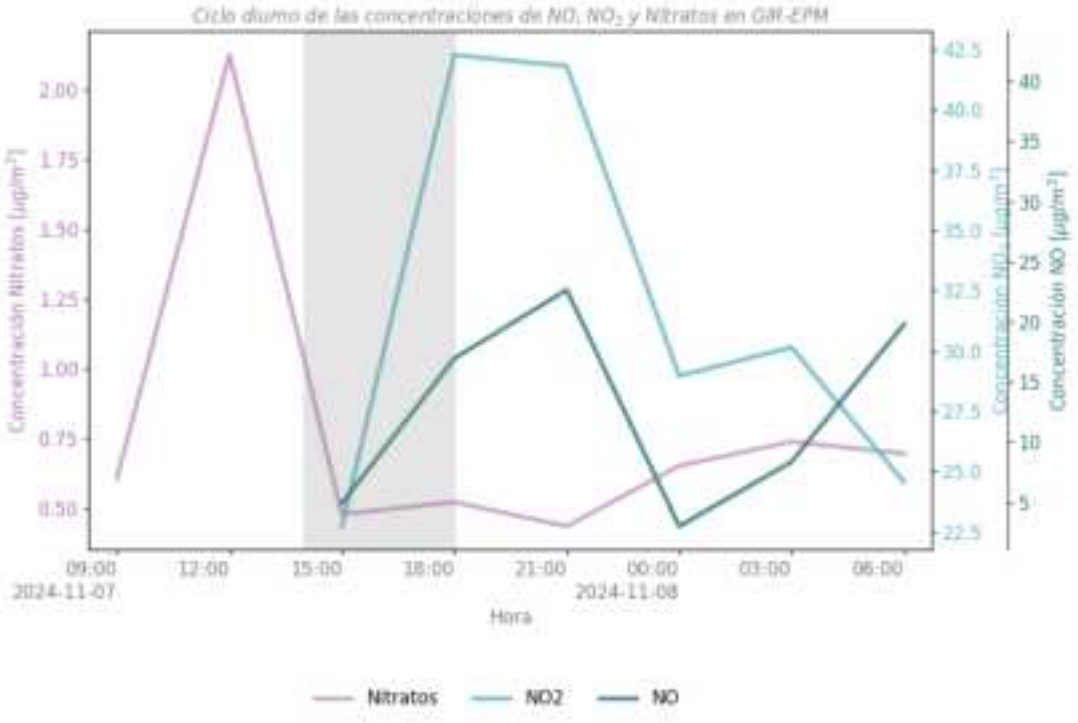


Figura 487: Ciclo diurno de las concentraciones de iones nitratos y de óxidos de nitrógeno en la estación GIR-EPM del 7 de noviembre de 2024.

De los análisis realizados anteriormente, es necesario considerar un aporte adicional que podría haber afectado a las concentraciones de ambos aniones, relacionado con el transporte de masas de aire contaminado con aportes tanto de precursores como aerosoles envejecidos.

Comportamiento de las concentraciones de sulfatos y cloruros en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM

Previamente se expusieron los resultados obtenidos de las concentraciones registradas de sulfatos y nitratos en la campaña de caracterización química. A continuación, se presentan los resultados de otra de las fracciones mayoritarias del PM2.5, correspondiente a los iones cloruros.

Como se mencionó antes, es importante destacar que los valores de las concentraciones medidos de cloruros también corresponden a un tiempo de recolección de muestra de 3 horas previas al dato reportado.

En la Figura 488 se muestran las concentraciones obtenidas de cloruros, sulfatos y del PM2.5 de la estación ITA-CJUS. Se puede observar cómo desde las 09:00 horas las concentraciones tanto de cloruros como de PM2.5 empiezan a disminuir, mientras que las concentraciones de sulfatos comienzan a aumentar hasta las 12:00 horas. Se presentaron máximos cerca de las 12:00 (7 de noviembre) y de las 03:00 (8 de noviembre) en las concentraciones de sulfatos y al mismo tiempo concentraciones reducidas de PM2.5 y cloruros. A las 00:00 horas del 8 de noviembre, se observa un máximo de PM2.5 pero mínimas concentraciones de cloruros y sulfatos. Lo anterior indicaría que los registros del PM2.5 no representan el comportamiento

de los iones que lo constituyen en todas las horas del día que, de acuerdo con los estudios de especiación química de PM2.5, representan cerca del 12 %.

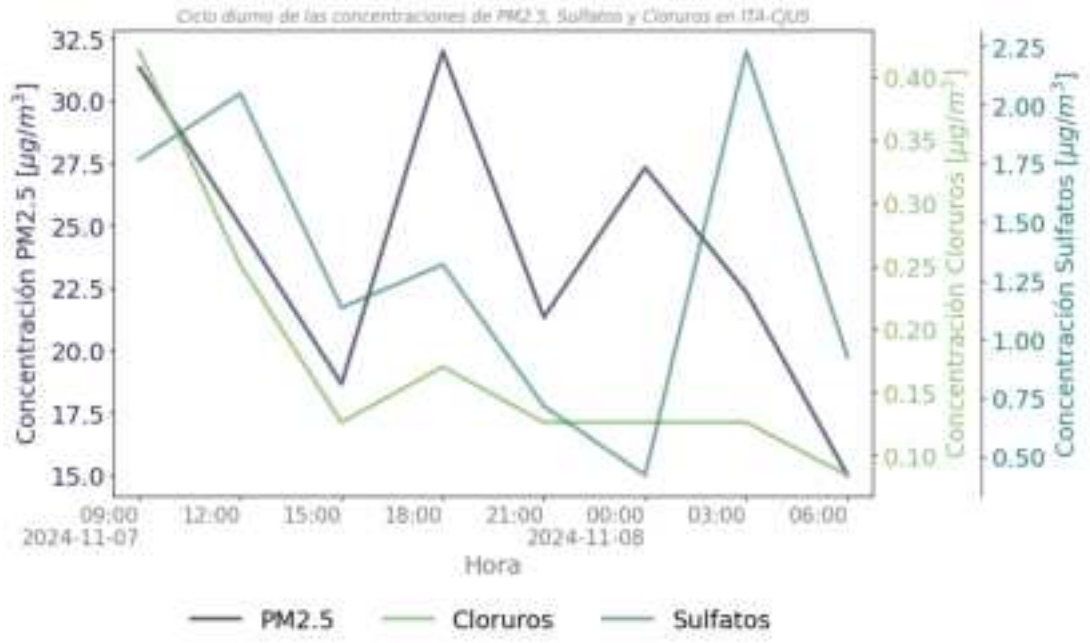


Figura 488: Ciclo diurno de las concentraciones de iones cloruros y PM2.5 en la estación ITA-CJUS del 7 de noviembre de 2024.

En el caso de la estación GIR-EPM, como se observa en la Figura 489, posee un comportamiento bimodal en las concentraciones de los iones cloruros en comparación con lo presentado en la estación ITA-CJUS. El pico de concentración se obtiene a las 12:00 horas, presentando un segundo valor máximo a las 03:00 del día siguiente. En esta estación la concentración mayor de cloruro se obtiene a un mínimo en la concentración del PM2.5 y un valor máximo de sulfatos, y posteriormente se presentan aumentos generalizados de estas especies desde las 21:00 del 07 de noviembre hasta las 03:00 del 8 de noviembre, momento en el cual las concentraciones disminuyen.

Adicionalmente, en la Figura 489 se distingue un período de tiempo en el cual hubo un evento de precipitación entre las 14:00 y las 18:00 horas del 7 de noviembre, es así como se puede visualizar una reducción tanto en los sulfatos como cloruros, lo que puede indicar un posible lavado de estas especies químicas.

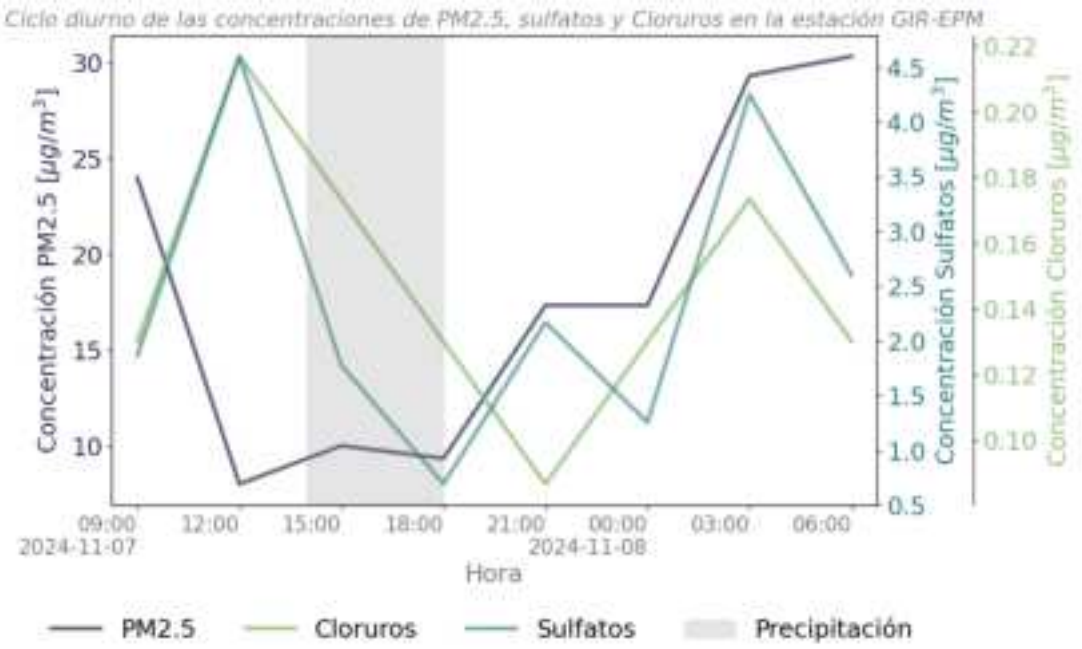


Figura 489: Variación de las concentraciones de PM2.5, sulfatos y cloruros en la estación GIR-EPM para las mediciones realizadas entre el 07 y el 08 de noviembre de 2024. La franja vertical corresponde a un período en el que se registraron precipitaciones.

Para evaluar y explicar el comportamiento de las concentraciones de los iones cloruros en ambas estaciones, es necesario considerar los mecanismos de reacción en los que se ve involucrado. En el estudio de (Wang et al. (2005)) encontraron que mediante coeficientes de correlación entre especies reaccionantes, los iones cloruros tienen una mayor afinidad de formación con el amonio, sugiriendo un proceso de neutralización en la atmósfera, favoreciendo la formación de cloruro de amonio (NH_4Cl) en forma de partícula, seguido de la formación de cloruro de sodio (NaCl) y cloruro de potasio (KCl). Por lo anterior, sería necesario realizar una caracterización del ciclo diurno de las concentraciones del catión amonio (NH_4^+) en puntos de interés del Valle de Aburrá, y posteriormente analizar su aporte al PM2.5, teniendo en cuenta que el (NH_4^+) también hace parte de las fracciones mayoritarias del PM2.5 secundario (AMVA (2019)).

En el caso de los iones cloruros, también es importante conocer su fuente de emisión y el tipo de área ya sea costera, rural o urbana ya que puede influir en la formación de aerosoles con alta concentración de cloro. En zonas urbanas industrializadas, los aerosoles de cloruros usualmente co-existen con metales pesados o de transición tales como el zinc y el plomo, adicionalmente pueden ser recubiertos por materiales orgánicos en plumas de aire envejecidas. En regiones con bosques y áreas agrícolas los aerosoles contienen cloruro de potasio contribuyendo casi a la mitad de la concentración de partículas finas de las plumas provenientes de la quema de biomasa (Wang et al. (2005)). Así mismo, los cloruros secundarios también se pueden mezclar con polvos minerales o material particulado resuspendido.

En áreas urbanas, estudios (Wang et al. (2005)) han mostrado que los cloruros metálicos contienen partículas que normalmente se mezclan con materiales carbonosos provenientes de las emisiones de combustión, tal es el caso del cloruro de zinc ($ZnCl_2$) recubierto de materia orgánica luego de un proceso de envejecimiento en la atmósfera.

Lo anterior resalta la importancia de evaluar además del ciclo diurno de constituyentes del PM2.5 secun-

dario, el tiempo o envejecimiento de estas especies químicas en la atmósfera, dado que los iones cloruros pueden obtenerse a partir del transporte de sales marinas disueltas o de la combustión del carbón (Wang et al. (2005)), destacando que en cercanías de ambas estaciones se tiene la operación de industrias que consumen este combustible.

Por otro lado, la mezcla de aerosoles que contienen cloruros con otros constituyentes inorgánicos y orgánicos pueden alterar de forma significativa la higroscopicidad e influenciar la activación de los núcleos de condensación de nubes (Wang et al. (2017)). Lo anterior puede dar explicación a la variabilidad en el comportamiento de las concentraciones, tanto de cloruros como de los registros del PM2.5 en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM.

Otro de los procesos o mecanismos de reacción en los que se ven implicados los cloruros, es en la reacción con el pentaóxido de dinitrógeno (N_2O_5), el cual juega un papel crítico en los procesos de oxidación de los NO_x, especialmente en la química nocturna, por lo que puede afectar el incremento en la producción de ozono, por sus reacciones de degradación con compuestos orgánicos volátiles (VOC) (Faxon and Allen (2013); Dai et al. (2020)). Para este tipo de reacciones, debido a su complejidad y competitividad frente a las reacciones con iones hidroxilo (OH^-), es necesario una evaluación mediante modelos de calidad del aire que tengan implementados dichos mecanismos fotoquímicos, específicamente los procesos de condensación del cloro.

Considerando lo expuesto anteriormente, se hace evidente la cantidad de factores involucrados en la formación de especies aportantes al PM2.5 secundario, resaltando la necesidad de continuar estudiando la variabilidad de las concentraciones de estos compuestos, cuyos resultados puedan ser implementados en los diferentes planes de gestión de calidad del aire del Valle de Aburrá por parte de la autoridad ambiental.

Tasas de oxidación de azufre y nitrógeno en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM

Los resultados de la campaña mostraron una variabilidad de las concentraciones de los aniones (sulfatos y nitratos) a lo largo del día, evidenciando dinámicas de reacción particulares. Por lo anterior, es importante determinar las razones de oxidación tanto de nitrógeno como de azufre, dado que estas relaciones brindan información de la capacidad oxidativa de la atmósfera para la obtención de estos compuestos (Wang et al. (2005)), adicionalmente que ayudan a describir el aporte por tipo de fuentes de emisión, ya sea de fuentes móviles o por fuentes fijas industriales. Las ecuaciones D.1 y D.2 definen las razones de oxidación de azufre (SOR) y nitrógeno (NOR), respectivamente.

$$SOR = \frac{n - SO_4^{2-}}{(n - SO_4^{2-} + n - SO_2)} \tag{D.1}$$

$$NOR = \frac{n - NO_3^-}{(n - NO_3^- + n - NO_2)} \tag{D.2}$$

Donde $n - SO_4^{2-}$, $n - SO_2$, $n - NO_3^-$ y $n - NO_2$ son las concentraciones molares de sulfatos, dióxido de azufre, nitratos y del dióxido de nitrógeno, respectivamente. Cuando los valores de las razones de oxidación de azufre y nitrógeno son mayores a 0.1, algunas investigaciones sugieren que puede indicar procesos de transformación secundaria, favoreciendo la oxidación fotoquímica de especies gaseosas tales como el SO_2 y el NO_2, siendo precursores de aerosoles secundarios (Wang et al. (2005)).

En las Figuras 490 y 491 se muestran las variaciones horarias de las razones de SOR y NOR, así co-

mo también de las concentraciones de sulfatos y nitratos, en las estaciones de ITA-CJUS y GIR-EPM, respectivamente.

De forma general, se puede observar cómo las razones de SOR en ambas estaciones son mayores a las de NOR a lo largo del día, lo que indicaría que la formación secundaria de nitratos a partir de NO_2 es débil en comparación a la conversión de sulfatos. Adicionalmente, se destacan los valores de SOR mayor a 0.1 a las 12:00 y 03:00 horas en ambos puntos de monitoreo, sugiriendo una mayor actividad oxidativa de la atmósfera a estas horas, favoreciendo la formación de aerosoles secundarios especialmente de sulfatos.

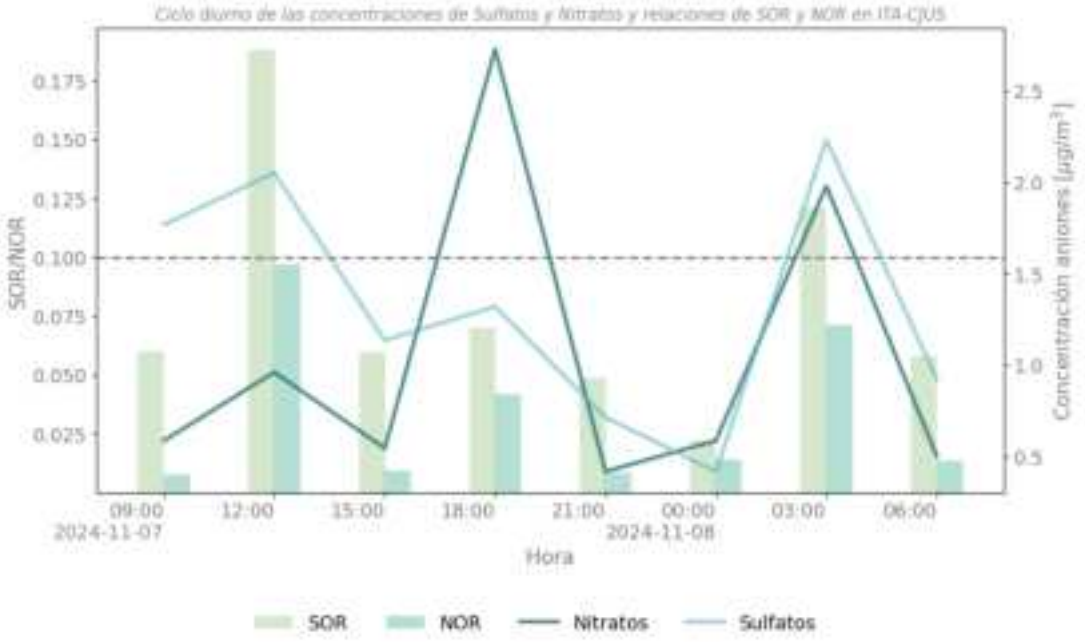


Figura 490: Razones de oxidación de sulfatos y nitratos en la estación ITA-CJUS el 07 y el 08 de noviembre de 2024.
Nota: La línea punteada corresponde al límite donde las tasas de oxidación sugieren una atmósfera reactiva para la formación de aerosoles secundarios.

Las razones de NOR fueron inferiores a valores de 0.05 en la estación GIR-EPM, sin embargo, en la estación ITA-CJUS se logra observar un valor cercano a 0.1, a las 12:00. Lo anterior puede indicar que en esta estación se presentan dinámicas de reacción particulares al medio día, con un aporte relevante principalmente de fuentes fijas industriales, seguido de las fuentes móviles. Considerando que las emisiones de SO_2 se deben principalmente al sector industrial, mientras que las emisiones de NO_X son aportadas por el parque automotor, siendo ambos precursores de aerosoles secundarios, como se expuso anteriormente.

Cabe destacar el pico de nitratos a las 18:00 horas en la estación ITA-CJUS, que aunque está asociado a una tasa NOR menor a 0.05, lo que corresponde a una tasa de oxidación reducida a partir de NO_2, podría indicar que a esta hora del día se presentan otros procesos de formación secundaria adicional a la oxidación de este precursor. Investigaciones han obtenido que la formación de nitratos poseen una correlación positiva alta con la presencia de iones amonio (NH_4^+) (Wang et al. (2005)). Esto puede mostrar un mecanismo adicional importante para la alta producción de nitratos en este punto de medición, siendo importante estudiar la variabilidad de las concentraciones de iones amonio en otras estaciones de monitoreo del Valle de Aburrá para poder analizar su relación con estas especies secundarias, teniendo en

cuenta que el catión NH_4^+ también corresponde a una fracción mayoritaria del PM2.5, reportado en las investigaciones de especiación química realizadas por el Politécnico Jaime Isaza Cadavid (AMVA (2019)).

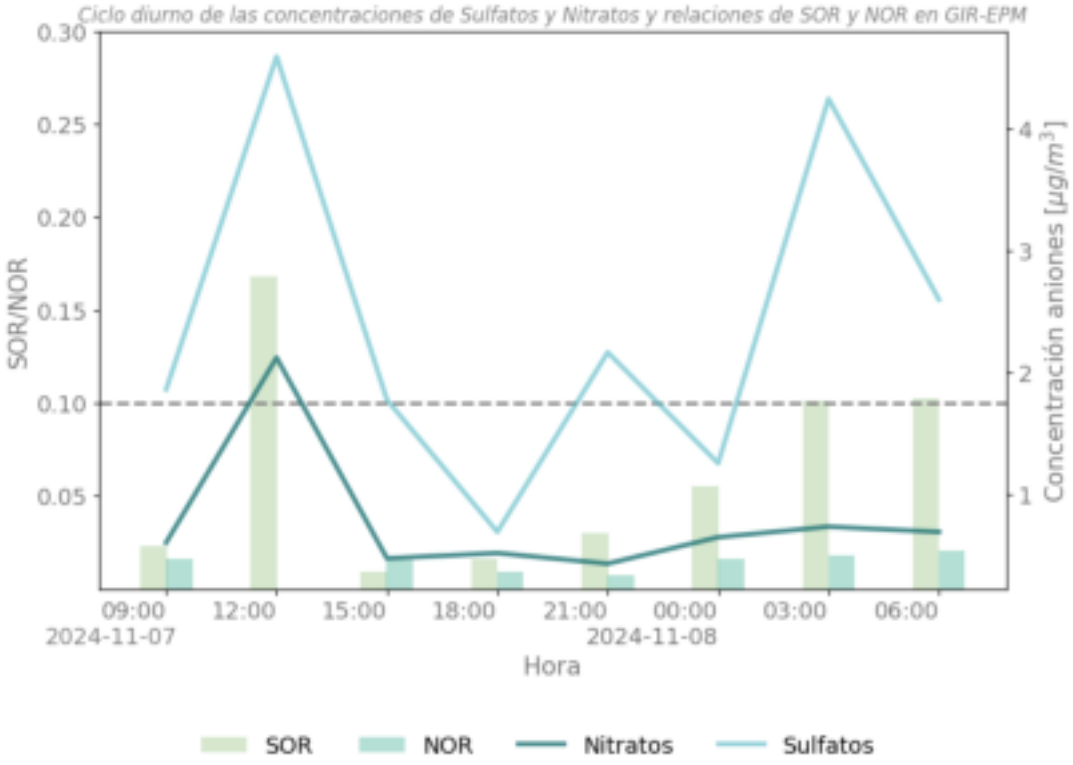


Figura 491: Razones de oxidación de sulfatos y nitratos en la estación GIR-EPM el 07 y el 08 de noviembre de 2024.
Nota: La línea punteada corresponde al límite donde las tasas de oxidación sugieren una atmósfera reactiva para la formación de aerosoles secundarios.

En el caso de la estación GIR-EPM, la tasa de oxidación de NO_2 (NOR) presentó valores significativamente bajos menores a 0.05. Lo que sugiere una producción baja de nitratos en este punto de medición, en concordancia con los valores obtenidos de sus concentraciones menor a 1 $\mu g/m^3$ como se observa en la Figura 491, a excepción del valor obtenido a las 12:00 horas de aproximadamente 2 $\mu g/m^3$. El comportamiento anterior, sugiere que en el municipio de Girardota, las emisiones provenientes de las fuentes fijas industriales son las de mayor aporte en términos de formación de aerosoles secundarios, representado en la alta tasa de oxidación de azufre y su posterior conversión a iones sulfatos, los cuales son aportantes al PM2.5 secundario.

Para el comportamiento observado en la tasas de oxidación de azufre (SOR) en las estaciones de ITA-CJUS y GIR-EPM, estarían altamente afectadas por el contenido de agua de los aerosoles y la temperatura ambiente (Wei and Tahrin (2024)). Estos factores habrían favorecido que la higroscopicidad de las partículas aumentaran la concentración de sulfatos, principalmente en las primeras horas del día (alrededor de las 03:00).

Relación entre las concentraciones de aerosoles secundarios y la meteorología en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM

En las secciones previas se expuso la dependencia de las concentraciones de los aerosoles secundarios con las variables meteorológicas (Gao et al. (2020)), donde se resaltó la importancia de variables como la humedad relativa, el pH, la temperatura y el tipo de fuentes de emisión, sobre la producción de aerosoles secundarios. Por lo anterior, a continuación se presenta un análisis de correlación entre las concentraciones de aerosoles inorgánicos (nitratos, sulfatos y cloruros), medidos en la campaña de caracterización química del mes de noviembre de 2024, con variables meteorológicas como la humedad relativa, temperatura ambiente, radiación solar y precipitación, incluyendo además en el análisis, la influencia de precursores como el NO_x y el SO_2. Adicionalmente se evaluaron otros contaminantes secundarios como el ozono y el carbono orgánico.

Cabe mencionar que, en la campaña de caracterización química también se tuvo como objetivo cuantificar la variabilidad de compuestos como el formaldehido, que se ha sugerido su papel como catalizador en la formación de sulfatos y del tolueno como especie química intermediaria que, aumenta la tasa de reacción en la producción de aerosoles secundarios. Por lo anterior, estos compuestos también serán objeto de análisis en la correlación de variables.

En las Figuras 492 y 493 se pueden observar los mapas de calor construidos a partir de los coeficientes de correlación de Pearson, encontrados entre las variables de interés, en las estaciones ITA-CJUS y GIR-EPM, respectivamente. En el punto de medición de ITA-CJUS se evaluaron, además de la influencia de los aniones, la radiación solar y las concentraciones de carbono orgánico (OC) asumiendo que todo sea de origen secundario, mientras que en el punto de GIR-EPM se analizaron las concentraciones de ozono y la precipitación.

Los mapas de calor demuestran cómo, en las estaciones de la Casa de Justicia en el municipio de Itagüí (ITA-CJUS) y en los tanques de EPM en el municipio de Girardota (GIR-EPM), las interacciones entre contaminantes atmosféricos primarios y variables meteorológicas modulan la formación de aerosoles secundarios.

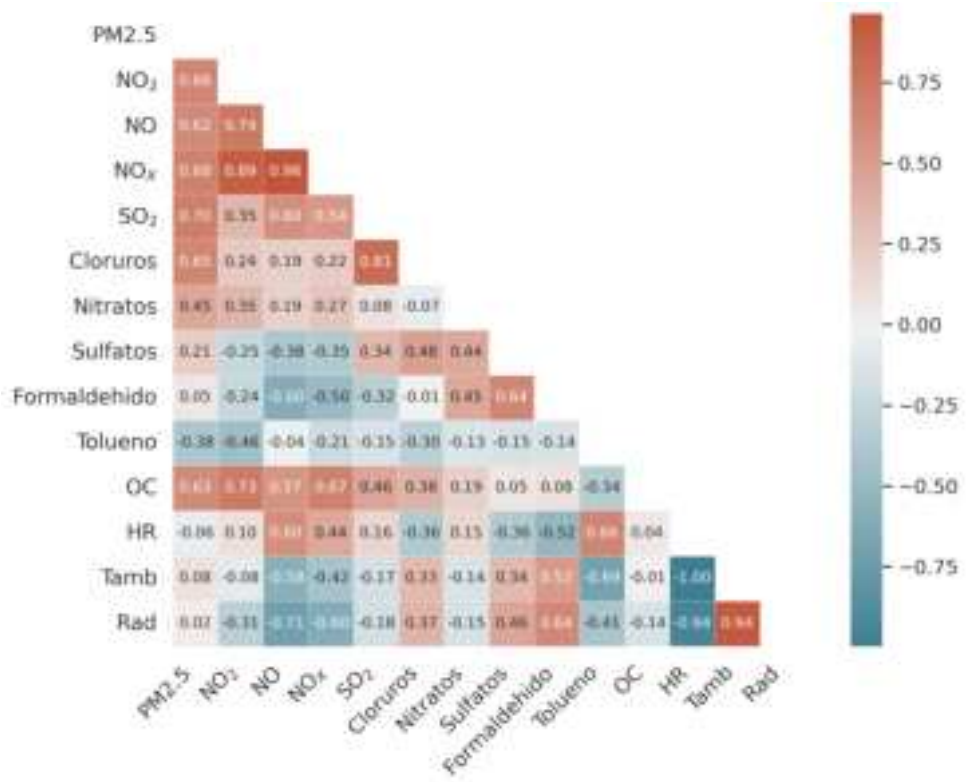


Figura 492: Matriz de correlación entre las concentraciones de aerosoles inorgánicos con respecto a sus precursores y variables meteorológicas, en la estación ITA-CJUS.

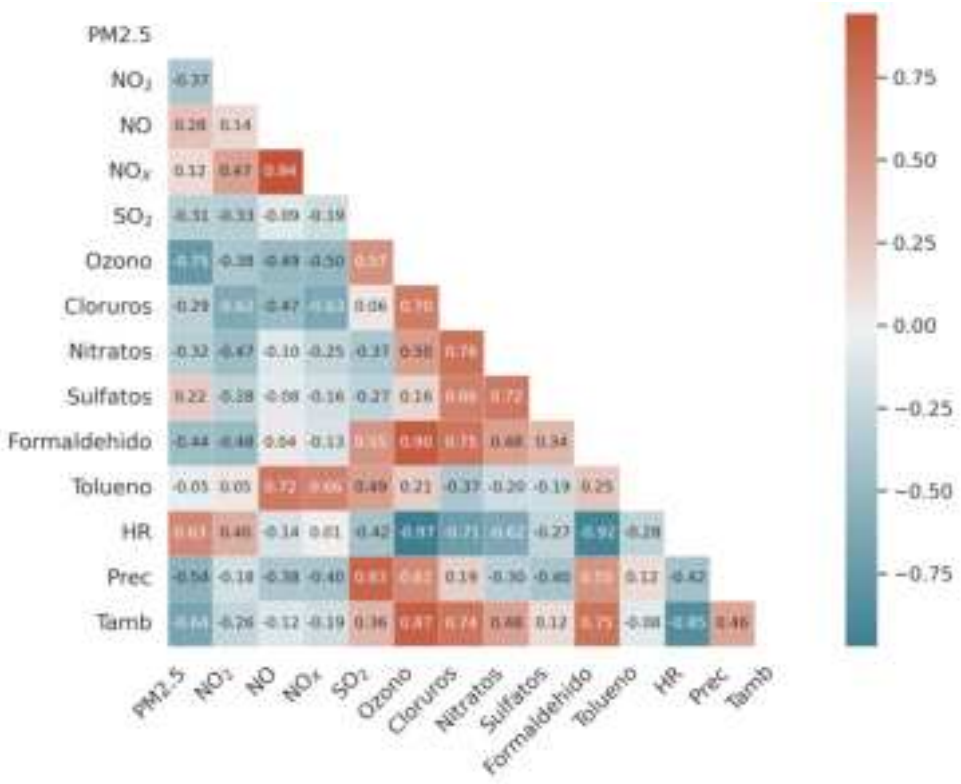


Figura 493: Matriz de correlación entre las concentraciones de aerosoles inorgánicos con respecto a sus precursores y variables meteorológicas, en la estación GIR-EPM.

Inicialmente, fueron analizadas las relaciones entre los aniones secundarios como los sulfatos (SO_4^{2-}), nitratos (NO_3^-) y cloruros (Cl^-) mediante las reacciones de oxidación de sus precursores (Dovrou et al. (2021)) como se observa a continuación:

$$SO_2 + \cdot OH \rightarrow HSO_3\cdot \rightarrow SO_4^{2-} \tag{D.3}$$

$$NO_2 + \cdot OH \rightarrow HNO_3 \rightarrow NO_3^- \tag{D.4}$$

$$Cl_2 + H_2O \rightarrow 2HCl \rightarrow 2Cl^- \tag{D.5}$$

Al verificar los resultados en cada punto de medición, se puede observar que se obtuvieron correlaciones bajas entre los nitratos con NO_X y los sulfatos con SO_2, destacando que fueron de magnitud positiva en ITA-CJUS y negativa en GIR-EPM. Lo anterior podría sugerir que en el caso de GIR-EPM, se presenta una oxidación de precursores al mismo tiempo que se obtienen iones secundarios, mientras que en la estación ITA-CJUS, el tiempo de reacción sería más lento por lo que la oxidación no degradaría una mayor cantidad de precursores presentes en la atmósfera, lo anterior considerando las características del tipo de fuentes de emisión cercanas. En el sector de ITA-CJUS, las fuentes móviles se destacan ya que convergen diferentes vías principales y residenciales, sumado al número de fuentes fijas industriales, en comparación con GIR-EPM que se encuentra en un punto con alta presencia de vegetación con influencia principalmente de fuentes fijas industriales con alto consumo de carbón como combustible.

Por otro lado, al considerar la interacción del formaldehído (HCHO) como catalizador con la formación de sulfatos, el cual acelera la oxidación de SO_2 en fase líquida (Dovrou et al. (2021); Wei and Tahrin (2024)), revela un coeficiente de correlación positiva de hasta 0.64, demostrando su efectividad en la formación de estos aerosoles secundarios. Adicionalmente, se destaca que la temperatura y la humedad relativa se correlacionan de manera crítica con las concentraciones de HCHO, especialmente en la estación GIR-EPM, donde a mayores temperaturas se puede presentar un incremento importante de la velocidad de reacción en fase gaseosa, que basado en otras investigaciones, se estaría favoreciendo la producción de HCHO a partir de hidrocarburos mediante procesos de fotooxidación. Mientras que la alta humedad relativa estaría potenciando las reacciones en fase acuosa y a su vez, la hidrólisis de peróxidos orgánicos hacia HCHO disuelto de menores concentraciones (Gao et al. (2020); Luo et al. (2024)).

Se puede observar que en la estación de ITA-CJUS, la combinación de emisiones aportadas tanto por fuentes móviles como por fuentes fijas bajo condiciones meteorológicas relativamente estables, promueven correlaciones mayormente positivas entre los aerosoles secundarios con respecto a los precursores, en comparación con la estación de GIR-EPM donde se presentaron correlaciones negativas, lo que podría estar reflejando diferentes procesos de dilución o de deposición húmeda.

Por su parte, el tolueno presenta correlaciones negativas bajas con respecto a la formación de sulfatos y nitratos, logrando inferir que podría coincidir con resultados de otros estudios que destacan su contribución a fracciones orgánicas de aerosoles, donde muestran que la oxidación del tolueno con los radicales hidroxilo (OH) generan compuestos oxigenados (fenoles o compuestos nitroaromáticos) que incrementan el carbono orgánico (OC) de los aerosoles secundarios y compiten por radicales con las rutas de formación de aniones inorgánicos, lo cual puede explicar las correlaciones moderadas a bajas con nitratos y sulfatos, y así mismo notando una correlación negativa con el OC en la estación ITA-CJUS (Lin et al. (2015); Xu et al. (2020)). La oxidación de compuestos orgánicos volátiles (VOC) tales como el tolueno, sumado a su interacción con otros precursores como los NO_x, han demostrado ser una fuente importante de SOA a partir de reacciones como la ozonólisis.

Adicionalmente, observando las correlaciones relativamente bajas pero de carácter positivo entre el OC con los aniones, podría indicar que estos aerosoles tendrían una composición mayoritariamente inorgánica, dejando ver también la necesidad de estudiar la presencia de aerosoles envejecidos, los cuales se caracterizan por estar recubiertos de una capa de materia orgánica (Wang et al. (2017)).

Los resultados indican además que la condiciones meteorológicas modulan las reacciones de formación de aerosoles. En el caso de GIR-EPM en el que un evento de precipitación moderado sugiere un lavado húmedo de especies hidrosolubles, atenuando momentáneamente los niveles de nitratos y sulfatos (Gao et al. (2020); Luo et al. (2024)), mostrando además una correlación alta con la humedad relativa, tanto para los iones cloruro como nitrato. Igualmente en la estación ITA-CJUS, se vieron afectados los cloruros y sulfatos por la influencia con la temperatura y radiación solar, además de la humedad relativa.

Es importante mencionar, que debido al poco volumen de datos recolectados, solo se exponen posibles tendencias entre las variables medidas para la campaña realizada en el mes de noviembre de 2024, por lo que no se debe tomar de forma concluyente hasta tanto no se realice una mayor cantidad de mediciones que puedan brindar más información para el ajuste de tendencias.

Los análisis realizados revelan algunos patrones esperados de precursores a aniones secundarios mediante estudios recientes (Gao et al. (2020); Wei and Tahrin (2024)), adicional de algunos no esperados, lo cual sugiere la necesidad de ampliar medidas de control y reducciones de emisiones de VOC y de precursores de aniones secundarios y continuar con la investigación de mecanismo de reacción química para la formación de compuestos atmosféricos secundarios. Estos hallazgos pueden fortalecer el conocimiento del aporte por composición química de los registros de PM2.5 en el Valle de Aburrá, lo que puede orientar la formulación y actualización de políticas públicas para mejorar la calidad del aire, que contemplen precursores de aerosoles secundarios desde fuentes emisoras.

Conclusiones

En la vigencia del Contrato de Ciencia y Tecnología CCT 016 de 2024 se propuso la investigación para el estudio de la formación del PM2.5 secundario, en la cual se planteó el objetivo de *realizar un estudio que permitiera determinar aproximadamente los perfiles verticales de concentración del PM2.5, SO_2 y NO_X principalmente, y realizar un acercamiento a la evaluación de los compuestos orgánicos volátiles*. Para el desarrollo de este objetivo se sugirieron como actividades estudiar en detalle los mecanismos de reacción fotoquímicos de los aerosoles primarios, tales como el SO_2 y el NO_x, además del uso de datos satelitales para la estimación de los perfiles verticales de contaminantes atmosféricos.

En el transcurso de la investigación fueron analizados, mediante revisión secundaria, los mecanismos de reacción química, considerando tanto los procesos como las especies químicas involucradas. En este análisis se identificó la necesidad de emplear herramientas matemáticas como los modelos computacionales que permiten solucionar un sistema complejo y extenso de una serie de ecuaciones. Desde el SIATA se viene trabajando en la implementación del modelo WRF-Chem para el Valle de Aburrá, el cual permite acercarse al conocimiento de los mecanismos de reacción química; sin embargo, éste aún está en su fase de implementación, por lo que actualmente no es posible evaluar los perfiles verticales de especies químicas a partir de este modelo. No obstante lo anterior, se utilizarán los resultados del modelo CAMx publicados por la Universidad Pontificia Bolivariana a través de los convenios suscritos con el Área Metropolitana del Valle de Aburrá. Los resultados de este modelo permitirán estimar el perfil vertical de las concentraciones de contaminantes atmosféricos; sin embargo, es importante tener en cuenta que la configuración disponible de CAMx para el Valle de Aburrá no considera el aporte de fuentes externas en la calidad del aire de esta región, lo cual podría afectar los perfiles verticales que se esperan analizar.

En concordancia con los hallazgos de las caracterizaciones químicas realizadas en el Valle de Aburrá, en los modelos evaluados como el de Isorropía, se resalta la importancia de los iones sulfatos y nitratos como iones mayoritarios constitutivos del PM2.5, por lo que reconocer los mecanismos de formación de éstos, a partir de los óxidos de nitrógeno y dióxido de azufre y otras variables meteorológicas que inciden en esa formación, es fundamental para direccionar las acciones de gestión para mejorar la calidad del aire.

En el análisis realizado a los modelos de calidad del aire, específicamente en el módulo de mecanismos de reacción química, se lograron identificar especies químicas importantes en las dinámicas de reacción atmosférica. Es así como se destaca el rol de compuestos químicos como el tolueno y el formaldehido, siendo la fotooxidación del tolueno un proceso clave para la formación de aerosoles secundarios y el formaldehido como catalizador de las reacciones en presencia de compuestos azufrados. Al conocer su importancia en las tasas de formación de agentes secundarios, se propuso realizar una campaña de caracterización de estos compuestos en tres puntos del Valle de Aburrá, lo que podría brindar información del perfil de concentraciones diurno y nocturno de algunas especies mayoritarias, tales como los sulfatos y nitratos.

La revisión bibliográfica realizada sobre los mecanismos de formación secundaria de aerosoles, así como del ozono troposférico, permitió identificar la complejidad de los factores que inciden en la formación de éstos, siendo necesario continuar profundizando en su análisis, teniendo en cuenta variables meteorológicas tales como la temperatura, precipitación, radiación solar y humedad relativa, así como las dinámicas estacionales y espaciales.

Con la información recolectada a partir de los mecanismos de reacción de los modelos de Isorropía y RAQMS, se realizaron análisis del comportamiento de las concentraciones tanto de los precursores como de las especies constituyentes del PM2.5, específicamente el carbono orgánico y el brown carbon. Estas relaciones se hicieron con base en la influencia de parámetros meteorológicos como la radiación solar, intensidad de la precipitación y la humedad relativa.

En las estaciones ubicadas en el distrito de Medellín (CEN-TRAF) y los municipios de Itagüí (ITA-CJUS) y Girardota (GIR-EPM), se pudo observar que a medida que aumenta la radiación solar se reducen las

concentraciones de los NO_X, producto de la activación de los procesos de remoción de contaminantes por ascenso vertical y de las transformaciones fisicoquímicas que contribuyen a la formación de aerosoles orgánicos secundarios (SOA) y de ozono troposférico. Por otro lado, el aumento en las concentraciones del PM2.5 al igual que del OC cerca de las 13:00 horas en el período de evaluación, se presentaría por las diferentes reacciones que involucran los compuestos orgánicos semivolátiles primarios (SVOC) e intermedios (IVOC) remanentes que posiblemente no reaccionaron en la formación del ozono troposférico.

Uno de los compuestos de interés en la formación de aerosoles secundarios y especialmente del brown carbon es el tolueno, el cual es producto de la combustión tanto de combustibles fósiles como de la quema de biomasa. Considerando lo anterior, se analizaron las concentraciones de tolueno y brown carbon en la estación CEN-TRAF en el período de 2022. Las concentraciones de los aerosoles secundarios absorbentes de luz que constituyen el brown carbon a lo largo del año presentaron un comportamiento bimodal, con los mayores picos alrededor de las 06:00 y a las 20:00 horas. Las concentraciones más altas se presentaron en los meses de febrero y marzo asociados a las quemas de cobertura vegetal característicos del primer período de gestión de episodios en la región. Para el segundo semestre del año 2022, los picos de tolueno en la mañana superan los picos de las horas de la tarde, lo cual puede estar asociado a temperaturas mas altas que inciden en la volatilización de este compuesto, manteniéndolo en su forma gaseosa, además del aporte de las dinámicas de movilidad. De igual manera en esta estación, se presenta un comportamiento bimodal del OC en el último cuatrimestre del año, indicando probablemente que las condiciones meteorológicas favorecen la formación de aerosoles orgánicos secundarios en este período.

Analizando las concentraciones de ozono troposférico en la estación ubicada en la sede Caribe de la Fiscalía General de la Nación (MED-FISC) en el Distrito Especial de Medellín, se logró observar que en un evento de alta intensidad de precipitación, alrededor de las 21:00 horas, (con ausencia de radiación solar) se presentó un descenso en las concentraciones de este contaminante, favoreciendo otros procesos de transformación secundaria, como por ejemplo la formación de nitratos, ácido nítrico (formación de lluvia ácida) y deposición húmeda de contaminantes. Adicionalmente, se identifican los máximos en las concentraciones de ozono aproximadamente a las 15:00 horas (donde el NO se interconvierte a NO_2 y posteriormente a ozono troposférico), formación que se facilita por la presencia de radiación solar. Los picos de NO y NO_2 son mayores que los picos de ozono, lo que podría dar a entender que la emisión de contaminantes primarios de la familia de los NO_X es superior a la transformación química en ozono, quedando un remanente que puede contribuir a la formación de PM2.5 secundario como son los nitratos.

Los diferentes análisis realizados en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá, permitieron evidenciar la importancia de especies químicas reactivas en el comportamiento de las concentraciones del PM2.5, especialmente a la fracción secundaria. Adicionalmente, es destacable la influencia de las especies químicas intermedias de los mecanismos de reacción en los que están involucrados los precursores de PM2.5 secundario medidos en la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá. En este sentido, los estudios de caracterización química son ejercicios fundamentales para poder cuantificar la concentración de especies químicas intermedias que reaccionan con precursores atmosféricos (NO_X, SO_2, VOC) y que contribuyen al conocimiento de la formación secundaria del PM2.5, proporcionando información para acercarse al entendimiento de los mecanismos de reacción química que se dan en la atmósfera del Valle de Aburrá, lo cual deberá ser analizado conjuntamente con herramientas matemáticas.

Consideraciones para trabajos futuros

1. Teniendo en cuenta la necesidad de ajustar los modelos locales de calidad del aire asociados al WRF-Chem que se está implementando para el Valle de Aburrá desde el proyecto SIATA, se hace necesario realizar una evaluación de los coeficientes de reacción más relevantes que permitan incorporar los cambios que estos modelos requieren para el territorio, para lo cual, se propone, además del

análisis integral de la información histórica asociada al comportamiento de las concentraciones de contaminantes criterio en el tiempo, la realización de campañas de medición de otros compuestos intermedios.

II. Basado en las apreciaciones con respecto al efecto de los procesos de oxidación en la atmósfera, se da la necesidad de monitorear las concentraciones de compuestos orgánicos volátiles intermedios (destacándose el glioxal y el metilglioxal por su alta reactividad) en el Valle de Aburrá y estimar las concentraciones de iones hidroxilo, las cuales permitirán estudiar las condiciones aproximadas de oxidación propias del territorio facilitando la estimación del aporte de aerosoles orgánicos a la calidad del aire y sus potenciales fuentes de emisión permitiendo la actualización de planes de gestión.

III. Observando los resultados de diferentes investigaciones, se destaca la importancia de variables como la temperatura, humedad relativa, radiación solar y las concentraciones de NO_X y SO_2 como parámetros que influyen en las reacciones de formación de nitratos y sulfatos (componentes del PM2.5). Esto debido a los cambios que sufren los aerosoles orgánicos secundarios (SOA) en su composición debido a la fotólisis en la fase gaseosa, por lo que su concentración y el tiempo de vida en la atmósfera, poseen una alta variabilidad. Es importante mencionar que se tiene una comprensión limitada de los procesos que controlan la formación, envejecimiento y remoción de los SOA en la atmósfera. Por lo anterior, para poder estudiar los procesos de oxidación y de fotólisis en la atmósfera en la formación de aerosoles secundarios, se recomienda iniciar con la evaluación de registros de radiación solar, humedad relativa y temperatura en las diferentes estaciones de calidad del aire del Valle de Aburrá y estudiar su correlación con las concentraciones de especies químicas de interés.

IV. Se hace necesario evaluar el comportamiento de las concentraciones de NO_X, SO_2 y de VOC tales como el tolueno, formaldehido (destacando su origen principalmente por la quema de biocombustibles), eteno entre otros, en las estaciones de la Red de Monitoreo de Calidad del Aire del Valle de Aburrá, tratando de obtener relaciones de interés con las mediciones de PM2.5, en casos o escenarios particulares tales como los períodos de gestión de episodios, teniendo en cuenta la reactividad de estos contaminantes como precursores de SOA.

V. Evaluar la influencia de parámetros meteorológicos tales como la radiación solar, la temperatura y la humedad relativa en los procesos de formación de ozono troposférico, considerando períodos de gestión de episodios por contaminación atmosférica y otros escenarios, lo cual facilitaría no solo el entendimiento en la formación de este contaminante sino también de otros aerosoles secundarios.

VI. Analizar con mayor detenimiento lo relacionado con el ozono troposférico, debido a su complejidad asociada a la meteorología y variaciones en las concentraciones de los diferentes precursores. Es importante tener en cuenta que en meteorología solo se tiene certeza de la incidencia de la radiación solar para la formación de O_3.

VII. Evaluar además del ciclo diurno de constituyentes del PM2.5 secundario, el tiempo o envejecimiento de estas especies químicas en la atmósfera.

VIII. Los resultados presentados anteriormente evidencian la necesidad de continuar con el estudio y caracterización de especies secundarias en el Valle de Aburrá, con el objetivo de generar conocimiento en la formación de aerosoles orgánicos e inorgánicos, lo que puede brindar apoyo en la actualización de los planes de gestión de la autoridad ambiental, para el seguimiento y control a fuentes de emisión, tales como son los Planes Individuales de Reducción de Emisiones (PIR) del sector industrial. Así mismo, se resalta la necesidad de continuar con los ejercicios de caracterización química, adicionando el amonio como aerosol secundario y analizar el comportamiento con respecto a los iones sulfatos y nitratos en otros puntos de medición.

