TARULLA
Ingeniería e Investigación

# Condiciones actuales de riesgos por desabastecimiento de agua para consumo y riesgos por contaminación hídrica en las áreas de influencia de los POMCA río Piedras, río Manzanares y otros directos al caribe (SZH 1501) y POMCA Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01)

**Junio de 2024**

# CONDICIONES ACTUALES DE RIESGOS POR DESABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO Y RIESGOS POR CONTAMINACIÓN HÍDRICA EN LAS ÁREAS DE INFLUENCIA DE LOS POMCA RÍO PIEDRAS, RÍO MANZANARES Y OTROS DIRECTOS AL CARIBE (SZH 1501) Y POMCA COMPLEJO HUMEDALES CIÉNAGA GRANDE DE SANTA MARTA (NSS 2906-01)

## INFORME DE AVANCE DE LAS ESTIMACIONES DE LAS CONDICIONES ACTUALES DE RIESGOS

| Versión | Descripción | Fecha |
|---|---|---|
| 1 | Emisión del documento | 28/06/2024 |

| Elaboró | Revisó y Aprobó |
|---|---|
| <br>Vo. Bo. | Vo. Bo. |
| Coordinador Técnico<br>**Jose Javier Oliveros Acosta**<br>TARULLA INGENIERIA E INVESTIGACION SAS<br>Junio 28 de 2024 | Supervisor del contrato<br>**Luis Sepulveda**<br>CORPAMAG<br>Julio 5 de 2024 |

## CONTENIDO

LISTA DE ACRÓNIMOS ..... 1
GLOSARIO ..... 2
1. INTRODUCCIÓN ..... 4
2. ALCANCE ..... 5
3. AREA DE ESTUDIO ..... 6
4. METODOLOGÍA ..... 8
4.1. Determinación del riesgo ..... 8
4.1.1. Riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC) ..... 8
4.1.2. Riesgo por contaminación hídrica (RCH) ..... 9
4.2. Áreas priorizadas ..... 10
4.3. Medidas de adaptación y reducción de los riesgos identificados ..... 11
5. RIESGO POR DESABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO ..... 12
5.1. Amenaza por desabastecimiento de agua para consumo ..... 22
5.1.1. Subíndice de sequía meteorológica (ISM) ..... 22
5.1.1.1. Precipitación ..... 22
- Identificación de valores anómalos ..... 22
- Análisis de consistencia ..... 25
- Complementación de datos faltantes ..... 25
- Homogeneidad ..... 26
5.1.1.1.1. Red de monitoreo de la precipitación ..... 26
5.1.1.1.2. Análisis de consistencia y homogeneidad de datos de precipitación ..... 33
5.1.1.2. SPI ..... 40
5.1.1.2.1. Asignación de precipitación en las cuencas ..... 42
5.1.1.2.2. Ajuste funciones de probabilidad empíricas ..... 44
5.1.1.2.3. Clasificación SPI ..... 52
5.1.1.3. ISM ..... 58
5.1.2. Subíndice de sequía agrícola (ISA) ..... 60
5.1.2.1. Temperatura ..... 60
5.1.2.1.1. Red de monitoreo de la temperatura ..... 60
5.1.2.1.2. Análisis de consistencia y homogeneidad de datos de temperatura ..... 63
5.1.2.2. RDI ..... 68

5.1.2.2.1. Asignación de temperatura en las cuencas ..... 69
5.1.2.2.2. Evapotranspiración potencial ..... 71
5.1.2.2.3. Ajuste funciones de probabilidad empíricas ..... 72
5.1.2.2.4. Clasificación del RDI ..... 78
5.1.2.3. ISA ..... 84
5.1.3. Subíndice de sequía hidrológica (ISH) ..... 86
5.1.3.1. Modelo hidrológico de Thomas ..... 86
5.1.3.1.1. Construcción del modelo hidrológico ..... 88
5.1.3.1.2. Calibración y validación del modelo hidrológico ..... 90
5.1.3.1.3. Simulación de caudales ..... 97
5.1.3.2. SDI ..... 98
5.1.3.2.1. Ajuste funciones de probabilidad empíricas ..... 98
5.1.3.2.2. Clasificación del SDI ..... 104
5.1.3.3. ISH ..... 110
5.1.4. Índice de amenaza por desabastecimiento de agua para consumo (SIA) ..... 112
5.2. Vulnerabilidad por desabastecimiento de agua para consumo (SIV) ..... 114
5.2.1. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) ..... 114
5.2.1.1. Usos del agua ..... 114
5.2.1.1.1. Inventario de usuarios del recurso hídrico ..... 116
- Río Piedras, Río Manzanares y otros afluentes directos al Caribe (SZH 1501) 116
- Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01) ..... 126
5.2.1.2. Índice de Uso del Agua (IUA) ..... 135
5.2.1.3. Índice de retención y regulación hídrica (IRH) ..... 137
5.2.1.4. IVH ..... 140
5.2.2. Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) ..... 143
5.3. RDAC ..... 148
6. REFERENCIAS ..... 150
7. Anexos ..... 152

# ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ubicación de las cuencas de estudio. ---------- 7

Figura 2 Esquema del proceso metodológico. ---------- 8

Figura 3 Metodología para la determinación del riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC).---------- 9

Figura 4 Metodología para la determinación del riesgo por contaminación hídrica (RCH). -- 10

Figura 5 Municipios en los que se ubican las cuencas de estudio. ---------- 12

Figura 6 Emergencias por sequía reportadas por la UNGRD (1998-2023). ---------- 13

Figura 7 Emergencias por sequía reportadas por DesInventar (1977-2012). ---------- 20

Figura 8 Definición de valores anómalos según Tukey. ---------- 24

Figura 9 Red de monitoreo climatológico con registros de precipitación.---------- 32

Figura 10 Cantidad de estaciones de precipitación por categoría de la estación.---------- 33

Figura 11 Datos anómalos detectados para la precipitación diaria. ---------- 34

Figura 12 Porcentaje de datos faltantes en las estaciones de precipitación.---------- 35

Figura 13 Red de monitoreo climatológico con registros de precipitación que cumplen con los criterios de completitud de los datos. ---------- 36

Figura 14 Curvas de masa de la variable de precipitación. ---------- 40

Figura 15 Proceso metodológico para el cálculo de la precipitación en las cuencas. --------- 43

Figura 16 Precipitación en las cuencas.---------- 44

Figura 17 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) - Precipitación. ---------- 47

Figura 18 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101) - Precipitación.---------- 48

Figura 19 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la precipitación en todas las cuencas de la SZH 1501 - Precipitación. ---------- 50

Figura 20 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la precipitación en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - Precipitación.---------- 51

Figura 21 SPI para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101).---------- 53

Figura 22 SPI para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101). --- 54

Figura 23 Clasificación del SPI en las cuencas. ---------- 57

Figura 24 Subíndice de sequía meteorológica (ISM) en las cuencas. ---------- 59

Figura 25 Red de monitoreo climatológico con registros de temperatura---------- 62

Figura 26 Cantidad de estaciones de temperatura por categoría de la estación.---------- 63

Figura 27 Datos anómalos detectados para la temperatura diaria.---------- 64

Figura 28 Porcentaje de datos faltantes en las estaciones de temperatura. ---------- 65

Figura 29 Red de monitoreo climatológico con registros de temperatura que cumplen con los criterios de completitud de los datos. ---------- 66

Figura 30 Curvas de masa de la variable de temperatura. ---------- 68

Figura 31 Proceso metodológico para el cálculo de la temperatura en las cuencas. ---------- 70

Figura 32 Temperatura en las cuencas. ---------- 71

Figura 33 Evapotranspiración potencial para las cuencas. ---------- 72

Figura 34 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) - a. ---------- 73

Figura 35 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101) - a. ---------- 74

Figura 36 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la SZH 1501 - a. ---------- 76

Figura 37 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - a. ---------- 77

Figura 38 RDI para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101). ---------- 79

Figura 39 RDI para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101). --- 80

Figura 40 Clasificación del RDI en las cuencas. ---------- 83

Figura 41 Subíndice de sequía agrícola (ISA) en las cuencas. ---------- 85

Figura 42 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - a. ---------- 86

Figura 43 Unidades de análisis hidrológico en las áreas de estudio. ---------- 89

Figura 44. Representación esquemática de muestreo paramétrico. ---------- 90

Figura 45 Estación de calibración en la SZH 1501. ---------- 91

Figura 46 Esquema de modelación en la NSS 2906-01. ---------- 93

Figura 47 Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de calibración del modelo -SZH 1501. ------- 95

Figura 48 Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de validación del modelo -SZH 1501. --------- 96

Figura 49 Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de calibración del modelo – NSS 2906-01. -- 97

Figura 46 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) - Caudales. ---------- 99

Figura 47 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101) - Caudales. ---------- 100

Figura 48 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la SZH 1501 - Caudales. ---------- 102

Figura 49 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - Caudales. ---------- 103

Figura 50 SDI para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101). ---------- 105

Figura 51 SDI para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101). - 106

Figura 52 Clasificación del SDI en las cuencas.---------- 109

Figura 53 Subíndice de sequía hidrológica (ISH) en las cuencas. ---------- 111

Figura 54 Subíndice de amenaza por desabastecimiento de agua para consumo (SIA)en las cuencas.---------- 113

Figura 42 Usos y usuarios en la SZH 1501. ---------- 117

Figura 43 Caudal concesionado por tipo de uso del agua en la SZH 1501. ---------- 121

Figura 44 Usos y usuarios en la NSS 2906-01.---------- 127

Figura 45 Caudal concesionado por tipo de uso del agua en la NSS 2906-01.---------- 130

Figura 59 Índice de uso del agua (IUA)en las cuencas. ---------- 136

Figura 60 Índice de retención y regulación hídrica (IRH) en las cuencas.---------- 139

Figura 65 Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) en la SZH 1501.----- 141

Figura 66 Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) en la NSS 2906-01. 142

Figura 67 Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) en las áreas de estudio. ---------- 147

Figura 68 Riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC)en las cuencas. - 149

# ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Emergencias por sequía - UNGRD. ..... 13
Tabla 2 Emergencias por sequía – DesInventar. ..... 20
Tabla 3 Estaciones con registros de precipitación. ..... 27
Tabla 4 Estaciones de precipitación que cumplen con los criterios de completitud de los datos. ..... 37
Tabla 5 Funciones de densidad de probabilidad evaluadas. ..... 45
Tabla 6 Clasificación de sequía por rangos de SPI. ..... 52
Tabla 7 Percentil 95 del SPI para las cuencas de la NSS 2906-01 ..... 55
Tabla 8 Percentil 95 del SPI para las cuencas de la SZH 1501. ..... 55
Tabla 9 Normalización del indicador SPI. ..... 58
Tabla 10 Estaciones con registros de temperatura. ..... 61
Tabla 11 Estaciones de temperatura que cumplen con los criterios de completitud de los datos. ..... 67
Tabla 12 Clasificación de sequía por rangos de RDI. ..... 78
Tabla 13 Percentil 95 del RDI para las cuencas de la NSS 2906-01 ..... 81
Tabla 14 Percentil 95 del RDI para las cuencas de la SZH 1501. ..... 81
Tabla 15 Periodos considerados para calibración y validación de los modelos hidrológicos. 92
Tabla 16 Rangos para evaluar el desempeño de los modelos con el Nash-Sutcliffe. ..... 94
Tabla 17 Clasificación de sequía por rangos de SDI. ..... 104
Tabla 18 Percentil 95 del SDI para las cuencas de la NSS 2906-01. ..... 107
Tabla 19 Percentil 95 del SDI para las cuencas de la SZH 1501. ..... 107
Tabla 15 Matriz de asociación del índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento - IVH ..... 114
Tabla 21 Usos del agua establecidos en el Decreto 1076 de 2015. ..... 114
Tabla 18 Caudal concesionado por fuente y número de resoluciones – SZH 1501. ..... 118
Tabla 19 Empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto – SZH 1501. ..... 119
Tabla 20 Concesiones de agua superficial en la SZH 1501. ..... 122
Tabla 21 Caudal concesionado por fuente y número de resoluciones – NSS 2906-01. ..... 126
Tabla 22 Empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto – NSS 2906-01. ..... 128
Tabla 23 Concesiones de agua superficial en la NSS 2906-01. ..... 131
Tabla 16 Categorías del índice de uso del agua. ..... 135
Tabla 29 Clasificación del IRH. ..... 137

Tabla 30 Determinación de indicador de vulnerabilidad económica - IVE1. .....143

Tabla 31 Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) de la NSS 2906-01.....144

Tabla 32 Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) de la SZH 1501. .....145



NIT 901049950-2

# LISTA DE ACRÓNIMOS

| | |
|---|---|
| CORPAMAG | Corporación Autónoma Regional del Magdalena |
| IA | Índice de amenaza por contaminación hídrica |
| IACAL | Subíndice de alteración potencial de la calidad de agua |
| ICA | Subíndice de calidad del agua en corrientes superficiales |
| IFA | Subíndice de capacidad de asimilación |
| ISA | Subíndice de sequía agrícola |
| ISH | Subíndice de sequía hidrológica |
| ISM | Subíndice de sequía meteorológica |
| IV | Índice de vulnerabilidad por contaminación hídrica |
| IVE-CH | Subíndice de Vulnerabilidad económica por contaminación hídrica |
| IVE-DAC | Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo |
| IVH | Subíndice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento |
| NSS 2906-01 | Cuenca Hidrográfica Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta |
| RCH | Riesgo por contaminación hídrica |
| RDAC | Riesgo por desabastecimiento de agua para consumo |
| SIA | Índice de amenaza por desabastecimiento de agua para consumo |
| SIV | Índice de vulnerabilidad por desabastecimiento de agua para consumo |
| SZH 1501 | Cuenca Hidrográfica Río Piedras, Río Manzanares y otros afluentes directos al Caribe |

# GLOSARIO

| | |
|---|---|
| Adaptación | El ajuste continuo de sistemas naturales, artificiales o humanos en respuesta a cambios reales o percibidos en el clima u otros factores de riesgo. La adaptación puede ser autónoma (es decir, lograda a través de cambios no planificados) o gestionada (es decir, lograda a través de una planificación de adaptación decidida basada en expectativas de cambios futuros). |
| Amenaza | Peligro latente de 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 (Ley 1523 de 2012). |
| Estación Agrometeorológica | En esta estación se realizan observaciones meteorológicas y biológicas, incluyendo fenológicas y otras observaciones que ayuden a determinar las relaciones entre el tiempo y el clima, por una parte y la vida de las plantas y los animales, por la otra. Incluye el mismo programa de observaciones de la estación CP, más registros de temperatura a varias profundidades (hasta un metro) y en la capa cercana al suelo (0, 10 y 20 cm sobre el suelo). |
| Estación Climatológica Ordinaria | Este tipo de estaciones poseen obligatoriamente un pluviómetro, pluviógrafo y psicrómetro. Es decir, miden lluvias y temperaturas extremas e instantáneas. |
| Estación Climatológica Principal | Es aquella en la cual se hacen observaciones de visibilidad, tiempo atmosférico presente, cantidad, tipo y altura de las nubes, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad, viento, radiación, solar, brillo solar, evaporación y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores. Por lo general se efectúan tres observaciones diarias. |
| Estación Meteorológica Especial | Estación instalada para realizar seguimiento a un fenómeno o un fin específico, por ejemplo, las heladas. |
| Estación Pluviográfica | Registra en forma mecánica y continua la precipitación, en una gráfica que permite conocer la cantidad, duración, intensidad y periodo en que ha ocurrido la lluvia. |
| Estación Pluviométrica | Es una estación meteorológica dotada de un pluviómetro o recipiente que permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas. |
| Estación Sinóptica Principal | Realiza observaciones de los principales elementos meteorológicos, los datos se toman horariamente y corresponden a nubosidad, dirección y velocidad de los vientos, presión atmosférica, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, fenómenos especiales, características de humedad, precipitación, temperaturas extremas, capas significativas de nubes, recorrido del viento y secuencia de los fenómenos atmosféricos. |

| | |
|---|---|
| Riesgo | Se entiende como los daños o pérdidas potenciales que pueden presentarse debido a los eventos físicos peligrosos de origen natural, socio-natural tecnológico, biosanitario o humano no intencional, en un período de tiempo específico y que son determinados por la vulnerabilidad de los elementos expuestos; por consiguiente, el riesgo de desastres se deriva de la combinación de la amenaza y la vulnerabilidad (Ley 1523 de 2012). |
| Vulnerabilidad | Susceptibilidad o fragilidad física, económica, social, ambiental o institucional que tiene una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos en caso de que un evento físico peligroso se presente. Corresponde a la predisposición a sufrir pérdidas o daños de los seres humanos y sus medios de subsistencia, así como de sus sistemas físicos, sociales, económicos y de apoyo que pueden ser afectados por eventos físicos peligrosos. (Ley 1523 de 2012). |

# 1. INTRODUCCIÓN

CORPAMAG ha diseñado y adoptado el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01) y el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, Río Manzanares y otros afluentes directos al Caribe (SZH 1501), los cuales contemplan una serie de programas y proyectos establecidos durante su fase de formulación. En el marco del contrato No 569 de 2023 suscrito entre la Corporación Autónoma Regional del Magdalena, CORPAMAG y TARULLA INGENIERIA E INVESTIGACION S.A.S., se llevará a cabo una actividad relacionada con la implementación de los programas de los planes operativos de dichos POMCA. Esta actividad consiste en realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de riesgo por desabastecimiento de agua para consumo y por contaminación hídrica, así como en formular medidas de adaptación y reducción de los riesgos identificados en las áreas prioritarias según el diagnóstico.

La realización del diagnóstico de las condiciones de riesgo por desabastecimiento y contaminación hídrica surge en primera instancia para dar cumplimiento a los planes operativos de los POMCA asociados, y en segunda instancia, para contribuir al mejoramiento de las condiciones ambientales de cada cuenca. Este diagnóstico implica la estimación de los índices de Vulnerabilidad al Desabastecimiento (IVH), el Índice de Amenaza Potencial por Afectación a la Calidad del Agua (IACAL) y el Índice de Calidad del Agua (ICA), cuyos resultados definirán las zonas prioritarias para la formulación consecuente de medidas de adaptación y reducción de los riesgos.

El presente documento presenta el avance en la determinación las condiciones actuales de riesgo por desabastecimiento de agua para consumo en el Río Piedras, el Río Manzanares y otros afluentes directos al Caribe (SZH 1501), así como en el Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01).

# 2. ALCANCE

El contrato No 569 del 2023 suscrito entre la Corporación Autónoma Regional del Magdalena, CORPAMAG y TARULLA INGENIERIA E INVESTIGACION S.A.S., se tiene como alcance *Determinar las condiciones actuales de riesgos por desabastecimiento de agua para consumo y riesgos por contaminación hídrica, así como la formulación de medidas de adaptación y reducción de los riesgos identificados en las áreas priorizadas según diagnóstico*.

El actual documento presenta las condiciones actuales de riesgos por desabastecimiento de agua para consumo en las áreas de los POMCA del río Piedras, río Manzanares y otros directos al caribe (SZH 1501) y el Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01).

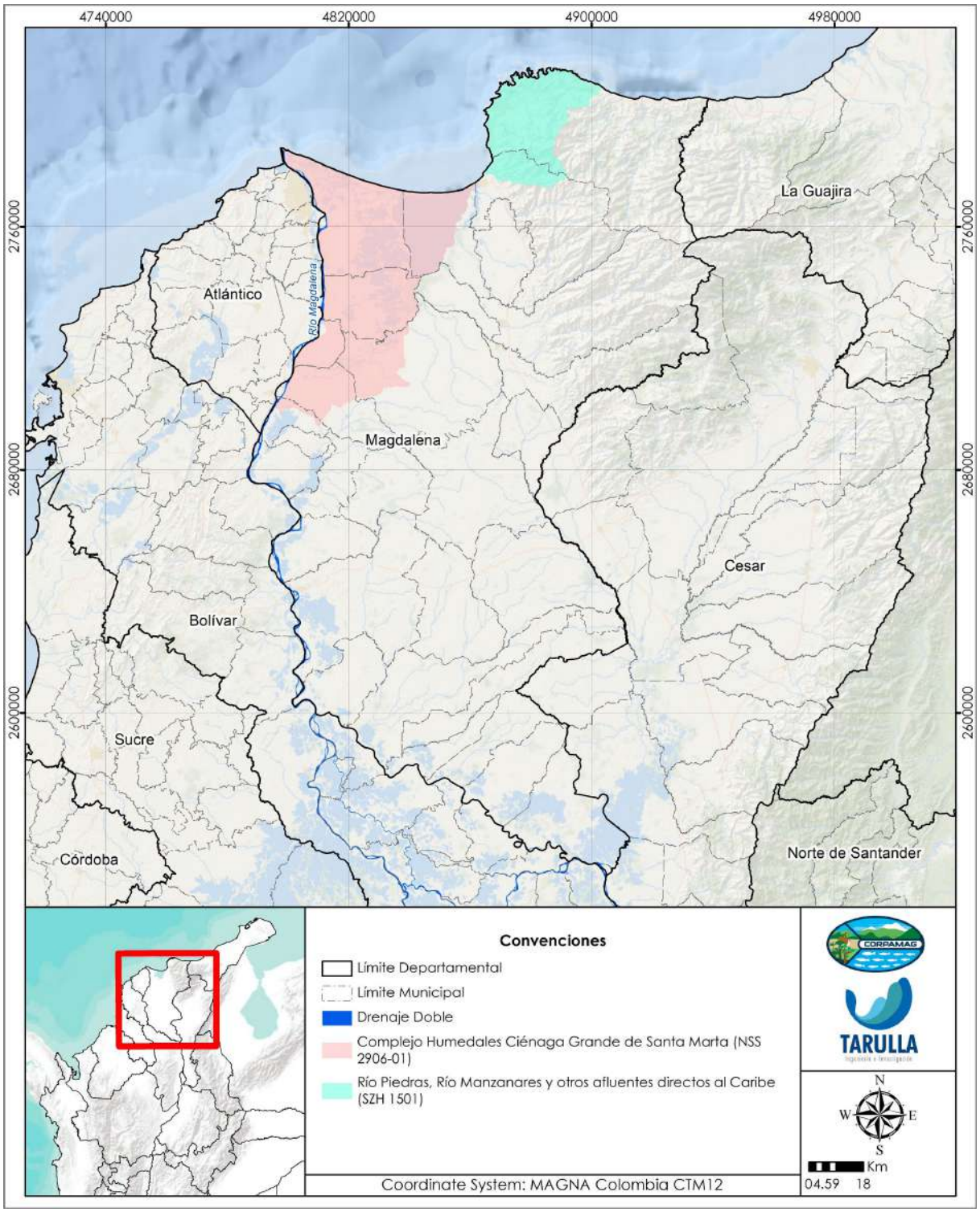
# 3. AREA DE ESTUDIO

El área de estudio abarca el territorio definido por el Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01) y del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica Río Piedras, Río Manzanares y otros afluentes directos al Caribe (SZH 1501), ambos elaborados y adoptados por CORPAMAG (ver Figura 1). En estas zonas se llevará a cabo una actividad relacionada con la implementación de los programas operativos de los Planes de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas (POMCA), la cual consiste en realizar un diagnóstico de las condiciones actuales de riesgos por desabastecimiento de agua para consumo y riesgos por contaminación hídrica, así como la formulación de medidas de adaptación y reducción de los riesgos identificados en las áreas priorizadas según diagnóstico.

La cuenca hidrográfica río Piedras, río Manzanares y otros directos al Caribe (SZH 1501), se encuentra en el departamento de Magdalena, limitando con los departamentos de La Guajira al Nororiente, Cesar al oriente, Bolívar al suroccidente, Atlántico al occidente, y al norte con el océano Atlántico. Esta cuenca forma parte de la macro cuenca Caribe y abarca aproximadamente 92.799,45 hectáreas. Desde una perspectiva hidrográfica, la cuenca limita al norte con el océano Atlántico, al sur con las cuencas de los ríos Frío y Sevilla, al oeste con el océano Atlántico y al este con las cuencas de los ríos Guachaca, Mendiguaca y Buritaca.

Por otro lado, la cuenca Hidrográfica Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01), se encuentra situada en el departamento de Magdalena, limitando con el departamento del Atlántico y el río Magdalena al occidente; al norte con el mar Caribe, al sur y al oriente con municipios del mismo departamento del Magdalena. Esta cuenca forma parte de la macro cuenca Magdalena Cauca, y abarca una extensión total aproximada de 278.423,43 hectáreas. Sus límites hidrográficos son definidos por el océano Atlántico al norte, la cuenca Directos al Bajo Magdalena entre El Plato y Calamar (md) al sur, el río Magdalena al occidente con las cuencas Directos al Bajo Magdalena entre Calamar y la desembocadura al mar Caribe (mi), y al oriente por las cuencas Río Frío - Río Sevilla, Río Aracataca y Río Fundación.

**Figura 1 Ubicación de las cuencas de estudio.**

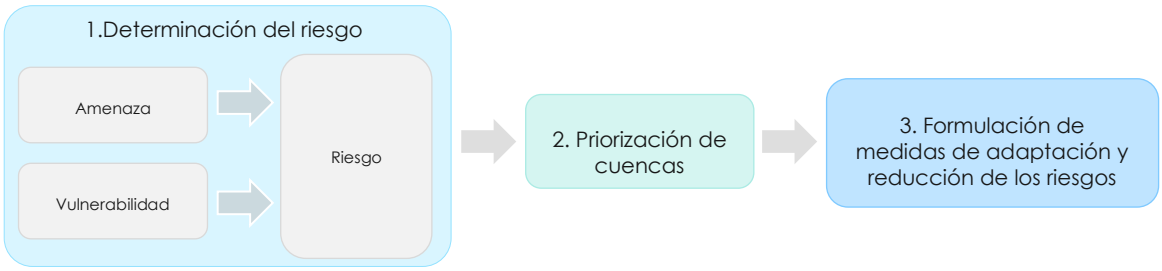



*Fuente: Elaboración propia*

# 4. METODOLOGÍA

Esta sección detalla los pasos que componen el proceso metodológico del presente estudio (ver Figura 2), los cuales aplican para el desabastecimiento de agua para consumo y la contaminación hídrica.

**Figura 2 Esquema del proceso metodológico.**




*Fuente: Elaboración propia*

## 4.1. Determinación del riesgo

### 4.1.1. Riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC)

La determinación del riesgo por desabastecimiento de agua para consumo en el río Piedras, río Manzanares y otros directos al caribe (SZH 1501) y el Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01), se realizó siguiendo la metodología desarrollada por Thomaz et al., (2023), la cual es adaptada al caso de estudio incorporando el sistema de indicadores ambientales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM.

De acuerdo con Thomaz et al., (2023), el riesgo por desabastecimiento de agua para consumo se construye a través de dos componentes principales, la amenaza y la vulnerabilidad. La amenaza está compuesta por una combinación de procesos atmosféricos y respuestas hidrológicas, reduciendo el agua disponible en lagos, ríos, embalses y/o suelo. La vulnerabilidad de un sistema refleja la exposición a los impactos ambientales, sociales y económicos de las sequías. El componente de vulnerabilidad también incluye la resiliencia, que es la capacidad de un sistema para adaptarse o recuperarse de un daño.

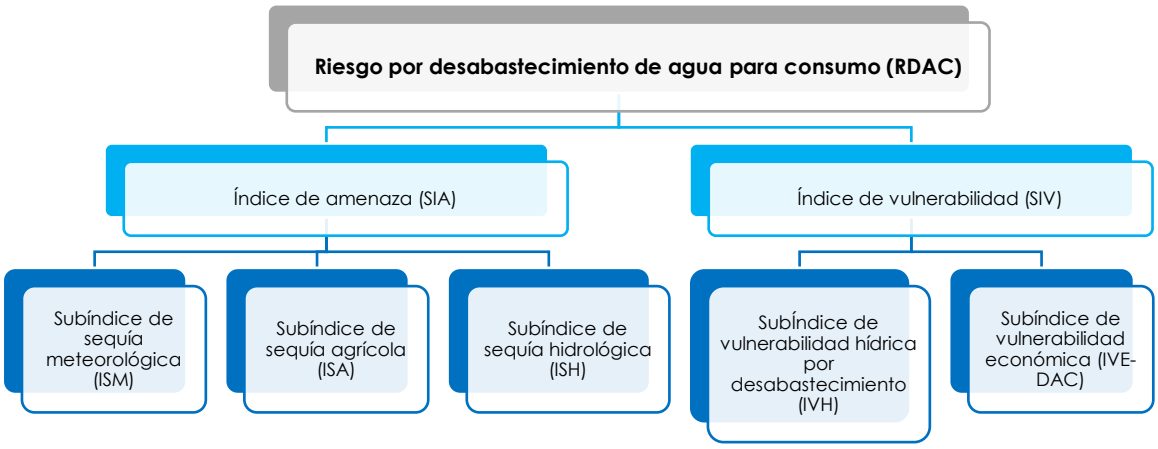
En este sentido, la determinación del riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC) se llevó a cabo a partir del producto ponderado entre el índice de amenaza por desabastecimiento de agua (SIA) y el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento de agua (SIV). Matemáticamente, este se expresa como:

$$RDAC = SIA^{wh} \times SIV^{wc}$$

Donde *wh* y *wc* son los pesos asociados a los índices de amenaza (SIA) y vulnerabilidad (SIV), respectivamente.

De acuerdo con Thomaz et al., (2023), los índices SIA y SIV están definido por un conjunto de subíndice. En la Figura 3 se presenta el conjunto de índices que definen el RDAC para las dos áreas de estudio.

**Figura 3 Metodología para la determinación del riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC).**




*Fuente: Adaptado de* Thomaz et al., (2023)

Cabe anotar que, los índice y subíndices se normalizaran en el rango de 0 a 1, donde el valor 0 del RDAC corresponde al riesgo mínimo (o la ausencia de riesgo) y un valor de 1del RDAC corresponde al riesgo máximo. Para esto, se utilizará un esquema de normalización lineal mediante la siguiente expresión (Juwana et al., 2012):

$$S_i = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}$$

Donde $S_i$ es el valor del índice o subíndice, $I_i$ es el valor real del índice o subíndice *i*, y $I_{min}$ y $I_{max}$ son los valores umbral mínimo y máximo del del índice o subíndice. La ecuación calcula el valor del del índice o subíndice en una escala de 0 a 1. La ecuación anterior se utiliza cuando $I_{min}$ es el valor menos preferido y $I_{max}$ es el valor más preferido. Si $I_{min}$ y $I_{max}$ son los valores más y menos preferidos respectivamente, la ecuación se modifica a (Juwana et al., 2012):

$$S_i = 1 - \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}$$

### 4.1.2. Riesgo por contaminación hídrica (RCH)

La determinación del riesgo por contaminación hídrica se realizó a partir de índices, los cuales corresponden a los sugeridos por el sistema de indicadores ambientales del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. El riesgo por contaminación hídrica se construye a través de dos componentes principales, la amenaza y la vulnerabilidad. La amenaza está compuesta por las amenazas potenciales por alteración de la calidad del recurso hídrico en las unidades de análisis. La vulnerabilidad de un sistema refleja la exposición a los impactos ambientales, sociales y económicos de la contaminación hídrica. El componente de vulnerabilidad también incluye la resiliencia, que es la capacidad de un sistema para adaptarse o recuperarse de un daño (Thomaz et al., 2023).

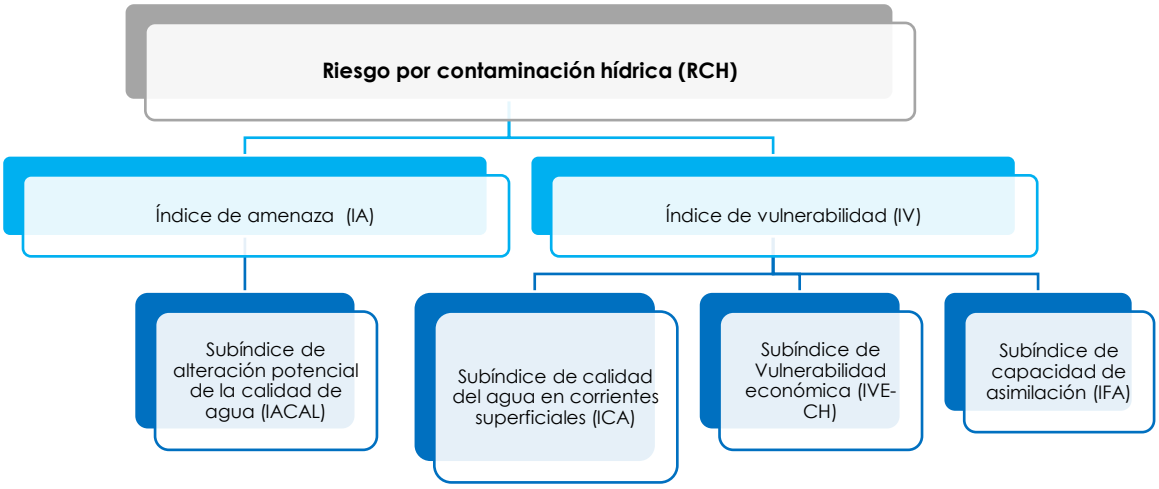
En este sentido, la determinación del riesgo por contaminación hídrica (RCH) se realizó a partir del producto ponderado entre el índice de amenaza por contaminación hídrica (IA) y el

índice de vulnerabilidad a la contaminación hídrica a (IV). Matemáticamente, este se expresa como:

$$RCH = IA^{wh} \times IV^{wc}$$

Donde *wh* y *wc* son los pesos asociados a los índices de amenaza (IA) y vulnerabilidad (IV), respectivamente. los índices IA y IV están definido por un conjunto de subíndice. En la Figura 4 se presenta el conjunto de índices que definen el RCH para el río Piedras, río Manzanares y otros directos al caribe (SZH 1501) y el Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01).

**Figura 4 Metodología para la determinación del riesgo por contaminación hídrica (RCH).**




*Fuente: Elaboración propia*

Cabe anotar que, los índice y subíndices se normalizaran en el rango de 0 a 1, donde el valor 0 del RCH corresponde al riesgo mínimo (o la ausencia de riesgo) y un valor de 1del RCH corresponde al riesgo máximo. Para esto, se utilizará un esquema de normalización lineal mediante la siguiente expresión (Juwana et al., 2012):

$$S_i = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}$$

Donde $S_i$ es el valor del índice o subíndice, $I_i$ es el valor real del índice o subíndice *i*, y $I_{min}$ y $I_{max}$ son los valores umbral mínimo y máximo del del índice o subíndice. La ecuación calcula el valor del del índice o subíndice en una escala de 0 a 1. La ecuación anterior se utiliza cuando $I_{min}$ es el valor menos preferido y $I_{max}$ es el valor más preferido. Si $I_{min}$ y $I_{max}$ son los valores más y menos preferidos respectivamente, la ecuación se modifica a (Juwana et al., 2012):

$$S_i = 1 - \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}$$

## 4.2. Áreas priorizadas

Las cuencas fueron clasificadas y priorizadas en función de su nivel de riesgo, con un enfoque especial en aquellas que presentan condiciones de muy alto riesgo. Los criterios utilizados

incluyen la magnitud de la vulnerabilidad, la intensidad de las amenazas y la importancia estratégica de las cuencas para el abastecimiento de agua.

## 4.3. Medidas de adaptación y reducción de los riesgos identificados

Para cada caso específico, se revisaron y desarrollaron estrategias de adaptación que pueden incluir no estructurales o de restauración de ecosistemas.

- Medidas No Estructurales: Promoción de prácticas de gestión sostenible del agua, como la conservación de cuencas y el uso eficiente del agua.
- Restauración de Ecosistemas: Iniciativas para restaurar y proteger ecosistemas clave que contribuyen a la regulación hídrica y a la mejora de la calidad del agua.

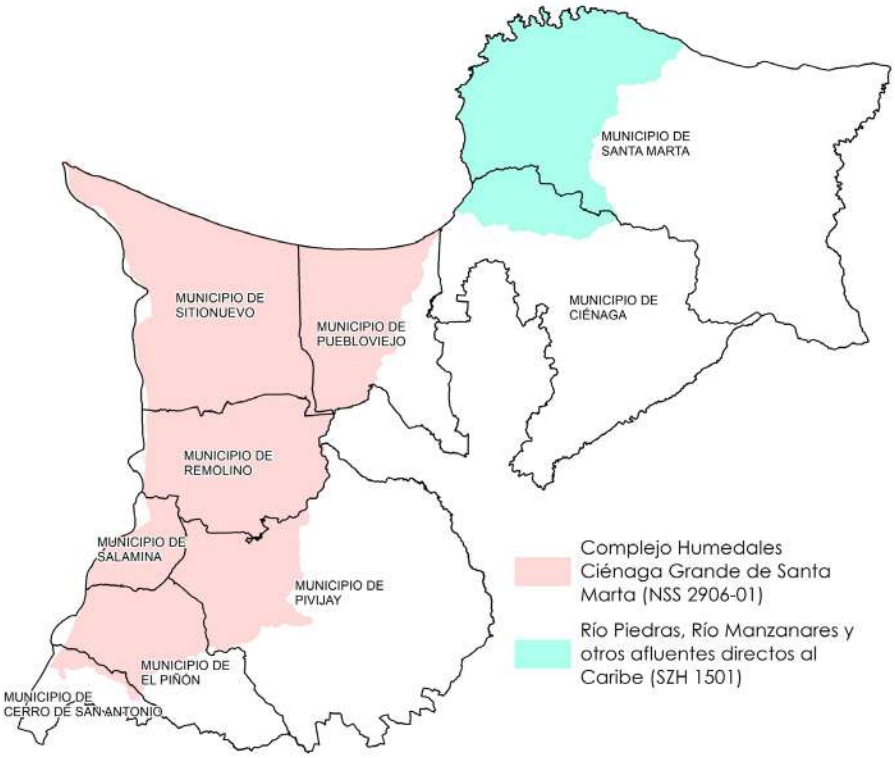
Además, se evaluó la participación de las comunidades locales en la planificación y ejecución de estas medidas. La participación comunitaria se promueve mediante programas de educación y sensibilización, con el objetivo de fomentar el uso sostenible del agua y la protección de los recursos hídricos.

Asimismo, se definieron indicadores que permitan evaluar la efectividad de las medidas, permitiendo el ajuste continuo de las estrategias de adaptación basado en los resultados de la evaluación.

# 5. RIESGO POR DESABASTECIMIENTO DE AGUA PARA CONSUMO

Este capítulo presenta el cálculo de la amenaza, vulnerabilidad y riesgo por desabastecimiento hídrico en las dos cuencas de estudio, detallando cada uno de los índices propuestos en la metodología de cálculo. Se revisaron los registros históricos de eventos de sequía presentados en los municipios que comprenden las cuencas de estudio (Figura 5). La revisión se llevó a cabo en diversas fuentes de información, tales como, las emergencias declaradas por la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres (UNGRD) y DesInventar de la Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED).

**Figura 5 Municipios en los que se ubican las cuencas de estudio.**




*Fuente: Elaboración propia*

En el consolidado generado por la UNGRD se tiene información de las emergencias por sequía ocurridas en el departamento del Magdalena y específicamente en alguno de los municipios que comprenden las cuencas de estudio. Entre el año 1998 y el año 2023, la UNGRD reporta eventos de sequía que generaron emergencias en los años 2013, 2014, 2016 y 2019, los cuales se resumen en la línea de tiempo de la Figura 6.

**Figura 6 Emergencias por sequía reportadas por la UNGRD (1998-2023).**




*Fuente: Elaboración propia*

En términos generales, los reportes de emergencias de la UNGRD indican la ocurrencia de 11 eventos de sequía. La Tabla 1 presenta los detalla las emergencias por sequía registradas.

**Tabla 1 Emergencias por sequía - UNGRD.**

| Fecha | Municipio | Afectación | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Personas | Familias | |
| 28-feb-13 | Departamento | | | Apoyo del FNGRD para desarrollar acciones para atender las afectaciones producidas por desabastecimiento de agua para el consumo humano producto de la temporada seca declarada en calamidad pública mediante resolución 055 del 26 de febrero de 2013 |
| 27-mar-14 | Santa Marta | 3'950 | 790 | En el año en curso, se viene presentando en el distrito de santa marta, una emergencia natural producto de la escasez de lluvias en la región, deviniendo en el desabastecimiento de agua potable y generando múltiples solicitudes de apoyo de las empresas prestadoras de servicios públicos y en general de la población. Afectación en los corregimientos de Minca, Bonda, Guachaca y los municipios de; Don Jaca, Altos De Don Jaca, Tigrera, Puerto Mosquito, Masinga, Paso Del Mango, El Boqueron, Los Limones, San Isidro, Paramo De San Isidro, Girocasaca, Transjordania, Nuevo Mexico, Colinas De Calabazo, Calabazo, La Esmeralda, Trompito Bajo, Los Naranjos, Orinoco, Los Cocos, Mendihuca, La Unión, Quebrada Valencia, Quebrada El Platano, Buritaca, Quebrada Maria, Los Linderos, Quebrada El Sol, Paz Del Caribe, Guacoche, Don Diego, Alto Don Diego, Quebrada La Línea, Casa De Tabla, El Mamei, Honduras, Marquetalia y Palominito. 790 fincas afectadas. |

| Fecha | Municipio | Afectación | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Personas | Familias | |
| | | | | Apoyo del FNGRD mediante transferencia económica de acuerdo a la calamidad pública no 034 del 27 de marzo de 2014 del distrito de santa marta, para gastos administrativos y logísticos, debido a la temporada seca y el desabastecimiento de agua en la ciudad de santa marta.<br>Se estiman 9522 familias beneficiadas con el suministro de agua<br>Agua y saneamiento: el valor de otros corresponde a; convenio (9677-04-238-2014) para la transferencia de recursos y en desarrollo de lo dispuesto en el artículo 80 de la ley 1523 de 2012, el fondo nacional de gestión del riesgo de desastres, transferirá a la dirección general de la defensa civil colombiana, unidad ejecutora de acuerdo con lo establecido en el artículo 66 de la ley 1523 de 2012, recursos para la atención del desabastecimiento de agua en el distrito de santa marta y fortalecimiento de la capacidad operativa y administrativa de la defensa civil colombiana para la atención de la emergencia, de acuerdo con el plan de acción de la declaratoria de calamidad pública, del distrito turístico, cultural e histórico de santa marta. (a.p. 14-0334, 14-0377, 14-0598, 14-0628)<br>Agua y saneamiento: el valor de otros corresponde a; convenio (9677-04-250-2014) para aunar esfuerzos entre la sociedad nacional de la cruz roja colombiana y el fondo nacional de gestión del riesgo de desastres - fiduciaria la previsora sa- para brindar apoyo administrativo y logístico en la operación de cinto (5) plantas potabilizadoras de agua, con el fin de dar respuesta a las personas afectadas por la emergencia producto del desabastecimiento de agua potable en la ciudad de santa marta dcth, departamento del magdalena. (a.p. 14-0368)<br>Agua y saneamiento: contrato de alquiler de carro tanques para el suministro de agua potable en la ciudad de santa marta debido a la temporada seca. ($4.120'320.000). (a.p. 14-0485 y 14-0756) |
| 21-jul-14 | Sitionuevo | | | Debido a la falta de lluvias y al fuerte verano, el municipio de Sitionuevo ha generado la declaratoria de emergencia y de desabastecimiento de agua. Debido a esto la siembra de cultivos está muriendo debido a la falta de riego, además los caños jaguey y las ciénagas están totalmente secas y como |

| Fecha | Municipio | Afectación | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Personas | Familias | |
| | | | | consecuencia los animales están muriendo por la falta de líquido. |
| 1-ago-14 | Departamento | | | Se declara calamidad pública en diferentes municipios del departamento de magdalena debido a la sequía por falta de lluvias y altas temperaturas, causando afectaciones en las familias tanto en sus cultivos y animales, debido al desabastecimiento de agua.<br>Agua y saneamiento: el valor de otros corresponde a contrato de suministro de carrotanques para transporte de agua para apoyar las declaratorias de emergencia decretadas en el departamento de magdalena. ($997'236.000) (a.p. 14-0756)<br>El valor de otros corresponde a 2000 toneladas de comida para ganado. ($430'396.638 ap: 14-0873) ($437'966.161,5 ap: 14-0874) ($867'650,000 a.p. 14-1029) |
| 16-feb-16 | Santa Marta | | | Desde el año 2014 se ha venido presentando escasez de agua en la ciudad de santa marta debido a las condiciones meteorológicas ocasionando falta de lluvias y como consecuencia desabastecimiento de agua, fenómeno que se ha venido incrementando por el fenómeno de el niño, tal que a la fecha se sigue presentando el mismo problema de desabastecimiento de agua, por lo cual se ha venido declarando calamidad pública en la ciudad de santa marta en el departamento de magdalena.<br>El valor de otros corresponde a suministro de carrotanques para abastecimiento de agua potable en el municipio de santa marta departamento de magdalena temporada seca ($1.522'500.000 a.p.16-0321, $1.522'500.000 a.p 16-0322. Y $1.522'500.000 a.p. 16-0324) y realizar interventoría técnica administrativa y financiera al suministro de carrotanques para apoyar la declaratoria de calamidad pública en el municipio de santa marta departamento de magdalena ($91'350.000 a.p. 16-0320, $91'350.000 a.p. 16-0323 y $91'350.000 a.p. 16-0325)<br>El valor de otros corresponde a alquiler de 8 carrotanques más para suministro de agua por 15 días ($174'000.000 a.p.16-0532) y seguimiento y control de los mismos ($10'440.000 a.p.16-0533). Cuarta fase. |
| 16-feb-16 | Departamento | 14 | 9 | Debido al fenómeno de el niño, durante los años 2015 y lo que lleva del 2016, el departamento de magdalena se ha venido afectando en cuanto desabastecimiento de |

| Fecha | Municipio | Afectación | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Personas | Familias | |
| | | | | agua y racionamiento de la misma debido a los bajos niveles de los ríos y quebradas del departamento. afectación en los municipios de; Algarrobo, Aracataca, Ariguani, Cerro De San Antonio, Concordia, Ciénaga, Chibolo, El Banco, El Piñón, Guamal, Fundación, Nueva Granada, Pedraza, Pivijay, Pijiño Del Carmen, Plato, Pueblo Viejo, Remolino, Salamina, San Angel, San Sebastian, Santa Ana, San Zenon, Santa Barbara De Pinto, Sitionuevo, Tenerife y Zapayan, dichos municipios vienen afectados desde el 2015 y hoy en día tienen calamidad pública.<br>El valor de otros corresponde a 32 tanques de 5000 lts y 10 tanques de 10000 lts. ($113'577.920 a.p.16-0396)<br>El valor de otros corresponde a 20 tanques de 5000 litros y 5 tanques de 10000 litros. ($65'470.400 a.p.16-0395)<br>El valor de otros corresponde a suministro de 11 carrotanques para abastecimiento de agua potable por 30 días en el departamento de magdalena temporada seca. ($478'500.000 a.p.16-0280) y seguimiento y control ($28'710.000 a.p.16-0282).<br>El valor de otros corresponde a alquiler de 10 carrotanques para suministro de agua por 30 días ($435'000.000 a.p.16-0280) y seguimiento y control de los mismos ($26'100.000 a.p.16-0282).<br>El valor de otros corresponde a alquiler de 21 carrotanques para suministro de agua por 15 días más ($456'750.000 a.p.16-0514) y seguimiento y control de los mismos ($27'405.000 a.p.16-0513). Etapa 2<br>El valor de otros corresponde a alquiler de 21 carrotanques para suministro de agua por 15 días más ($456'750.000 a.p.16-0528) y seguimiento y control de los mismos ($27'405.000 a.p.16-0529). Etapa 3 |
| 8-ago-16 | Santa Marta | | | CDGRD Magdalena informa que en el municipio de santa marta en la ciénaga grande de santa marta reportan muerte masiva de peces de la ciénaga, que genera preocupación y contaminación, causas por establecer, atiende comunidad y CMGRD situación en desarrollo. -588<br>Debido al fuerte periodo de sequía (fenómeno de el niño 2015-2016) limito el ingreso de agua dulce al sistema a través de los ríos, caños y drenajes. Los bajos niveles de la columna de agua favorecieron el incremento de material particulado en suspensión y tanto actividades |

| Fecha | Municipio | Afectación | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Personas | Familias | |
| | | | | antropogénicas , como procesos internos en la interface agua-sedimentos favoreciendo el incremento de la concentración de nutrientes, así mismo la ausencia de flujo hídrico al interior de la ciénaga grande generaron en los últimos dos meses afectaciones ambientales y por ende en los recursos (manglares y pesqueros) reflejándose en la mortandad de las de veinte toneladas de peces y gran pérdida de cobertura manglar, así como el detrimento en la abundancia de los recursos pesqueros, causando un grave problema ecológico, social y ambiental. Geográficamente la ecorregión ciénaga grande comprende 13 municipios; Sitio Nuevo, Pueblo Viejo, Remolino, El Retén, Salamina, Zona Bananera, Pivijay, Ciénaga, Aracataca, El Piñón, Fundación, Concordia y Cerro De San Antonio, adicionalmente en el complejo pajarales se encuentran las comunidades palafíticas de Buenavista y nueva Venecia. |
| 8-ago-16 | Sitionuevo | 4'065 | 813 | Debido al fuerte periodo de sequía (fenómeno de el niño 2015-2016) limito el ingreso de agua dulce al sistema a través de los ríos, caños y drenajes. Los bajos niveles de la columna de agua favorecieron el incremento de material particulado en suspensión y tanto actividades antropogénicas , como procesos internos en la interface agua-sedimentos favoreciendo el incremento de la concentración de nutrientes, así mismo la ausencia de flujo hídrico al interior de la ciénaga grande generaron en los últimos dos meses afectaciones ambientales y por ende en los recursos (manglares y pesqueros) reflejándose en la mortandad de las de veinte toneladas de peces y gran pérdida de cobertura manglar, así como el detrimento en la abundancia de los recursos pesqueros, causando un grave problema ecológico, social y ambiental. Geográficamente la ecorregión ciénaga grande comprende 13 municipios; Sitio Nuevo, Pueblo Viejo, Remolino, El Reten, Salamina, Zona Bananera, Pivijay, Ciénaga, Aracataca, El Piñón, Fundación, Concordia y Cerro De San Antonio, adicionalmente en el complejo pajarales se encuentran las comunidades palafíticas de Buenavista y nueva Venecia. Afectadas 813 familias pescadoras. |
| 8-ago-16 | Puebloviejo | 200 | 40 | Debido al fuerte periodo de sequía (fenómeno de el niño 2015-2016) limito el ingreso de agua dulce al sistema a través de los ríos, caños y drenajes. Los bajos niveles de la columna de |

| Fecha | Municipio | Afectación | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Personas | Familias | |
| | | | | agua favorecieron el incremento de material particulado en suspensión y tanto actividades antropogénicas , como procesos internos en la interface agua-sedimentos favoreciendo el incremento de la concentración de nutrientes, así mismo la ausencia de flujo hídrico al interior de la ciénaga grande generaron en los últimos dos meses afectaciones ambientales y por ende en los recursos (manglares y pesqueros) reflejándose en la mortandad de las de veinte toneladas de peces y gran pérdida de cobertura manglar, así como el detrimento en la abundancia de los recursos pesqueros, causando un grave problema ecológico, social y ambiental. Geográficamente la ecorregión ciénaga grande comprende 13 municipios; Sitio Nuevo, Pueblo Viejo, Remolino, El Retén, Salamina, zona bananera, Pivijay, Ciénaga, Aracataca, El Piñón, Fundación, Concordia y Cerro De San Antonio, adicionalmente en el complejo pajarales se encuentran las comunidades palafíticas de Buenavista y nueva Venecia. Afectadas 40 familias pescadoras. |
| 8-ago-16 | Cerro de San Antonio | 2000 | 400 | Debido al fuerte periodo de sequía (fenómeno de el niño 2015-2016) limito el ingreso de agua dulce al sistema a través de los ríos, caños y drenajes. Los bajos niveles de la columna de agua favorecieron el incremento de material particulado en suspensión y tanto actividades antropogénicas , como procesos internos en la interface agua-sedimentos favoreciendo el incremento de la concentración de nutrientes, asi mismo la ausencia de flujo hídrico al interior de la ciénaga grande generaron en los últimos dos meses afectaciones ambientales y por ende en los recursos (manglares y pesqueros) reflejándose en la mortandad de las de veinte toneladas de peces y gran pérdida de cobertura manglar, asi como el detrimento en la abundancia de los recursos pesqueros, causando un grave problema ecológico, social y ambiental. Geográficamente la ecorregión ciénaga grande comprende 13 municipios; Sitio Nuevo, Pueblo Viejo, Remolino, El Retén, Salamina, Zona Bananera, Pivijay, Ciénaga, Aracataca, El Piñón, Fundación, Concordia y Cerro De San Antonio., adicionalmente en el complejo pajarales se encuentran las comunidades palafíticas de Buenavista y Nueva Venecia. Afectadas 400 familias pescadoras. |

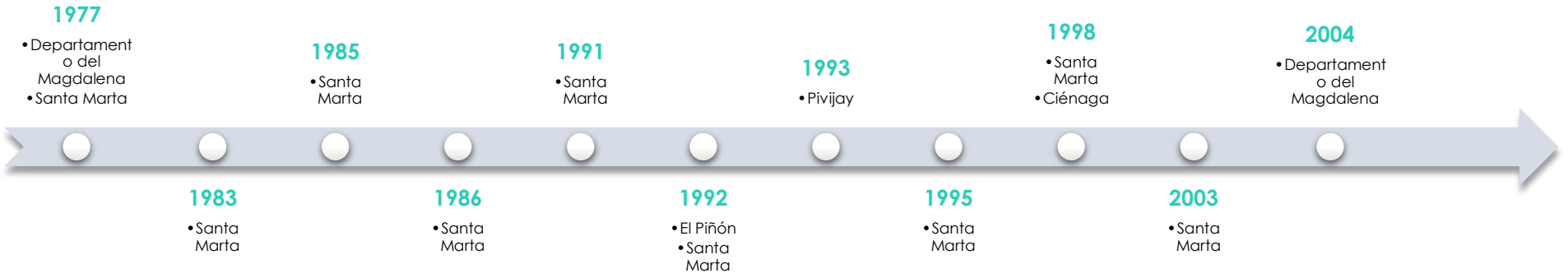
| Fecha | Municipio | Afectación | | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | Personas | Familias | |
| 15-abr-19 | Santa Marta | | | Decreto 082 del 15 de abril de 2019 por el cual se declara calamidad pública en el distrito de santa marta, menciona en el considerando que en el año en curso, se viene presentando una emergencia natural producto de la escasez de lluvias en la región, deviniendo en el desabastecimiento de agua potable y generando múltiples solicitudes de apoyo de las empresas prestadoras de servicio público y en general la población, que el consejo distrital de santa marta en acta del 12 de abril de 2019 manifestó su preocupación frente al desabastecimiento de líquido vital, en dicha acta se emite concepto favorable para realizar la declaratoria; en informe del plan de acción desarrollado por el CMGRD de santa marta se evidencia, que el número de carrotanques en operación es de 60, operados por Cruz Roja, ESSMAR, Alcaldía, Ecopetrol, al día 13 de mayo se cuenta con 25 días de operación, 163 barrios atendidos, 3940 viajes realizados y47.276.000 litros de agua entregados, adicionalmente se tienen 18 tanques de 1000 litros ubicados estratégicamente -365<br>29/05/2019 se aprueban dos otro sí para el convenio 9677-ppal001-808-2018 celebrado con la cruz roja para abastecimiento de agua por valor de $1.252.000.000 |

*Fuente: Elaboración propia*[1]

Por otra parte, La Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina (LA RED) desarrolló un sistema para la adquisición, consulta y despliegue de información sobre desastres de pequeños, medianos y grandes impactos. Este sistema, basado en datos preexistentes, fuentes hemerográficas y reportes de instituciones en nueve países de América Latina, se denomina Sistema de Inventario de Desastres (DesInventar). La revisión de la base de datos de DesInventar abarca eventos reportados desde 1977 hasta 2012, excluyendo aquellos informados por la UNGRD. En la Figura 7 se muestran los eventos de sequía a lo largo del tiempo, destacando Santa Marta como la ciudad con la mayor cantidad de eventos reportados. Según la información de DesInventar, se registran un total de 15 eventos de sequía.

[1] https://portal.gestiondelriesgo.gov.co/Paginas/Consolidado-Atencion-de-Emergencias.aspx

**Figura 7 Emergencias por sequía reportadas por DesInventar (1977-2012).**




*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 2 Emergencias por sequía – DesInventar.**

| Fecha | Municipio | Afectados indirectamente | Daños en cultivos Ha. | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| 11/01/1977 | | | | Asimismo gran cantidad de barcos permanecen varados en las playas que se ha formado en numerosos sectores del río mientras que la movilización de embarcaciones menores con motor fuera de borda especialmente entre Barracabermeja y Puerto Berrio también se ha tornado difícil. |
| 13/01/1977 | Santa Marta | | | Esta ciudad estuvo sometida hoy a rigurosos racionamientos de energía. El control lo ejerce la electrificadora del Magdalena desde hace una semana causando perjuicios a la industria turística local. |
| 17/01/1977 | | | | Los puertos del Bajo Magdalena como San Pablo Wilches Morales Gamarra La Gloria están secos y hay que caminar un tramo a pie entre la playa para llegar al caudal del río. En algunos de ellos el Magdalena se alejó más de un Km. |
| 7/04/1983 | Santa Marta | | | La ciudad sigue sin carne de res por acción del verano que azota a la región cuyas incidencias se han hecho sentir en distintos puntos de la costa atlántica. El problema radica en que por la fuerte sequía el ganado pierde peso y compensa con los precios que fijan los ganaderos. En otros municipios el problema es más delicado por que la agricultura y ganadería están amenazados por la falta de lluvias. En fundación la situación es mala debido a que este año no ha caído el primer aguacero por consiguiente los cultivos y producciones mayores han entrado en decadencia. La ganadería esta atrofiada y no hay fuentes de agua por lo cual las reses mueren en las travesías que tienen que hacer en busca del preciado líquido. los caños acequias y ríos están secos. |
| 10/07/1985 | Santa Marta | | | La escasez de agua en la ciudad se acentúo en las últimas 24 horas en momentos en que está en pleno apogeo la temporada de turismo de mitad de año. El problema se agrava en |

| Fecha | Municipio | Afectados indirectamente | Daños en cultivos Ha. | Observaciones |
|---|---|---|---|---|
| | | | | virtud de que cada día merma el suministro porque el caudal del río Manzanares en el sector del Paso del Mango donde se surte el acueducto disminuye rápidamente por efectos del intenso verano que se registra en toda la región. El acueducto produce en condiciones normales de 450 litros por segunda pero actualmente no queda ni a los 150 litros. |
| 17/05/1986 | Santa Marta | | | Las fallas en el suministro de agua potable se han incrementado en la presente semana por efecto del notorio descenso del caudal del río Manzanares del cual se surte el acueducto local para abastecer una parte de la población mientras la capacidad de algunos pozos ha disminuido. El problema ocasionar una aguda escasez del líquido en los barrios Galicia Santa Fé Urbanización del Río Avenida del Río Juan XXIII Taminaka Los Angeles Alambique Primero de Mayo y Maria Eugenia. |
| 15/06/1991 | Santa Marta | 250000 | | No hay bombeo del agua por el bajo caudal del rio en especial en los barrios populares. Bajo caudal del rio Manzanares. |
| 30/01/1992 | El Piñon | | | Se han destruidos sembrados de ajonjolí yuca maíz y sorgo debido al desnivel de agua de la Ciénaga Pivijay. |
| 15/02/1992 | Santa Marta | | | La ciudad se ha visto sometida a drásticos racionamientos de agua y energía debido a la extinción del río Manzanares. Todos los sectores han parado sus actividades. |
| 28/03/1993 | Pivijay | | | Se secó el Caño Schiller que surte de agua al municipio. Ha sido necesario traer de Barranquilla el agua en carrotanques. |
| 14/03/1995 | Santa Marta | | | Debido al bajo caudal del embalse que abastece el acueducto local se están presentando racionamientos de seis y doce horas diarias en diferentes sectores de la ciudad. (1995-04-18) El inclemente verano que azota la Costa Atlántica no da tregua a las fuentes de captación del acueducto de Santa Marta han bajado su producción hasta en un 50 por ciento por lo tanto la compañía de acueducto y alcantarillado Metropolitana -Metroagua S.A.- racionara el servicio hasta por doce horas en algunos sectores. El acueducto tiene un déficit de 300 litros por segundo lo que ha motivado la aceleración de la construcción de los 8 pozos profundos que ayudarían a solventar la carencia de agua. |
| 21/01/1998 | Santa Marta | | | Se han secado fuentes que abastecen poblaciones pequeñas como Quebrada La Aguja en Ciénaga Don Jaca Mojada y Tamaca en Santa Marta Mapale en Guamal y el Río Ariguaní. Racionamiento por que se está secando la quebrada Tamaca |
| 21/01/1998 | Ciénaga | | | Se han secado fuentes que abastecen poblaciones pequeñas como Quebrada La Aguja en Ciénaga Don Jaca Mojada y Tamaca en Santa Marta Mapale en Guamal y el Río Ariguaní. Racionamiento se ha secado la Quebrada La Aguja. |
| 15/01/2003 | Santa Marta | | | Los peces están muriendo por la alta temperatura del agua originada por el verano. |
| 1/07/2004 | | | 750 | Solicitan equipo para henificar. Se remite al CREPAD para evaluar la situación. |

*Fuente: Elaboración propia*[2]

[2] https://www.desinventar.net/DesInventar/

## 5.1. Amenaza por desabastecimiento de agua para consumo

El capítulo aborda el cálculo de los subíndices que conforman el Índice de Amenaza por Desabastecimiento de Agua para Consumo (SIA), incluyendo los datos utilizados, el proceso de cálculo y los resultados obtenidos.

### 5.1.1. Subíndice de sequía meteorológica (ISM)

El subíndice de sequía meteorológica (ISM) se representa a través del Índice de Precipitación Estandarizado (SPI). El SPI consiste en la diferencia entre la precipitación medida y la precipitación promedio histórica (durante un período de tiempo determinado) dividida por la desviación estándar.

#### *5.1.1.1. Precipitación*

Los análisis de la variable de precipitación se desarrollaron empleando los siguientes pasos metodológicos, teniendo en cuenta la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM No 168 (WMO, 2011), la Guía de prácticas metrológicas No 5.2 y los estándares de calidad aplicables para Colombia. Para esto se realizó el análisis de consistencia y homogeneidad de la información a una resolución diaria. El procedimiento aplicado propende por la obtención de la mejor calidad en la información.

- *Identificación de valores anómalos*

La detección de datos anómalos se realizó por medio de cuatro metodologías, la prueba de Grubbs, GESD, test de Tukey y la prueba de dobles desviaciones absolutas de la mediana. Un dato se considera como valor anómalo si es detectado por los cuatro métodos que se describen a continuación:

- **Prueba de Grubbs**

Este método fue desarrollado por (Grubbs, 1969) y es conocido como el método ESD (Extreme Studentized Deviate), es usado para detectar valores atípicos en un conjunto univariante y se basa en el supuesto de normalidad. El estadístico se determina mediante la siguiente ecuación.

$$\Gamma = \frac{\max|x_i - \bar{x}|}{\sigma}$$

Donde:
$\Gamma$: Estadístico de Grubbs
$x_i$: Observación "i"
$\bar{x}$: Promedio de las observaciones
$\sigma$: Desviación estándar de la muestra

Cuando se realiza un análisis de distribución de dos colas el Estadístico de Grubbs se evalúa para valores máximos (cola derecha) como:

$$\Gamma = \frac{x_{max} - \bar{x}}{\sigma}$$

Y para valores mínimos (cola izquierda) como:

$$\Gamma = \frac{\bar{x} - x_{min}}{\sigma}$$

Donde:
$x_{max}$: Valor máximo de las observaciones
$x_{min}$: Valor mínimo de las observaciones

$$\Gamma < \frac{(\eta - 1)}{\sqrt{\eta}} \sqrt{\frac{(t_{(\alpha/2\eta),\eta-2})^2}{\eta - 2 + (t_{(\alpha/2\eta),\eta-2})^2}}$$

Donde:
$\eta$: Número de datos
$t_{(\alpha/2\eta),\eta-2}$: Valor crítico de la distribución de $t_{student}$ con $\eta - 2$ grados de libertad y nivel de significancia $\alpha/2\eta$

Grubbs (1969) afirma que la prueba estadística se puede usar para respaldar el juicio de que realmente existe una razón física para un valor atípico, o el criterio estadístico se puede usar de manera rutinaria como base para iniciar una acción para encontrar una causa física.

- **Prueba de GESD**

GESD (Generalized Extreme Studentized Deviate) es un método estadístico utilizado para detectar valores atípicos en un conjunto de datos univariados (Rosner, 1983). Esta prueba es especialmente útil cuando se desconoce el número de valores atípicos en el conjunto de datos. A continuación, se describe paso a paso cómo funciona la prueba GESD (Rosner, 1983).

Se definen los parámetros:

$\alpha$ Nivel de significancia (comúnmente 0,05)

$n$ Número de puntos de datos

$k$ Número máximo de valores atípicos que se desean detectar

Luego se calcula la media $\bar{x}$ y la desviación estándar $s$ del conjunto de datos. Para cada posible valor atípico desde $i = 1$ hasta $k$ se calcula el estadístico de prueba para cada punto de datos $x_i$

$$R_i = \frac{|x_i - \bar{x}|}{s}$$

Luego se identifica el punto de datos con el valor $R_i$ más grande, denominado como $R_{max}$ y al punto de datos correspondientes $x_{max}$, el cual se elimina del conjunto de datos. Se recalcula la media $\bar{x}$ y la desviación estándar $s$ del conjunto de datos reducido.

Para cada $i$ desde 1 hasta $k$, se calcula el valor crítico $\lambda_i$ usando:

$$\lambda_i = \frac{(n-i)\, t_{(\alpha/2(n-i+1),n-i-1)}}{\sqrt{(n-i-1+t^2_{(\alpha/2(n-i+1),n-i-1))}\,(n-i+1)}}$$

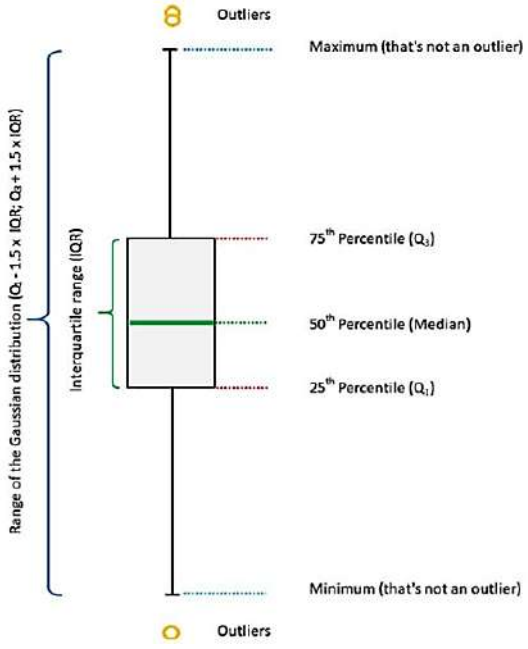
Donde $t_{(\alpha/2(n-i+1),n-i-1)}$ es el valor crítico de la distribución $t$ de Student con $n-i-1$ grados de libertad.

Se compara cada $R_i$ con el correspondiente $\lambda_i$. Si $R_i > \lambda_i$ para algún $i$, el punto de datos asociado con $R_i$ se considera un valor atípico por este método.

- **Prueba de Tukey**

El método de Tukey se basa en el rango intercuartílico (IQR), mediante una representación por el diagrama de caja y bigotes, también conocido como box-plot, con el objeto de que los datos del conjunto analizado no pierdan su distribución espacial (Pum, 2019). Esta herramienta de análisis exploratorio permite estudiar la simetría de los datos y detectar los valores anómalos en la información que se esté analizando (ver Figura 8).

**Figura 8 Definición de valores anómalos según Tukey.**




*Fuente:* (Pum, 2019)

Según esta prueba, se considera valores atípicos a cualquier dato que se encuentre fuera del intervalo (Q1–1.5 IQR; Q3 + 1.5 IQR). Donde, IQR es la diferencia entre el percentil 75 (Q3) y el percentil 25 (Q1) (ver Figura 8).

- **Prueba de dobles desviaciones absolutas de la mediana (MAD)**

La mediana es una medida de tendencia central que es muy insensible a la presencia de valores atípicos. El punto de ruptura es un indicador de esta insensibilidad y hace referencia a

la proporción máxima de observaciones que pueden establecerse en infinito. Con un punto de ruptura de 0.5, la mediana tiene el punto de ruptura más alto (Leys et al., 2013). Para determinar los valores anómalos con la prueba MAD, se estima la mediana de las observaciones y se divide la muestra en dos grupos de datos, con los cuales se procede a realizar la prueba de MAD de manera independiente. En base al valor de corte se determina que datos pueden ser anómalos.

$$MAD = mediana(|X_i - \tilde{X}|)$$

Donde:

$X_i$ Observación "i"

$\tilde{X}$ Mediana de todas las observaciones (percentil 50 empírico)

- *Análisis de consistencia*

Posterior al análisis de datos anómalos, se aplicó una prueba de completitud de los datos, donde se considera la longitud esperada y observada de la serie. Se consideró que el periodo efectivo de registro de la serie no puede ser inferior a 10 años. Adicionalmente, se incluyó un criterio de un porcentaje de datos faltantes inferior al 20 %. Para aprobar el análisis de completitud la serie debe cumplir con los dos criterios simultáneamente.

- *Complementación de datos faltantes*

La complementación de datos faltantes se lleva a cabo mediante la metodología de Distancia Inversa Ponderada (IDW). El IDW es un método matemático de interpolación que usa una función inversa de la distancia, parte del supuesto que las cosas que están más cerca son más parecidas, por lo tanto, tienen más peso e influencia sobre el punto a estimar (Cañada R., Cervera B., Moreno, 2008). Otra definición con gran aceptación consiste en que el método IDW combina el concepto de vecindad entre sitios con disponibilidad de datos con un cambio gradual de las superficies definidas con una tendencia. Se supone que el valor del atributo Z en una posición donde el valor del atributo no es conocido es un promedio de los valores de sus vecinos, pero donde los vecinos más cercanos tienen más peso o importancia que los más alejados (FAO, 2003). Matemáticamente se expresa como:

$$Z*(x) = \sum_{i=1}^{n} (\lambda i \times Z(x)_i)$$

Dónde:

$Z*(x)$ Valor Estimado de la Variable

$Z(x)_i$ Valor de la variable en el punto conocido i

$\lambda i$ Peso de la Estación i

$n$ Número de estaciones vecinas

Los pesos se calculan en función de la distancia entre las estaciones y el punto a interpolar, de la siguiente forma:

$$\lambda i = \frac{\frac{1}{dij^{\beta}}}{\sum_{i=1}^{n} * \frac{1}{dij^{\beta}}}$$

Dónde:

| | |
|---|---|
| $\lambda i$ | Peso de la Estación i |
| $dij^{\beta}$ | Distancia geométrica entre la estación y el punto a interpolar |
| $\beta$ | Coeficiente de ponderación |

$\beta$ es un factor de reducción de peso, cuyo valor se encuentra minimizando el error cuadrático medio o error de predicción. Mientras más alto el valor de $\beta$, el peso de las estaciones más cercanas cera mayor.

- *Homogeneidad*

Se aplicó la metodología de curvas de masa para todas las variables de interés. La gráfica de curva de masa en un determinado periodo de tiempo se compone en las abscisas de los valores del tiempo (años) y en las ordenadas de la variable. La pendiente de la recta trazada entre los puntos extremos de la curva de masa permite identificar las fluctuaciones existentes y posibles inconstancias asociadas a errores de medición, vacíos de información o traslado de la estación, entre otros factores. Asimismo, está pendiente positiva evidencia en las tendencias lineales sin cambios importantes en la pendiente una consistencia en los datos.

#### 5.1.1.1.1. Red de monitoreo de la precipitación

Las redes de monitoreo hidroclimatológicas son un conjunto de estaciones que registran de manera continua (en el tiempo) variables ambientales (como la precipitación). Las estaciones identificadas que registran la precipitación, según las categorías del IDEAM son: pluviométrica, pluviográfica, climatológica ordinaria, climatológica principal, agrometeorológica, sinóptica principal y meteorológica especial. El IDEAM en su página web[3] describe las estaciones denominadas por cada una de estas categorías.

En total se identificaron 142 estaciones de monitoreo de la variable meteorológica de precipitación a nivel regional (ver Tabla 3). La Figura 9 muestra la ubicación de las estaciones con respecto a las dos áreas de estudio. En el Anexo 1. Datos Nativos se presenta la información de precipitación diaria registrada por la red de monitoreo climatológica.

[3] http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario

**Tabla 3 Estaciones con registros de precipitación.**

| Nombre | Código | Municipio | Departamento | Categoría | Elevación | Coordenadas origen nacional | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| Piojo | 14010010 | Piojó | Atlántico | Pluviográfica | 320 | 4769565,72 | 2746271,88 |
| Hibacharo | 14010020 | Piojó | Atlántico | Pluviométrica | 80 | 4766032,27 | 2743617,29 |
| Porvenir El | 14010090 | Piojó | Atlántico | Pluviométrica | 40 | 4763598,77 | 2742343,93 |
| Pintada La | 14010100 | Tubará | Atlántico | Pluviométrica | 200 | 4782071,72 | 2769302,23 |
| Minca | 15010010 | Santa Marta | Magdalena | Pluviométrica | 640 | 4877747,03 | 2789339,13 |
| Buritaca | 15010020 | Santa Marta | Magdalena | Pluviométrica | 30 | 4916558,10 | 2801297,24 |
| Vista Nieves | 15010040 | Santa Marta | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4882106,58 | 2783190,67 |
| Cienaga Grande | 15010050 | Ciénaga | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4863489,73 | 2773826,55 |
| Jirocasaca | 15010130 | Santa Marta | Magdalena | Pluviométrica | 710 | 4887173,22 | 2779263,72 |
| Guachaca | 15010300 | Santa Marta | Magdalena | Pluviográfica | 45 | 4908712,74 | 2802010,42 |
| Filo Cartagena | 15010310 | Santa Marta | Magdalena | Pluviométrica | 750 | 4907948,19 | 2784756,16 |
| Ideam Santa Marta | 15010501 | Santa Marta | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4871241,96 | 2798361,99 |
| Centro Agro Sena | 15015010 | Santa Marta | Magdalena | Climática Ordinaria | 7 | 4870866,60 | 2797749,32 |
| Ye La | 15015020 | Ciénaga | Magdalena | Climática Ordinaria | 20 | 4867730,90 | 2772970,82 |
| Punta Betin | 15015030 | Santa Marta | Magdalena | Climática Ordinaria | 15 | 4867724,34 | 2826027,60 |
| Aeropuerto Simon Bolivar | 15015050 | Santa Marta | Magdalena | Sinóptica Principal | 4 | 4865853,98 | 2788004,33 |
| San Lorenzo - Aut | 15015060 | Santa Marta | Magdalena | Climática Principal | 2200 | 4884864,51 | 2786024,28 |
| Canaverales | 15015090 | Santa Marta | Magdalena | Climática Ordinaria | 30 | 4903624,08 | 2803161,45 |
| Parque Tayrona | 15015100 | Santa Marta | Magdalena | Climática Ordinaria | 30 | 4898547,34 | 2807967,35 |
| Alto De Mira | 15015110 | Santa Marta | Magdalena | Climática Ordinaria | 180 | 4898210,36 | 2783814,90 |
| Universidad Tecnologica - Aut | 15015120 | Santa Marta | Magdalena | Climática Principal | 7 | 4870587,49 | 2798456,74 |
| Apure | 25021600 | Plato | Magdalena | Pluviométrica | 85 | 4826777,90 | 2649338,21 |
| Agrado El | 25021610 | Plato | Magdalena | Pluviométrica | 100 | 4834965,98 | 2628644,81 |
| Iran | 25021620 | Nueva Granada | Magdalena | Pluviométrica | 80 | 4855004,38 | 2628352,81 |
| Nueva Granada | 25021630 | Nueva Granada | Magdalena | Pluviométrica | 110 | 4847776,01 | 2641423,43 |
| El Dificil - Aut | 25025000 | Ariguaní (El Difícil) | Magdalena | Climática Principal | 120 | 4881009,59 | 2653485,04 |
| Monterrey Forestal | 25025020 | Zambrano | Bolívar | Climática Principal | 25 | 4798442,15 | 2633910,54 |
| Dificil El | 25025260 | Ariguaní (El Difícil) | Magdalena | Climática Ordinaria | 205 | 4862987,80 | 2646697,57 |

| Nombre | Código | Municipio | Departamento | Categoría | Elevación | Coordenadas origen nacional | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| Seis El | 25025300 | San Sebastián De Buenavista | Magdalena | Climática Ordinaria | 50 | 4854992,15 | 2628340,57 |
| Represa El Callao | 25027310 | Zambrano | Bolívar | Pluviométrica | 25 | 4791617,21 | 2628603,56 |
| Esperanza La Hacienda | 28020150 | Valledupar | Cesar | Pluviométrica | 60 | 4926733,35 | 2666406,67 |
| Caracoli | 28030190 | Valledupar | Cesar | Pluviométrica | 220 | 4919858,40 | 2672911,80 |
| Guaymaral | 28035040 | Valledupar | Cesar | Climática Ordinaria | 50 | 4929040,31 | 2652580,15 |
| Bosconia | 28040030 | Bosconia | Cesar | Pluviométrica | 130 | 4903392,07 | 2660468,37 |
| Pavas Las | 28040060 | Bosconia | Cesar | Pluviométrica | 150 | 4903245,54 | 2670518,02 |
| Palmariguani | 28040070 | Bosconia | Cesar | Pluviométrica | 80 | 4895363,47 | 2655442,93 |
| Monterrubio | 28040100 | Pivijai | Magdalena | Pluviométrica | 100 | 4860603,36 | 2689122,82 |
| San Angel | 28040140 | Sabanas De San Ángel | Magdalena | Pluviométrica | 140 | 4867160,52 | 2666917,89 |
| Bellavista | 28040150 | Algarrobo | Magdalena | Pluviométrica | 140 | 4886254,48 | 2697250,68 |
| Chimilaima | 28040200 | Bosconia | Cesar | Pluviométrica | 120 | 4916025,21 | 2670485,86 |
| Dona Vila Hacienda | 28040250 | Bosconia | Cesar | Pluviométrica | 160 | 4908703,91 | 2663134,98 |
| Manature Hacienda | 28040270 | Bosconia | Cesar | Pluviométrica | 150 | 4913622,19 | 2667003,72 |
| Villa Concepcion | 28040300 | Ariguaní (El Difícil) | Magdalena | Pluviométrica | 120 | 4905759,77 | 2630680,24 |
| Molino El | 28040310 | El Paso | Cesar | Pluviométrica | 110 | 4918500,16 | 2638359,45 |
| Brillante El | 28040320 | Santa Ana | Magdalena | Pluviométrica | 135 | 4894825,99 | 2630316,49 |
| Cabana La Hacienda | 28040360 | Ariguaní (El Difícil) | Magdalena | Pluviométrica | 100 | 4881986,93 | 2647847,49 |
| Palmasola | 28040400 | Bosconia | Cesar | Pluviométrica | 50 | 4902564,69 | 2660654,81 |
| Algarrobo | 28045020 | El Copey | Cesar | Climática Ordinaria | 60 | 4883192,52 | 2679789,27 |
| Zambrano | 29010050 | Zambrano | Bolívar | Pluviométrica | 15 | 4800891,19 | 2630334,42 |
| Canonegro Hacienda | 29010120 | Zambrano | Bolívar | Pluviométrica | 80 | 4785924,40 | 2635024,94 |
| Indugan Hacienda | 29010130 | Zambrano | Bolívar | Pluviométrica | 20 | 4796938,39 | 2643071,95 |
| El Guamo - Aut | 29015000 | El Guamo | Bolívar | Climática Ordinaria | 75 | 4797092,70 | 2670715,35 |
| Carmen De Bolivar | 29015020 | El Carmén De Bolívar | Bolívar | Agrometeorológica | 152 | 4768601,21 | 2632794,15 |
| Carmen De Bolivar - Aut | 29015040 | El Carmén De Bolívar | Bolívar | Climática Principal | 152 | 4768601,21 | 2632794,15 |
| Garrapata | 29020020 | Pivijai | Magdalena | Pluviométrica | 60 | 4844142,19 | 2698905,18 |
| San Estanislao | 29030050 | San Estanislao | Bolívar | Pluviométrica | 20 | 4763413,23 | 2708488,62 |
| San Jose | 29030140 | Luruaco | Atlántico | Pluviométrica | 20 | 4769296,71 | 2712356,78 |

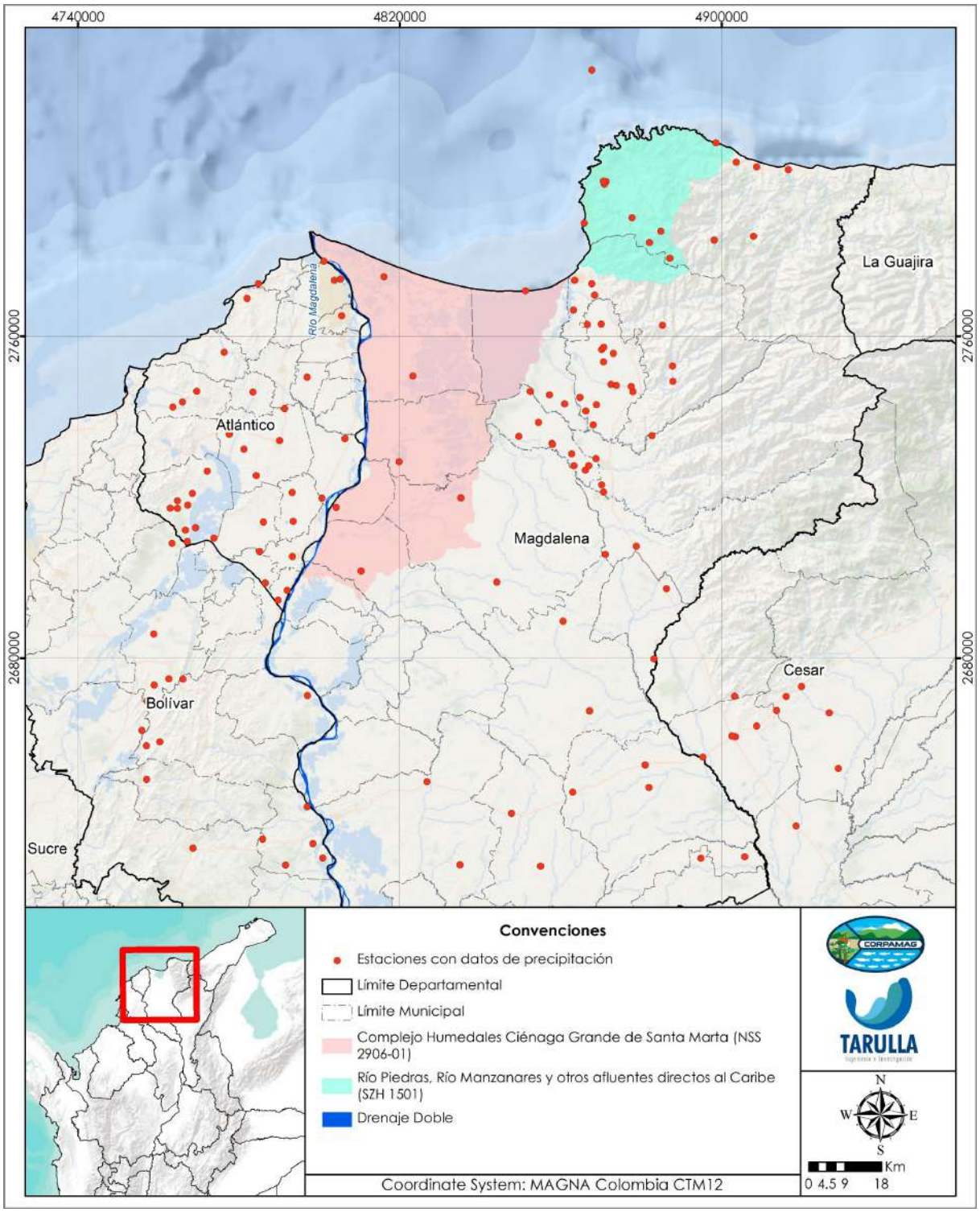
| Nombre | Código | Municipio | Departamento | Categoría | Elevación | Coordenadas origen nacional | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| Gamero | 29030170 | Mahates | Bolívar | Pluviométrica | 10 | 4758866,51 | 2685975,22 |
| San Cayetano | 29030200 | San Juan Nepomuceno | Bolívar | Pluviométrica | 70 | 4766097,31 | 2674805,52 |
| Santa Rita | 29030210 | San Juan Nepomuceno | Bolívar | Pluviométrica | 60 | 4762657,57 | 2674858,90 |
| Loma Grande | 29030270 | Repelón | Atlántico | Pluviométrica | 15 | 4766747,30 | 2711753,30 |
| San Basilio | 29030280 | Mahates | Bolívar | Pluviométrica | 50 | 4758963,47 | 2673316,74 |
| Banco El | 29030360 | Repelón | Atlántico | Pluviométrica | 75 | 4762944,13 | 2717253,94 |
| Cabecera Bartolo | 29030390 | Repelón | Atlántico | Pluviométrica | 10 | 4764768,45 | 2717241,43 |
| Casa De Bombas | 29030410 | Repelón | Atlántico | Pluviométrica | 10 | 4767205,79 | 2708929,94 |
| Cativa | 29030420 | Mahates | Bolívar | Pluviográfica | 50 | 4757140,44 | 2669365,78 |
| Casa De Piedra | 29030500 | San Jacinto | Bolívar | Pluviométrica | 60 | 4757101,40 | 2649887,75 |
| Montecrisanto | 29030520 | San Juan Nepomuceno | Bolívar | Pluviométrica | 70 | 4757007,72 | 2658229,60 |
| Haya La | 29030570 | San Juan Nepomuceno | Bolívar | Pluviográfica | 100 | 4760422,44 | 2659205,39 |
| Cabecera Henequen | 29030640 | Repelón | Atlántico | Pluviométrica | 9 | 4768441,85 | 2720903,15 |
| Cabecera El Polvar | 29030650 | Repelón | Atlántico | Pluviométrica | 10 | 4764781,05 | 2719084,69 |
| Eden El | 29030690 | El Retén | Magdalena | Pluviométrica | 30 | 4857855,83 | 2733314,18 |
| Mampujan | 29030780 | María La Baja | Bolívar | Pluviométrica | 60 | 4755903,29 | 2662031,31 |
| Molinero | 29035020 | Sabanalarga (Atlántico) | Atlántico | Climática Ordinaria | 45 | 4777658,13 | 2735587,99 |
| Veracruz | 29035060 | Repelón | Atlántico | Climática Ordinaria | 12 | 4772126,76 | 2726408,32 |
| Normal Manati - Aut | 29035080 | Manatí | Atlántico | Climática Principal | 10 | 4786130,70 | 2713812,17 |
| Limon El | 29035120 | Manatí | Atlántico | Climática Ordinaria | 7 | 4773841,49 | 2709807,67 |
| Santa Lucia Granja | 29035130 | Santa Lucia | Atlántico | Climática Principal | 5 | 4786545,53 | 2698668,49 |
| Repelon - Aut | 29035200 | Repelón | Atlántico | Climática Principal | 10 | 4767297,03 | 2717961,58 |
| Montebello | 29040020 | Baranoa | Atlántico | Pluviométrica | 100 | 4791426,21 | 2741969,71 |
| Ponedera | 29040070 | Ponedera | Atlántico | Pluviométrica | 8 | 4806378,28 | 2734502,54 |
| Polonuevo | 29040080 | Polonuevo | Atlántico | Pluviométrica | 80 | 4796932,31 | 2749732,17 |
| Leña | 29040200 | Candelaria (Atlántico) | Atlántico | Pluviométrica | 45 | 4793249,81 | 2721113,38 |
| Puerto Colombia | 29040230 | Puerto Colombia (Atlántico) | Atlántico | Pluviométrica | 5 | 4784864,13 | 2772957,96 |
| Usiacuri | 29040240 | Usiacurí | Atlántico | Pluviográfica | 100 | 4783498,73 | 2746025,55 |
| Campo De La Cruz | 29040250 | Campo De La Cruz | Atlántico | Pluviométrica | 4 | 4793328,28 | 2705259,64 |

| Nombre | Código | Municipio | Departamento | Categoría | Elevación | Coordenadas origen nacional | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| Candelaria | 29040260 | Candelaria (Atlántico) | Atlántico | Pluviométrica | 4 | 4793547,23 | 2713935,99 |
| Rabon El Hacienda | 29040270 | Santa Lucia | Atlántico | Pluviométrica | 4 | 4785194,17 | 2706448,56 |
| Campanos Los | 29040290 | Sabanalarga (Atlántico) | Atlántico | Pluviométrica | 100 | 4784327,06 | 2725346,10 |
| Puerto Giraldo | 29040300 | Ponedera | Atlántico | Pluviométrica | 5 | 4800652,67 | 2719730,34 |
| San Pedrito Alerta | 29040310 | Suan | Atlántico | Pluviométrica | 8 | 4789780,58 | 2694360,72 |
| Gallego | 29040390 | Sabanalarga (Atlántico) | Atlántico | Pluviométrica | 80 | 4781280,73 | 2731878,04 |
| Barranquilla Sede | 29040450 | Barranquilla | Atlántico | Pluviométrica | 12 | 4803766,10 | 2773865,45 |
| Sabanalarga - Aut | 29045000 | Sabanalarga (Atlántico) | Atlántico | Climática Principal | 100 | 4790167,89 | 2734039,88 |
| Malambito | 29045090 | Suan | Atlántico | Climática Ordinaria | 8 | 4792009,69 | 2696792,55 |
| Base Naval | 29045100 | Barranquilla | Atlántico | Climática Principal | 5 | 4805230,42 | 2774120,88 |
| Juan De Acosta | 29045110 | Juan De Acosta | Atlántico | Climática Ordinaria | 20 | 4776395,77 | 2755933,54 |
| Flores Las | 29045120 | Barranquilla | Atlántico | Climática Principal | 8 | 4801160,40 | 2778568,61 |
| Aeropuerto E. Cortissoz - Aut | 29045190 | Soledad | Atlántico | Sinóptica Principal | 14 | 4805571,22 | 2765026,76 |
| Tiogollo | 29050010 | El Piñón | Magdalena | Pluviométrica | 41 | 4810420,40 | 2701599,44 |
| Salamina | 29050020 | Salamina (Magdalena) | Magdalena | Pluviométrica | 15 | 4804171,96 | 2717458,63 |
| Salinas El Torno | 29060010 | Sitionuevo | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4823310,17 | 2750061,68 |
| Bongo El | 29060030 | El Retén | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4849606,66 | 2735057,19 |
| Fundacion | 29060040 | Fundación | Magdalena | Pluviométrica | 40 | 4870690,01 | 2721216,32 |
| Media Luna | 29060050 | Pivijai | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4835188,22 | 2719783,80 |
| Cenizo El | 29060060 | Aracataca | Magdalena | Pluviométrica | 450 | 4882662,09 | 2735239,85 |
| San Pablo | 29060070 | Ciénaga | Magdalena | Pluviométrica | 800 | 4887795,21 | 2752531,52 |
| Cocos Los | 29060080 | Sitionuevo | Magdalena | Pluviométrica | 4 | 4816125,42 | 2774718,34 |
| Santa Rosa De Lima | 29060100 | Fundación | Magdalena | Pluviométrica | 75 | 4878762,11 | 2707743,56 |
| Tasajera | 29060120 | Puebloviejo | Magdalena | Pluviométrica | 2 | 4851271,75 | 2771250,88 |
| Carmen El | 29060140 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4868104,98 | 2737934,26 |
| Destino El | 29060150 | El Retén | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4866128,94 | 2726684,46 |
| Enano El | 29060160 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4870058,12 | 2762987,47 |
| Gavilan | 29060170 | El Retén | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4854521,46 | 2738536,61 |
| Esperanza La | 29060180 | Puebloviejo | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4857220,35 | 2745388,60 |

| Nombre | Código | Municipio | Departamento | Categoría | Elevación | Coordenadas origen nacional | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| Florida La | 29060190 | El Retén | Magdalena | Pluviométrica | 26 | 4862724,30 | 2730785,26 |
| Maria La | 29060200 | Aracataca | Magdalena | Pluviométrica | 30 | 4870177,22 | 2723020,78 |
| Palma La | 29060210 | Ciénaga | Magdalena | Pluviométrica | 23 | 4868423,48 | 2770139,78 |
| Poly La | 29060220 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 24 | 4870692,05 | 2753529,98 |
| Sara La | 29060230 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4873138,02 | 2755682,41 |
| Union La | 29060240 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4866247,63 | 2741374,73 |
| Proyectos Los | 29060250 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4864782,04 | 2744715,51 |
| Palo Alto | 29060270 | Pueblo viejo | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4860967,54 | 2743158,78 |
| San Isidro | 29060280 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4866655,33 | 2762850,53 |
| San Juan | 29060290 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4872492,45 | 2747995,66 |
| Santa Rosa | 29060300 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 25 | 4877951,02 | 2746132,91 |
| Sevillano | 29060310 | Ciénaga | Magdalena | Pluviométrica | 5 | 4863191,96 | 2766426,91 |
| Playa La | 29060330 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4877539,86 | 2747457,88 |
| Palmor El | 29060340 | Ciénaga | Magdalena | Pluviométrica | 1200 | 4887909,84 | 2748689,78 |
| Bayano | 29060350 | El Retén | Magdalena | Pluviométrica | 30 | 4858009,76 | 2733074,00 |
| Loma La | 29060380 | Pueblo viejo | Magdalena | Pluviométrica | 23 | 4852444,21 | 2746235,34 |
| San Rafael | 29060540 | Remolino | Magdalena | Pluviométrica | 10 | 4819880,49 | 2728770,67 |
| Ruby El | 29060550 | Zona Bananera | Magdalena | Pluviométrica | 20 | 4870170,02 | 2756679,58 |
| Dona Maria | 29060560 | Fundación | Magdalena | Pluviométrica | 50 | 4871100,26 | 2705747,56 |
| Media Luna - Aut | 29065000 | Pivijai | Magdalena | Climática Principal | 20 | 4835188,22 | 2719783,80 |
| Zacapa | 29065010 | El Retén | Magdalena | Climática Ordinaria | 30 | 4863301,54 | 2727764,31 |
| Padelma | 29065020 | Zona Bananera | Magdalena | Climática Ordinaria | 20 | 4868859,59 | 2742973,57 |
| Prado Sevilla | 29065030 | Zona Bananera | Magdalena | Climática Ordinaria | 18 | 4873797,01 | 2747714,35 |
| San Pedro D La Sie | 29065050 | Ciénaga | Magdalena | Climática Ordinaria | 1400 | 4885295,39 | 2762688,56 |
| Rubi El | 29065070 | Zona Bananera | Magdalena | Meteorológica Especial | 20 | 4870706,36 | 2757214,88 |
| Luz Mary | 29065090 | Aracataca | Magdalena | Climática Ordinaria | 50 | 4868777,34 | 2729585,27 |
| Pativilca | 29065100 | El Retén | Magdalena | Climática Ordinaria | 55 | 4866947,36 | 2727749,90 |

*Fuente: Elaboración propia*

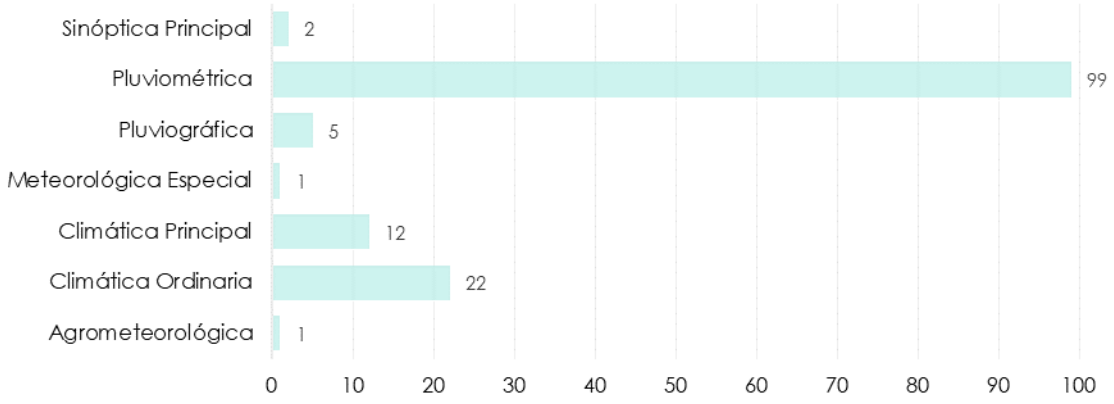
**Figura 9 Red de monitoreo climatológico con registros de precipitación.**




*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 10 se muestra la cantidad de estaciones que registran precipitación por cada una de las categorías de estación del IDEAM. En total, se cuenta con 99 estaciones pluviométricas, 22 estaciones climáticas ordinarias, 12 estaciones climáticas principales, 5 estaciones pluviográficas, 2 estaciones sinópticas principales, 1 estación meteorológica especial y 1 estación agrometeorológica.

**Figura 10 Cantidad de estaciones de precipitación por categoría de la estación.**



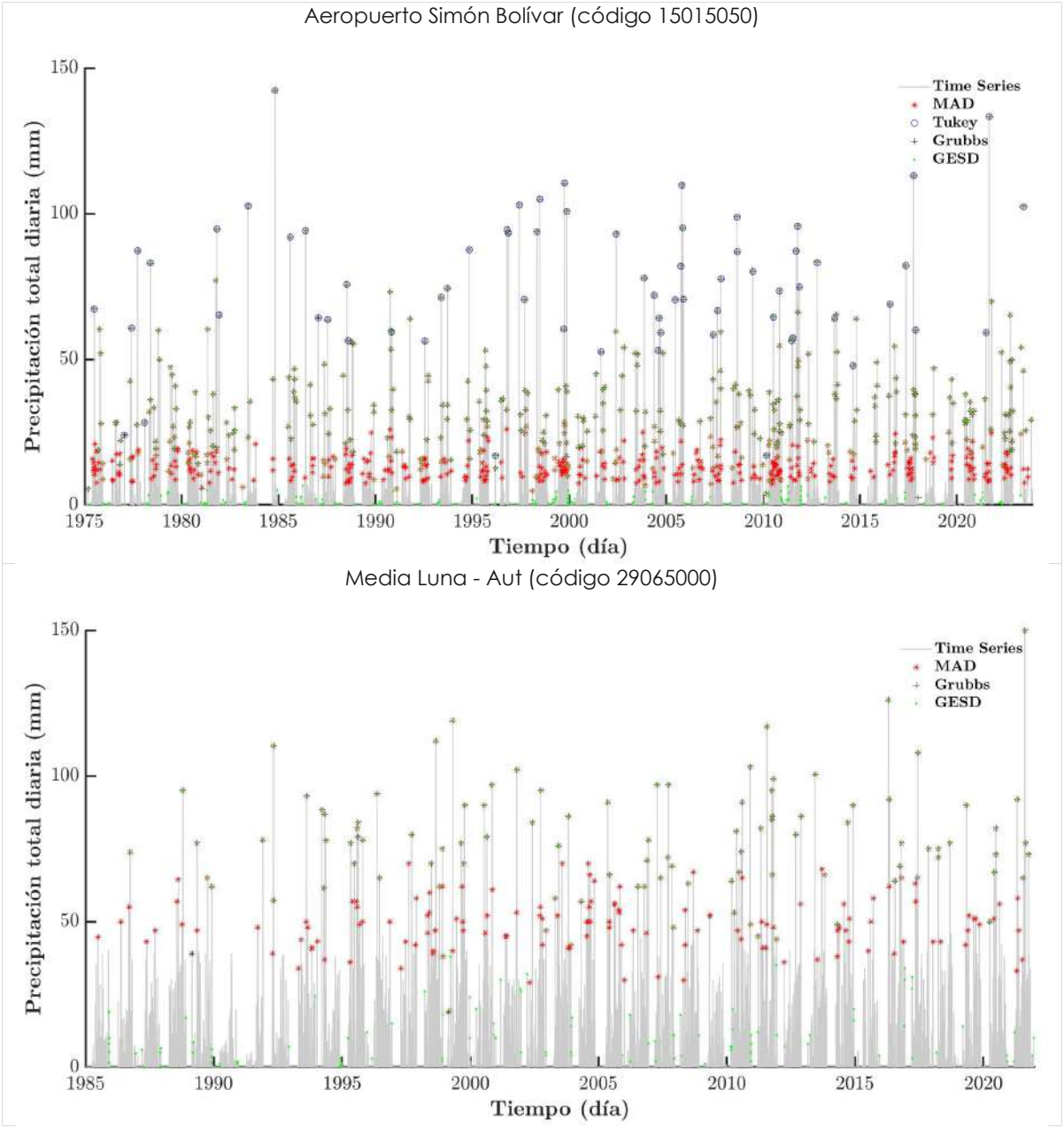

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.1.1.1.2. Análisis de consistencia y homogeneidad de datos de precipitación

Los análisis se llevaron a cabo para la ventana temporal comprendida entre el 01/01/1975 al 31/12/2023. A modo de ejemplo, en la Figura 11 se muestran los registros tomados por las estaciones para la variable de precipitación total diaria. Para cada estación se identificaron y removieron los valores atípicos a la serie de precipitación, tomando en cuenta que la información meteorológica en la mayoría de los casos presenta discontinuidad temporal en sus registros, así como también ciertas inconstancias; estas debidas posiblemente a fallas en los instrumentos de medición, o a factores operativos de carácter antrópico en las estaciones de monitoreo. La detección de datos anómalos se llevó a cabo mediante las metodologías de Grubbs, GESD, Tukey y la metodología de las desviaciones absolutas en términos de medianas (por sus siglas en inglés, Median Absolute Deviations - MADs).

A manera de ejemplo, la Figura 11 presenta los resultados de los valores detectados como anómalos en las diferentes metodologías evaluadas para la precipitación en dos estaciones presentes en el área de estudio. En el Anexo 2. Datos Anómalos se presentan los resultados de la detección de valores anómalos para todas las estaciones analizadas.

**Figura 11 Datos anómalos detectados para la precipitación diaria.**

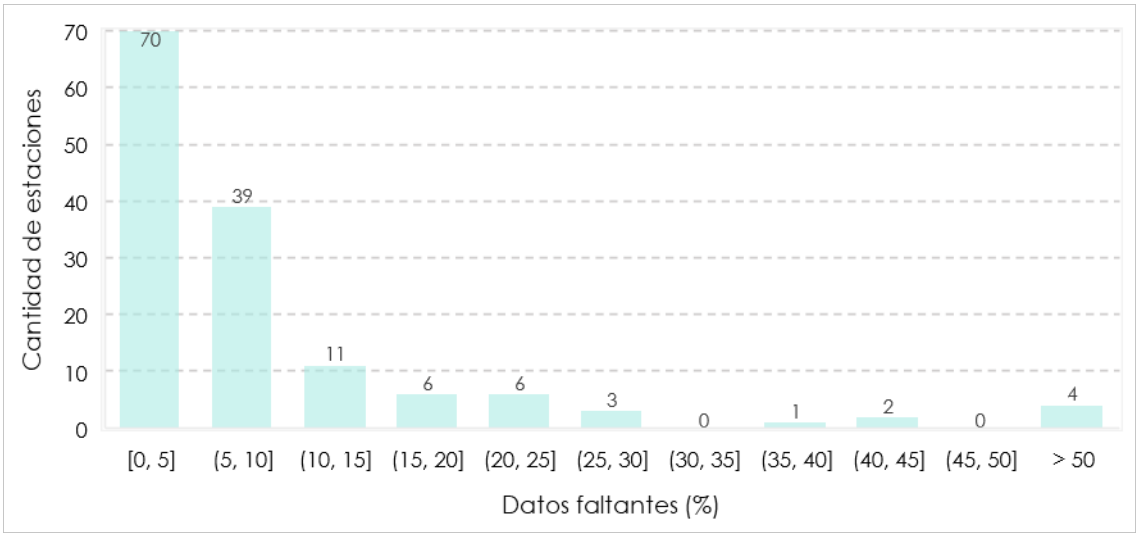



*Fuente: Elaboración propia*

Después de la detección y remoción de datos anómalos, se estima el porcentaje de datos faltantes en cada una de las series. Con los siguientes criterios: i) el periodo efectivo de registro de la serie no puede ser inferior a 10 años, y ii) el porcentaje de datos faltantes debe ser inferior al 20%, se aplicó una prueba de completitud de los datos. La prueba de completitud se considera aceptada si ambos criterios se cumplen, indicando que la estación es consistente.

En la Figura 12 se presenta el consolidado de los resultados de porcentaje de datos faltantes obtenidos. En el Anexo 3. Resumen Datos Sin Anómalos se presenta el resumen con la información de la cantidad de datos faltantes, el porcentaje de datos faltantes, la cantidad de datos y la longitud en años del registro de datos para todas las series de tiempo sin datos anómalos.

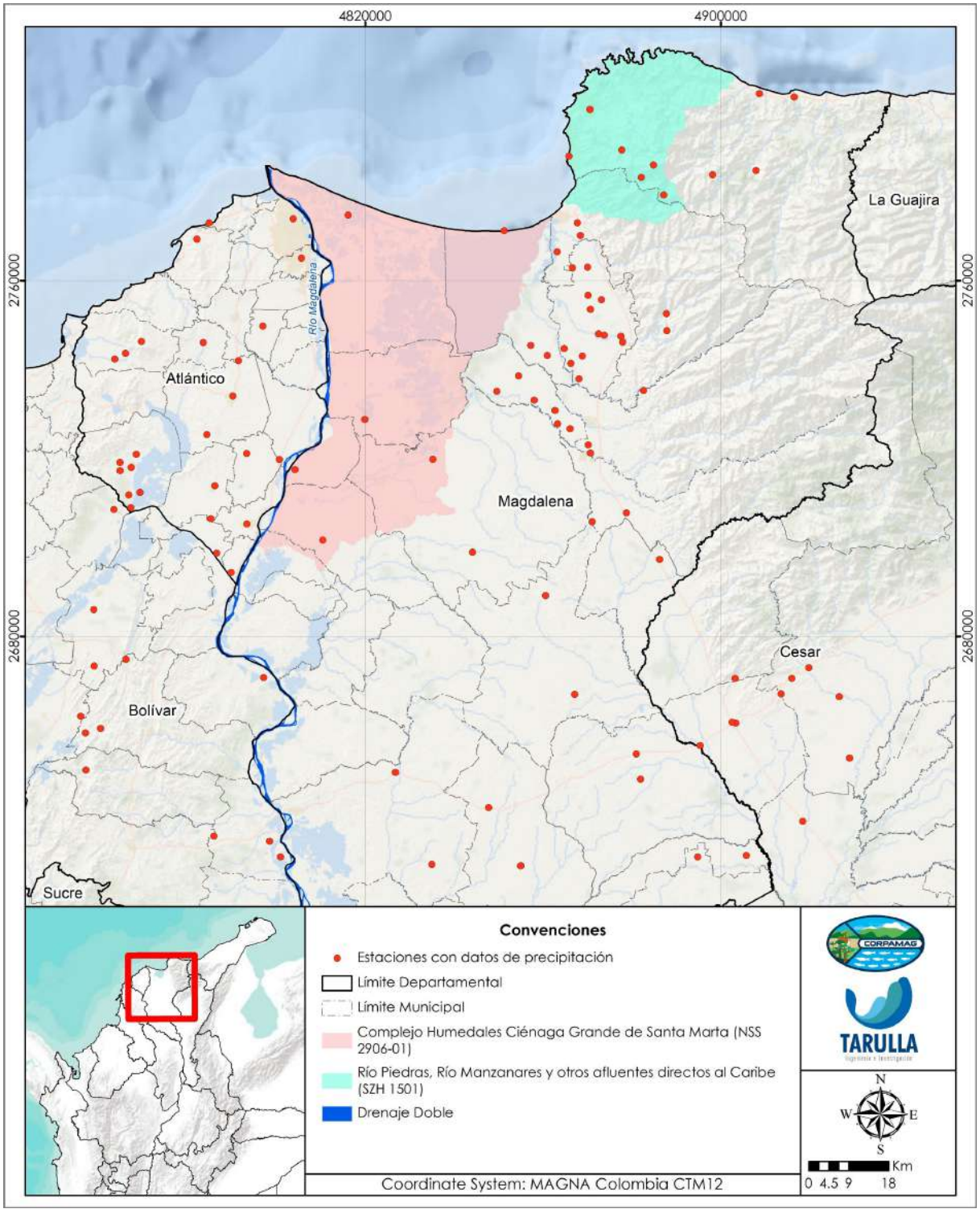
**Figura 12 Porcentaje de datos faltantes en las estaciones de precipitación.**




*Fuente: Elaboración propia*

Un total de 109 estaciones de precipitación cumplen con los criterios de completitud de la información (Figura 13). La Tabla 4 relaciona las estaciones de precipitación que presentan menos del 20 % de datos faltantes y una longitud de registros igual o superior a 10 años.

**Figura 13 Red de monitoreo climatológico con registros de precipitación que cumplen con los criterios de completitud de los datos.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 4 Estaciones de precipitación que cumplen con los criterios de completitud de los datos.**

| Nombre | Código | Municipio | Departamento |
|---|---|---|---|
| Piojo | 14010010 | Piojó | Atlántico |
| Hibacharo | 14010020 | Piojó | Atlántico |
| Porvenir El | 14010090 | Piojó | Atlántico |
| Pintada La | 14010100 | Tubará | Atlántico |
| Minca | 15010010 | Santa Marta | Magdalena |
| Buritaca | 15010020 | Santa Marta | Magdalena |
| Vista Nieves | 15010040 | Santa Marta | Magdalena |
| Jirocasaca | 15010130 | Santa Marta | Magdalena |
| Guachaca | 15010300 | Santa Marta | Magdalena |
| Filo Cartagena | 15010310 | Santa Marta | Magdalena |
| Ye La | 15015020 | Ciénaga | Magdalena |
| Aeropuerto Simon Bolivar | 15015050 | Santa Marta | Magdalena |
| San Lorenzo - Aut | 15015060 | Santa Marta | Magdalena |
| Alto De Mira | 15015110 | Santa Marta | Magdalena |
| Universidad Tecnologica - Aut | 15015120 | Santa Marta | Magdalena |
| Apure | 25021600 | Plato | Magdalena |
| Agrado El | 25021610 | Plato | Magdalena |
| Iran | 25021620 | Nueva Granada | Magdalena |
| Nueva Granada | 25021630 | Nueva Granada | Magdalena |
| El Dificil - Aut | 25025000 | Ariguaní (El Dificil) | Magdalena |
| Monterrey Forestal | 25025020 | Zambrano | Bolívar |
| Seis El | 25025300 | San Sebastián De Buenavista | Magdalena |
| Esperanza La Hacienda | 28020150 | Valledupar | Cesar |
| Caracoli | 28030190 | Valledupar | Cesar |
| Guaymaral | 28035040 | Valledupar | Cesar |
| Bosconia | 28040030 | Bosconia | Cesar |
| Pavas Las | 28040060 | Bosconia | Cesar |
| Palmariguani | 28040070 | Bosconia | Cesar |
| Monterrubio | 28040100 | Pivijai | Magdalena |
| San Angel | 28040140 | Sabanas De San Ángel | Magdalena |
| Bellavista | 28040150 | Algarrobo | Magdalena |
| Chimilaima | 28040200 | Bosconia | Cesar |
| Manature Hacienda | 28040270 | Bosconia | Cesar |
| Villa Concepcion | 28040300 | Ariguaní (El Dificil) | Magdalena |
| Molino El | 28040310 | El Paso | Cesar |
| Brillante El | 28040320 | Santa Ana | Magdalena |
| Cabana La Hacienda | 28040360 | Ariguaní (El Dificil) | Magdalena |
| Palmasola | 28040400 | Bosconia | Cesar |
| Zambrano | 29010050 | Zambrano | Bolívar |

| Nombre | Código | Municipio | Departamento |
|---|---|---|---|
| Canonegro Hacienda | 29010120 | Zambrano | Bolívar |
| El Guamo - Aut | 29015000 | El Guamo | Bolívar |
| Garrapata | 29020020 | Pivijai | Magdalena |
| San Estanislao | 29030050 | San Estanislao | Bolívar |
| San Jose | 29030140 | Luruaco | Atlántico |
| Gamero | 29030170 | Mahates | Bolívar |
| San Cayetano | 29030200 | San Juan Nepomuceno | Bolívar |
| Loma Grande | 29030270 | Repelón | Atlántico |
| San Basilio | 29030280 | Mahates | Bolívar |
| Cabecera Bartolo | 29030390 | Repelón | Atlántico |
| Casa De Bombas | 29030410 | Repelón | Atlántico |
| Casa De Piedra | 29030500 | San Jacinto | Bolívar |
| Montecrisanto | 29030520 | San Juan Nepomuceno | Bolívar |
| Haya La | 29030570 | San Juan Nepomuceno | Bolívar |
| Cabecera Henequen | 29030640 | Repelón | Atlántico |
| Cabecera El Polvar | 29030650 | Repelón | Atlántico |
| Mampujan | 29030780 | María La Baja | Bolívar |
| Normal Manati - Aut | 29035080 | Manatí | Atlántico |
| Santa Lucia Granja | 29035130 | Santa Lucia | Atlántico |
| Repelon - Aut | 29035200 | Repelón | Atlántico |
| Montebello | 29040020 | Baranoa | Atlántico |
| Polonuevo | 29040080 | Polonuevo | Atlántico |
| Leña | 29040200 | Candelaria (Atlántico) | Atlántico |
| Puerto Colombia | 29040230 | Puerto Colombia (Atlántico) | Atlántico |
| Usiacuri | 29040240 | Usiacurí | Atlántico |
| Campo De La Cruz | 29040250 | Campo De La Cruz | Atlántico |
| Rabon El Hacienda | 29040270 | Santa Lucia | Atlántico |
| Campanos Los | 29040290 | Sabanalarga (Atlántico) | Atlántico |
| Puerto Giraldo | 29040300 | Ponedera | Atlántico |
| San Pedrito Alerta | 29040310 | Suan | Atlántico |
| Barranquilla Sede | 29040450 | Barranquilla | Atlántico |
| Sabanalarga - Aut | 29045000 | Sabanalarga (Atlántico) | Atlántico |
| Aeropuerto E. Cortissoz - Aut | 29045190 | Soledad | Atlántico |
| Tiogollo | 29050010 | El Piñón | Magdalena |
| Salamina | 29050020 | Salamina (Magdalena) | Magdalena |
| Bongo El | 29060030 | El Retén | Magdalena |
| Fundacion | 29060040 | Fundación | Magdalena |
| Media Luna | 29060050 | Pivijai | Magdalena |
| Cenizo El | 29060060 | Aracataca | Magdalena |
| San Pablo | 29060070 | Ciénaga | Magdalena |
| Cocos Los | 29060080 | Sitionuevo | Magdalena |

| Nombre | Código | Municipio | Departamento |
|---|---|---|---|
| Santa Rosa De Lima | 29060100 | Fundación | Magdalena |
| Tasajera | 29060120 | Puebloviejo | Magdalena |
| Carmen El | 29060140 | Zona Bananera | Magdalena |
| Destino El | 29060150 | El Retén | Magdalena |
| Enano El | 29060160 | Zona Bananera | Magdalena |
| Gavilan | 29060170 | El Retén | Magdalena |
| Esperanza La | 29060180 | Puebloviejo | Magdalena |
| Florida La | 29060190 | El Retén | Magdalena |
| Maria La | 29060200 | Aracataca | Magdalena |
| Palma La | 29060210 | Ciénaga | Magdalena |
| Poly La | 29060220 | Zona Bananera | Magdalena |
| Sara La | 29060230 | Zona Bananera | Magdalena |
| Union La | 29060240 | Zona Bananera | Magdalena |
| Proyectos Los | 29060250 | Zona Bananera | Magdalena |
| Palo Alto | 29060270 | Puebloviejo | Magdalena |
| San Isidro | 29060280 | Zona Bananera | Magdalena |
| San Juan | 29060290 | Zona Bananera | Magdalena |
| Santa Rosa | 29060300 | Zona Bananera | Magdalena |
| Sevillano | 29060310 | Ciénaga | Magdalena |
| Playa La | 29060330 | Zona Bananera | Magdalena |
| Palmor El | 29060340 | Ciénaga | Magdalena |
| Bayano | 29060350 | El Retén | Magdalena |
| San Rafael | 29060540 | Remolino | Magdalena |
| Ruby El | 29060550 | Zona Bananera | Magdalena |
| Dona Maria | 29060560 | Fundación | Magdalena |
| Media Luna - Aut | 29065000 | Pivijai | Magdalena |
| Zacapa | 29065010 | El Retén | Magdalena |
| Padelma | 29065020 | Zona Bananera | Magdalena |
| Prado Sevilla | 29065030 | Zona Bananera | Magdalena |

*Fuente: Elaboración propia*

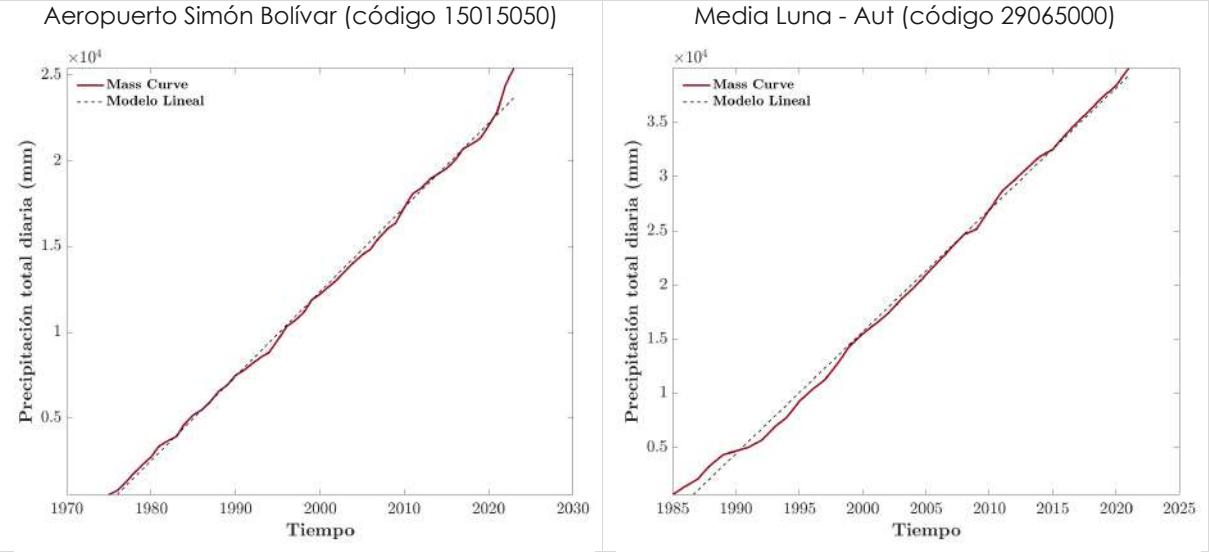
Posteriormente, se completaron los datos utilizando la Interpolación por Ponderación de la Distancia Inversa (IDW). A continuación, se realizó un análisis de homogeneidad para las estaciones que cumplen con el criterio de completitud, con el fin de verificar la consistencia de las series de tiempo y el método de complementación empleado. Siguiendo lo establecido en la Guía de Prácticas Meteorológicas No 5.2, se aplicó la metodología de curvas de masa. En el Anexo 4. Complementación se pueden consultar las series complementadas para todas las estaciones.

La curva de masa se define como la curva acumulada en un determinado periodo de tiempo, representada en un sistema de ejes donde se grafican los valores del tiempo (en años) en el eje x (abscisas) y la variable acumulada en el eje y (ordenadas). La pendiente de la línea trazada entre los puntos extremos de la curva de masa permite identificar fluctuaciones y

posibles inconsistencias asociadas a errores de medición o traslado de la estación, entre otros factores. Si existen cambios bruscos en la pendiente de la curva, se considera que los datos de la estación no son homogéneos.

En la Figura 14 se presentan, a modo de ejemplo, las curvas para la estación Aeropuerto Simón Bolívar (código 15015050) y Media Luna – Aut (código 29065000), notando series homogéneas al no presentar cambios bruscos en la pendiente de las curvas de las variables de precipitación. En general, todas las estaciones de precipitación son homogéneas y no evidencian cambios abruptos en la pendiente de la curva. En el Anexo 5. Curvas de Masa se presentan las curvas de masa para todas las estaciones con la respectiva métrica de desempeño del Nash.

**Figura 14 Curvas de masa de la variable de precipitación.**




*Fuente: Elaboración propia*

### *5.1.1.2. SPI*

El Índice de Precipitación Estandarizada cuantifica el déficit de precipitación para una gran variedad de escalas de tiempo lo que lo hace apto para estudiar sequías de diferentes duraciones, desde un mes (relevantes para la agricultura) a varios meses (relevantes para evaluar la disponibilidad de agua). El primer paso para el cálculo del SPI es calcular los totales acumulados de precipitación correspondientes al mes/año y escala temporal deseada. El SPI se calcula ajustando la distribución de frecuencia de la precipitación con una función teórica de densidad de probabilidad, la función de densidad es luego transformada a una distribución normal estandarizada (con media 0 y varianza 1), siendo el SPI el resultado de esta transformación. Existen muchas distribuciones teóricas que se pueden utilizar, entre ellas se encuentra la Gamma.

A modo de ejemplo, se describe la metodología de cálculo del SPI a partir de la función de distribución Gamma con dos parámetros (Cerpa Reyes, 2021), la cual está definida por la siguiente función densidad de probabilidad:

$$(x) = \frac{1}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}\, x^{\alpha-1}\, e^{\frac{x}{\beta}}, x > 0$$

Donde:
$\alpha$ parámetro de forma o uniformidad
$\beta$ parámetro de escala
$x$ cantidad de precipitación
$\Gamma(\alpha)$ función gamma que está definida por la siguiente expresión

$$\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} y^{\alpha-1}\, e^{-y}\, dy = \frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)} \int_0^{x} x^{\alpha-1}\, e^{-\frac{x}{\beta}}$$

El cálculo del SPI se basa en la función de densidad de probabilidades Gamma la cual se ajusta para una distribución de frecuencias dada de valores precipitación de una estación. Los valores de alfa y beta son calculados para cada estación, en cualquier escala de tiempo (1 mes, 3 meses, 6 meses, etc.) alfa y beta se calculan de la siguiente manera (Cerpa Reyes, 2021).

$$\alpha = \frac{1}{4A}\left(1 + \sqrt{1 + \frac{4A}{3}}\right)$$

$$\beta = \frac{\bar{x}}{\alpha}$$

$$A = \ln(\bar{x}) - \frac{\sum \ln(x)}{n}$$

Donde:
$n$ número de datos
$\bar{x}$ precipitación media

Los parámetros para encontrar la probabilidad acumulada de una precipitación observada para el mes y escala de tiempos dados de una determinada estación (Cerpa Reyes, 2021). La probabilidad acumulada es dada por:

$$G(x) = \int_0^{x} G(x)\ dx = \frac{1}{\beta\Gamma(\alpha)} \int_0^{x} x^{\alpha-1}\, e^{-\frac{x}{\beta}}$$

El rango de la función Gamma está definido por valores mayores a cero; sin embargo, en datos de precipitación se pueden encontrar estos valores fácilmente y mucho más cuando se presenta el fenómeno de sequía. Si encontramos un dato de cero en los registros, según la función Gamma, el valor acumulado es cero, lo cual no es correcto. En los datos podemos encontrar m valores de precipitaciones iguales a cero, entonces la probabilidad de que se presente este valor es m/n, donde n es el número de años a evaluar (Cerpa Reyes, 2021). A esta probabilidad se le llama q, entonces se hace un ajuste para cuando se encuentre uno o más valores de precipitación igual a cero; esta se expresa de la siguiente manera (Cerpa Reyes, 2021):

$$H(x) = q + (1 - q)G(x)$$

Se determina a continuación el valor de Z para la función de distribución normal con media cero y varianza uno. El valor de Z se calcula de la siguiente manera (Cerpa Reyes, 2021):

$$Z = SPI = -\left(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t + d_3 t}\right), 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$Z = SPI = +\left(t - \frac{c_0 + c_1 + c_2 t^2}{1 + d_1 t + d_2 t + d_3 t}\right), 0.5 < H(x) \leq 1$$

Donde t es determinado por:

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{H_{(x)^2}}} \ldots 0 < H(x) \leq 0.5$$

$$t = \sqrt{\ln \frac{1}{(1 - H(x))^2}} \ldots 0.5 < H(x) \leq 1$$

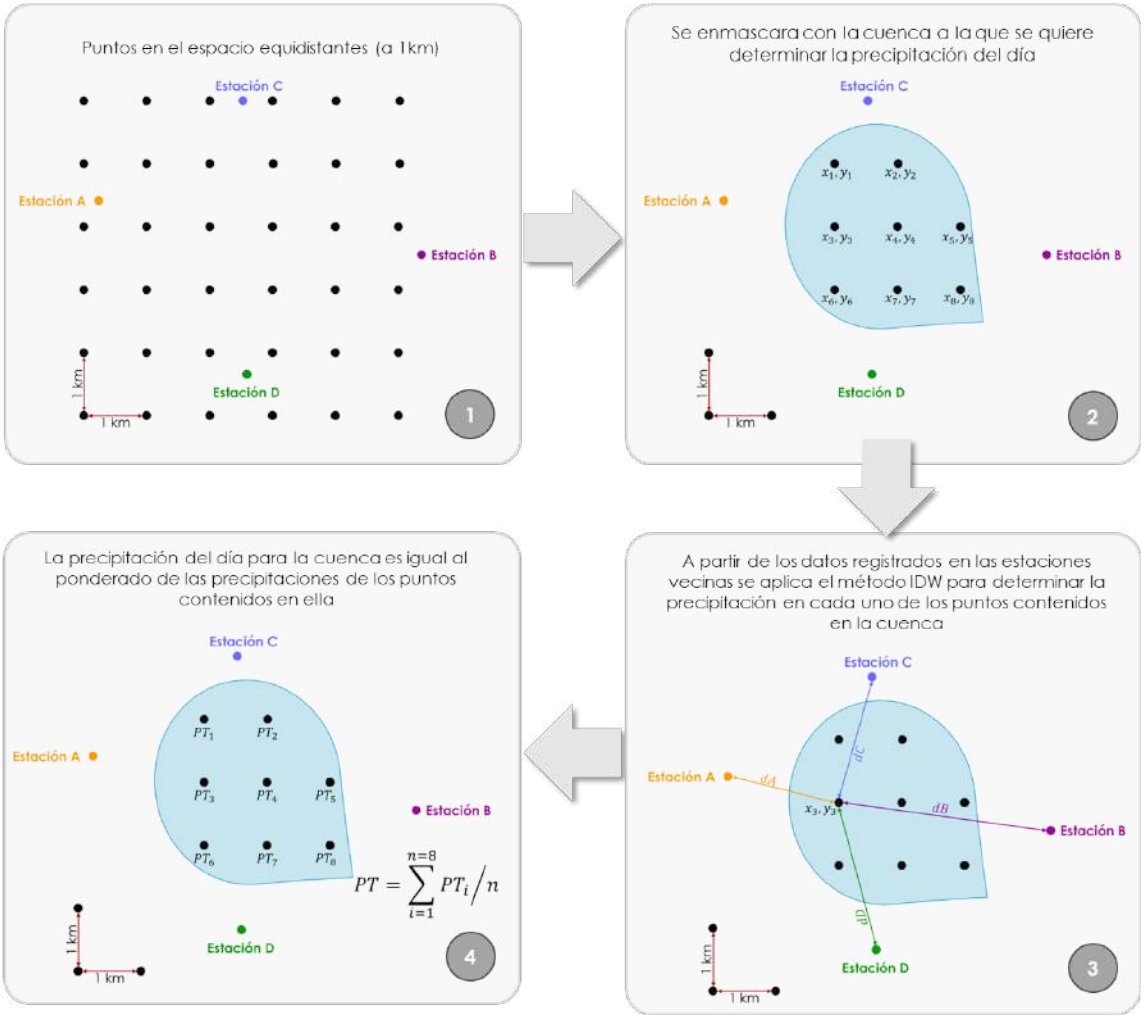
C0 = 2.515517
C1 = 0.802853
C2 = 0.010328
d1 = 1.432788
d2 = 0.189269
d3 = 0.001308

A continuación, se describe el proceso de asignación de la precipitación diaria en cada una de las cuencas de estudio, la cual es agregada de acuerdo con las ventanas temporales determinadas para el SPI (1 mes, 3 meses, 6 meses y 12 meses). Posteriormente, se presenta el ajuste de funciones de probabilidad empíricas, identificando cuál es la que mejor se ajusta a cada serie de datos en las diferentes ventanas temporales analizadas. Finalmente, se muestran los resultados del SPI clasificado.

#### 5.1.1.2.1. Asignación de precipitación en las cuencas

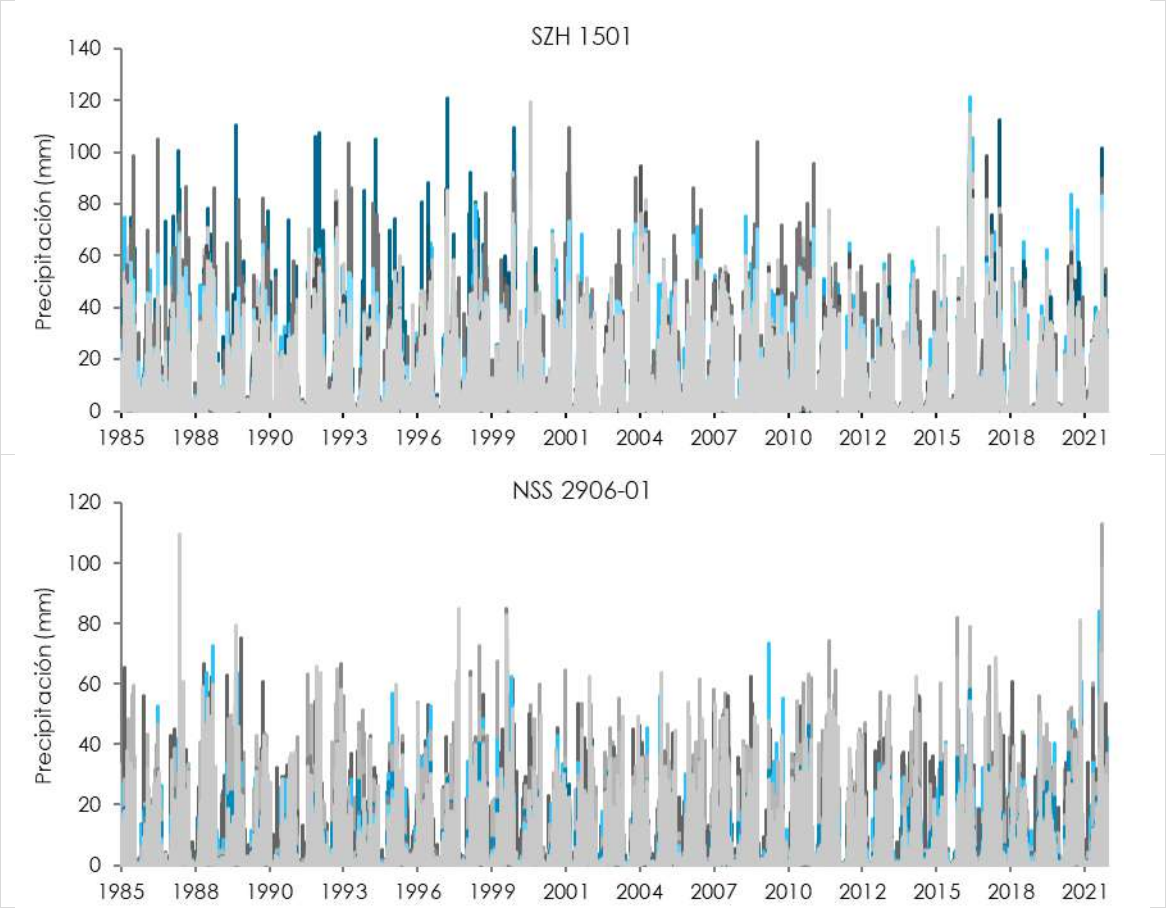
A cada cuenca se le asignó en cada paso de tiempo (diario) un valor de precipitación. Para esto se genera puntos en el espacio equidistantes (a un kilómetro de distancia) que comprendan el área de estudio (ver paso 1 de la Figura 15), luego se toman solo aquellos puntos que abarque la cuenca a la cual se quiere determinar la precipitación del día (ver paso 2 de la Figura 15). En cada punto georreferenciado se determina la precipitación por medio del método de interpolación de distancia inversa ponderada o IDW que emplea los datos de las estaciones vecinas y sus distancias, tal como se muestra en el ejemplo del paso 3 de la Figura 15 con las distancias dA, dB, dC y dD. Finalmente, se determina como la precipitación del día en la cuenca como el ponderado de las precipitaciones de los puntos contenidos en ella (ver paso 4 de la Figura 15). Los datos de precipitación resultado de la aplicación del proceso que se muestra en la Figura 15, en cada cuenca pueden ser consultados en el Anexo 6. Precipitación Cuencas. En la Figura 16 se presentan de manera representativa los datos de precipitación estimados en todas las cuencas.

**Figura 15 Proceso metodológico para el cálculo de la precipitación en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 16 Precipitación en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.1.1.2.2. Ajuste funciones de probabilidad empíricas

La prueba de ajuste pretende confirmar o refutar si la distribución empírica, es decir, los datos observados, se ajusta a una distribución teórica. Una distribución de probabilidad es una función que representa la probabilidad de ocurrencia de una variable aleatoria. Mediante el ajuste a una distribución de un conjunto de datos hidrológicos, una gran cantidad de información probabilística de la muestra puede resumirse de forma compacta en la función y en sus respectivos parámetros asociados (Ven Te Chow et al., 1994).

Habitualmente el ajuste de una PDF se efectúa mediante la calibración de su frecuencia empírica (Fe) con la obtenida por los modelos o teórica (Ft). Para este caso se realizó la calibración mediante la (Fe) propuesta por Weibull, tal como lo describe (Dominguez, 2016) y las obtenidas por los 12 modelos a evaluar (ver Tabla 5).

**Tabla 5 Funciones de densidad de probabilidad evaluadas.**

| PDF | Ecuación |
|---|---|
| Normal | $P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(x-\acute{x})}{2\sigma^2}}$ |
| Log-Normal | $P(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-(\ln(x)-\acute{x})^2}{2\sigma^2}}$ |
| Exponencial | $P(x) = \lambda e^{-\lambda x} \forall x \geq 0$ |
| Gamma | $P(x) = \frac{\lambda^2 x^{(a-1)} e^{-\lambda x}}{\Gamma(a)}$ |
| Weibull | $P(x) = C(-x)^{(c-1)} e^{(-(-x)^c)}$ |
| Nakagami | $P(x) = \frac{2 * N^N}{\Gamma(N) x^{2*N-1} e^{-Nx^2}} para x > 0, N > 0$ |
| Gumbel-R | $P(x) = e^{-(x+e^{-x})}$ |
| Generalized Pareto | $f(x\|k,\mu,\sigma,\theta) = \left(\frac{1}{\sigma}\right)\left(1 + \kappa\frac{(x-\theta)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{\kappa}}$ |
| Generalized Extreme Value | $f(x\|\kappa,\sigma,\theta) = \left(\frac{1}{\sigma}\right)\left(-\left(1+\kappa\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{\frac{-1}{\kappa}}\right)\left(1+\kappa\frac{(x-\mu)}{\sigma}\right)^{-1-\frac{1}{\kappa}}$ $para\ 1 + \kappa\frac{(x-\mu)}{\sigma} > 0$ |
| Logistic | $f(x\|\mu,\sigma) = \frac{exp\left\{\frac{x-\mu}{\sigma}\right\}}{\sigma\left(1+exp\left\{\frac{x-\mu}{\sigma}\right\}\right)^2}; -\infty < x < \infty$ |
| LogLogistic | $f(x\|\mu,\sigma) = \frac{1}{\sigma}\frac{1}{x}\frac{e^z}{(1+e^z)^2}; x \geq 0 donde z = \frac{log(x)-\mu}{\sigma}$ |
| tLocationScale | $P(x) = \frac{\Gamma\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}{\sigma\sqrt{\nu\pi}\Gamma\left(\frac{\nu}{2}\right)}\left[\nu + \left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2\right]^{-\left(\frac{\nu+1}{2}\right)}$ $donde \Gamma(\bullet): función gamma,$ $\mu: parámetro de localización, \sigma: parámetro de escala y \nu: arámetro de forma$ |

*Fuente:* (Monsalve, 1995), *Chow (1965) y* (Garnett P., 1997)

La selección del mejor ajuste se llevó a cabo mediante la métrica de error medio cuadrático, en donde este fuese menor, y la prueba de Kolmogorov-Smirnov fuera valida con un nivel de significancia del 95%.

- Prueba de Kolmogorov – Smirnov

  Esta prueba consiste en comparar el máximo valor absoluto de la diferencia D entre la función de distribución de probabilidad observada $F_o(X_m)$ y la estimada $F(X_m)$.

$$D = mas\ |F_o(X_m) - F(X_m)$$

  Con un valor critico d que depende del número de datos y el nivel de significancia seleccionado. Si D<d, se acepta la hipótesis nula. La función de distribución de probabilidad observada o empírica se calculó como se muestra en la ecuación.

$$F_o(X_m) = 1 - \frac{m}{n+1}$$

- Error cuadrático medio (RMSE)

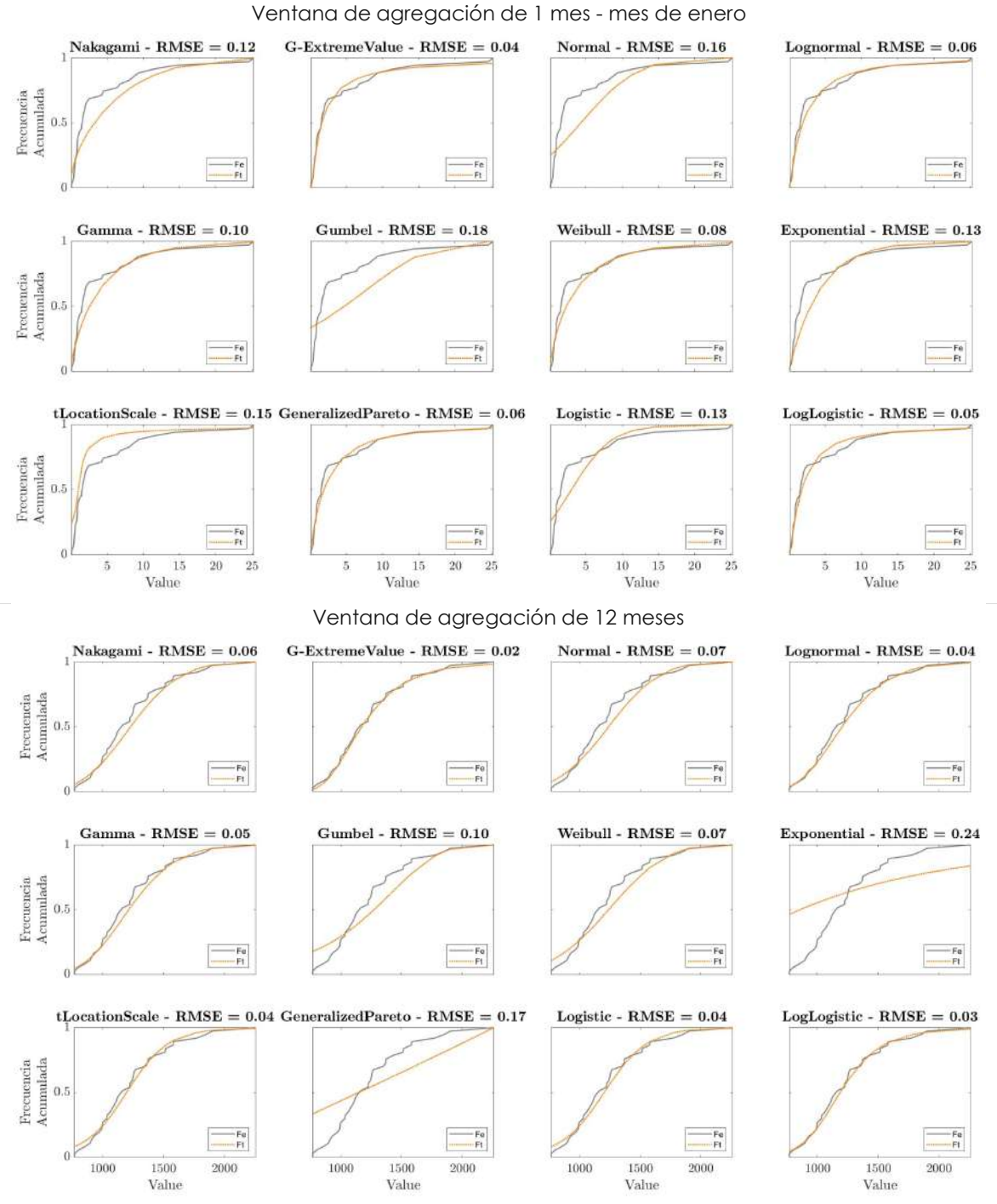
  El RMSE registra en unidades reales el nivel de acuerdo general entre los conjuntos de datos observados y modelados. Es una métrica no negativa que no tiene límite superior y para un modelo perfecto, el resultado sería cero (Dawson et al., 2007). A continuación, se presenta la ecuación que se utiliza para calcular el RMSE.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i - \widehat{X}_\iota)^2}{n}}$$

  $\widehat{X}_\iota$ Valor Observado
  $X_i$ Valor Simulado
  n Numero de datos

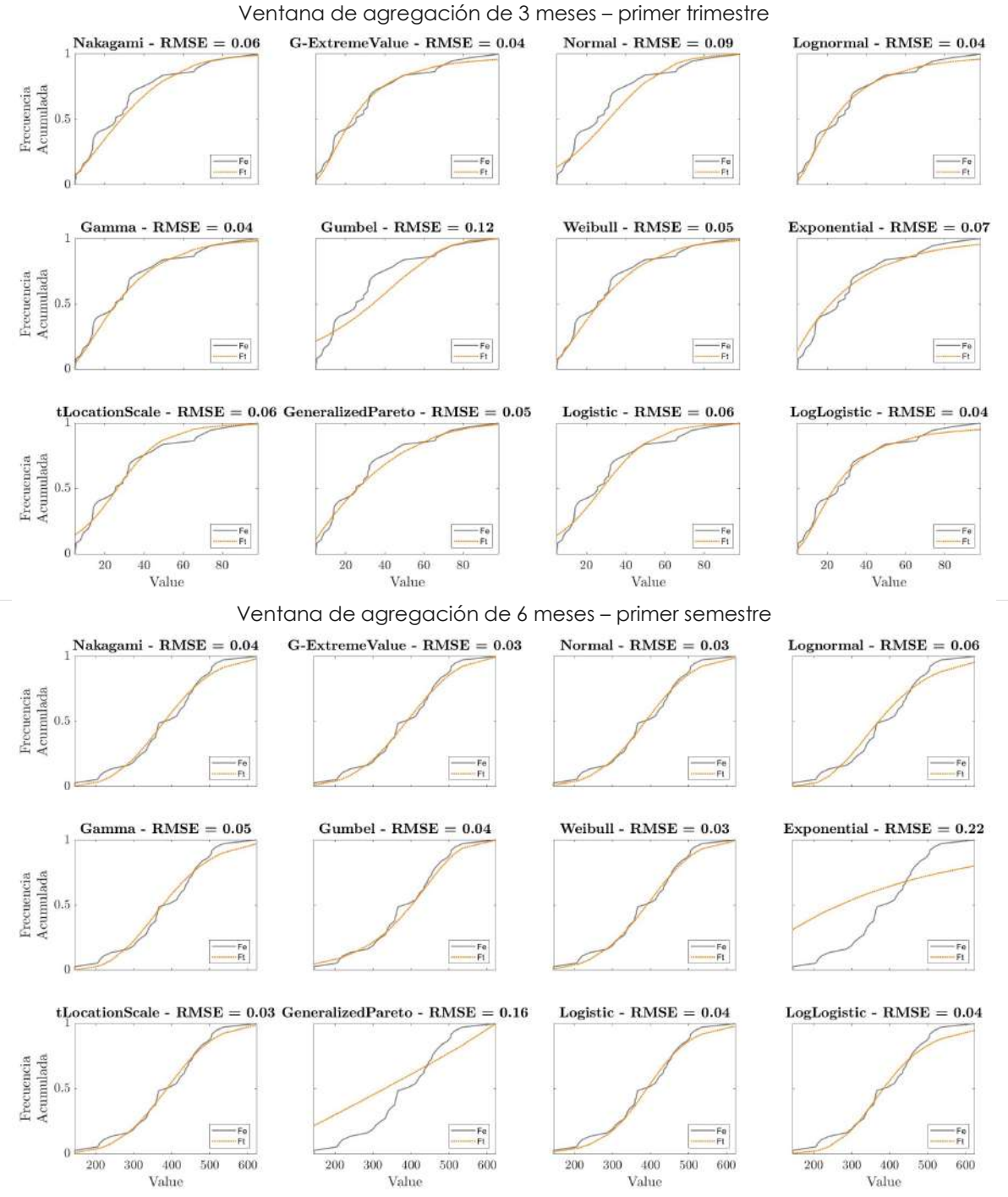
A manera de ejemplo, se presenta en la Figura 17 los ajustes de las doce funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) del mes de enero y al año, y en la Figura 18 se muestran los ajustes para el primer trimestre (ventana de agregación de 3 meses) y primer semestre (ventana de agregación de 6meses) para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101). En gris se observa la función de densidad de probabilidad empírica y en naranja la función de densidad de probabilidad teórica obtenida de los modelos teóricos evaluados. Los diferentes ajustes para cada una de las ventanas de agregación en las cuencas de análisis pueden ser consultados en el Anexo 7. PDF SPI.

**Figura 17 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) - Precipitación.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 18 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101) - Precipitación.**




*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 19 y Figura 20 se presenta el resumen de las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en cada una de las ventanas temporales para las cuencas de las SZH 1501 y NSS 2906-01, respectivamente.

Para la ventana temporal de agregación de 1 mes en las cuencas de la SZH 1501 (ver Figura 19) las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron durante los 12 meses del año fueron Log Normal, Weibull y Generalized Extreme Value, con un 21,6%, 18,8% y 16,4% de las cuencas, respectivamente. En el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 20), las funciones que mejor se ajustaron fueron Generalized Extreme Value y Log Normal, alcanzando el 60% del total.

Las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en los cuatro trimestres del año para la ventana temporal de agregación de 3 meses en las cuencas de la SZH 1501(ver Figura 19), correspondieron a Generalized Extreme Value y t Location Scale, con el 27,8% y 13,9% de las cuencas. Para el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 20), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron fueron Generalized Extreme Value, Log Normal y Log Logistic, alcanzando el 68,4% del total.

Para la ventana temporal de agregación de 6 meses en las cuencas de la SZH 1501(ver Figura 19), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en los dos semestres del año fueron Generalized Extreme Value, t Location Scale, Normal y Log Logistic, con un 22,2%, 16,7%, 14,8% y 14,8% de las cuencas, respectivamente. En las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 20), las funciones que mejor se ajustaron fueron Log Logistic, Log Normal y Nakagami, alcanzando el 66,7% del total.

En la ventana temporal de agregación de 12 meses en las cuencas de la SZH 1501 (ver Figura 19), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron durante el año fueron Generalized Extreme Value y Log Logistic, con un 48,1% y 29,6% de las cuencas, respectivamente. En el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 20), la función que mejor se ajustó fue la Log Logistic con el 60% del total.

**Figura 19 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la precipitación en todas las cuencas de la SZH 1501 - Precipitación.**

Ventana de agregación de 1 mes

| PDF | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 14.8% | 3.7% | 29.6% | 22.2% | 3.7% | 59.3% | 48.1% | 0.0% | 14.8% | 14.8% | 0.0% | 14.8% | 18.8% |
| Lognormal | 25.9% | 40.7% | 40.7% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 18.5% | 44.4% | 3.7% | 14.8% | 48.1% | 18.5% | 21.6% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.3% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 25.9% | 0.0% | 11.1% | 0.0% | 11.1% | 29.6% | 0.0% | 0.0% | 7.1% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 37.0% | 3.7% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 11.1% | 4.6% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 7.4% | 0.0% | 0.0% | 0.9% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 48.1% | 29.6% | 18.5% | 14.8% | 3.7% | 7.4% | 3.7% | 33.3% | 0.0% | 13.9% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 11.1% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 2.2% |
| GeneralizedExtremeValue | 51.9% | 18.5% | 7.4% | 11.1% | 14.8% | 3.7% | 7.4% | 14.8% | 0.0% | 14.8% | 11.1% | 40.7% | 16.4% |
| LogLogistic | 7.4% | 0.0% | 11.1% | 7.4% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 37.0% | 33.3% | 0.0% | 7.4% | 14.8% | 9.9% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 18.5% | 18.5% | 0.0% | 0.0% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 4.3% |

Ventana de agregación de 3 meses

| PDF | 1 trimestre | 2 trimestre | 3 trimestre | 4 trimestre | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.9% |
| Weibull | 7.4% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 5.6% |
| Lognormal | 3.7% | 7.4% | 14.8% | 0.0% | 6.5% |
| Exponential | 18.5% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 4.6% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% | 44.4% | 11.1% | 13.9% |
| GeneralizedPareto | 11.1% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.8% |
| Normal | 0.0% | 25.9% | 0.0% | 0.0% | 6.5% |
| Gamma | 33.3% | 11.1% | 0.0% | 0.0% | 11.1% |
| Logistic | 0.0% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 3.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 3.7% | 11.1% | 25.9% | 70.4% | 27.8% |
| LogLogistic | 0.0% | 0.0% | 14.8% | 18.5% | 8.3% |
| Nakagami | 22.2% | 11.1% | 0.0% | 0.0% | 8.3% |

Ventana de agregación de 6 meses

| PDF | 1 semestre | 2 semestre | Total |
|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 14.8% | 0.0% | 7.4% |
| Lognormal | 7.4% | 11.1% | 9.3% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 7.4% | 25.9% | 16.7% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 29.6% | 0.0% | 14.8% |
| Gamma | 7.4% | 0.0% | 3.7% |
| Logistic | 3.7% | 0.0% | 1.9% |
| GeneralizedExtremeValue | 11.1% | 33.3% | 22.2% |
| LogLogistic | 0.0% | 29.6% | 14.8% |
| Nakagami | 18.5% | 0.0% | 9.3% |

Ventana de agregación de 12 meses

| PDF | 1 año | Total |
|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 11.1% | 11.1% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% |
| Logistic | 11.1% | 11.1% |
| GeneralizedExtremeValue | 48.1% | 48.1% |
| LogLogistic | 29.6% | 29.6% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 20 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la precipitación en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - Precipitación.**

Ventana de agregación de 1 mes

| PDF | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% | 40.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.3% |
| Lognormal | 6.7% | 6.7% | 20.0% | 33.3% | 33.3% | 86.7% | 6.7% | 6.7% | 20.0% | 6.7% | 60.0% | 66.7% | 29.4% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 1.7% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 26.7% | 0.0% | 40.0% | 26.7% | 0.0% | 0.0% | 8.3% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 20.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 1.7% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 40.0% | 26.7% | 0.0% | 33.3% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 13.3% | 13.3% | 12.2% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 6.7% | 0.0% | 6.7% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 2.2% |
| GeneralizedExtremeValue | 86.7% | 73.3% | 0.0% | 0.0% | 13.3% | 6.7% | 13.3% | 93.3% | 6.7% | 33.3% | 26.7% | 13.3% | 30.6% |
| LogLogistic | 6.7% | 6.7% | 0.0% | 6.7% | 20.0% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 6.7% | 26.7% | 0.0% | 0.0% | 6.7% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 20.0% | 6.7% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.9% |

Ventana de agregación de 3 meses

| PDF | 1 trimestre | 2 trimestre | 3 trimestre | 4 trimestre | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 26.7% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 8.3% |
| Lognormal | 26.7% | 26.7% | 33.3% | 0.0% | 21.7% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 1.7% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 0.0% | 3.3% |
| Gamma | 26.7% | 6.7% | 0.0% | 13.3% | 11.7% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| GeneralizedExtremeValue | 0.0% | 20.0% | 40.0% | 40.0% | 25.0% |
| LogLogistic | 6.7% | 6.7% | 26.7% | 46.7% | 21.7% |
| Nakagami | 6.7% | 20.0% | 0.0% | 0.0% | 6.7% |

Ventana de agregación de 6 meses

| PDF | 1 semestre | 2 semestre | Total |
|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 6.7% | 0.0% | 3.3% |
| Lognormal | 33.3% | 6.7% | 20.0% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 0.0% | 13.3% | 6.7% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 6.7% | 0.0% | 3.3% |
| Logistic | 0.0% | 13.3% | 6.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 13.3% | 13.3% | 13.3% |
| LogLogistic | 0.0% | 53.3% | 26.7% |
| Nakagami | 40.0% | 0.0% | 20.0% |

Ventana de agregación de 12 meses

| PDF | 1 año | Total |
|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 13.3% | 13.3% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 13.3% | 13.3% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% |
| Logistic | 6.7% | 6.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 6.7% | 6.7% |
| LogLogistic | 60.0% | 60.0% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% |

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.1.1.2.3. Clasificación SPI

El valor de Z encontrado es el valor del SPI, es decir el valor normal gracias a este ajuste para un lugar y periodo deseado. Los valores positivos y negativos indican que las precipitaciones son respectivamente, mayores o menores que la media. El valor del SPI al ser normalizado indica que los periodos secos y húmedos se presentan de la misma forma, entonces, este índice puede ser también aplicado para el seguimiento de periodos húmedos. La Tabla 6 presenta la escala de colores para las clases de sequía y los valores del SPI.

**Tabla 6 Clasificación de sequía por rangos de SPI.**

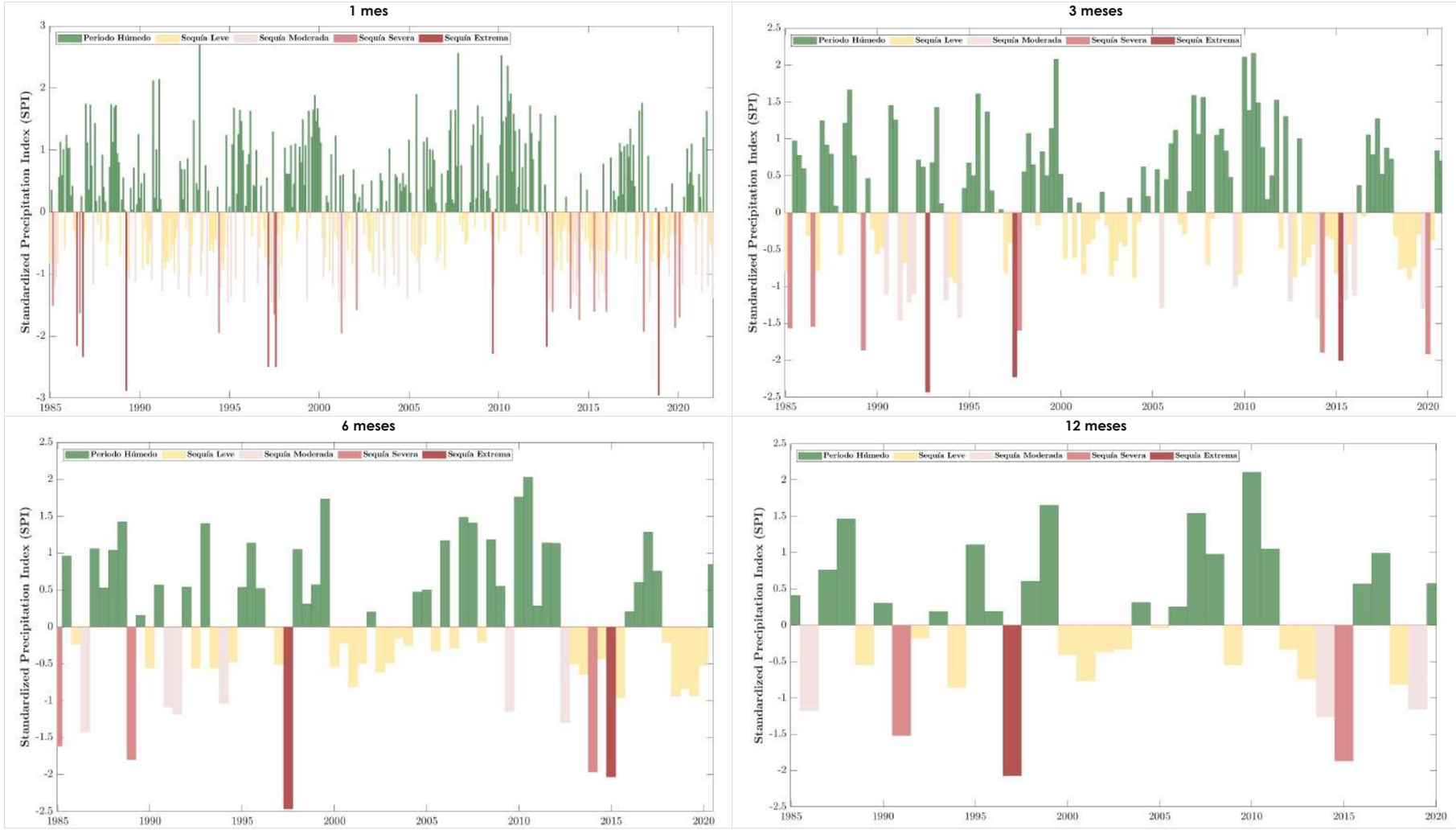
| Escala de colores | SPI | Clasificación |
|---|---|---|
| | SPI > 0 | Periodo húmedo |
| | 0 a - 0,99 | Sequía leve |
| | -1,00 a -1,49 | Sequía moderada |
| | -1,50 a -1,99 | Sequía Severa |
| | SPI ≤ -2,00 | Sequía extrema |

*Fuente:* Thomaz et al., (2023)

En la Figura 21 y Figura 22 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados del SPI en las diferentes ventanas de agregación analizadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) y la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101), respectivamente. Cada ventana de agregación del SPI proporciona información valiosa y complementaria. Las ventanas de agregación más cortas capturan la variabilidad y los extremos a corto plazo, mientras que las ventanas de agregación más largas permiten identificar tendencias y patrones más persistentes en las condiciones climáticas. La variabilidad es más alta en la gráfica de la ventana de agregación de 1 mes y disminuye a medida que aumenta la escala temporal de la ventana de agregación. Las gráficas de 6 y 12 meses muestran tendencias más claras y persistentes en las condiciones de humedad y sequía.

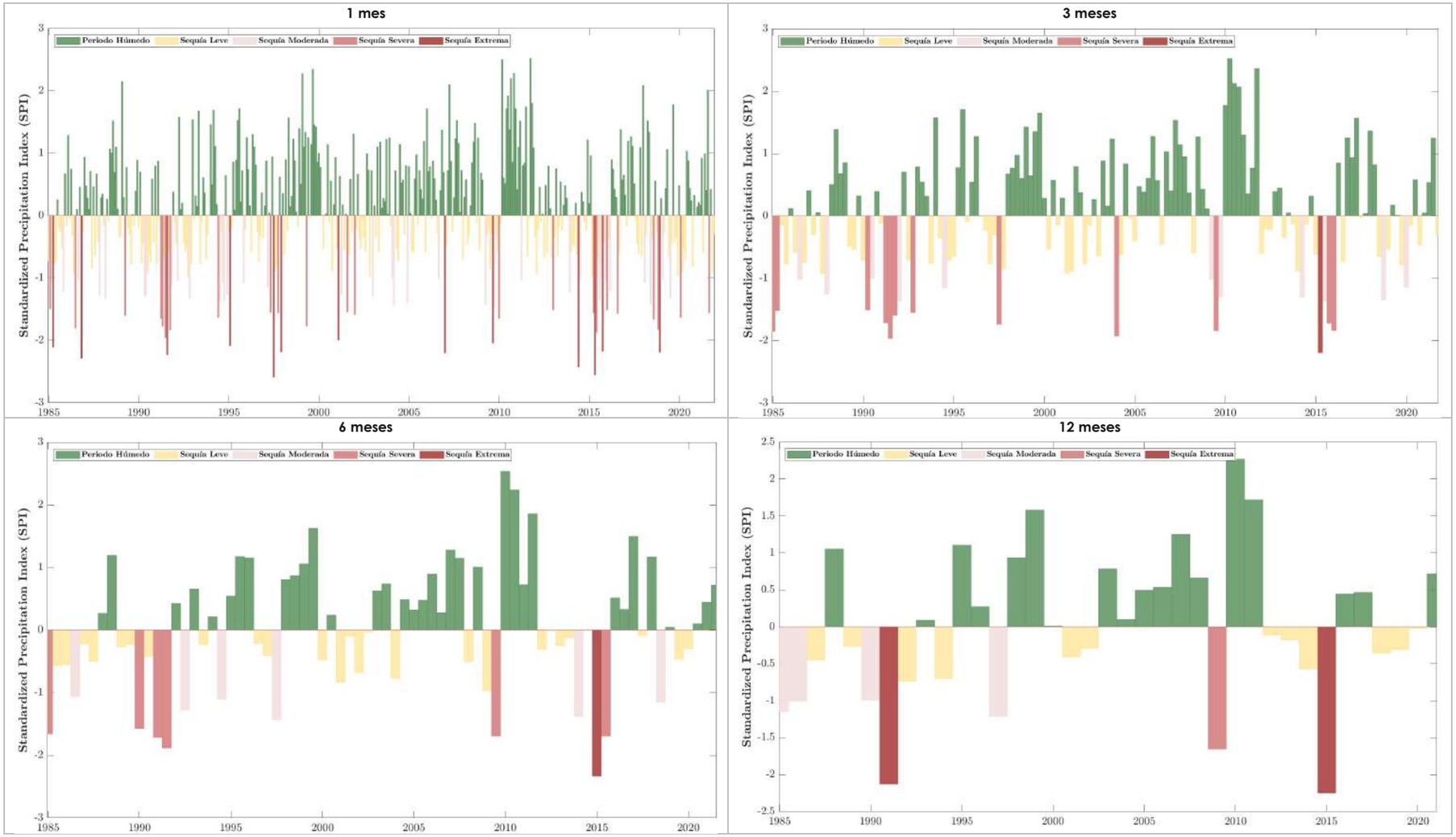
En el Anexo 8. SPI se presentan los resultados del SPI y su clasificación para todas las cuencas de las áreas de estudio. En general, las cuencas de la SZH 1501 muestran valores del SPI que indican sequías severas y extremas en las diversas ventanas de agregación para los años de 1997 y 2015. Por otro lado, las cuencas de la NSS 2906-01 presentan valores del SPI que indican sequías severas y extremas en las diferentes ventanas de agregación para los años de 1991, 2009 y 2015, así como sequías moderadas en los años de 1985 y 1997.

**Figura 21 SPI para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101).**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 22 SPI para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101).**




*Fuente: Elaboración propia*

En cada ventana de agregación, se tomó el valor del percentil 95 para los SPI por debajo de 0, los que indican las sequías. El percentil 95 representa el valor por debajo del cual se encuentran el 95% de los datos, es decir, el 5% de los datos más altos del SPI. Finalmente, en cada cuenca, se asigna un único valor de SPI como el promedio de los valores en cada ventana temporal. La Tabla 7 y Tabla 8 presentan los resultados del SPI en cada una de las cuencas de la NSS 2906-01 y SZH 1501, respectivamente.

**Tabla 7 Percentil 95 del SPI para las cuencas de la NSS 2906-01.**

| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 2906010101 | Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM | -2.06 | -1.85 | -1.81 | -2.20 | -1.98 |
| 2906010102 | Complejo Ciénaga Playazo | -2.07 | -1.88 | -1.93 | -2.26 | -2.03 |
| 2906010103 | Caño Schiller entre La Loma y El Jagüey | -2.01 | -1.94 | -1.96 | -1.81 | -1.93 |
| 2906010104 | Caño Schiller entre el rio Magdalena y La Loma | -2.02 | -1.95 | -2.24 | -1.92 | -2.03 |
| 2906010105 | Arroyo Pacheco y otros directos al Caño Schiller | -1.88 | -2.03 | -1.94 | -1.81 | -1.91 |
| 2906010106 | Arroyos Palma de Vino, Pertuz y Los Puercos | -1.98 | -2.01 | -2.05 | -2.11 | -2.04 |
| 2906010200 | Caños Hondo, El Loro y otros directos al rio Magdalena | -1.90 | -1.96 | -1.97 | -2.04 | -1.97 |
| 2906010301 | Complejo Ciénaga de Buenavista | -1.97 | -1.87 | -1.80 | -1.92 | -1.89 |
| 2906010302 | Complejo Ciénaga El Diluvio | -2.04 | -1.83 | -2.09 | -2.19 | -2.04 |
| 2906010400 | Complejo Caño El Salado | -1.97 | -1.87 | -1.95 | -2.14 | -1.98 |
| 2906010501 | Complejo Cenagoso-Sector Palermo | -1.95 | -1.70 | -1.86 | -1.94 | -1.86 |
| 2906010502 | Complejo Cenagoso-Sector Sitionuevo | -1.93 | -1.79 | -1.79 | -1.99 | -1.87 |
| 2906010503 | Caño Los Micos | -2.01 | -1.86 | -1.78 | -2.00 | -1.91 |
| 2906010600 | Complejo de Ciénagas Vía Parque Isla Salamanca | -1.98 | -1.70 | -1.66 | -1.83 | -1.79 |
| 2906010700 | Complejo Lagunar Ciénaga Grande | -1.91 | -1.78 | -1.76 | -1.54 | -1.75 |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 8 Percentil 95 del SPI para las cuencas de la SZH 1501.**

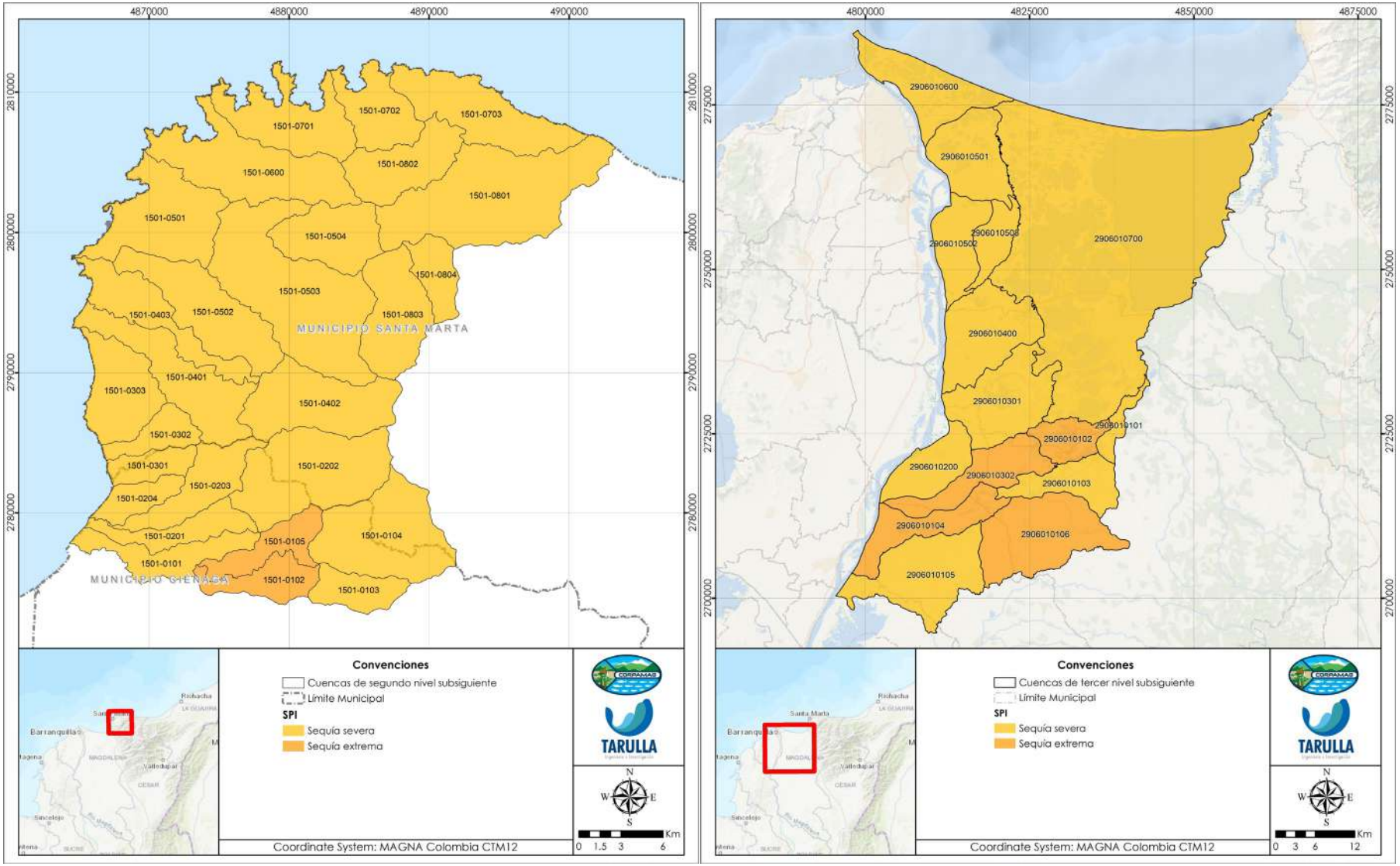
| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 15010104 | Río Cordoba-Sector Agualinda | -2,05 | -1,79 | -1,95 | -2,19 | -1,99 |
| 15010303 | Quebrada El Ebano y otros directos al Caribe | -1,83 | -1,93 | -1,80 | -1,80 | -1,84 |
| 15010202 | Río Toribio entre Guayabal y El Vergel | -2,02 | -1,66 | -1,95 | -1,87 | -1,87 |
| 15010401 | Directos al Río Gaira entre Minca y el mar Caribe (mi) | -1,93 | -1,83 | -1,72 | -1,66 | -1,79 |
| 15010703 | Quebradas Santa Rosa, Playa Brava y otros directos al Caribe | -1,77 | -1,93 | -2,20 | -1,74 | -1,91 |
| 15010600 | Quebrada Concha | -1,85 | -1,87 | -1,75 | -1,95 | -1,86 |

| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 15010501 | Río Manzanares en Santa Marta | -1,84 | -1,78 | -1,83 | -1,90 | -1,84 |
| 15010801 | Río Piedras entre San Isidro y el Mar Caribe | -1,83 | -1,89 | -1,83 | -1,81 | -1,84 |
| 15010802 | Quebrada Jordan | -1,93 | -1,83 | -1,82 | -1,87 | -1,86 |
| 15010702 | Quebrada Cinto y otros directos al Caribe | -1,98 | -1,93 | -1,78 | -1,86 | -1,89 |
| 15010701 | Quebrada Gayraca y otros directos al Caribe | -1,87 | -1,83 | -1,66 | -1,95 | -1,83 |
| 15010504 | Quebrada Matogiro (Donama) | -1,98 | -1,79 | -1,74 | -1,90 | -1,85 |
| 15010804 | Quebrada La Lisa | -1,97 | -1,81 | -1,75 | -2,02 | -1,89 |
| 15010803 | Río Piedras entre la Cuchills de San Lorenzo y San Isidro | -1,90 | -1,99 | -1,69 | -1,91 | -1,87 |
| 15010503 | Río Manzanares entre la Cuchilla de San Lorenzo y Santa Marta | -1,98 | -1,76 | -1,72 | -1,82 | -1,82 |
| 15010402 | Río Gaira entre la Cuchilla de San Lorenzo y Minca | -1,92 | -1,99 | -2,05 | -1,70 | -1,92 |
| 15010502 | Quebrada Tamaca | -2,04 | -1,75 | -1,58 | -1,79 | -1,79 |
| 15010403 | Directos al rio Gaira entre Minca y el mar Caribe (md) | -1,92 | -1,75 | -1,62 | -1,72 | -1,75 |
| 15010302 | Quebrada Don Jaca | -1,87 | -1,88 | -1,90 | -1,55 | -1,80 |
| 15010301 | Quebrada El Doctor | -1,88 | -1,98 | -1,94 | -1,81 | -1,90 |
| 15010203 | Quebrada Marinca | -1,83 | -1,98 | -1,96 | -2,06 | -1,96 |
| 15010204 | Quebrada El Guayabo | -1,91 | -1,96 | -2,12 | -1,73 | -1,93 |
| 15010201 | Río Toribio entre vereda El Vergel y Mar Caribe | -1,85 | -1,93 | -1,92 | -2,07 | -1,94 |
| 15010101 | Río Cordoba-Sector Cordobita | -1,88 | -1,90 | -2,02 | -2,04 | -1,96 |
| 15010105 | Quebrada El Quindio y otros directos al Río Cordoba (md) | -2,03 | -1,94 | -2,10 | -2,05 | -2,03 |
| 15010102 | Quebrada Lourdes y otros directos al Río Cordoba (mi) | -1,95 | -2,04 | -2,02 | -2,11 | -2,03 |
| 15010103 | Quebrada La Sierrita | -2,02 | -1,84 | -2,01 | -2,06 | -1,98 |

*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 23 muestra el resultado del SPI clasificado en cada una de las cuencas de las áreas de estudio. Se puede apreciar que, al sur de la SZH 1501, se encuentran las cuencas Quebrada Lourdes y otros directos al Río Córdoba (mi) (15010102) y Quebrada El Quindío y otros directos al Río Córdoba (md) (15010105), las cuales presentan los valores más altos del SPI. Así mismo, en la NSS 2906-01, las cuencas Complejo Ciénaga Playazo (2906010102), Caño Schiller entre el río Magdalena y La Loma (2906010104), Arroyos Palma de Vino, Pertuz y Los Puercos (2906010106), y Complejo Ciénaga El Diluvio (2906010302) muestran los valores más altos del SPI.

**Figura 23 Clasificación del SPI en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

### *5.1.1.3. ISM*

El ISM corresponde al valor normalizado del SPI, obtenido mediante tres ecuaciones que consideran los valores de probabilidad típicos de la distribución normal y los valores del SPI entre "0" y "−3" (Tabla 9). Para normalizar el SPI entre 0 y 1, se utilizan los valores de probabilidad acumulada de una curva normal, asumiendo que los valores del SPI de −1, −2 y −3 están asociados con las probabilidades acumuladas de hasta 1, 2 y 3 desviaciones estándar en el lado derecho de la curva.

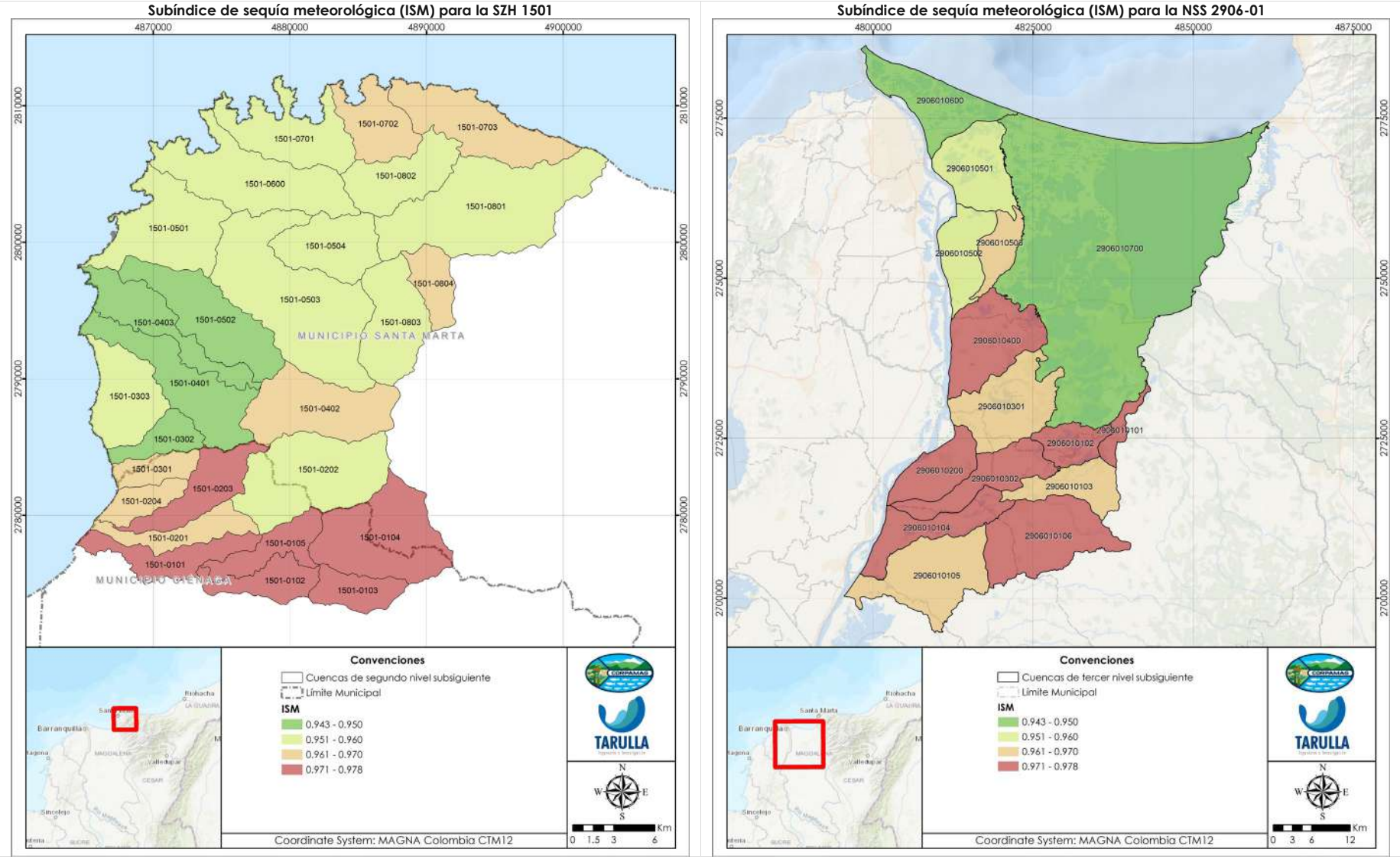
**Tabla 9 Normalización del indicador SPI.**

| Valores SPI | Probabilidad acumulada: distribución normal | Ecuación ajustada |
|---|---|---|
| 0 | 0,50 | $y = -0{,}341x + 0{,}5$ |
| -1 | 0,841 | |
| -1 | 0,841 | $y = -0{,}136x + 0{,}705$ |
| -2 | 0,977 | |
| -2 | 0,977 | $y = 0{,}022x + 0{,}933$ |
| -3 | 0,999 | |

*Fuente:* Thomaz et al., (2023)

Los valores del ISM, resultado de la normalización del SPI, arroja valores superiores a 0,94 en las dos áreas de estudio (ver Figura 24). Evidenciando, tanto para SZH 1501 y NSS 2906-01 la presencia de los valores más altos en las cuencas localizadas al sur de estas. Así mismo, las cuencas Complejo de Ciénagas Vía Parque Isla Salamanca (2906010600) y Complejo Lagunar Ciénaga Grande (2906010700) ubicadas en la zona norte de la NSS 2906-01 muestran los valores más bajos del ISM.

**Figura 24 Subíndice de sequía meteorológica (ISM) en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

## 5.1.2. Subíndice de sequía agrícola (ISA)

El subíndice de sequía agrícola (ISA) se representa a partir del Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI) desarrollado Tsakiris & Vangelis (2005) en la Universidad Técnica Nacional de Atenas (Grecia), que aborda los déficits de agua como una especie de equilibrio entre la entrada y salida de un sistema hídrico. El RDI se calcula con la información sobre la lluvia acumulada (observada) y la evapotranspiración potencial (calculada).

### *5.1.2.1. Temperatura*

Los análisis de la variable de temperatura se desarrollaron empleando los pasos metodológicos presentados en la sección 5.1.1.1, teniendo en cuenta la Guía de Prácticas Hidrológicas de la OMM No 168 (WMO, 2011), la Guía de prácticas metrológicas No 5.2 y los estándares de calidad aplicables para Colombia. Para esto se realizó el análisis de consistencia y homogeneidad de la información a una resolución diaria. El procedimiento aplicado propende por la obtención de la mejor calidad en la información.

#### 5.1.2.1.1. Red de monitoreo de la temperatura

Las estaciones identificadas que registran la temperatura, según las categorías del IDEAM son: climatológica ordinaria, climatológica principal, agrometeorológica y sinóptica principal. El IDEAM en su página web[4] describe las estaciones denominadas por cada una de estas categorías. En total se identificaron 26 estaciones de monitoreo de la variable meteorológica de temperatura a nivel regional (ver Tabla 3). La Figura 9 muestra la ubicación de las estaciones con respecto a las dos áreas de estudio. En el Anexo 1. Datos Nativos se presenta la información de temperatura diaria registrada por la red de monitoreo climatológica.

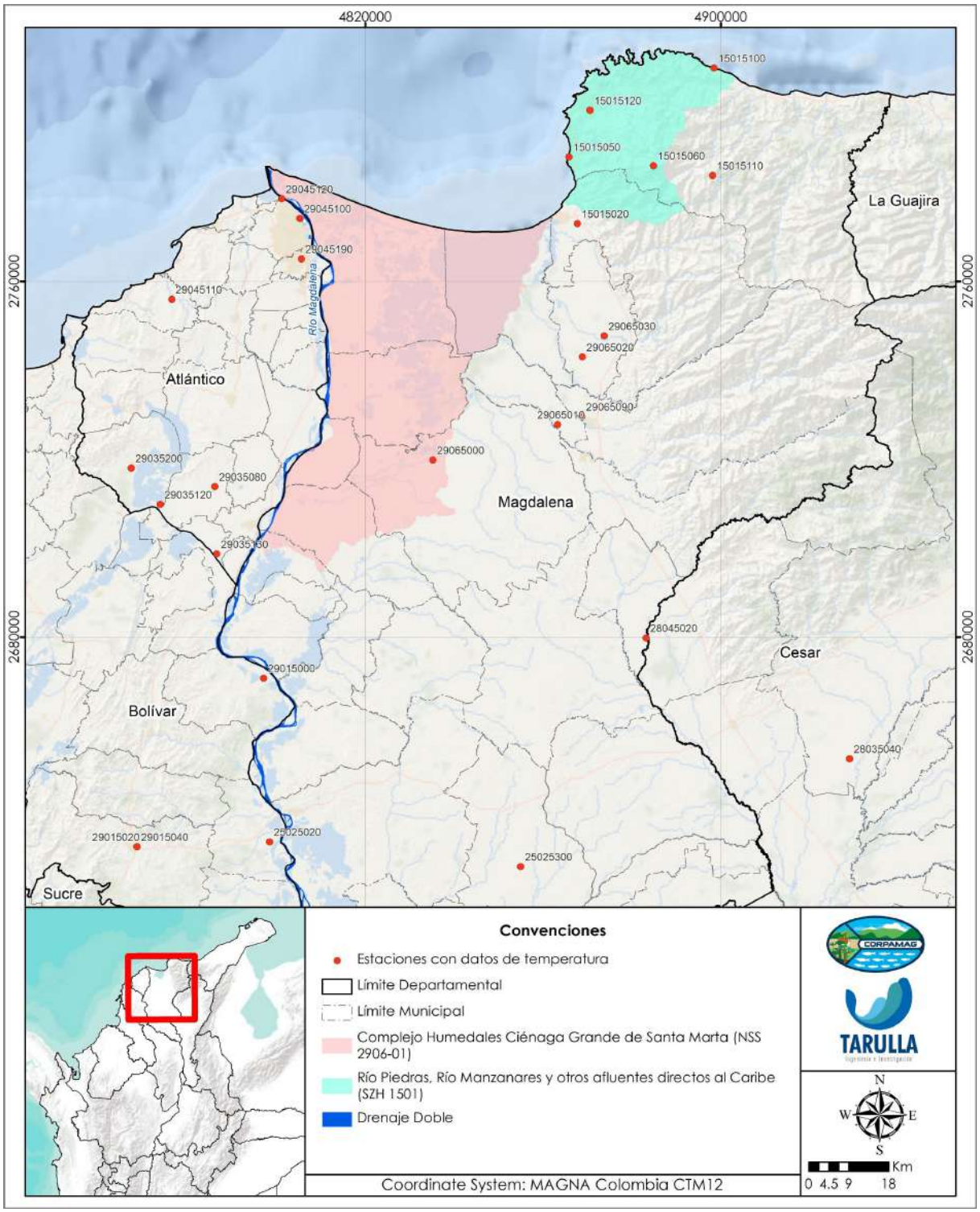
[4] http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario

**Tabla 10 Estaciones con registros de temperatura.**

| Nombre | Código | Municipio | Departamento | Categoría | Elevación | Coordenadas origen nacional | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| Ye La | 15015020 | Ciénaga | Magdalena | Climática Ordinaria | 20 | 4867730,90 | 2772970,82 |
| Aeropuerto Simón Bolívar | 15015050 | Santa Marta | Magdalena | Sinóptica Principal | 4 | 4865853,98 | 2788004,33 |
| San Lorenzo - Aut | 15015060 | Santa Marta | Magdalena | Climática Principal | 2200 | 4884864,51 | 2786024,28 |
| Parque Tayrona | 15015100 | Santa Marta | Magdalena | Climática Ordinaria | 30 | 4898547,34 | 2807967,35 |
| Alto De Mira | 15015110 | Santa Marta | Magdalena | Climática Ordinaria | 180 | 4898210,36 | 2783814,90 |
| Universidad Tecnologica - Aut | 15015120 | Santa Marta | Magdalena | Climática Principal | 7 | 4870587,49 | 2798456,74 |
| Monterrey Forestal | 25025020 | Zambrano | Bolívar | Climática Principal | 25 | 4798442,15 | 2633910,54 |
| Seis El | 25025300 | San Sebastián De Buenavista | Magdalena | Climática Ordinaria | 50 | 4854992,15 | 2628340,57 |
| Guaymaral | 28035040 | Valledupar | Cesar | Climática Ordinaria | 50 | 4929040,31 | 2652580,15 |
| Algarrobo | 28045020 | El Copey | Cesar | Climática Ordinaria | 60 | 4883192,52 | 2679789,27 |
| El Guamo - Aut | 29015000 | El Guamo | Bolívar | Climática Ordinaria | 75 | 4797092,70 | 2670715,35 |
| Carmen De Bolivar | 29015020 | El Carmén De Bolívar | Bolívar | Agrometeorológica | 152 | 4768601,21 | 2632794,15 |
| Carmen De Bolivar - Aut | 29015040 | El Carmén De Bolívar | Bolívar | Climática Principal | 152 | 4768601,21 | 2632794,15 |
| Normal Manati - Aut | 29035080 | Manatí | Atlántico | Climática Principal | 10 | 4786130,70 | 2713812,17 |
| Limon El | 29035120 | Manatí | Atlántico | Climática Ordinaria | 7 | 4773841,49 | 2709807,67 |
| Santa Lucia Granja | 29035130 | Santa Lucia | Atlántico | Climática Principal | 5 | 4786545,53 | 2698668,49 |
| Repelon - Aut | 29035200 | Repelón | Atlántico | Climática Principal | 10 | 4767297,03 | 2717961,58 |
| Base Naval | 29045100 | Barranquilla | Atlántico | Climática Principal | 5 | 4805230,42 | 2774120,88 |
| Juan De Acosta | 29045110 | Juan De Acosta | Atlántico | Climática Ordinaria | 20 | 4776395,77 | 2755933,54 |
| Flores Las | 29045120 | Barranquilla | Atlántico | Climática Principal | 8 | 4801160,40 | 2778568,61 |
| Aeropuerto E. Cortissoz - Aut | 29045190 | Soledad | Atlántico | Sinóptica Principal | 14 | 4805571,22 | 2765026,76 |
| Media Luna - Aut | 29065000 | Pivijai | Magdalena | Climática Principal | 20 | 4835188,22 | 2719783,80 |
| Zacapa | 29065010 | El Retén | Magdalena | Climática Ordinaria | 30 | 4863301,54 | 2727764,31 |
| Padelma | 29065020 | Zona Bananera | Magdalena | Climática Ordinaria | 20 | 4868859,59 | 2742973,57 |
| Prado Sevilla | 29065030 | Zona Bananera | Magdalena | Climática Ordinaria | 18 | 4873797,01 | 2747714,35 |
| Luz Mary | 29065090 | Aracataca | Magdalena | Climática Ordinaria | 50 | 4868777,34 | 2729585,27 |

*Fuente: Elaboración propia*

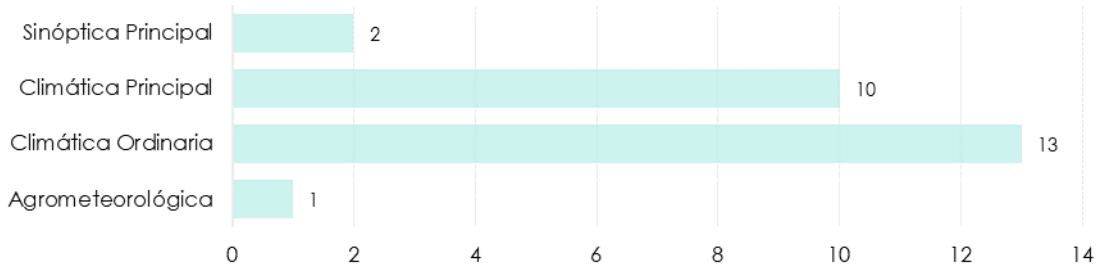
**Figura 25 Red de monitoreo climatológico con registros de temperatura**




*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 10 muestra la cantidad de estaciones que registran temperatura por cada una de las categorías de estación del IDEAM. En total, se cuenta con 13 estaciones climáticas ordinarias, 10 estaciones climáticas principales, 2 estaciones sinópticas principales y 1 estación agrometeorológica.

**Figura 26 Cantidad de estaciones de temperatura por categoría de la estación.**



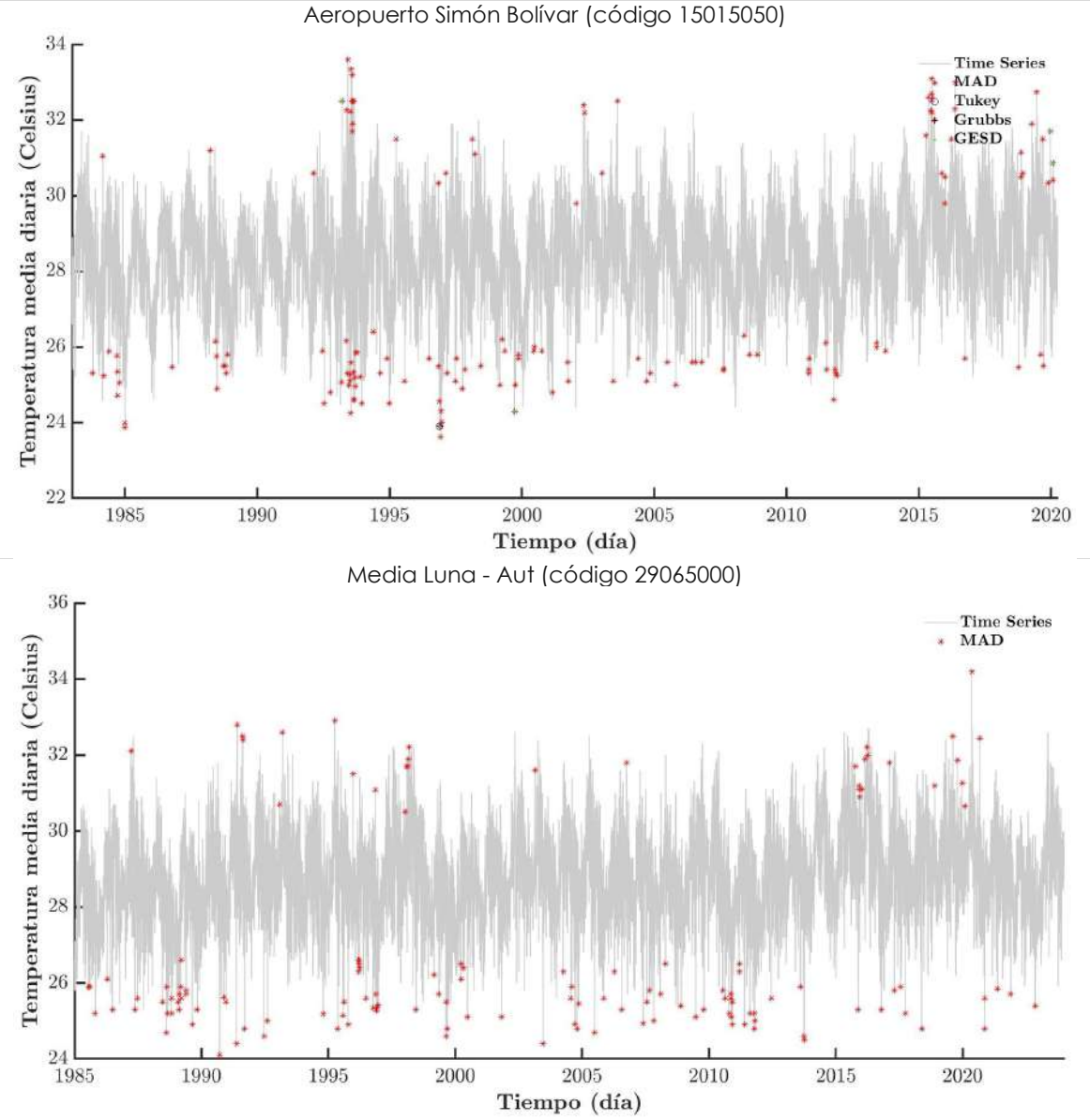

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.1.2.1.2. Análisis de consistencia y homogeneidad de datos de temperatura

Los análisis se llevaron a cabo para la ventana temporal comprendida entre el 01/01/1975 al 31/12/2023. A modo de ejemplo, la Figura 27 muestra registros de temperatura tomados por las estaciones. Para cada estación se identificaron y removieron los valores atípicos a la serie de temperatura, tomando en cuenta que la información meteorológica en la mayoría de los casos presenta discontinuidad temporal en sus registros, así como también ciertas inconstancias; estas debidas posiblemente a fallas en los instrumentos de medición, o a factores operativos de carácter antrópico en las estaciones de monitoreo. La detección de datos anómalos se llevó a cabo mediante las metodologías de Grubbs, GESD, Tukey y MAD.

A manera de ejemplo, la Figura 27 presenta los resultados de los valores detectados como anómalos en las diferentes metodologías evaluadas para la temperatura en dos estaciones presentes en el área de estudio. En el Anexo 2. Datos Anómalos se presentan los resultados de la detección de valores anómalos para todas las estaciones analizadas.

**Figura 27 Datos anómalos detectados para la temperatura diaria.**



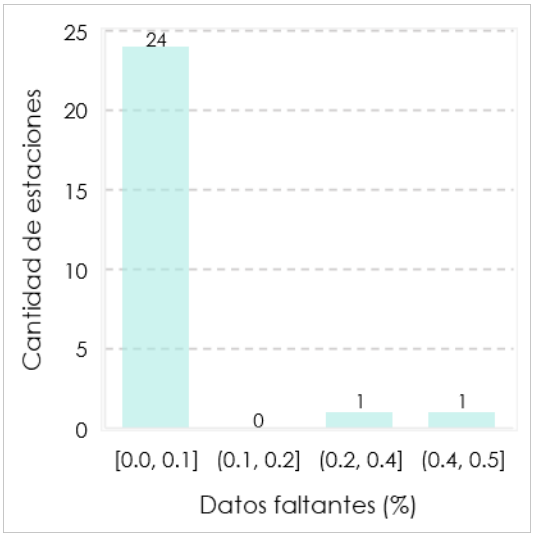

*Fuente: Elaboración propia*

Después de la detección y remoción de datos anómalos, se estima el porcentaje de datos faltantes en cada una de las series. Con los siguientes criterios: i) el periodo efectivo de registro de la serie no puede ser inferior a 10 años, y ii) el porcentaje de datos faltantes debe ser inferior al 20%, se aplicó una prueba de completitud de los datos. La prueba de completitud se considera aceptada si ambos criterios se cumplen, indicando que la estación es consistente.

En la Figura 28 se presenta el consolidado de los resultados de porcentaje de datos faltantes obtenidos. En el Anexo 3. Resumen Datos Sin Anómalos se presenta el resumen con la información de la cantidad de datos faltantes, el porcentaje de datos faltantes, la cantidad

de datos y la longitud en años del registro de datos para todas las series de tiempo sin datos anómalos.

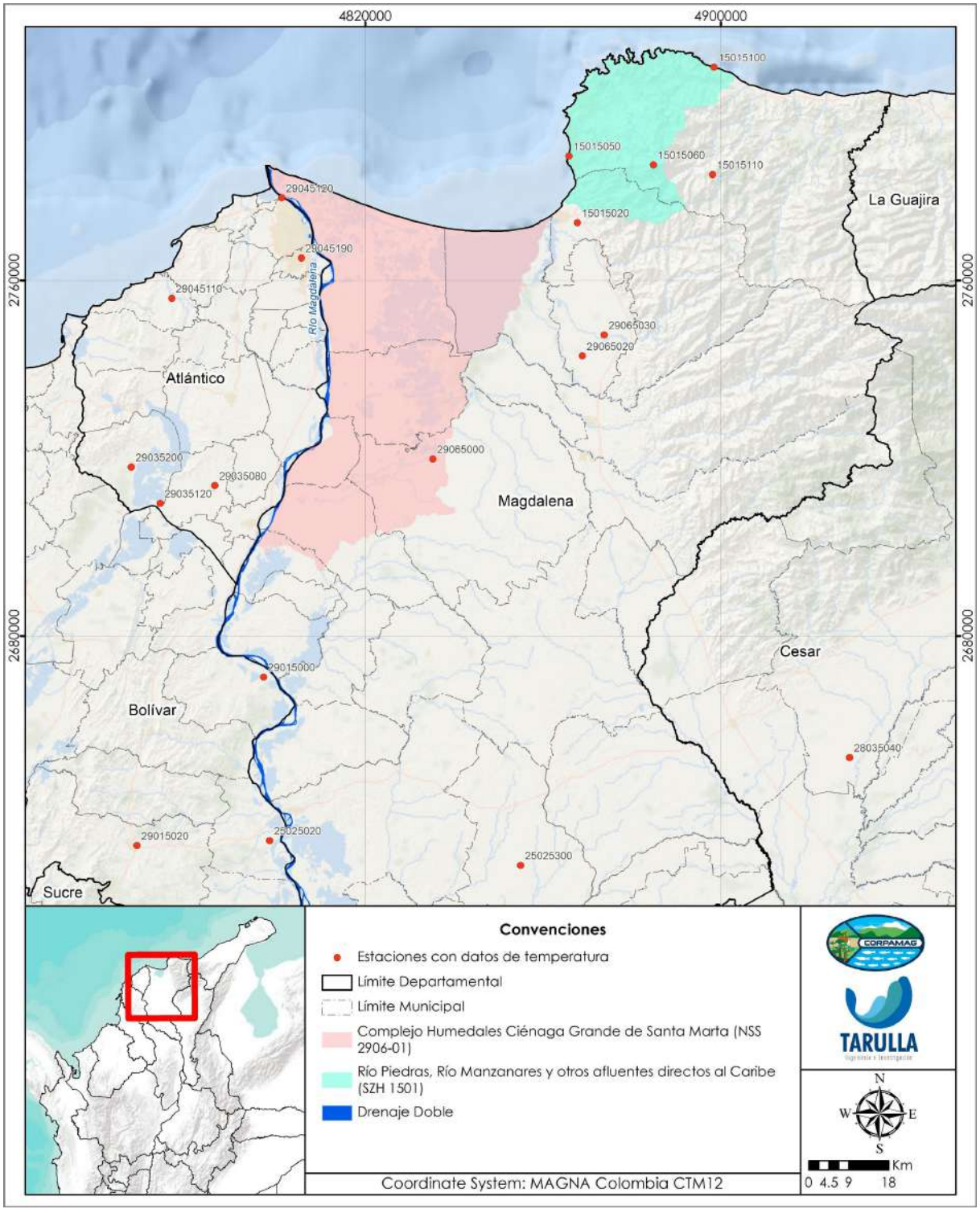
**Figura 28 Porcentaje de datos faltantes en las estaciones de temperatura.**




*Fuente: Elaboración propia*

Un total de 19 estaciones de temperatura cumplen con los criterios de completitud de la información (Figura 29). La Tabla 11 relaciona las estaciones de precipitación que presentan menos del 20 % de datos faltantes y una longitud de registros igual o superior a 10 años.

**Figura 29 Red de monitoreo climatológico con registros de temperatura que cumplen con los criterios de completitud de los datos.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 11 Estaciones de temperatura que cumplen con los criterios de completitud de los datos.**

| Nombre | Código | Municipio | Departamento |
|---|---|---|---|
| Ye La | 15015020 | Ciénaga | Magdalena |
| Aeropuerto Simón Bolívar | 15015050 | Santa Marta | Magdalena |
| San Lorenzo - Aut | 15015060 | Santa Marta | Magdalena |
| Parque Tayrona | 15015100 | Santa Marta | Magdalena |
| Alto De Mira | 15015110 | Santa Marta | Magdalena |
| Monterrey Forestal | 25025020 | Zambrano | Bolívar |
| Seis El | 25025300 | San Sebastián De Buenavista | Magdalena |
| Guaymaral | 28035040 | Valledupar | Cesar |
| El Guamo - Aut | 29015000 | El Guamo | Bolívar |
| Carmen De Bolivar | 29015020 | El Carmén De Bolívar | Bolívar |
| Normal Manati - Aut | 29035080 | Manatí | Atlántico |
| Limon El | 29035120 | Manatí | Atlántico |
| Repelon - Aut | 29035200 | Repelón | Atlántico |
| Juan De Acosta | 29045110 | Juan De Acosta | Atlántico |
| Flores Las | 29045120 | Barranquilla | Atlántico |
| Aeropuerto E. Cortissoz - Aut | 29045190 | Soledad | Atlántico |
| Media Luna - Aut | 29065000 | Pivijai | Magdalena |
| Padelma | 29065020 | Zona Bananera | Magdalena |
| Prado Sevilla | 29065030 | Zona Bananera | Magdalena |

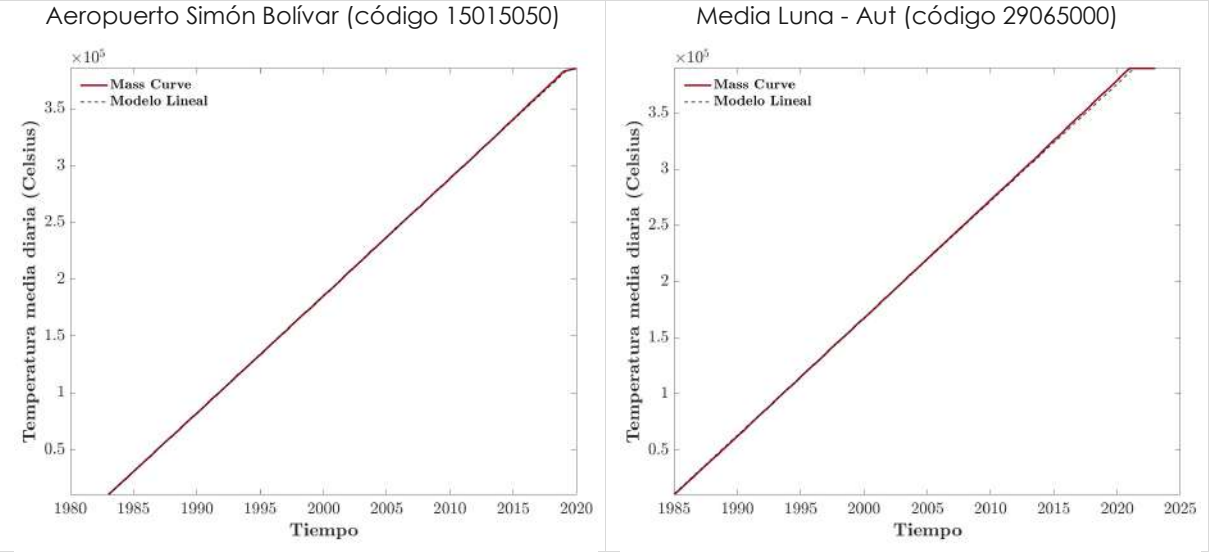
*Fuente: Elaboración propia*

Posteriormente, se completaron los datos mediante regresiones lineales múltiples haciendo uso de la elevación. A continuación, se realizó un análisis de homogeneidad para las estaciones que cumplen con el criterio de completitud, con el fin de verificar la consistencia de las series de tiempo y el método de complementación empleado. En el Anexo 4. Complementación se pueden consultar las series complementadas para todas las estaciones.

La curva de masa se define como la curva acumulada en un determinado periodo de tiempo, representada en un sistema de ejes donde se grafican los valores del tiempo (en años) en el eje x (abscisas) y la variable acumulada en el eje y (ordenadas). La pendiente de la línea trazada entre los puntos extremos de la curva de masa permite identificar fluctuaciones y posibles inconsistencias asociadas a errores de medición o traslado de la estación, entre otros factores. Si existen cambios bruscos en la pendiente de la curva, se considera que los datos de la estación no son homogéneos.

En la Figura 30 se presentan, a modo de ejemplo, las curvas para la estación Aeropuerto Simón Bolívar (código 15015050) y Media Luna – Aut (código 29065000), notando series homogéneas al no presentar cambios bruscos en la pendiente de las curvas de las variables de temperatura. En general, todas las estaciones de temperatura son homogéneas y no evidencian cambios abruptos en la pendiente de la curva. En el Anexo 5. Curvas de Masa se presentan las curvas de masa para todas las estaciones con la respectiva métrica de desempeño del Nash.

**Figura 30 Curvas de masa de la variable de temperatura.**




*Fuente: Elaboración propia*

### *5.1.2.2. RDI*

El Índice de Reconocimiento de Sequía (RDI) se basa en la relación entre dos cantidades agregadas de precipitación y la evapotranspiración potencial. El valor inicial del índice para un período determinado, indicado por un determinado mes (k) durante un año, se calcula mediante la siguiente ecuación (Tsakiris & Vangelis, 2005):

$$a_k = \frac{\sum_{j=1}^{j=k} P_j}{\sum_{j=1}^{j=k} PET_j}$$

Donde $P_j$ y $PET_j$ son la precipitación y la evapotranspiración potencial del $j$-ésimo mes del año hidrológico.

El RDI se calcula de manera similar que el SPI, y se recomienda utilizar períodos de 3, 6, 9 y 12 meses (ventanas de agregación), a partir de los datos mensuales de precipitación y evapotranspiración. El primer paso es calcular los totales acumulados de $a$ correspondientes al mes/año y escala temporal deseada, luego se ajusta la distribución de frecuencia de $a$ con una función teórica de densidad de probabilidad, la función de densidad es luego transformada a una distribución normal estandarizada (con media 0 y varianza 1), siendo el RDI el resultado de esta transformación.

A continuación, se describe el proceso de asignación de la temperatura en cada una de las cuencas de estudio, considerando que a partir de esta se determina la evapotranspiración potencial que luego es agregada de acuerdo con las ventanas temporales determinadas para el RDI (1 mes, 3 meses, 6 meses y 12 meses). Posteriormente, se presenta el ajuste de funciones de probabilidad empíricas, identificando cuál es la que mejor se ajusta a cada serie de datos en las diferentes ventanas temporales analizadas. Finalmente, se muestran los resultados del RDI clasificado.

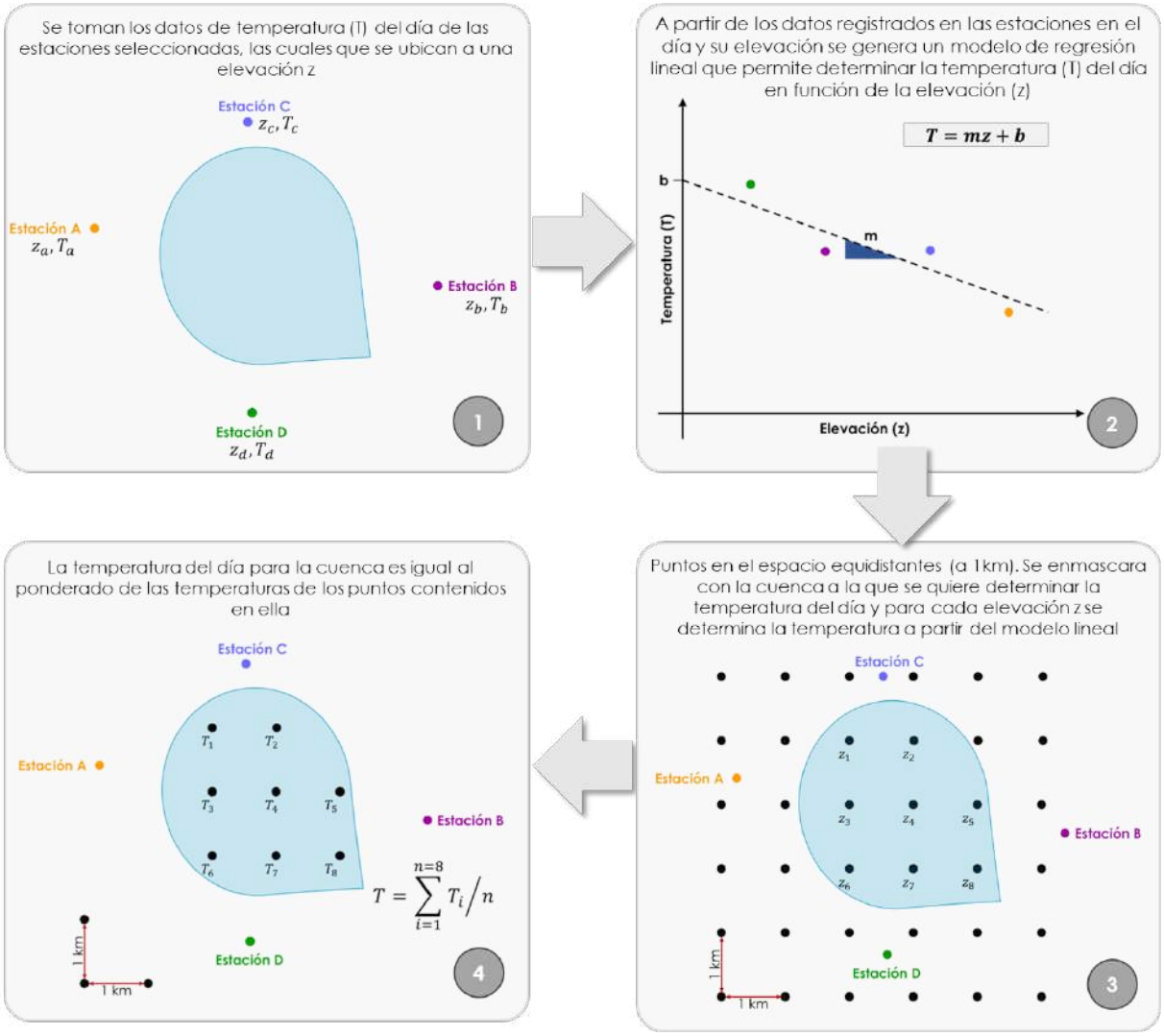
#### 5.1.2.2.1. Asignación de temperatura en las cuencas

Dado que la evapotranspiración potencial se deriva a partir de los datos de temperatura haciendo uso de la ecuación de Blaney–Criddle (Xiang et al., 2020). Con el fin de determinar la temperatura de cada cuenca se aplica el proceso metodológico que se presenta en la Figura 31.

Metodológicamente, se toman los datos de temperatura de las estaciones para el día (paso de tiempo) y la elevación a la que se encuentra ubicada la estación, esta última tomada del modelo de elevación digital de terreno de 12,5 m (ver paso 1 de la Figura 31). Con la información de temperatura y elevación se construye un modelo de regresión lineal que permite determinar la temperatura a partir de la elevación para el paso de tiempo en específico (ver paso 2 de la Figura 31). Luego, se genera puntos en el espacio equidistantes (a un kilómetro de distancia) que abarquen el área de estudio, y se toman solo aquellos puntos que estén contenidos en la cuenca a la cual se quiere determinar la temperatura del día (ver paso 3 de la Figura 31).

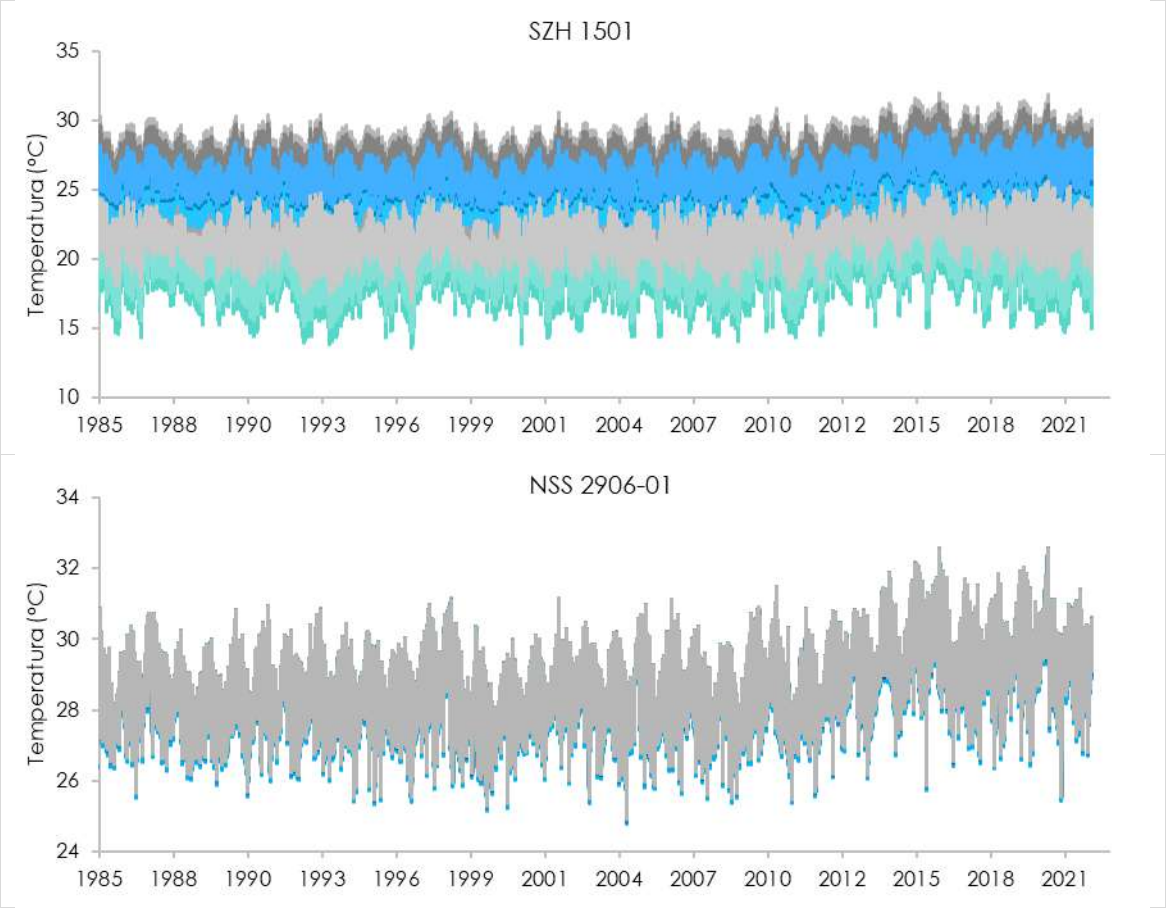
Cada punto georreferenciado presenta una elevación (z) tomada del modelo de elevación digital de terreno de 12,5 m, y para cada punto se estima la temperatura del día por medio del modelo de regresión lineal construido en el paso 2. Finalmente, se determina la temperatura del día en la cuenca como el ponderado de las temperaturas de los puntos contenidos en ella (ver paso 4 de la Figura 31). Los datos de temperatura resultado de la aplicación del proceso que se muestra en la Figura 31, en cada cuenca pueden ser consultados en el Anexo 9. Temperatura Cuencas. En la Figura 32 se presentan de manera representativa los datos de temperatura estimados en todas las cuencas.

**Figura 31 Proceso metodológico para el cálculo de la temperatura en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 32 Temperatura en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

### 5.1.2.2.2. Evapotranspiración potencial

Obtenida la temperatura en cada cuenca, se aplicó la ecuación de Blaney–Criddle y se obtuvo la evapotranspiración potencial. Para la estimación de la variable de evapotranspiración potencial se consideró el modelo matemático, a saber

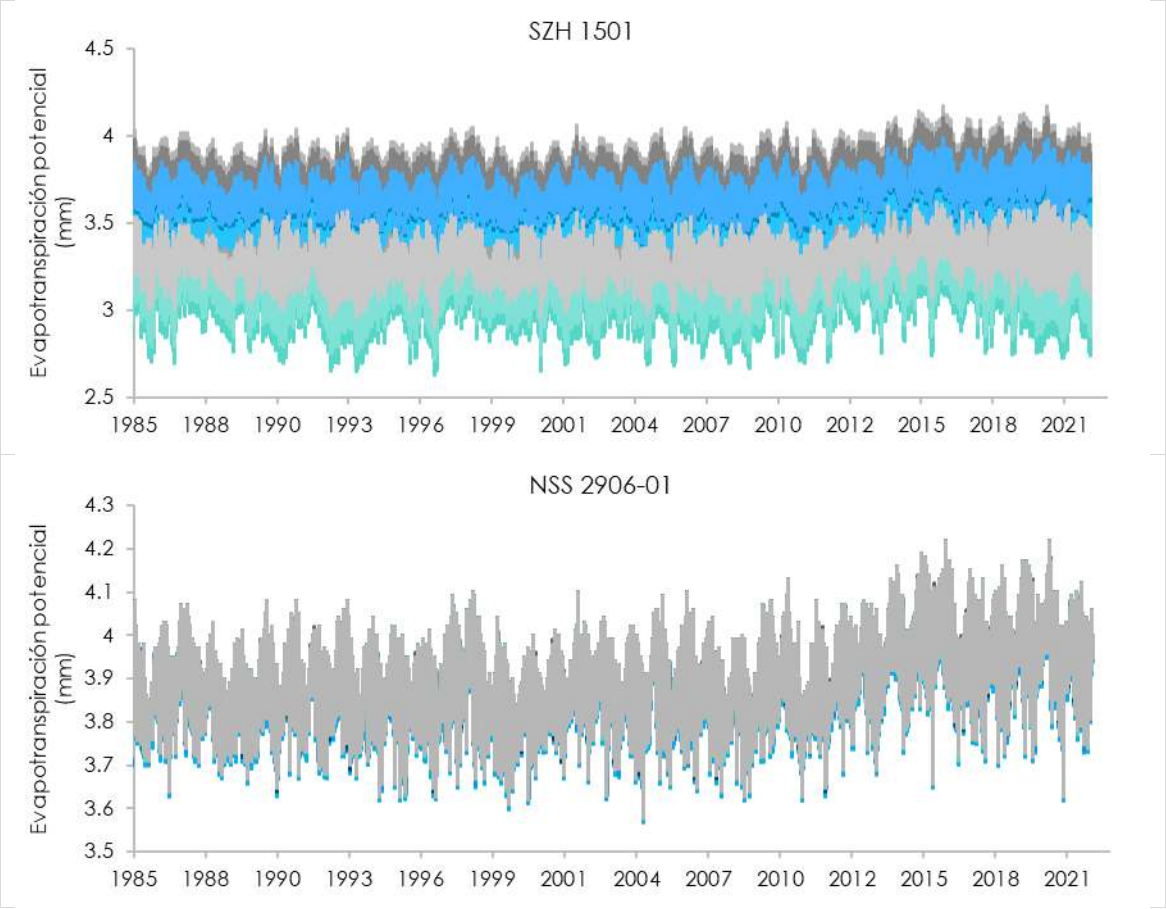
$$ETp = \rho\ (0{,}46T_a + 8)$$

$$\boldsymbol{T_a = 0{,}5(T_{max} + T_{min})}$$

Donde:
$T_{max}$ es la temperatura máxima del aire (°C)
$T_{min}$ es la temperatura mínima del aire (°C)
$\boldsymbol{\rho}$ es el porcentaje de insolación máxima diaria (N) respecto a la época de insolación teórica del año

En la Figura 33 se presentan las series de evapotranspiración potencial obtenidas en cada cuenca. En el Anexo 10. ETP puede ser consultadas las series de evapotranspiración potencial asignada a cada una de las cuencas.

**Figura 33 Evapotranspiración potencial para las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

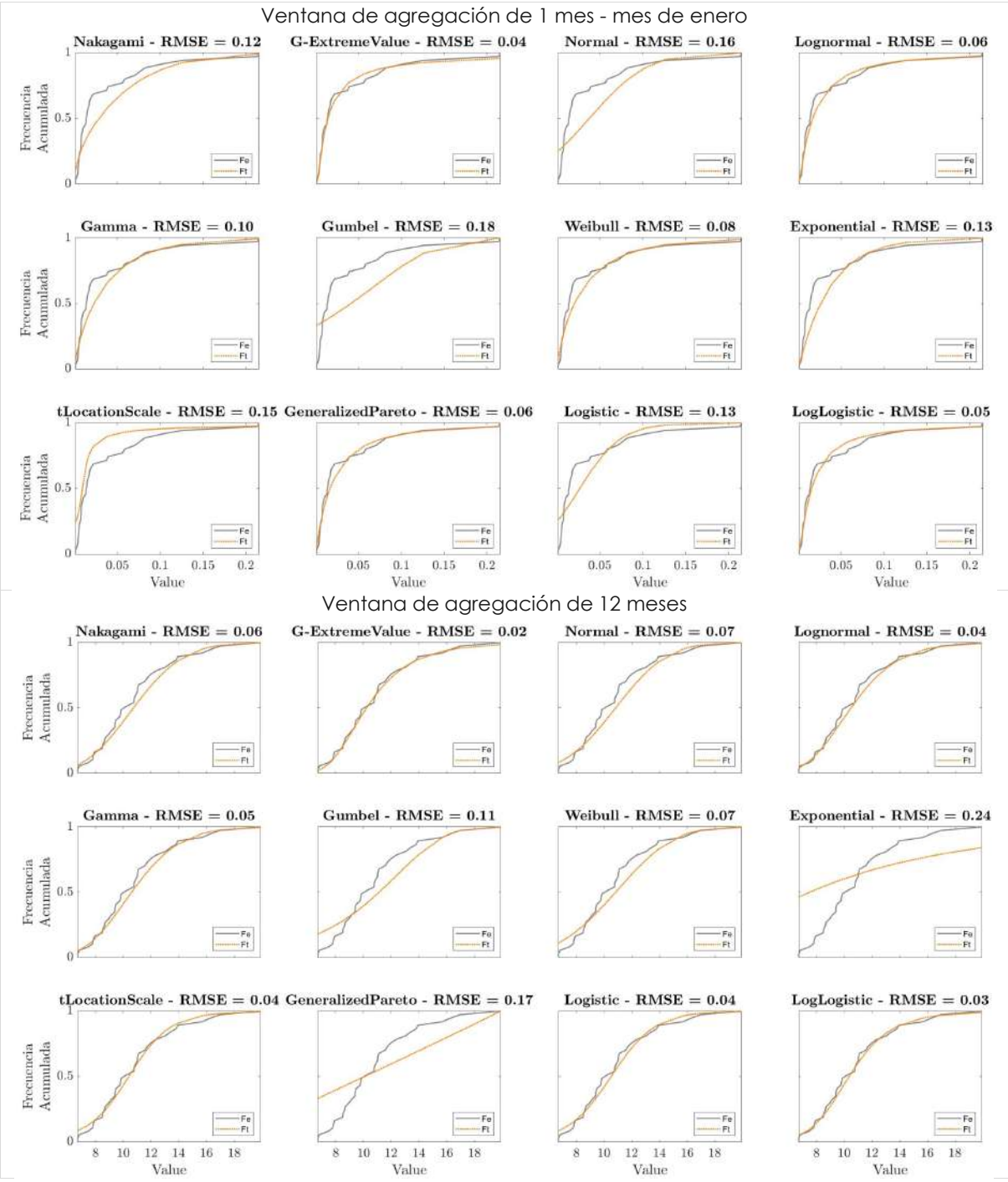
### 5.1.2.2.3. Ajuste funciones de probabilidad empíricas

El ajuste de una PDF se efectúa mediante la calibración de su frecuencia empírica (Fe) con la obtenida por los modelos o teórica (Ft). Para este caso se realizó la calibración mediante la (Fe) propuesta por Weibull, tal como lo describe (Dominguez, 2016) y las obtenidas por los 12 modelos a evaluar (ver Tabla 5). La selección del mejor ajuste se llevó a cabo mediante la métrica de error medio cuadrático, en donde este fuese menor, y la prueba de Kolmogorov-Smirnov fuera valida con un nivel de significancia del 95% (tal como se presenta en la sección 5.1.1.2.2).

A manera de ejemplo, la Figura 34 presenta los ajustes de las doce funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) del mes de enero y al año, y en la Figura 35 se muestran los ajustes para el primer trimestre (ventana de agregación de 3 meses) y primer semestre (ventana de agregación de 6meses) para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101). En gris se observa la función de densidad de probabilidad empírica y en naranja la función de densidad de probabilidad teórica obtenida de los modelos teóricos evaluados. Los diferentes ajustes para

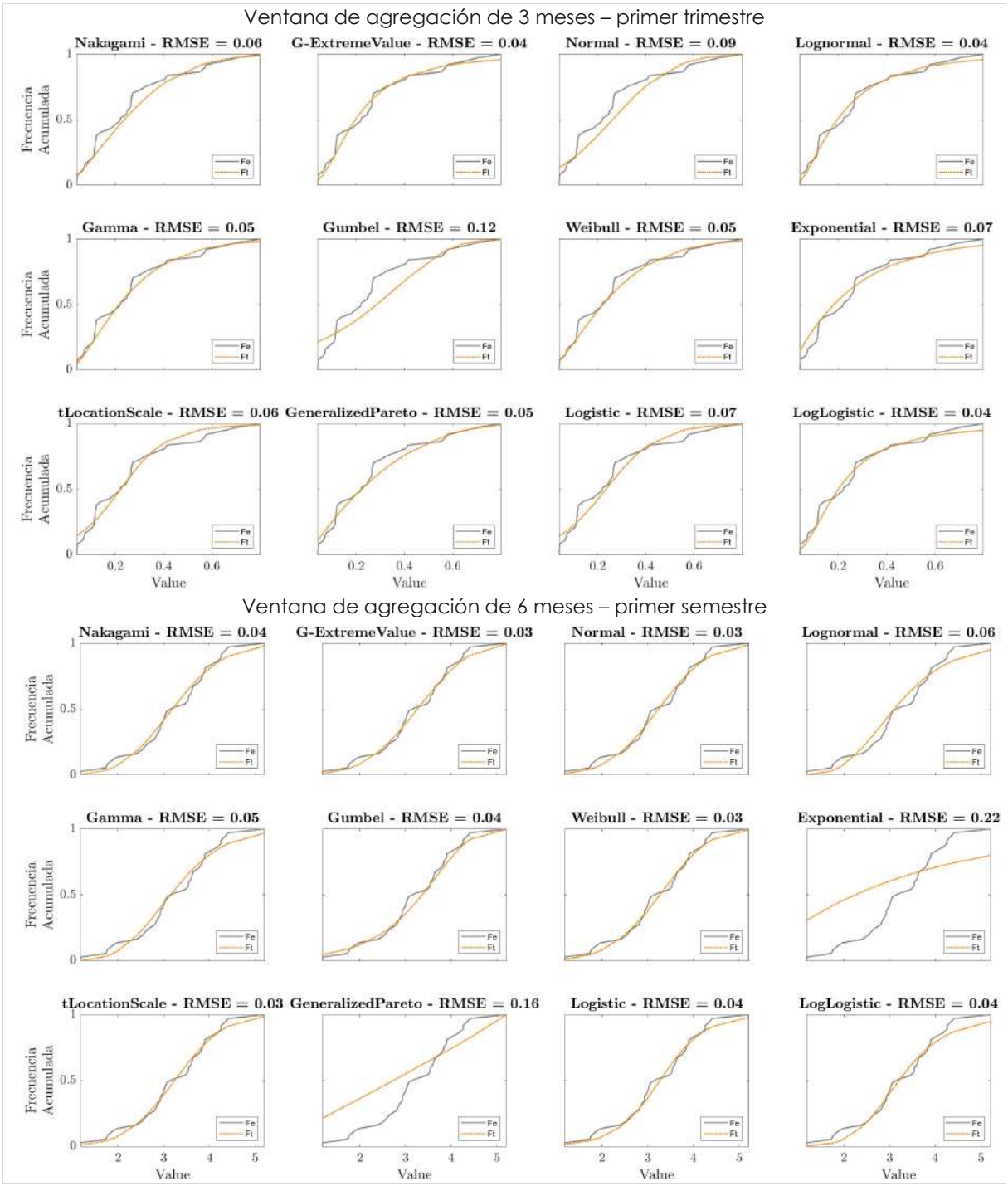
cada una de las ventanas de agregación en las cuencas de análisis pueden ser consultados en el Anexo 11. PDF RDI.

**Figura 34 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) - a.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 35 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101) - a.**




*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 36 y Figura 38 se presenta el resumen de las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en cada una de las ventanas temporales para las cuencas de las SZH 1501 y NSS 2906-01, respectivamente.

Para la ventana temporal de agregación de 1 mes en las cuencas de la SZH 1501 (ver Figura 36) las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron durante los 12 meses del año fueron Log Normal, Weibull y Generalized Extreme Value, con un 22,2%, 18,5% y 17,3% de las cuencas, respectivamente. En el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 38), las funciones que mejor se ajustaron fueron Generalized Extreme Value y Log Normal, alcanzando el 60% del total.

Las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en los cuatro trimestres del año para la ventana temporal de agregación de 3 meses en las cuencas de la SZH 1501(ver Figura 36), correspondieron a Generalized Extreme Value y t Location Scale, con el 33,3% y 12% de las cuencas. Para el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 38), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron fueron Generalized Extreme Value, Log Normal y Log Logistic, alcanzando el 68,4% del total.

Para la ventana temporal de agregación de 6 meses en las cuencas de la SZH 1501(ver Figura 36), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en los dos semestres del año fueron Generalized Extreme Value y t Location Scale, con un 24,1% y 22,2% de las cuencas, respectivamente. En las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 38), las funciones que mejor se ajustaron fueron Log Logistic y Log Normal, alcanzando el 46,7% del total.

En la ventana temporal de agregación de 12 meses en las cuencas de la SZH 1501 (ver Figura 36), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron durante el año fueron Generalized Extreme Value y Log Logistic, con un 44,4% y 37% de las cuencas, respectivamente. En el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 38), la función que mejor se ajustó fue la Log Logistic con el 60% del total.

**Figura 36 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la SZH 1501 - a.**

Ventana de agregación de 1 mes

| PDF | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 14.8% | 3.7% | 29.6% | 25.9% | 3.7% | 51.9% | 51.9% | 0.0% | 11.1% | 14.8% | 0.0% | 14.8% | 18.5% |
| Lognormal | 25.9% | 44.4% | 44.4% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 18.5% | 44.4% | 3.7% | 14.8% | 48.1% | 18.5% | 22.2% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.3% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 22.2% | 0.0% | 11.1% | 0.0% | 7.4% | 33.3% | 0.0% | 0.0% | 6.8% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 33.3% | 3.7% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 4.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.9% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 44.4% | 29.6% | 29.6% | 11.1% | 3.7% | 7.4% | 3.7% | 33.3% | 0.0% | 14.2% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 1.9% |
| GeneralizedExtremeValue | 51.9% | 18.5% | 7.4% | 11.1% | 22.2% | 3.7% | 7.4% | 14.8% | 3.7% | 11.1% | 11.1% | 44.4% | 17.3% |
| LogLogistic | 7.4% | 0.0% | 7.4% | 7.4% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 37.0% | 40.7% | 0.0% | 7.4% | 14.8% | 10.2% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 14.8% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 11.1% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 3.7% |

Ventana de agregación de 3 meses

| PDF | 1 trimestre | 2 trimestre | 3 trimestre | 4 trimestre | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.9% |
| Weibull | 7.4% | 7.4% | 0.0% | 0.0% | 3.7% |
| Lognormal | 3.7% | 3.7% | 14.8% | 0.0% | 5.6% |
| Exponential | 18.5% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 4.6% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% | 40.7% | 7.4% | 12.0% |
| GeneralizedPareto | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.7% |
| Normal | 0.0% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 3.7% |
| Gamma | 33.3% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 9.3% |
| Logistic | 0.0% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 3.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 3.7% | 29.6% | 25.9% | 74.1% | 33.3% |
| LogLogistic | 0.0% | 0.0% | 18.5% | 18.5% | 9.3% |
| Nakagami | 18.5% | 22.2% | 0.0% | 0.0% | 10.2% |

Ventana de agregación de 6 meses

| PDF | 1 semestre | 2 semestre | Total |
|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 11.1% | 0.0% | 5.6% |
| Lognormal | 7.4% | 7.4% | 7.4% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 7.4% | 37.0% | 22.2% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 29.6% | 0.0% | 14.8% |
| Gamma | 7.4% | 0.0% | 3.7% |
| Logistic | 3.7% | 0.0% | 1.9% |
| GeneralizedExtremeValue | 11.1% | 37.0% | 24.1% |
| LogLogistic | 0.0% | 18.5% | 9.3% |
| Nakagami | 22.2% | 0.0% | 11.1% |

Ventana de agregación de 12 meses

| PDF | 1 año | Total |
|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 11.1% | 11.1% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% |
| Logistic | 7.4% | 7.4% |
| GeneralizedExtremeValue | 44.4% | 44.4% |
| LogLogistic | 37.0% | 37.0% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 37 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - a.**

Ventana de agregación de 1 mes

| PDF | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% | 33.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.3% |
| Lognormal | 6.7% | 6.7% | 20.0% | 33.3% | 33.3% | 86.7% | 6.7% | 6.7% | 13.3% | 6.7% | 73.3% | 60.0% | 29.4% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 1.7% |
| tLocationScale | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 26.7% | 0.0% | 46.7% | 26.7% | 0.0% | 0.0% | 8.9% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 26.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.2% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 46.7% | 20.0% | 0.0% | 26.7% | 0.0% | 20.0% | 0.0% | 0.0% | 13.3% | 11.7% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 1.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 80.0% | 73.3% | 0.0% | 0.0% | 13.3% | 6.7% | 13.3% | 93.3% | 6.7% | 33.3% | 26.7% | 20.0% | 30.6% |
| LogLogistic | 13.3% | 6.7% | 0.0% | 6.7% | 26.7% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 13.3% | 26.7% | 0.0% | 0.0% | 8.3% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 13.3% | 6.7% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 2.2% |

Ventana de agregación de 3 meses

| PDF | 1 trimestre | 2 trimestre | 3 trimestre | 4 trimestre | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 26.7% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 8.3% |
| Lognormal | 26.7% | 26.7% | 33.3% | 0.0% | 21.7% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 1.7% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 0.0% | 3.3% |
| Gamma | 26.7% | 6.7% | 0.0% | 13.3% | 11.7% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| GeneralizedExtremeValue | 0.0% | 20.0% | 40.0% | 40.0% | 25.0% |
| LogLogistic | 6.7% | 6.7% | 26.7% | 46.7% | 21.7% |
| Nakagami | 6.7% | 20.0% | 0.0% | 0.0% | 6.7% |

Ventana de agregación de 6 meses

| PDF | 1 semestre | 2 semestre | Total |
|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 6.7% | 0.0% | 3.3% |
| Lognormal | 33.3% | 6.7% | 20.0% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 0.0% | 13.3% | 6.7% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 13.3% | 0.0% | 6.7% |
| Logistic | 0.0% | 13.3% | 6.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 13.3% | 13.3% | 13.3% |
| LogLogistic | 0.0% | 53.3% | 26.7% |
| Nakagami | 33.3% | 0.0% | 16.7% |

Ventana de agregación de 12 meses

| PDF | 1 año | Total |
|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 13.3% | 13.3% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 13.3% | 13.3% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% |
| Logistic | 6.7% | 6.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 6.7% | 6.7% |
| LogLogistic | 60.0% | 60.0% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% |

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.1.2.2.4. Clasificación del RDI

El valor de Z encontrado es el valor del RDI, es decir el valor normal gracias a este ajuste para un lugar y periodo deseado. Los valores positivos y negativos indican que "a" (precipitación/evapotranspiración potencial) son respectivamente, mayores o menores que la media. El valor del RDI al ser normalizado indica que los periodos secos y húmedos se presentan de la misma forma, entonces, este índice puede ser también aplicado para el seguimiento de periodos húmedos. La Tabla 12 presenta la escala de colores para las clases de sequía y los valores del RDI.

**Tabla 12 Clasificación de sequía por rangos de RDI.**

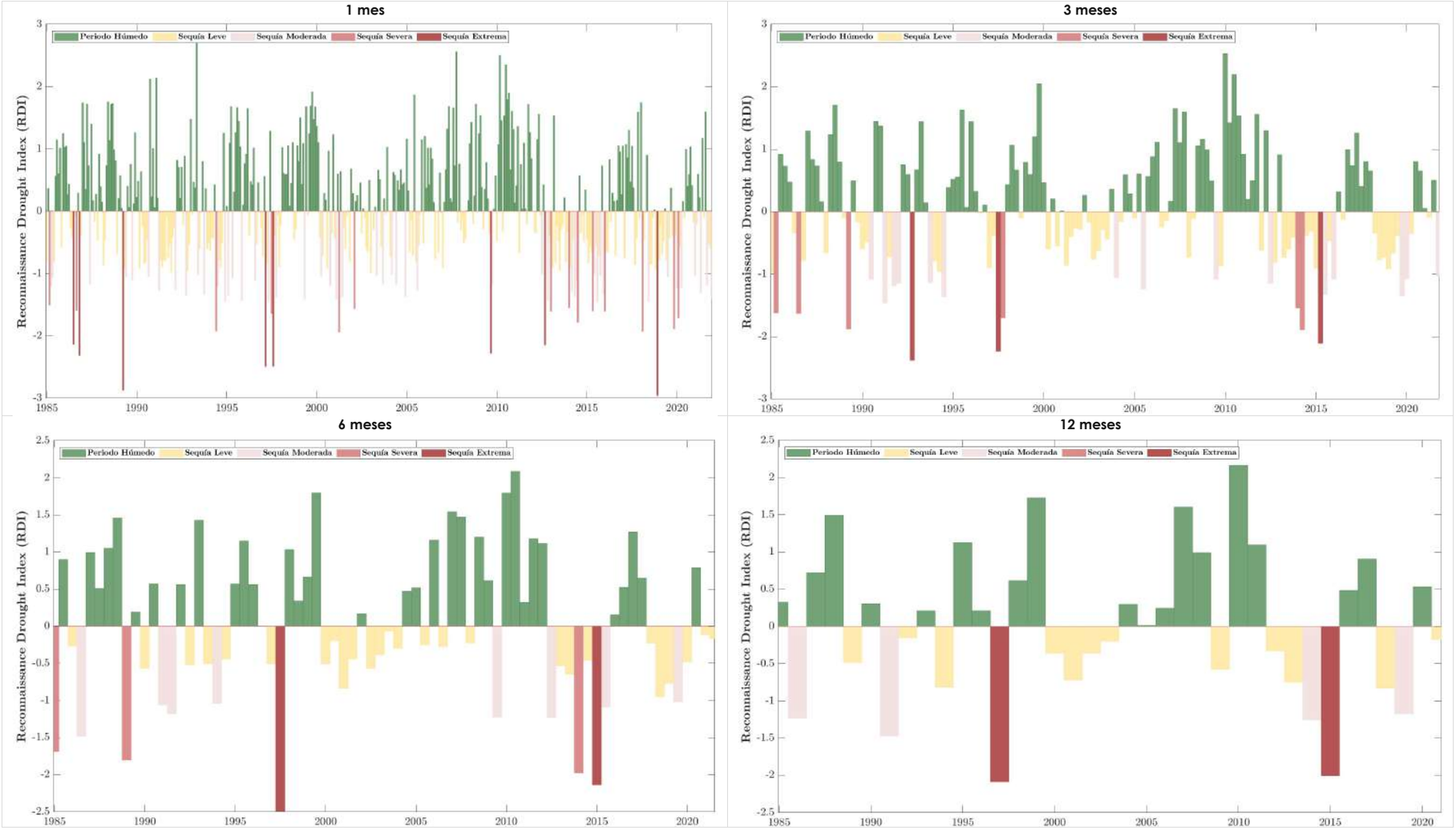
| Escala de colores | RDI | Clasificación |
|---|---|---|
| | RDI > 0 | Periodo húmedo |
| | 0 a - 0,99 | Sequía leve |
| | -1,00 a -1,49 | Sequía moderada |
| | -1,50 a -1,99 | Sequía Severa |
| | RDI ≤ -2,00 | Sequía extrema |

*Fuente: Adaptado de* Thomaz et al., (2023)

En la Figura 38 y Figura 39 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados del RDI en las diferentes ventanas de agregación analizadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) y la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101), respectivamente. Cada ventana de agregación del RDI proporciona información valiosa y complementaria. Las ventanas de agregación más cortas capturan la variabilidad y los extremos a corto plazo, mientras que las ventanas de agregación más largas permiten identificar tendencias y patrones más persistentes en las condiciones climáticas (precipitación/ evapotranspiración). La variabilidad es más alta en la gráfica de la ventana de agregación de 1 mes y disminuye a medida que aumenta la escala temporal de la ventana de agregación. Las gráficas de 6 y 12 meses muestran tendencias más claras y persistentes en las condiciones de humedad y sequía.

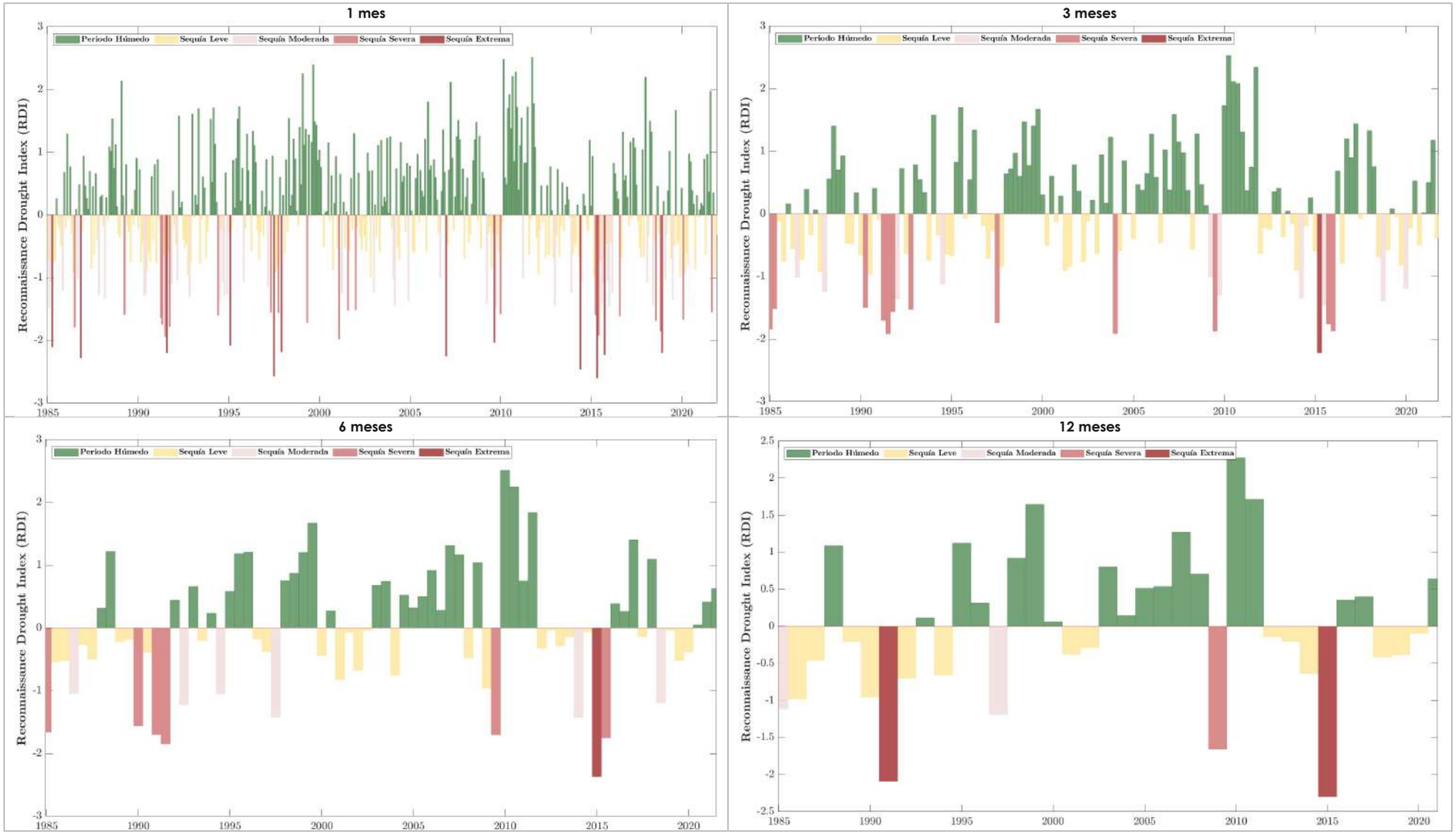
En el Anexo 12. RDI se presentan los resultados del RDI y su clasificación para todas las cuencas de las áreas de estudio. En general, las cuencas de la SZH 1501 muestran valores del RDI que indican sequías severas y extremas en las diversas ventanas de agregación para los años de 1997 y 2015. Por otro lado, las cuencas de la NSS 2906-01 presentan valores del RDI que indican sequías severas y extremas en las diferentes ventanas de agregación para los años de 1991 y 2015.

**Figura 38 RDI para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101).**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 39 RDI para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101).**




*Fuente: Elaboración propia*

En cada ventana de agregación, se tomó el valor del percentil 95 para los RDI por debajo de 0, los que indican las sequías. El percentil 95 representa el valor por debajo del cual se encuentran el 95% de los datos, es decir, el 5% de los datos más altos del RDI. Finalmente, en cada cuenca, se asigna un único valor de RDI como el promedio de los valores en cada ventana temporal. La Tabla 13 y Tabla 14 presentan los resultados del RDI en cada una de las cuencas de la NSS 2906-01 y SZH 1501, respectivamente.

**Tabla 13 Percentil 95 del RDI para las cuencas de la NSS 2906-01.**

| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 2906010101 | Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM | -2.06 | -1.88 | -1.80 | -2.21 | -1.99 |
| 2906010102 | Complejo Ciénaga Playazo | -2.03 | -1.92 | -1.92 | -2.27 | -2.03 |
| 2906010103 | Caño Schiller entre La Loma y El Jagüey | -2.02 | -1.90 | -1.97 | -1.80 | -1.92 |
| 2906010104 | Caño Schiller entre el rio Magdalena y La Loma | -1.92 | -1.94 | -2.20 | -1.92 | -2.00 |
| 2906010105 | Arroyo Pacheco y otros directos al Caño Schiller | -1.87 | -2.04 | -1.92 | -1.91 | -1.94 |
| 2906010106 | Arroyos Palma de Vino, Pertuz y Los Puercos | -2.05 | -1.98 | -2.03 | -2.12 | -2.05 |
| 2906010200 | Caños Hondo, El Loro y otros directos al rio Magdalena | -1.90 | -1.92 | -1.94 | -2.08 | -1.96 |
| 2906010301 | Complejo Ciénaga de Buenavista | -1.95 | -1.90 | -1.80 | -1.90 | -1.89 |
| 2906010302 | Complejo Ciénaga El Diluvio | -2.01 | -1.87 | -2.06 | -2.20 | -2.03 |
| 2906010400 | Complejo Caño El Salado | -1.98 | -1.85 | -1.92 | -2.14 | -1.97 |
| 2906010501 | Complejo Cenagoso-Sector Palermo | -1.94 | -1.68 | -1.91 | -1.96 | -1.87 |
| 2906010502 | Complejo Cenagoso-Sector Sitionuevo | -1.95 | -1.83 | -1.78 | -2.00 | -1.89 |
| 2906010503 | Caño Los Micos | -2.01 | -1.86 | -1.79 | -2.01 | -1.92 |
| 2906010600 | Complejo de Ciénagas Vía Parque Isla Salamanca | -1.97 | -1.73 | -1.68 | -1.85 | -1.81 |
| 2906010700 | Complejo Lagunar Ciénaga Grande | -1.91 | -1.73 | -1.82 | -1.53 | -1.75 |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 14 Percentil 95 del RDI para las cuencas de la SZH 1501.**

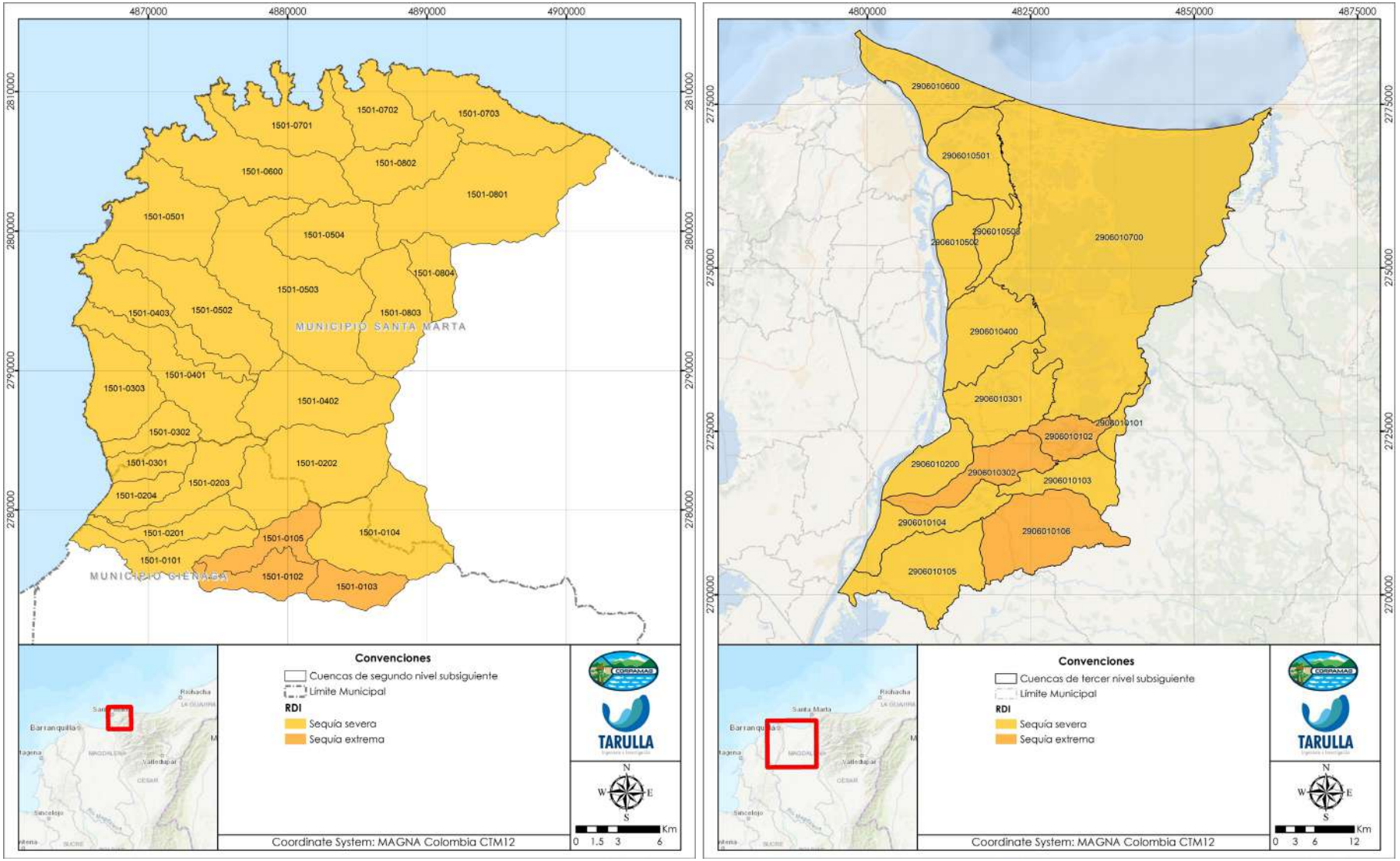
| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 15010104 | Río Cordoba-Sector Agualinda | -2.04 | -1.76 | -1.94 | -2.20 | -1.98 |
| 15010303 | Quebrada El Ebano y otros directos al Caribe | -1.83 | -1.93 | -1.83 | -1.83 | -1.86 |
| 15010202 | Río Toribio entre Guayabal y El Vergel | -2.02 | -1.63 | -1.98 | -1.93 | -1.89 |
| 15010401 | Directos al Río Gaira entre Minca y el mar Caribe (mi) | -1.92 | -1.96 | -1.73 | -1.65 | -1.82 |
| 15010703 | Quebradas Santa Rosa, Playa Brava y otros directos al Caribe | -1.87 | -1.82 | -2.11 | -1.77 | -1.89 |
| 15010600 | Quebrada Concha | -1.86 | -1.79 | -1.74 | -1.97 | -1.84 |

| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 15010501 | Río Manzanares en Santa Marta | -1.84 | -1.78 | -1.83 | -1.91 | -1.84 |
| 15010801 | Río Piedras entre San Isidro y el Mar Caribe | -1.85 | -1.89 | -1.94 | -1.81 | -1.87 |
| 15010802 | Quebrada Jordan | -1.93 | -1.83 | -1.82 | -1.90 | -1.87 |
| 15010702 | Quebrada Cinto y otros directos al Caribe | -1.94 | -1.82 | -1.79 | -1.88 | -1.86 |
| 15010701 | Quebrada Gayraca y otros directos al Caribe | -1.94 | -1.81 | -1.66 | -1.96 | -1.84 |
| 15010504 | Quebrada Matogiro (Donama) | -1.95 | -1.80 | -1.64 | -1.79 | -1.80 |
| 15010804 | Quebrada La Lisa | -1.96 | -1.80 | -1.78 | -2.04 | -1.89 |
| 15010803 | Río Piedras entre la Cuchills de San Lorenzo y San Isidro | -1.87 | -1.75 | -1.67 | -1.93 | -1.80 |
| 15010503 | Río Manzanares entre la Cuchilla de San Lorenzo y Santa Marta | -1.96 | -1.77 | -1.72 | -1.84 | -1.82 |
| 15010402 | Río Gaira entre la Cuchilla de San Lorenzo y Minca | -1.91 | -1.93 | -1.95 | -1.72 | -1.88 |
| 15010502 | Quebrada Tamaca | -2.04 | -1.78 | -1.64 | -1.79 | -1.81 |
| 15010403 | Directos al rio Gaira entre Minca y el mar Caribe (md) | -1.92 | -1.78 | -1.64 | -1.71 | -1.76 |
| 15010302 | Quebrada Don Jaca | -1.86 | -1.87 | -1.90 | -1.88 | -1.88 |
| 15010301 | Quebrada El Doctor | -1.87 | -1.90 | -1.96 | -1.82 | -1.89 |
| 15010203 | Quebrada Marinca | -1.82 | -2.04 | -1.86 | -2.09 | -1.95 |
| 15010204 | Quebrada El Guayabo | -1.90 | -1.96 | -2.15 | -1.76 | -1.94 |
| 15010201 | Río Toribio entre vereda El Vergel y Mar Caribe | -1.86 | -1.96 | -1.92 | -2.06 | -1.95 |
| 15010101 | Río Cordoba-Sector Cordobita | -1.91 | -1.89 | -2.06 | -2.06 | -1.98 |
| 15010105 | Quebrada El Quindio y otros directos al Río Cordoba (md) | -2.04 | -1.95 | -2.10 | -2.05 | -2.03 |
| 15010102 | Quebrada Lourdes y otros directos al Río Cordoba (mi) | -1.94 | -2.02 | -2.03 | -2.10 | -2.02 |
| 15010103 | Quebrada La Sierrita | -2.02 | -1.94 | -2.02 | -2.06 | -2.01 |

*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 40 muestra el resultado del RDI clasificado en cada una de las cuencas de las áreas de estudio. Se puede apreciar que, al sur de la SZH 1501, se encuentran las cuencas Quebrada Lourdes y otros directos al Río Córdoba (mi) (15010102), Quebrada La Sierrita (15010103) y Quebrada El Quindío y otros directos al Río Córdoba (md) (15010105), las cuales presentan los valores más altos del RDI. Así mismo, en la NSS 2906-01, las cuencas Complejo Ciénaga Playazo (2906010102), Arroyos Palma de Vino, Pertuz y Los Puercos (2906010106), y Complejo Ciénaga El Diluvio (2906010302) muestran los valores más altos del RDI.

**Figura 40 Clasificación del RDI en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

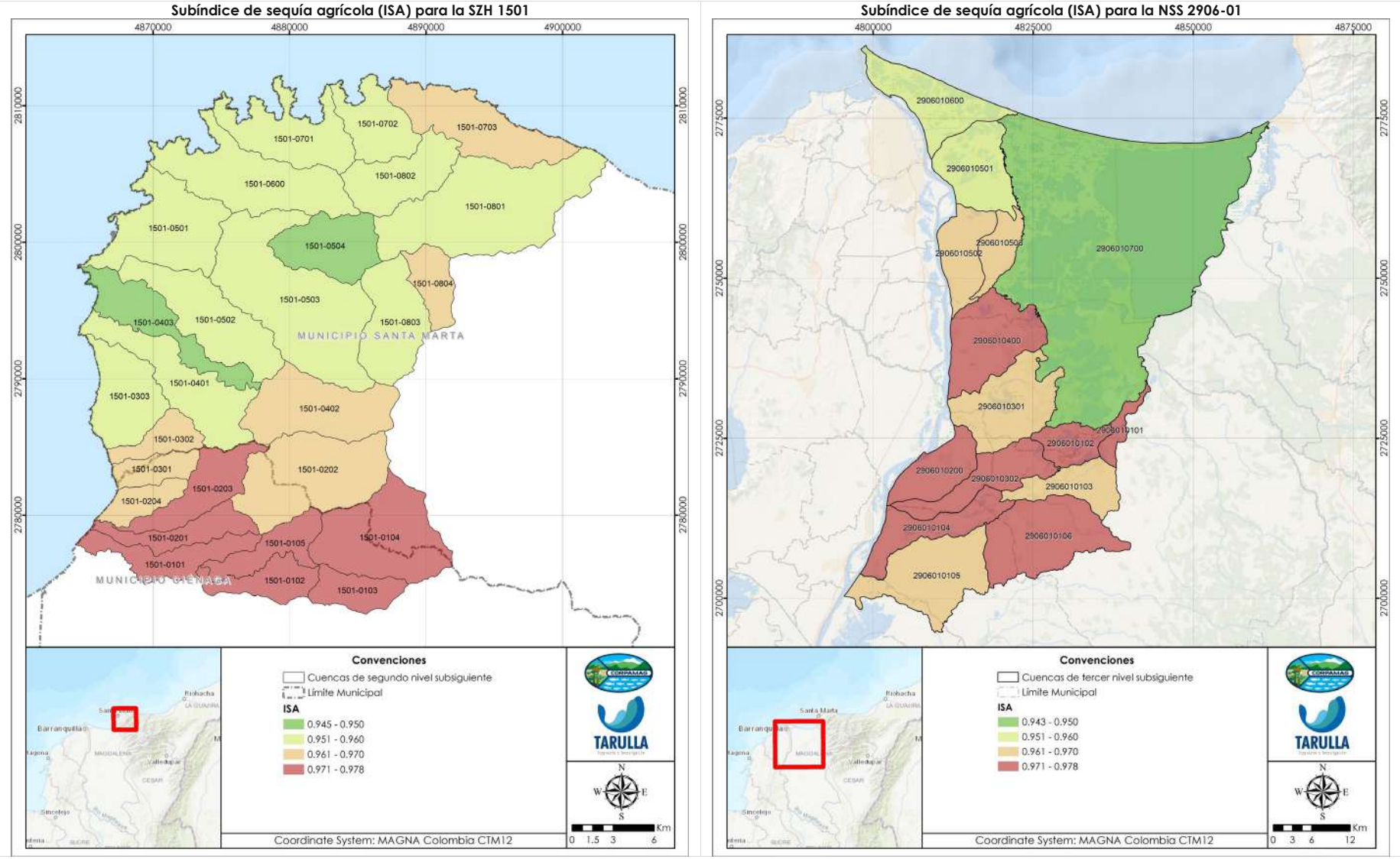
### *5.1.2.3. ISA*

El ISA corresponde al valor normalizado del RDI, obtenido mediante tres ecuaciones que consideran los valores de probabilidad típicos de la distribución normal y los valores del RDI entre "0" y "−3" (de la misma forma que el SPI, ver Tabla 9). Para normalizar el RDI entre 0 y 1, se utilizan los valores de probabilidad acumulada de una curva normal, asumiendo que los valores del RDI de −1, −2 y −3 están asociados con las probabilidades acumuladas de hasta 1, 2 y 3 desviaciones estándar en el lado derecho de la curva.

Los valores del ISA, resultado de la normalización del RDI, arroja valores superiores a 0,94 en las dos áreas de estudio (ver Figura 41). En la SZH 1501 los valores más altos del ISA se encuentran en las cuencas ubicadas al sur de esta.

En cuanto a la NSS 2906-01, los valores más altos del ISA se observan en las cuencas localizadas al sur y al oeste. Además, las cuencas Complejo Cenagoso-Sector Palermo (2906010501), Complejo de Ciénagas Vía Parque Isla Salamanca (2906010600) y Complejo Lagunar Ciénaga Grande (2906010700), situadas en la zona norte de la NSS 2906-01, presentan los valores más bajos del ISA.

**Figura 41 Subíndice de sequía agrícola (ISA) en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

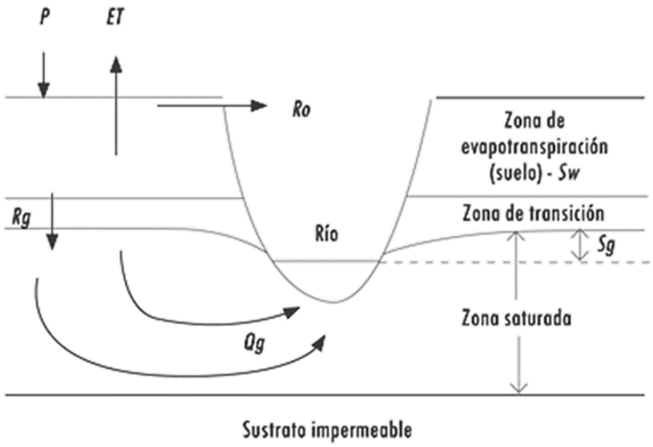
### 5.1.3. Subíndice de sequía hidrológica (ISH)

El subíndice de sequía hidrológica (ISH) se representa la severidad de la sequía hidrológica mediante el índice de sequía de caudal (Streamflow Drought Index - SDI). El SDI se calcula a partir de la información caudales mensuales en cada una de las cuencas, por lo que para cada una de las cuencas se construye y calibra el modelo de Thomas a resolución mensual.

#### *5.1.3.1. Modelo hidrológico de Thomas*

El modelo de Thomas (1981) considera dos compartimentos para el análisis del balance hídrico: el suelo o zona de evapotranspiración con almacenamiento $Sw$, y la zona saturada con almacenamiento $Sg$ (ver Figura 42). Para efectos de modelación, la componente de flujo subsuperficial en la parte superficial de la zona de evapotranspiración se puede incluir en la escorrentía directa ($Ro$). El modelo considera despreciable el flujo lateral profundo ($Qlat$) en la zona no saturada, de tal forma que la recarga potencial (infiltración) es igualada a la recarga real ($Rg$).

**Figura 42 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - a.**




*Fuente: Fragala and Obregón (2011).*

De esta forma, aplicando la ecuación de continuidad a un volumen de control $Sw$, se tiene:

$$\mathrm{P_i} - \mathrm{ET_i} - \mathrm{Rg_i} - \mathrm{Ro_i} = \Delta\mathrm{Sw} = \mathrm{Sw_i} - \mathrm{Sw_{i-1}}$$

Donde $P_i$ es la precipitación; $ET_i$, la evapotranspiración real; $Rg_i$, la recarga; $Ro_i$, la escorrentía directa; $\Delta Sw$, el cambio en el almacenamiento del suelo entre el período de cálculo $i$ ($Sw_i$) y el período inmediatamente anterior ($Sw_{i-1}$). Thomas Jr (1981) definen además las variables $W_i$ (agua disponible) e $Y_i$ como:

$$\mathrm{W_i} = \mathrm{P_i} + \mathrm{Sw_{i-1}}$$

$$\mathrm{Y_i} = \mathrm{ET_i} + \mathrm{Sw_{i-1}}$$

En cada intervalo de tiempo se asume que la humedad disminuya según la ley de decaimiento exponencial, asumiendo como humedad inicial al comienzo de cada intervalo $Y_i$, donde $ETP_i$ es la evapotranspiración potencial y $b$, es un parámetro del modelo:

$$\mathrm{Sw_i} = \mathrm{Y_i} * \mathrm{e}^{-\frac{\mathrm{ETP_i}}{\mathrm{b}}}$$

Thomas Jr (1981), define la variable de estado $Y_i$ como una función no lineal del agua disponible según los parámetros *a* (adimensional) y *b*:

$$\mathrm{Y_i} = \frac{\mathrm{W_i} + \mathrm{b}}{2\mathrm{a}} - \left[\left(\frac{\mathrm{W_i} + \mathrm{b}}{2\mathrm{a}}\right)^2 - \frac{\mathrm{W_i b}}{\mathrm{a}}\right]^{0,5}$$

Donde *a* y *b* son parámetros que pueden ser determinados a partir de mediciones de precipitación, evapotranspiración y humedad del suelo en la cuenca. Esta función asegura que $Y_i \leq W_i, Y_i(0) = 1\ y\ Y_i(¥) = 0$. El límite superior de $Y_i$ es representado por el parámetro *b*. Thomas Jr., (1981) hace notar que, a excepción de estas propiedades, la función $Y_i$ no tiene algún significado particular. Entonces, al sustituir en las ecuaciones anteriores se obtiene:

$$W_i - Y_i = Rg_i + Ro_i$$

Para diferenciar la escorrentía de la recarga se asume un coeficiente de reparto *c*:

$$Ro_i = (1 - c)(W_i - Y_i)$$

$$Rg_i = c(W_i - Y_i)$$

El caudal subterráneo ($Qg_i$), es decir, aquella fracción del caudal observado en el río que proviene del almacenamiento en la zona saturada ($Sg_i$), es:

$$Qg_i = d * Sg_i$$

El almacenamiento $Sg_i$ tiene que interpretarse como un almacenamiento dinámico, expresión de la conectividad entre el río y el acuífero. Por lo tanto, al aplicar la ecuación de continuidad a un volumen de acuífero de almacenamiento $Sg_i$ tenemos:

$$Rg_i - Qg_i = \Delta Sg_i = Sg_i - Sg_{i-1}$$

Donde $\Delta Sg_i$ es el cambio en almacenamiento de la zona saturada y $Sg_{i-1}$ es el almacenamiento de aguas subterráneas en el período inmediatamente anterior. Al sustituir en las ecuaciones anteriores y resolver por $Sg_i$, tenemos:

$$Sg_i = \frac{Rg_i + Ro_i}{d + 1}$$

En línea con lo anterior, el caudal final estaría dado como:

$$Qs_i = Ro_i + Rg_i$$

De acuerdo con Thomas Jr. (1981), los parámetros *a*, *b*, *c*, y *d* se pueden interpretar de la siguiente forma:

***a*** refleja la tendencia de la escorrentía a ocurrir antes de que el suelo esté completamente saturado. Valores de "a" menores a 1 generan escorrentía cuando $W_i < b$ (Alley, 1984)

***b*** es el límite superior a la suma de la evapotranspiración real y la humedad del suelo.

***c*** es la fracción del caudal promedio del río que proviene del agua subterránea.

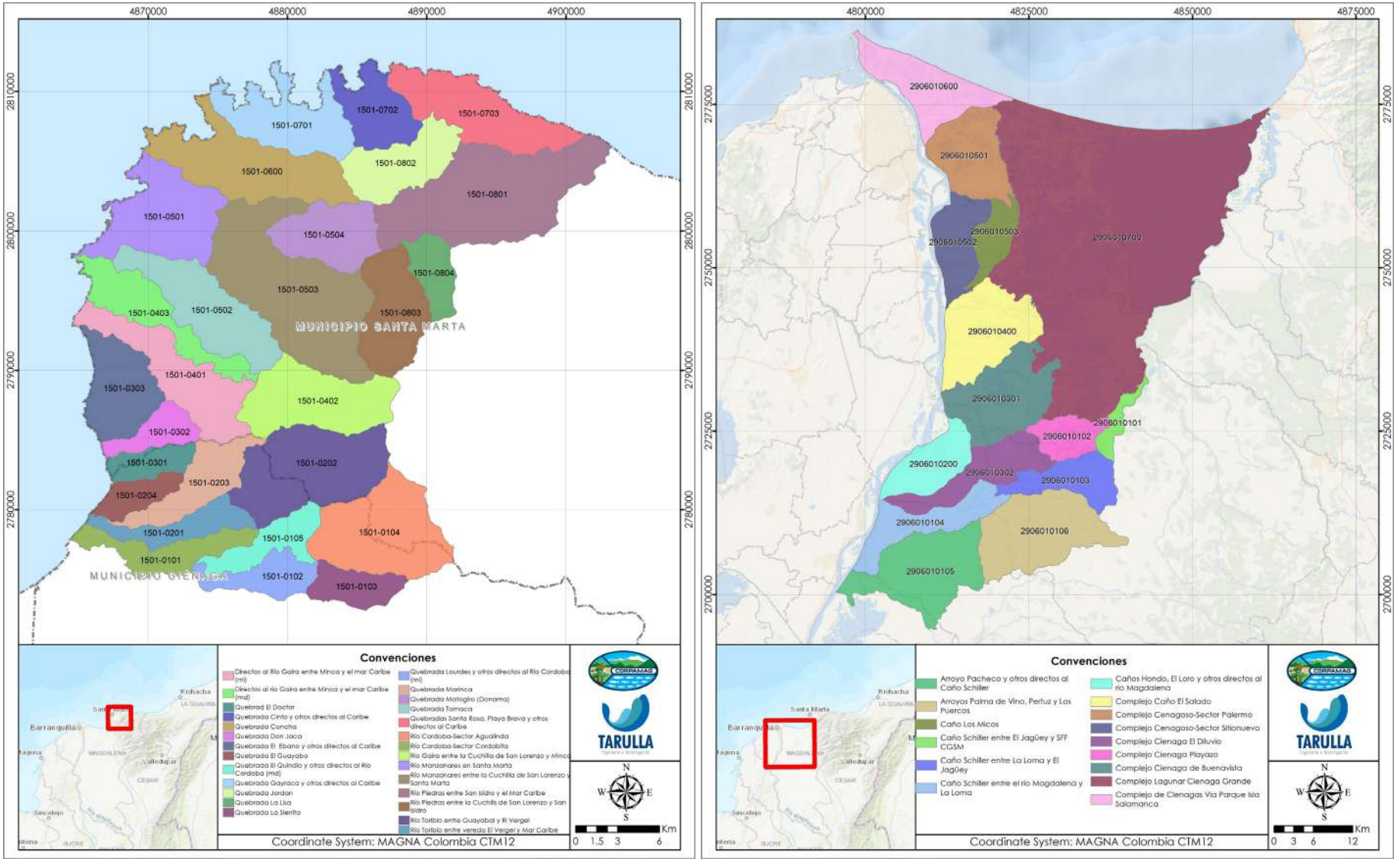
**d** es "el recíproco del tiempo de residencia del agua subterránea".

#### 5.1.3.1.1. Construcción del modelo hidrológico

El enfoque utilizado para el cálculo hidrológico fue de tipo semidistribuido y acumulativo. Esto implica la generación de caudales en cada unidad de modelación, seguido de su agregación descendente hasta el punto de cierre correspondiente.

En el caso de las SZH 1501 y NSS 2609-01, las unidades de análisis hidrológico fueron las subcuencas definidas en el POMCA respectivo de cada área (ver Figura 43). En cada paso temporal, se asignaron valores de precipitación (ver 5.1.1.2.1) y evapotranspiración potencial (ver 5.1.2.2.2) a cada unidad de modelación. En el Anexo 6. Precipitación Cuencas y Anexo 10. ETP se pueden consultar las series de precipitación y evapotranspiración potencial asignadas a cada una de las unidades de modelación (cuencas).

**Figura 43 Unidades de análisis hidrológico en las áreas de estudio.**




*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.1.3.1.2. Calibración y validación del modelo hidrológico

La calibración y validación del modelo hidrológico para ambas áreas de estudio se realizó mediante un algoritmo de optimización matemática heurístico. Una heurística de define como una técnica que aumenta la eficiencia de un proceso de búsqueda, siendo esta una correspondencia entre las descripciones de estados del problema hacia alguna medida de deseabilidad, normalmente representada por una métrica desempeño. Éstas a su vez, resultan adecuadas en el sentido de que generalmente guían el proceso de búsqueda en la dirección más provechosa sugiriendo qué camino tomar cuando hay más de uno disponible.

En concordancia con lo anterior, se utilizó la técnica de muestreo aleatorio *Latin Hypercube Sampling* (LHS) propuesta por primera vez por McKay et al. (1979) y es quizás el método de muestreo aleatorio más utilizado para la cuantificación de la incertidumbre y el análisis de confiabilidad basado en Simulaciones de Monte Carlo (Giri et al., 2019). A continuación, se realiza la explicación del algoritmo:

Sea *N* el número requerido de realizaciones y *K* el número de variables aleatorias. El espacio de muestreo es entonces *K*-dimensional. Se establece una matriz **P** = *N*×*K*, en la que cada una de las *K* columnas es una permutación aleatoria de 1, ..., *N*, y una matriz **R** = *N*×*K* de números aleatorios independientes de la distribución uniforme (0,1). Estas matrices forman el plan de muestreo básico, representado por la matriz **S** como:

$$S = 1NP - R$$

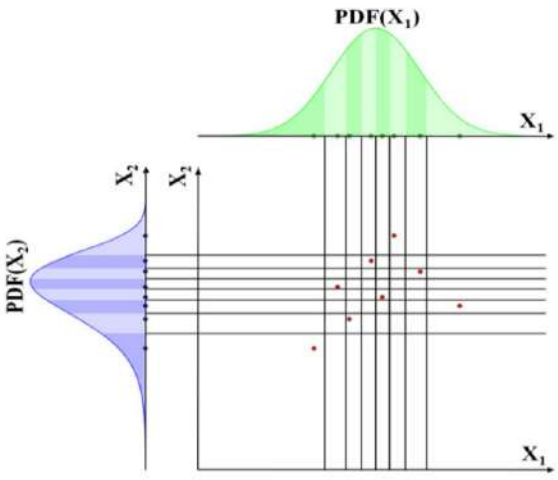
Cada elemento de **S**, $s_{ij}$, se mapea de acuerdo con su distribución marginal objetivo como

$$X_{ij} = F_{xj}^{-1} s_{ij}$$

Donde $F_{xj}^{-1}$ representa la inversa de la función de distribución acumulativa objetivo para la variable *j*. Un vector $X_i = X_{i1} X_{i2} \ldots X_{ik}$ ahora contiene datos de entrada para un cálculo determinista.

En la Figura 44 se presenta el esquema del LHS para el caso con dos variables y ocho muestras. Nótese que, la muestra se distribuye por todo el espacio de muestreo, ya que la generación del LHS requiere una imagen de cada fila y cada columna.

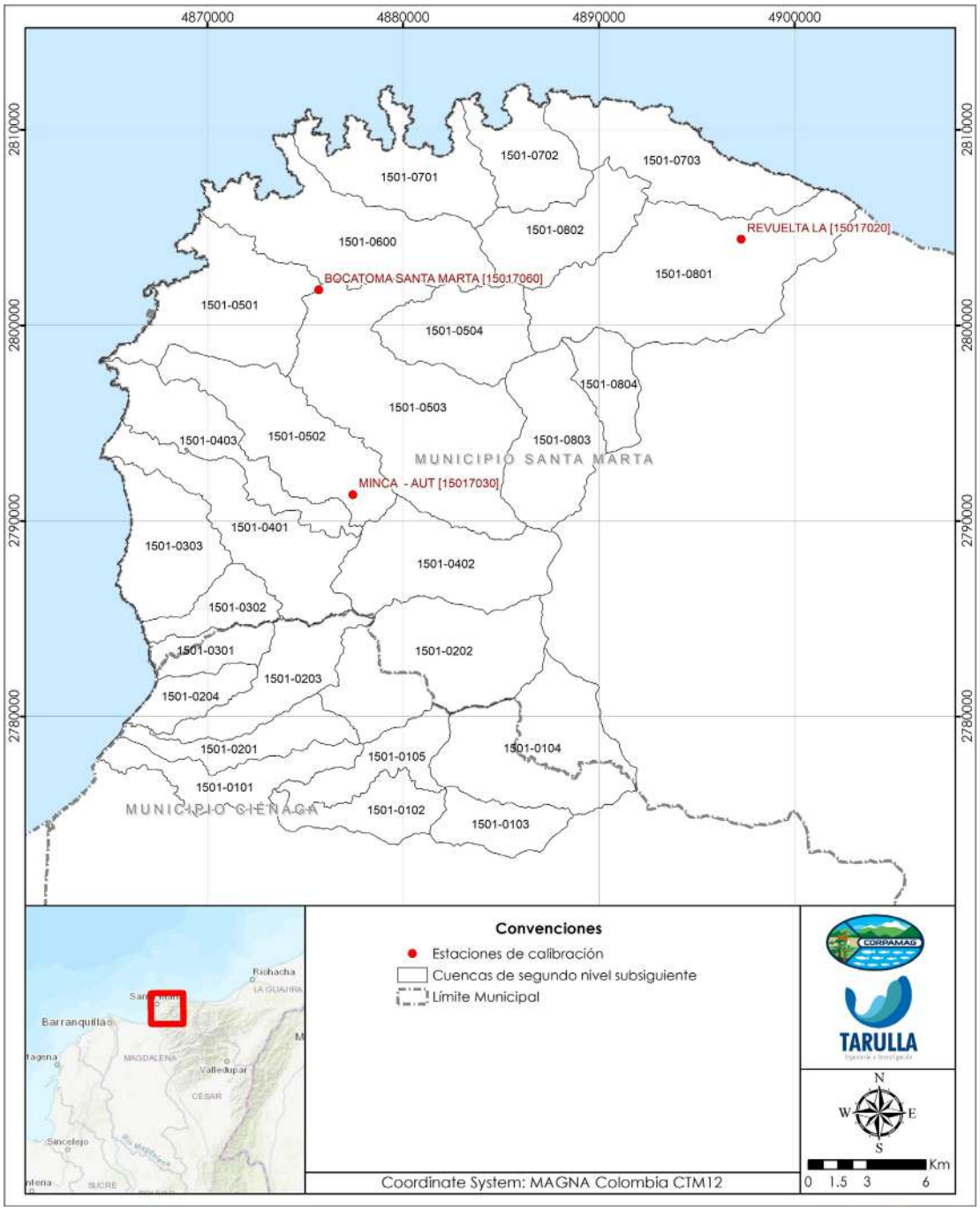
**Figura 44. Representación esquemática de muestreo paramétrico.**




*Fuente: Giri et al. (2019)*

Para SZH 1501 se consideraron tres estaciones de calibración, a saber: estación Revuelta La (código 15017020), estación Bocat Sta Marta (código 15017060) y estación Minca – Aut (código 15017030) (ver Figura 45). Los periodos de calibración y validación de cada estación se presentan en la Tabla 15.

**Figura 45 Estación de calibración en la SZH 1501.**




*Fuente: Elaboración propia*

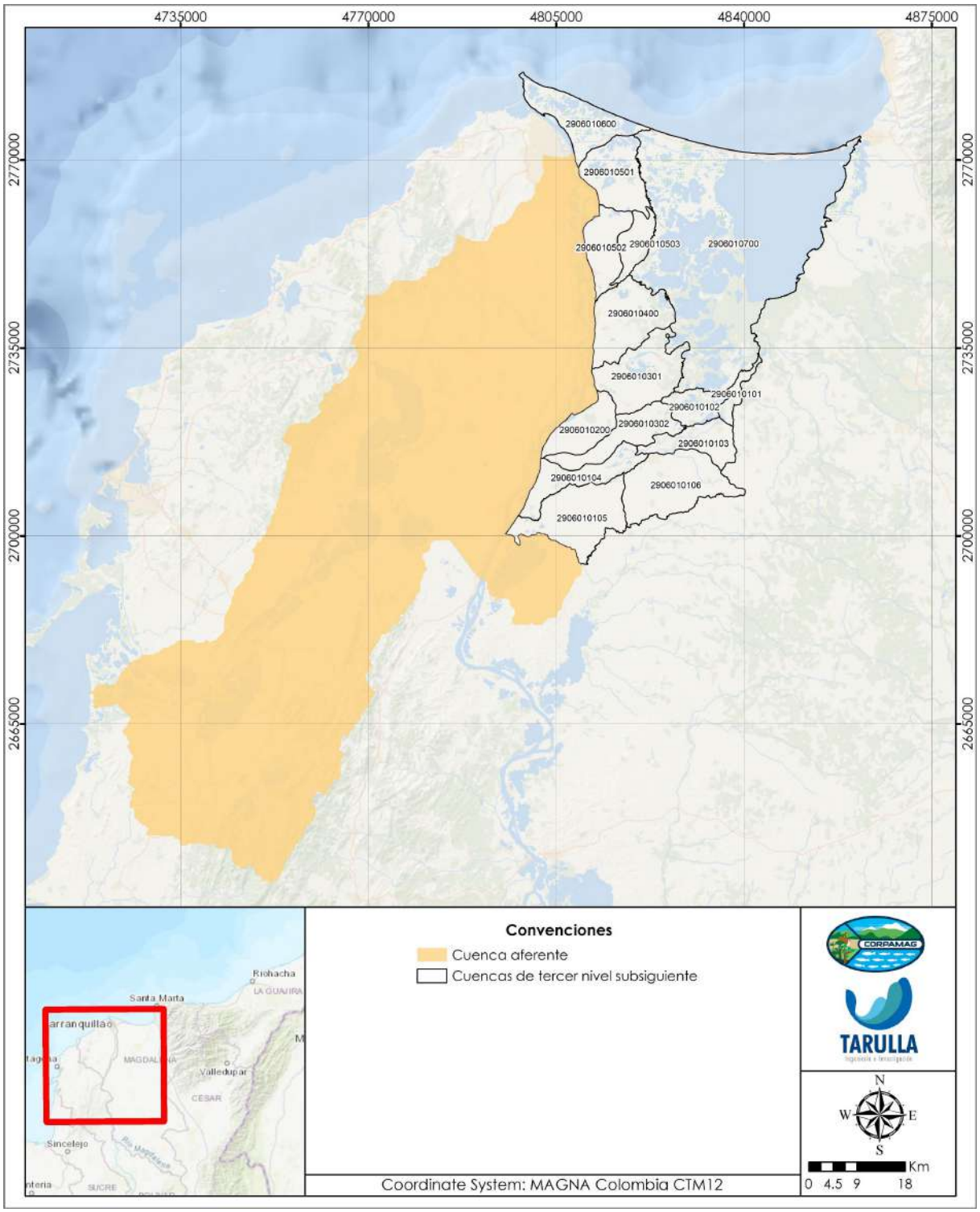
**Tabla 15 Periodos considerados para calibración y validación de los modelos hidrológicos.**

| Código | Nombre | Calibración | | Validación | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | Inicio | Fin | Inicio | Fin |
| 15017020 | Revuelta La | 01/01/1988 | 01/12/2005 | 01/01/2006 | 01/12/2020 |
| 15017060 | Bocat Sta Marta | 01/01/1988 | 01/12/2005 | 01/01/2006 | 01/12/2020 |
| 15017030 | Minca - Aut | 01/01/1990 | 01/12/2005 | 01/01/2006 | 01/12/2020 |

*Fuente: Elaboración propia*

En el caso de la SZH 2609-01, conforme al POMCA, la ausencia de información hidrológica dentro de las subcuencas del área de estudio y la limitada disponibilidad de datos de otras entidades distintas al IDEAM, llevaron a basar la calibración del modelo únicamente con la diferencia de los registros de las estaciones Calamar (código 29037020) y Planta El Rio (código 29047060) en el periodo 1976-1986. En particular, el dominio de modelación se extendió más allá del área de estudio para incluir la cuenca tributaria de la margen izquierda del punto de cierre en la estación Planta El Rio (código 29047060) (ver Figura 46).

**Figura 46 Esquema de modelación en la NSS 2906-01.**




*Fuente: Elaboración propia*

Para la evaluación de ambos modelos se utilizo el coeficiente de Nash-Sutcliffe (Ver los trabajos de Teegavarapu & Elshorbagy (2005) y Dawson, Abrahart and See, (2007)). La expresión matemática de esta metica se presenta a continuación.

$$Nash = \ 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_0^t - \ x_m^t)^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_0^t - \ x_0^-)^2}$$

Dónde

$x_0^t$ Valor observado.

$x_m^t$ Valor simulado.

$x_0^-$ Valor promedio.

Esta métrica varía desde -∞ hasta 1. Cuando el coeficiente de Nash toma un valor de 1 se considera que la calibración del modelo fue perfecta. Los rangos para evaluar el nivel de ajuste con esta métrica se presentan en la Tabla 16.

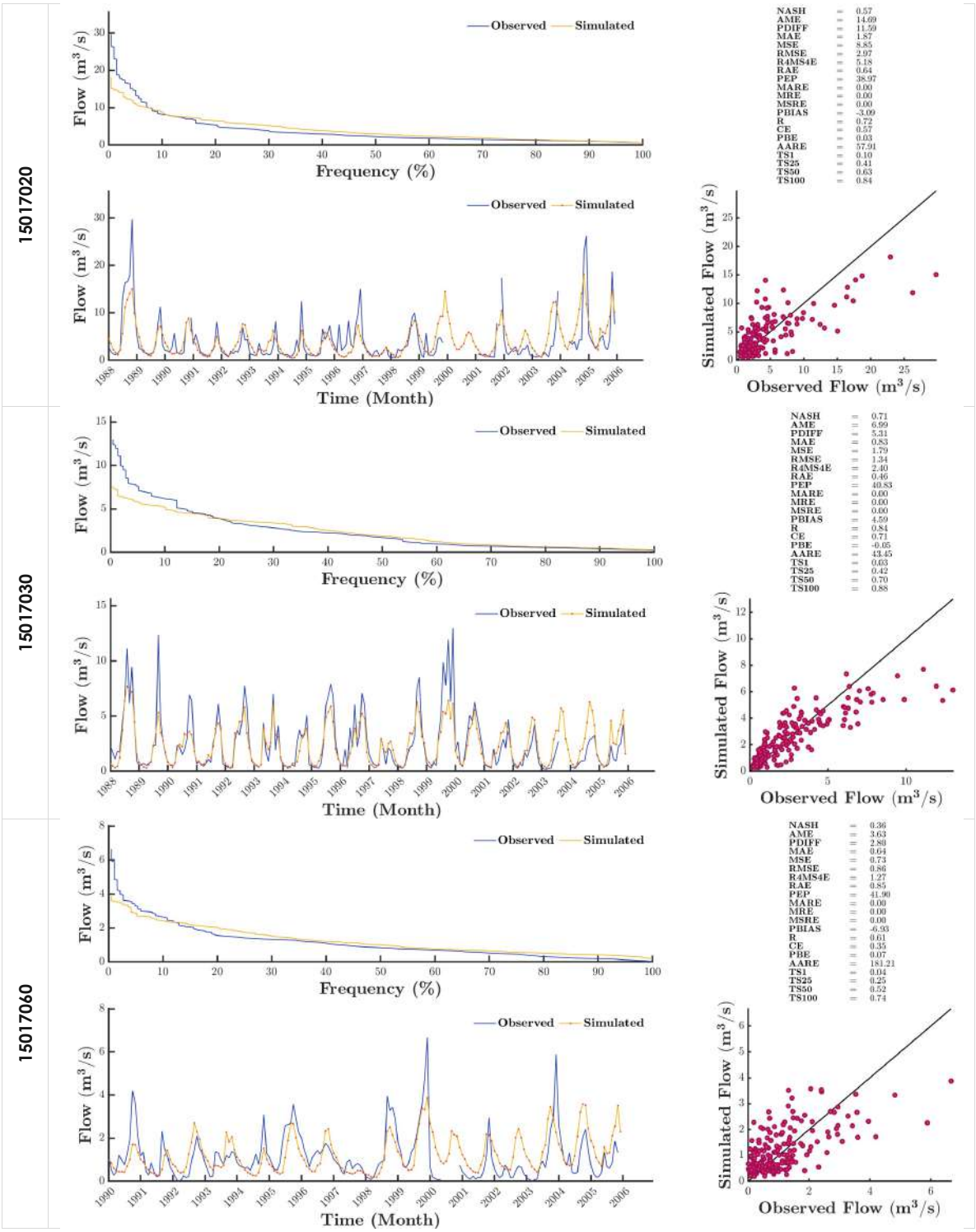
**Tabla 16 Rangos para evaluar el desempeño de los modelos con el Nash-Sutcliffe.**

| Desempeño | Nash |
|---|---|
| <0,2 | Insuficiente |
| 0,2 - 0,4 | Satisfactorio |
| 0,4 - 0,6 | Bueno |
| 0,6 - 0,8 | Muy Bueno |
| >0,8 | Excelente |

*Fuente: Molnar, 2011.*

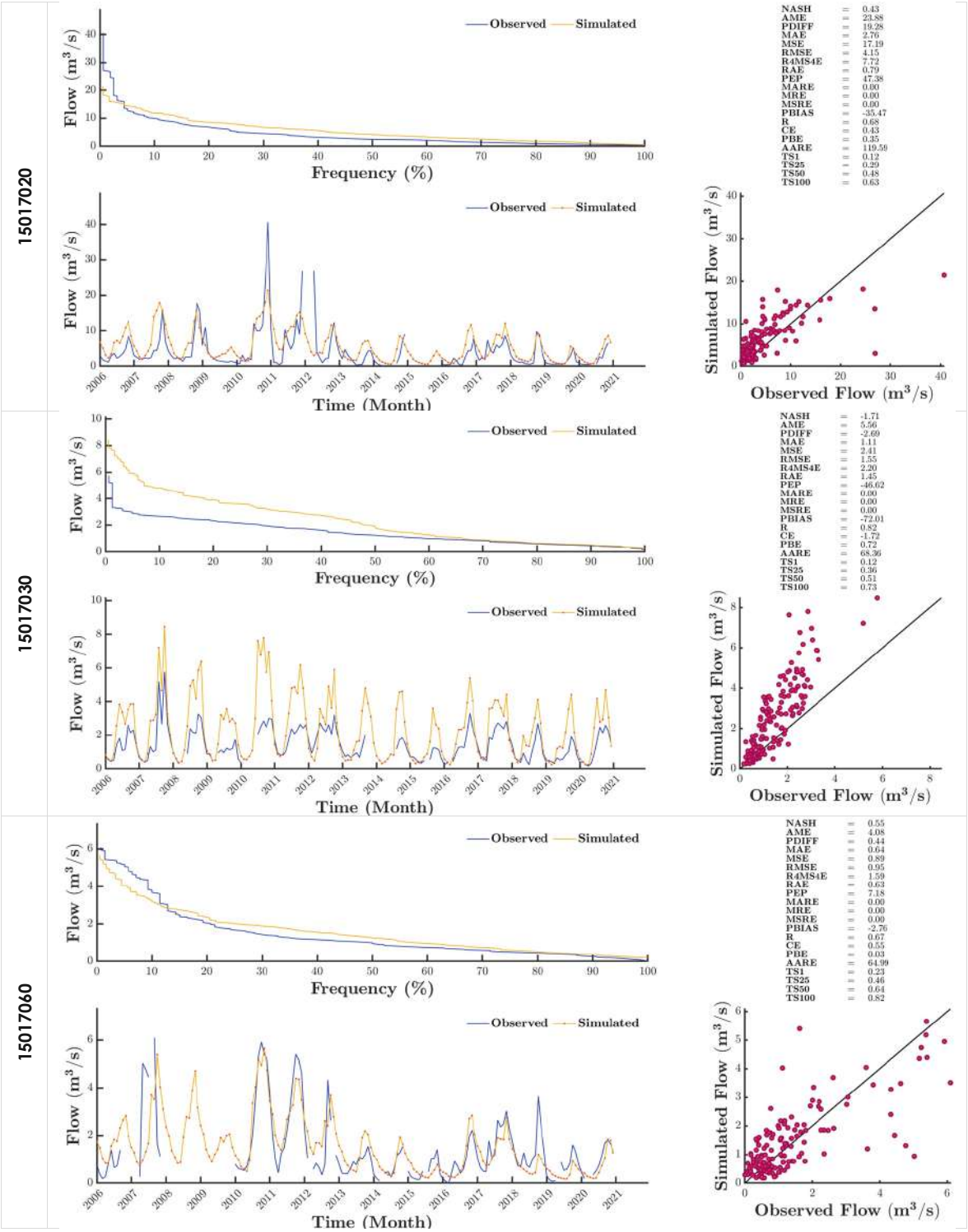
En total se realizaron 5.000 simulaciones por cada área de drenaje asociada a una estación de calibración. Los resultados de la calibración y la validación del modelo en las estaciones de la SZH 1501 se muestran en la Figura 47 y Figura 48, respectivamente.

**Figura 47 Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de calibración del modelo -SZH 1501.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 48 Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de validación del modelo -SZH 1501.**

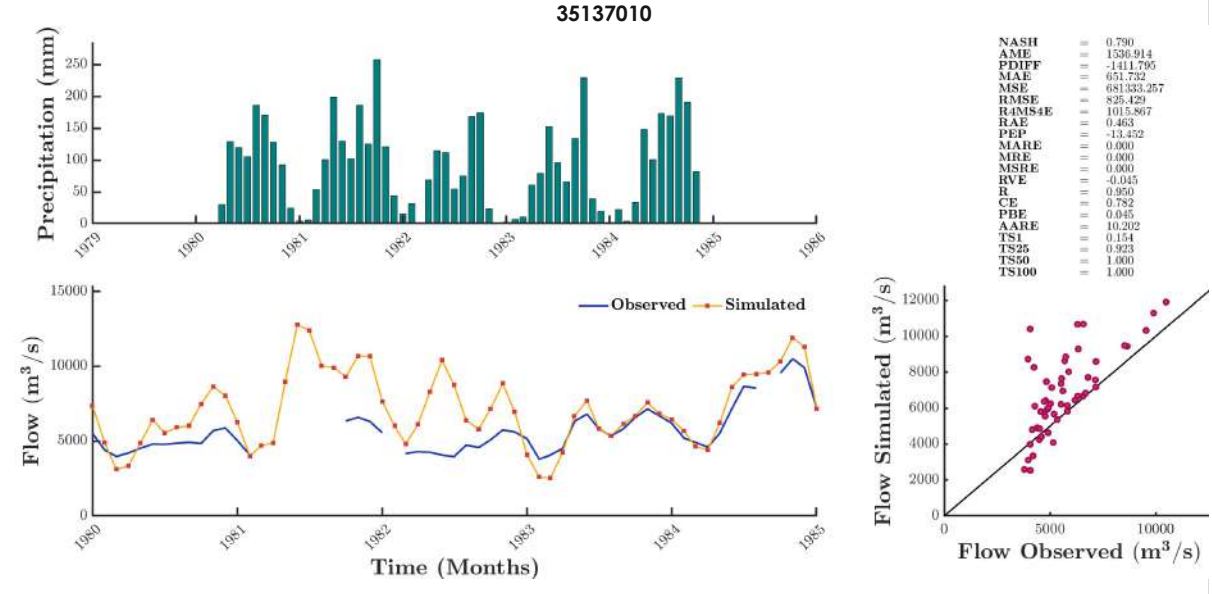



*Fuente: Elaboración propia*

En general los modelos presentaron un desempeño aceptable con un Nash- Sutcliffe de satisfactorio a muy bueno. En lo que respecta a la validación, el desempeño fue un poco más bajo entre 0,4 y 0,5. Sin embargo, se considera que el modelo es aceptable para efectos de la estimación de los indicadores, de acuerdo con los criterios definidos en la Tabla 16.

Los resultados de la calibración del modelo configurado para la NSS 2609-01, basado en las diferencias de caudal entre las estaciones Calamar (código 29037020) y Planta El Rio (código 29047060) durante el periodo 1976-1986, se presenta en la Figura 49.

**Figura 49 Gráficos comparativos entre caudal simulado y observado tanto en series como en diagramas de dispersión obtenidos del proceso de calibración del modelo – NSS 2906-01.**




*Fuente: Elaboración propia*

### 5.1.3.1.3. Simulación de caudales

Para la SZH 1501, se aplicó el criterio de proximidad espacial y similitud física establecido en el POMCA para la regionalización de parámetros en las cuencas sin instrumentación hidrológica. Los parámetros estimados para la subcuenca Río Piedras se asignaron a las subcuencas Directos al Caribe en el Parque Tayrona que carecen de información hidrológica. De manera similar, los parámetros estimados para la subcuenca Río Gaira se asignaron a las subcuencas sin información como Río Córdoba, Río Toribio, Quebrada Don Jaca, entre otros directos al Caribe y Quebrada Concha.

En contraste, para la SZH 2609-01 no fue necesaria la regionalización, ya que todas las subcuencas que la componen fueron consideradas en el proceso de calibración. Con ambos modelos calibrados y validados, se procedió a simular las series de caudal en sus respectivas subcuencas. Los datos de caudal simulado para todas las unidades hidrológicas se encuentran detallados en el Anexo 13. Caudales Mensuales.

### *5.1.3.2. SDI*

El índice de sequía de caudal (Streamflow Drought Index - SDI) se calcula mediante la siguiente ecuación (Thomaz et al., 2023):

$$SDI_{i,k} = \frac{V_{i,k} - \bar{V}_k}{S_k}$$

Donde $V_{i,k}$ es el volumen de caudal acumulado del año hidrológico i en el período de referencia k, y $\bar{V}_k$ y $S_k$ son la media y la desviación estándar de los volúmenes de flujo acumulados, respectivamente.

El SDI se calcula de manera similar que el SPI, y se recomienda utilizar períodos de 3, 6, 9 y 12 meses (ventanas de agregación), a partir de los datos mensuales caudales. El primer paso es calcular los totales acumulados correspondientes al mes/año y escala temporal deseada, luego se ajusta la distribución de frecuencia de caudales con una función teórica de densidad de probabilidad, la función de densidad es luego transformada a una distribución normal estandarizada (con media 0 y varianza 1), siendo el RDI el resultado de esta transformación.

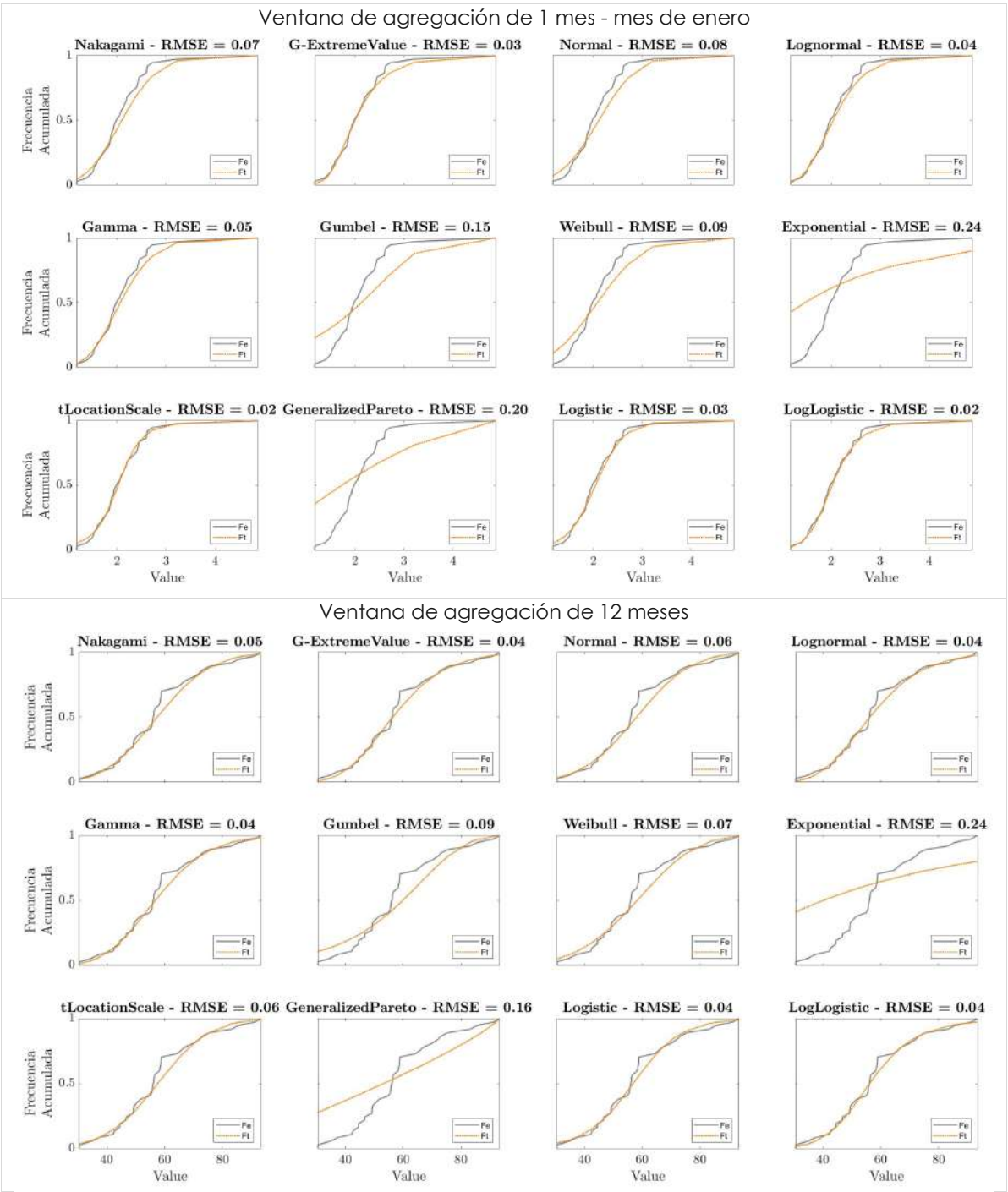
A continuación, se presenta el ajuste de funciones de probabilidad empíricas, identificando cuál es la que mejor se ajusta a cada serie de datos en las diferentes ventanas temporales analizadas (1 mes, 3 meses, 6 meses y 12 meses). Finalmente, se muestran los resultados del SDI clasificado.

#### 5.1.3.2.1. Ajuste funciones de probabilidad empíricas

El ajuste de una PDF se efectúa mediante la calibración de su frecuencia empírica (Fe) con la obtenida por los modelos o teórica (Ft). Para este caso se realizó la calibración mediante la (Fe) propuesta por Weibull, tal como lo describe (Dominguez, 2016) y las obtenidas por los 12 modelos a evaluar (ver Tabla 5). La selección del mejor ajuste se llevó a cabo mediante la métrica de error medio cuadrático, en donde este fuese menor, y la prueba de Kolmogorov-Smirnov fuera valida con un nivel de significancia del 95% (tal como se presenta en la sección 5.1.1.2.2).

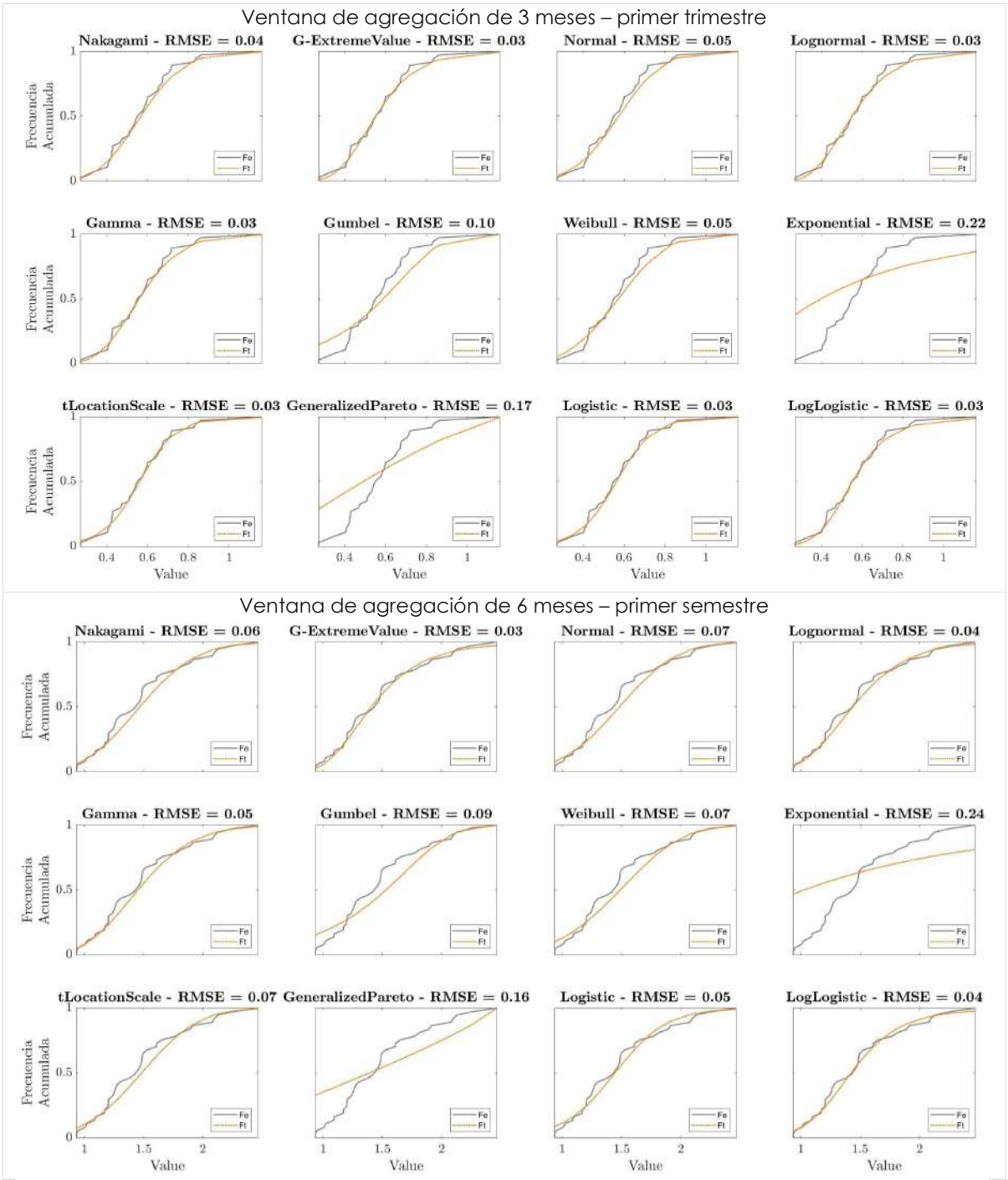
A manera de ejemplo, la Figura 50 presenta los ajustes de las doce funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) del mes de enero y al año, y en la Figura 51 se muestran los ajustes para el primer trimestre (ventana de agregación de 3 meses) y primer semestre (ventana de agregación de 6meses) para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101). En gris se observa la función de densidad de probabilidad empírica y en naranja la función de densidad de probabilidad teórica obtenida de los modelos teóricos evaluados. Los diferentes ajustes para cada una de las ventanas de agregación en las cuencas de análisis pueden ser consultados en el Anexo 14. PDF SDI.

**Figura 50 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) - Caudales.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 51 Ajustes de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101) - Caudales.**




*Fuente: Elaboración propia*

En la Figura 52 y Figura 53 se presenta el resumen de las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en cada una de las ventanas temporales para las cuencas de las SZH 1501 y NSS 2906-01, respectivamente.

Para la ventana temporal de agregación de 1 mes en las cuencas de la SZH 1501 (ver Figura 52) las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron durante los 12 meses del año fueron Generalized Extreme Value, Log Normal y Log Logistic, con un 39,8%, 19,4% y 13,9% de las cuencas, respectivamente. En el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 53), las funciones que mejor se ajustaron fueron Generalized Extreme Value, Log Logistic y t Location Scale, alcanzando el 76,1% del total.

Las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en los cuatro trimestres del año para la ventana temporal de agregación de 3 meses en las cuencas de la SZH 1501(ver Figura 52), correspondieron a Generalized Extreme Value, t Location Scale y Log Logistic, con el 34,3%, 15,7% y 12% de las cuencas. Para el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 53), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron fueron Log Normal y Log Logistic, alcanzando el 58,3% del total.

Para la ventana temporal de agregación de 6 meses en las cuencas de la SZH 1501(ver Figura 52), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron en los dos semestres del año fueron Generalized Extreme Value y Log Normal, con un 25,9% y 18,5% de las cuencas, respectivamente. En las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 53), las funciones que mejor se ajustaron fueron Generalized Extreme Value, Log Logistic y Log Normal, alcanzando el 96,7% del total.

En la ventana temporal de agregación de 12 meses en las cuencas de la SZH 1501 (ver Figura 52), las funciones de densidad de probabilidad que mejor se ajustaron durante el año fueron Log Normal y Log Logistic, con un 44,4% y 37% de las cuencas, respectivamente. En el caso de las cuencas de la NSS 2906-01 (ver Figura 53), la función que mejor se ajustó fue la Log Logistic con el 60% del total.

**Figura 52 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la SZH 1501 - Caudales.**

Ventana de agregación de 1 mes

| PDF | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 14.8% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 0.0% | 0.0% | 2.2% |
| Lognormal | 14.8% | 11.1% | 18.5% | 33.3% | 40.7% | 7.4% | 22.2% | 33.3% | 14.8% | 3.7% | 18.5% | 14.8% | 19.4% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 11.1% | 7.4% | 3.7% | 0.0% | 2.5% |
| tLocationScale | 11.1% | 7.4% | 14.8% | 33.3% | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 3.7% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 6.5% |
| GeneralizedPareto | 7.4% | 3.7% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 3.7% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 3.1% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.3% |
| Gamma | 3.7% | 7.4% | 7.4% | 3.7% | 0.0% | 7.4% | 25.9% | 3.7% | 0.0% | 11.1% | 11.1% | 3.7% | 7.1% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 14.8% | 7.4% | 0.0% | 0.0% | 1.9% |
| GeneralizedExtremeValue | 48.1% | 66.7% | 44.4% | 14.8% | 11.1% | 59.3% | 25.9% | 48.1% | 40.7% | 44.4% | 48.1% | 25.9% | 39.8% |
| LogLogistic | 14.8% | 3.7% | 11.1% | 14.8% | 48.1% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 18.5% | 48.1% | 13.9% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 18.5% | 0.0% | 3.7% | 11.1% | 7.4% | 0.0% | 0.0% | 3.4% |

Ventana de agregación de 3 meses

| PDF | 1 trimestre | 2 trimestre | 3 trimestre | 4 trimestre | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% | 3.7% | 0.0% | 0.9% |
| Lognormal | 11.1% | 22.2% | 7.4% | 3.7% | 11.1% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 7.4% | 0.0% | 1.9% |
| tLocationScale | 14.8% | 3.7% | 37.0% | 7.4% | 15.7% |
| GeneralizedPareto | 3.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.9% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 3.7% | 0.0% | 14.8% | 14.8% | 8.3% |
| Logistic | 0.0% | 29.6% | 0.0% | 0.0% | 7.4% |
| GeneralizedExtremeValue | 51.9% | 25.9% | 18.5% | 40.7% | 34.3% |
| LogLogistic | 14.8% | 0.0% | 3.7% | 29.6% | 12.0% |
| Nakagami | 0.0% | 18.5% | 7.4% | 3.7% | 7.4% |

Ventana de agregación de 6 meses

| PDF | 1 semestre | 2 semestre | Total |
|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 3.7% | 0.0% | 1.9% |
| Lognormal | 29.6% | 7.4% | 18.5% |
| Exponential | 0.0% | 11.1% | 5.6% |
| tLocationScale | 3.7% | 22.2% | 13.0% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 7.4% | 0.0% | 3.7% |
| Gamma | 3.7% | 0.0% | 1.9% |
| Logistic | 3.7% | 3.7% | 3.7% |
| GeneralizedExtremeValue | 25.9% | 25.9% | 25.9% |
| LogLogistic | 0.0% | 29.6% | 14.8% |
| Nakagami | 22.2% | 0.0% | 11.1% |

Ventana de agregación de 12 meses

| PDF | 1 año | Total |
|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 44.4% | 44.4% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 7.4% | 7.4% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 7.4% | 7.4% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% |
| GeneralizedExtremeValue | 3.7% | 3.7% |
| LogLogistic | 37.0% | 37.0% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 53 Porcentaje de ajuste de las funciones de densidad de probabilidad evaluadas para a en todas las cuencas de la NSS 2906-01 - Caudales.**

Ventana de agregación de 1 mes

| PDF | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct | Nov | Dic | Total |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 6.7% | 13.3% | 0.0% | 20.0% | 13.3% | 46.7% | 33.3% | 6.7% | 53.3% | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 17.2% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 46.7% | 46.7% | 46.7% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 6.7% | 53.3% | 13.3% | 40.0% | 22.2% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 26.7% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 6.7% | 0.0% | 0.0% | 3.3% |
| Logistic | 13.3% | 13.3% | 13.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.3% |
| GeneralizedExtremeValue | 13.3% | 6.7% | 13.3% | 80.0% | 26.7% | 20.0% | 40.0% | 93.3% | 13.3% | 6.7% | 46.7% | 13.3% | 31.1% |
| LogLogistic | 20.0% | 20.0% | 26.7% | 0.0% | 60.0% | 6.7% | 6.7% | 0.0% | 26.7% | 33.3% | 26.7% | 46.7% | 22.8% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |

Ventana de agregación de 3 meses

| PDF | 1 trimestre | 2 trimestre | 3 trimestre | 4 trimestre | Total |
|---|---|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 6.7% | 66.7% | 66.7% | 0.0% | 35.0% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 46.7% | 0.0% | 0.0% | 20.0% | 16.7% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 13.3% | 0.0% | 6.7% | 5.0% |
| Logistic | 13.3% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 3.3% |
| GeneralizedExtremeValue | 6.7% | 13.3% | 26.7% | 20.0% | 16.7% |
| LogLogistic | 26.7% | 6.7% | 6.7% | 53.3% | 23.3% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% | 0.0% |

Ventana de agregación de 6 meses

| PDF | 1 semestre | 2 semestre | Total |
|---|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 40.0% | 13.3% | 26.7% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 0.0% | 6.7% | 3.3% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% | 0.0% |
| GeneralizedExtremeValue | 60.0% | 26.7% | 43.3% |
| LogLogistic | 0.0% | 53.3% | 26.7% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% | 0.0% |

Ventana de agregación de 12 meses

| PDF | 1 año | Total |
|---|---|---|
| ExtremeValue | 0.0% | 0.0% |
| Weibull | 0.0% | 0.0% |
| Lognormal | 0.0% | 0.0% |
| Exponential | 0.0% | 0.0% |
| tLocationScale | 6.7% | 6.7% |
| GeneralizedPareto | 0.0% | 0.0% |
| Normal | 0.0% | 0.0% |
| Gamma | 0.0% | 0.0% |
| Logistic | 0.0% | 0.0% |
| GeneralizedExtremeValue | 33.3% | 33.3% |
| LogLogistic | 60.0% | 60.0% |
| Nakagami | 0.0% | 0.0% |

*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.1.3.2.2. Clasificación del SDI

El valor de Z encontrado es el valor del SDI, es decir el valor normal gracias a este ajuste para un lugar y periodo deseado. Los valores positivos y negativos indican que los caudales son respectivamente, mayores o menores que la media. El valor del SDI al ser normalizado indica que los periodos secos y húmedos se presentan de la misma forma, entonces, este índice puede ser también aplicado para el seguimiento de periodos húmedos. La Tabla 17 presenta la escala de colores para las clases de sequía y los valores del SDI.

**Tabla 17 Clasificación de sequía por rangos de SDI.**

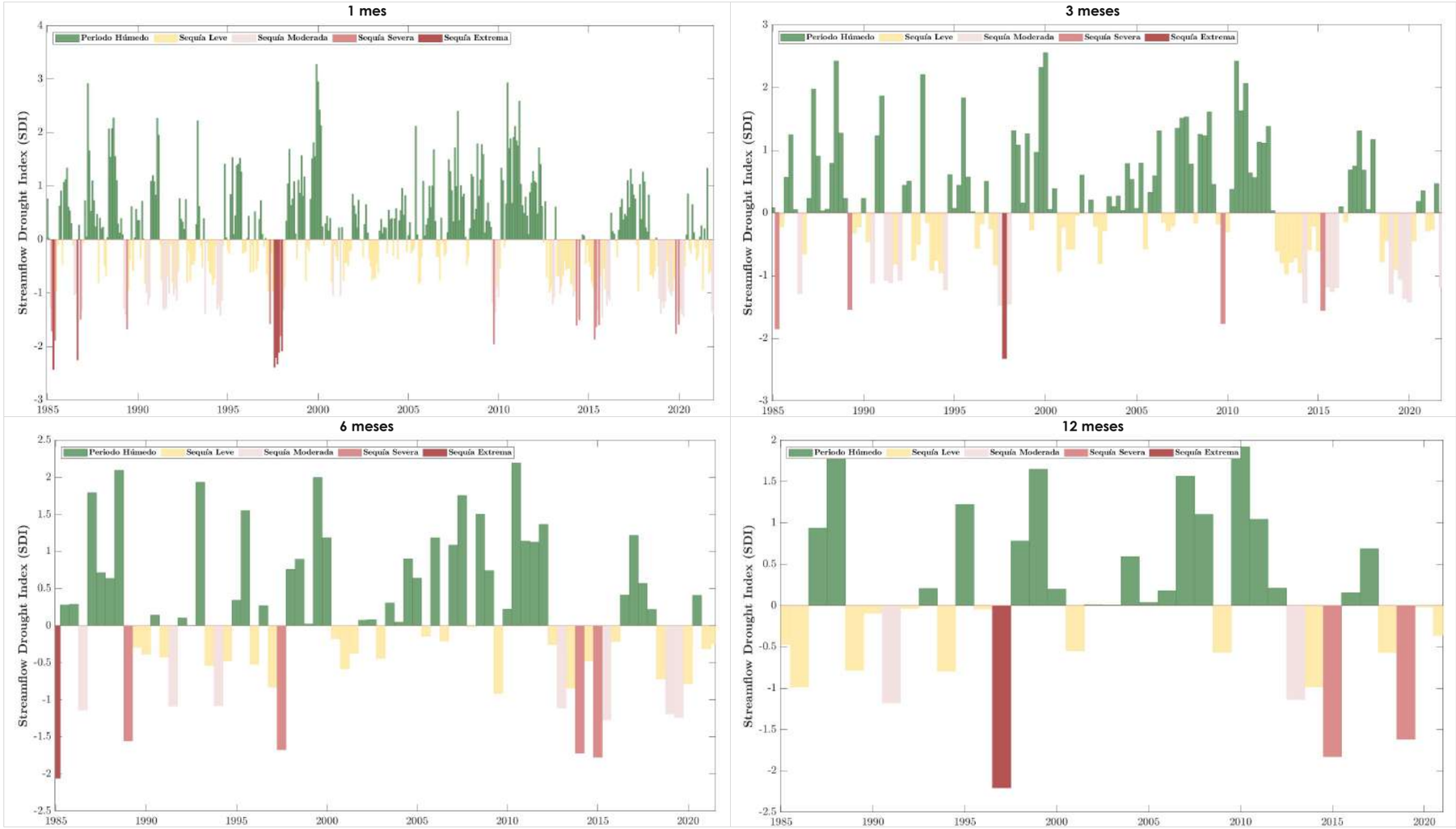
| Escala de colores | SDI | Clasificación |
|---|---|---|
| | SDI > 0 | Periodo húmedo |
| | 0 a - 0,99 | Sequía leve |
| | -1,00 a -1,49 | Sequía moderada |
| | -1,50 a -1,99 | Sequía Severa |
| | SDI ≤ -2,00 | Sequía extrema |

*Fuente: Adaptado de* Thomaz et al., (2023)

En la Figura 54 y Figura 55 se muestran, a modo de ejemplo, los resultados del SDI en las diferentes ventanas de agregación analizadas para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101) y la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101), respectivamente. Cada ventana de agregación del SDI proporciona información valiosa y complementaria. Las ventanas de agregación más cortas capturan la variabilidad y los extremos a corto plazo, mientras que las ventanas de agregación más largas permiten identificar tendencias y patrones más persistentes en las condiciones hidrológicas. La variabilidad es más alta en la gráfica de la ventana de agregación de 1 mes y disminuye a medida que aumenta la escala temporal de la ventana de agregación. Las gráficas de 6 y 12 meses muestran tendencias más claras y persistentes en las condiciones de humedad y sequía.

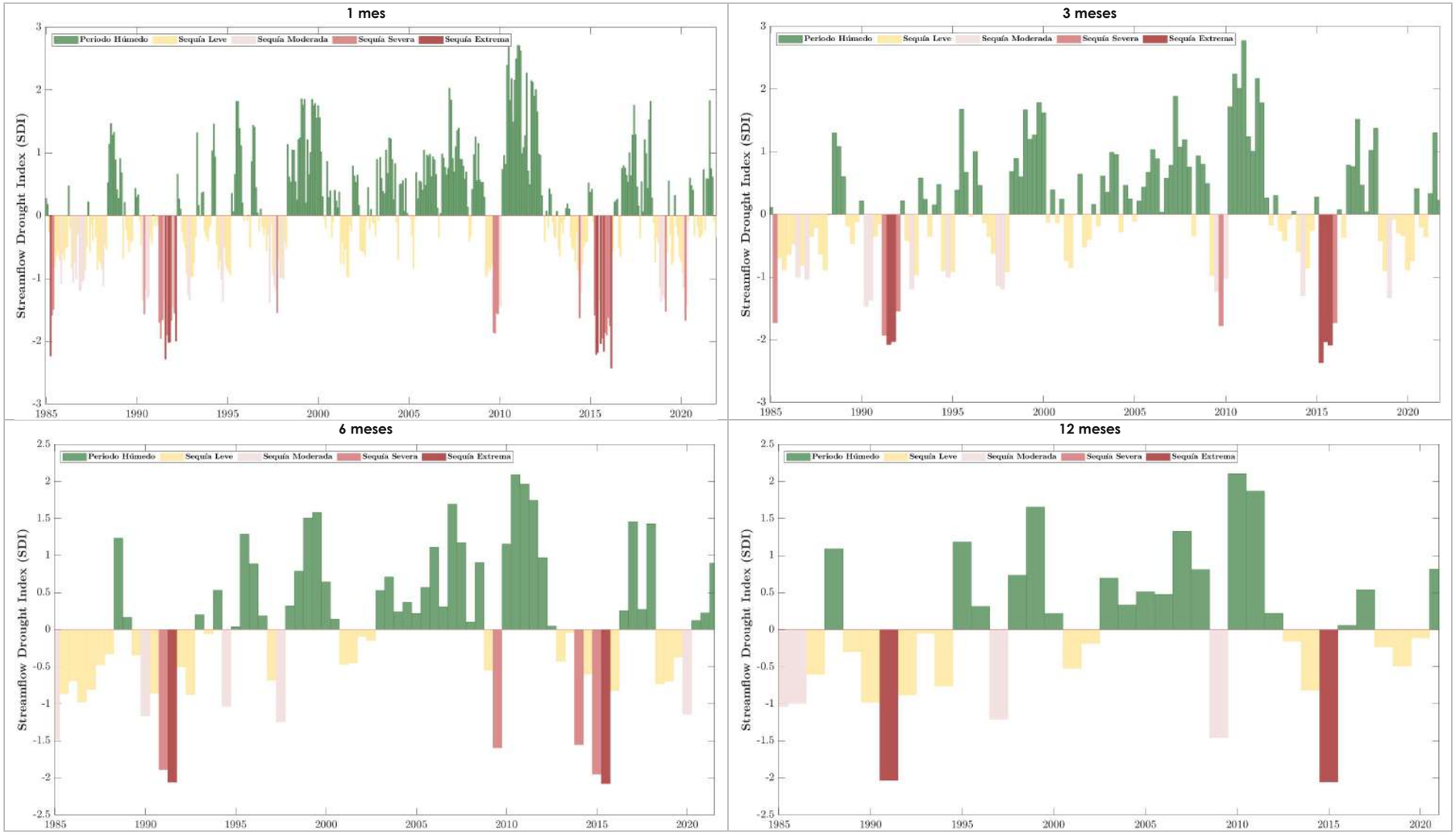
En el Anexo 15. SDI se presentan los resultados del SDI y su clasificación para todas las cuencas de las áreas de estudio. En general, las cuencas de la SZH 1501 muestran valores del SDI que indican sequías severas y extremas en las diversas ventanas de agregación para los años de 1997 y 2015. Por otro lado, las cuencas de la NSS 2906-01 presentan valores del SDI que indican sequías severas y extremas en las diferentes ventanas de agregación para los años de 1991 y 2015.

**Figura 54 SDI para la cuenca del Río Córdoba-Sector Cordobita (15010101).**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 55 SDI para la cuenca del Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101).**




*Fuente: Elaboración propia*

En cada ventana de agregación, se tomó el valor del percentil 95 para los SDI por debajo de 0, los que indican las sequías. El percentil 95 representa el valor por debajo del cual se encuentran el 95% de los datos, es decir, el 5% de los datos más altos del SDI. Finalmente, en cada cuenca, se asigna un único valor de SDI como el promedio de los valores en cada ventana temporal. La Tabla 18 y Tabla 19 presentan los resultados del SDI en cada una de las cuencas de la NSS 2906-01 y SZH 1501, respectivamente.

**Tabla 18 Percentil 95 del SDI para las cuencas de la NSS 2906-01.**

| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 2906010101 | Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM | -1.95 | -2.04 | -2.03 | -2.04 | -2.02 |
| 2906010102 | Complejo Ciénaga Playazo | -1.95 | -2.18 | -2.06 | -2.11 | -2.07 |
| 2906010103 | Caño Schiller entre La Loma y El Jagüey | -2.05 | -2.04 | -2.06 | -2.08 | -2.06 |
| 2906010104 | Caño Schiller entre el rio Magdalena y La Loma | -2.08 | -2.12 | -1.90 | -1.79 | -1.97 |
| 2906010105 | Arroyo Pacheco y otros directos al Caño Schiller | -1.85 | -1.92 | -1.82 | -1.91 | -1.87 |
| 2906010106 | Arroyos Palma de Vino, Pertuz y Los Puercos | -1.88 | -1.72 | -1.95 | -1.93 | -1.87 |
| 2906010200 | Caños Hondo, El Loro y otros directos al rio Magdalena | -2.00 | -2.12 | -2.13 | -2.07 | -2.08 |
| 2906010301 | Complejo Ciénaga de Buenavista | -1.95 | -1.84 | -1.71 | -1.66 | -1.79 |
| 2906010302 | Complejo Ciénaga El Diluvio | -2.03 | -2.16 | -1.81 | -1.96 | -1.99 |
| 2906010400 | Complejo Caño El Salado | -1.80 | -1.92 | -1.79 | -1.90 | -1.85 |
| 2906010501 | Complejo Cenagoso-Sector Palermo | -1.89 | -1.81 | -1.93 | -1.85 | -1.87 |
| 2906010502 | Complejo Cenagoso-Sector Sitionuevo | -1.97 | -1.82 | -1.86 | -1.78 | -1.86 |
| 2906010503 | Caño Los Micos | -1.81 | -1.81 | -1.86 | -1.79 | -1.82 |
| 2906010600 | Complejo de Ciénagas Vía Parque Isla Salamanca | -1.81 | -1.67 | -1.97 | -1.94 | -1.85 |
| 2906010700 | Complejo Lagunar Ciénaga Grande | -1.85 | -1.86 | -1.85 | -1.83 | -1.85 |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 19 Percentil 95 del SDI para las cuencas de la SZH 1501.**

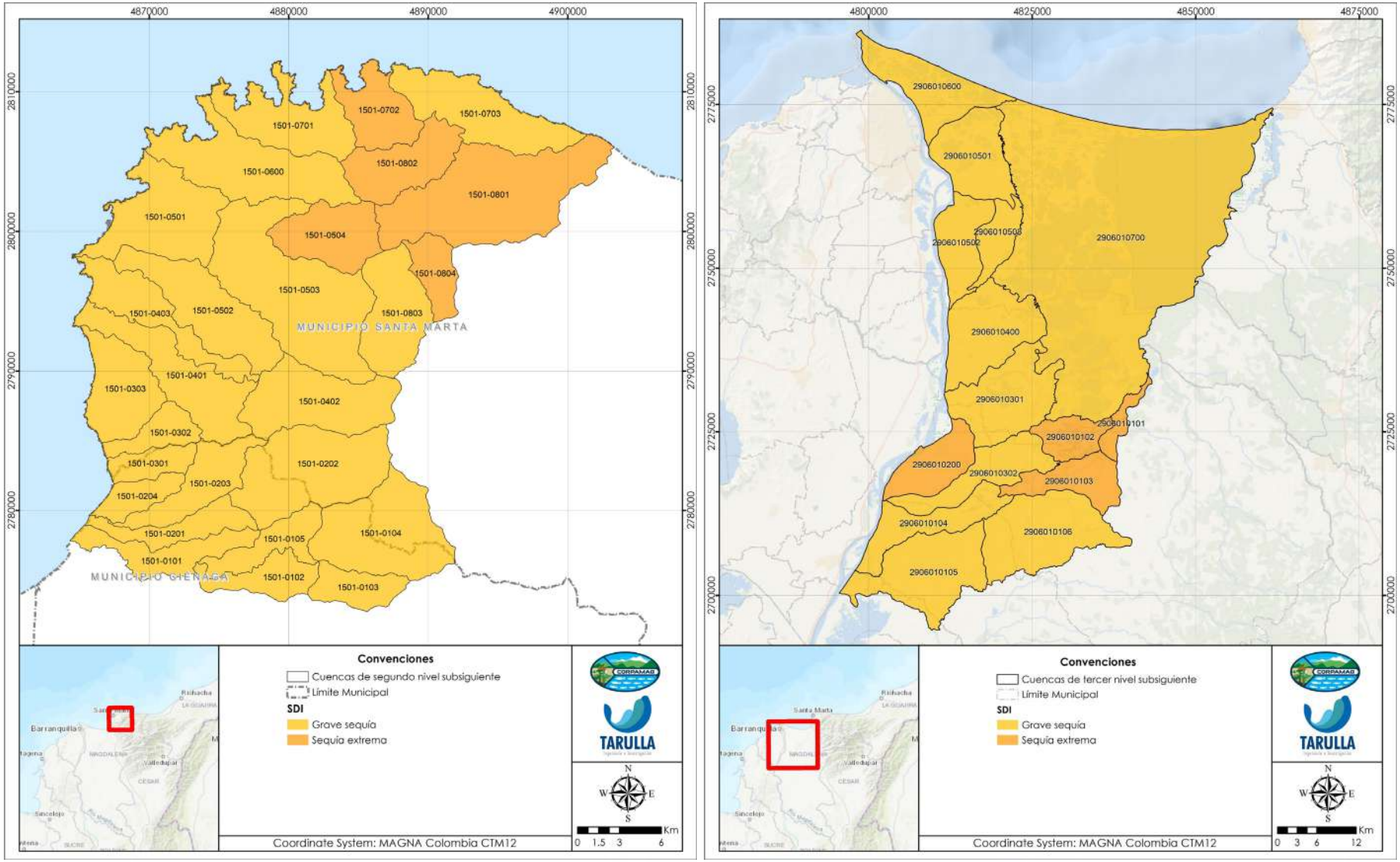
| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 15010104 | Río Cordoba-Sector Agualinda | -1.87 | -1.63 | -1.79 | -2.18 | -1.87 |
| 15010303 | Quebrada El Ebano y otros directos al Caribe | -1.99 | -1.67 | -1.73 | -1.92 | -1.83 |
| 15010202 | Río Toribio entre Guayabal y El Vergel | -2.01 | -1.80 | -1.84 | -1.98 | -1.91 |
| 15010401 | Directos al Río Gaira entre Minca y el mar Caribe (mi) | -1.92 | -1.80 | -1.78 | -1.96 | -1.87 |
| 15010703 | Quebradas Santa Rosa, Playa Brava y otros directos al Caribe | -1.67 | -1.66 | -1.54 | -1.75 | -1.65 |
| 15010600 | Quebrada Concha | -1.83 | -1.87 | -1.91 | -2.10 | -1.93 |

| Código Cuenca | Nombre Cuenca | SPI (Standardized Precipitation Index) | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Percentil 95 para diferentes ventanas de agregación | | | | Promedio |
| | | 1 mes | 3 meses | 6 meses | 12 meses | |
| 15010501 | Río Manzanares en Santa Marta | -1.92 | -1.92 | -1.80 | -1.90 | -1.88 |
| 15010801 | Río Piedras entre San Isidro y el Mar Caribe | -1.92 | -2.21 | -1.98 | -2.21 | -2.08 |
| 15010802 | Quebrada Jordan | -2.11 | -2.12 | -2.02 | -2.24 | -2.12 |
| 15010702 | Quebrada Cinto y otros directos al Caribe | -2.11 | -2.19 | -1.96 | -2.05 | -2.08 |
| 15010701 | Quebrada Gayraca y otros directos al Caribe | -1.89 | -1.85 | -1.98 | -2.01 | -1.93 |
| 15010504 | Quebrada Matogiro (Donama) | -1.91 | -2.09 | -1.88 | -2.13 | -2.00 |
| 15010804 | Quebrada La Lisa | -2.03 | -2.27 | -2.01 | -2.28 | -2.15 |
| 15010803 | Río Piedras entre la Cuchills de San Lorenzo y San Isidro | -1.97 | -2.06 | -1.65 | -2.17 | -1.96 |
| 15010503 | Río Manzanares entre la Cuchilla de San Lorenzo y Santa Marta | -1.78 | -1.93 | -1.78 | -2.19 | -1.92 |
| 15010402 | Río Gaira entre la Cuchilla de San Lorenzo y Minca | -1.91 | -1.92 | -1.90 | -2.01 | -1.93 |
| 15010502 | Quebrada Tamaca | -1.69 | -1.68 | -1.60 | -2.24 | -1.80 |
| 15010403 | Directos al rio Gaira entre Minca y el mar Caribe (md) | -1.83 | -1.79 | -1.60 | -1.71 | -1.73 |
| 15010302 | Quebrada Don Jaca | -1.88 | -1.94 | -1.94 | -1.95 | -1.93 |
| 15010301 | Quebrada El Doctor | -1.95 | -1.87 | -1.91 | -1.44 | -1.79 |
| 15010203 | Quebrada Marinca | -1.98 | -1.96 | -1.78 | -1.93 | -1.91 |
| 15010204 | Quebrada El Guayabo | -2.15 | -1.95 | -1.99 | -1.39 | -1.87 |
| 15010201 | Río Toribio entre vereda El Vergel y Mar Caribe | -1.87 | -1.88 | -1.81 | -1.89 | -1.86 |
| 15010101 | Río Cordoba-Sector Cordobita | -1.79 | -1.55 | -1.76 | -2.06 | -1.79 |
| 15010105 | Quebrada El Quindio y otros directos al Río Cordoba (md) | -1.86 | -1.55 | -1.75 | -2.12 | -1.82 |
| 15010102 | Quebrada Lourdes y otros directos al Río Cordoba (mi) | -1.80 | -1.55 | -1.74 | -2.11 | -1.80 |
| 15010103 | Quebrada La Sierrita | -1.81 | -1.57 | -2.05 | -2.05 | -1.87 |

*Fuente: Elaboración propia*

La Figura 56 muestra el resultado del SDI clasificado en cada una de las cuencas de las áreas de estudio. Se puede apreciar que, al noreste de la SZH 1501, se encuentran las cuencas Río Piedras entre San Isidro y el Mar Caribe (15010801), Quebrada Jordan (15010802), Quebrada Cinto y otros directos al Caribe (15010702), Quebrada Matogiro (Donama) (15010504) y Quebrada La Lisa (15010804), las cuales presentan los valores más altos del SDI. Así mismo, en la NSS 2906-01, las cuencas Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM (2906010101), Complejo Ciénaga Playazo (2906010102), Caño Schiller entre La Loma y El Jagüey (2906010103) y Caños Hondo, El Loro y otros directos al rio Magdalena (2906010200), muestran los valores más altos del SDI.

**Figura 56 Clasificación del SDI en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

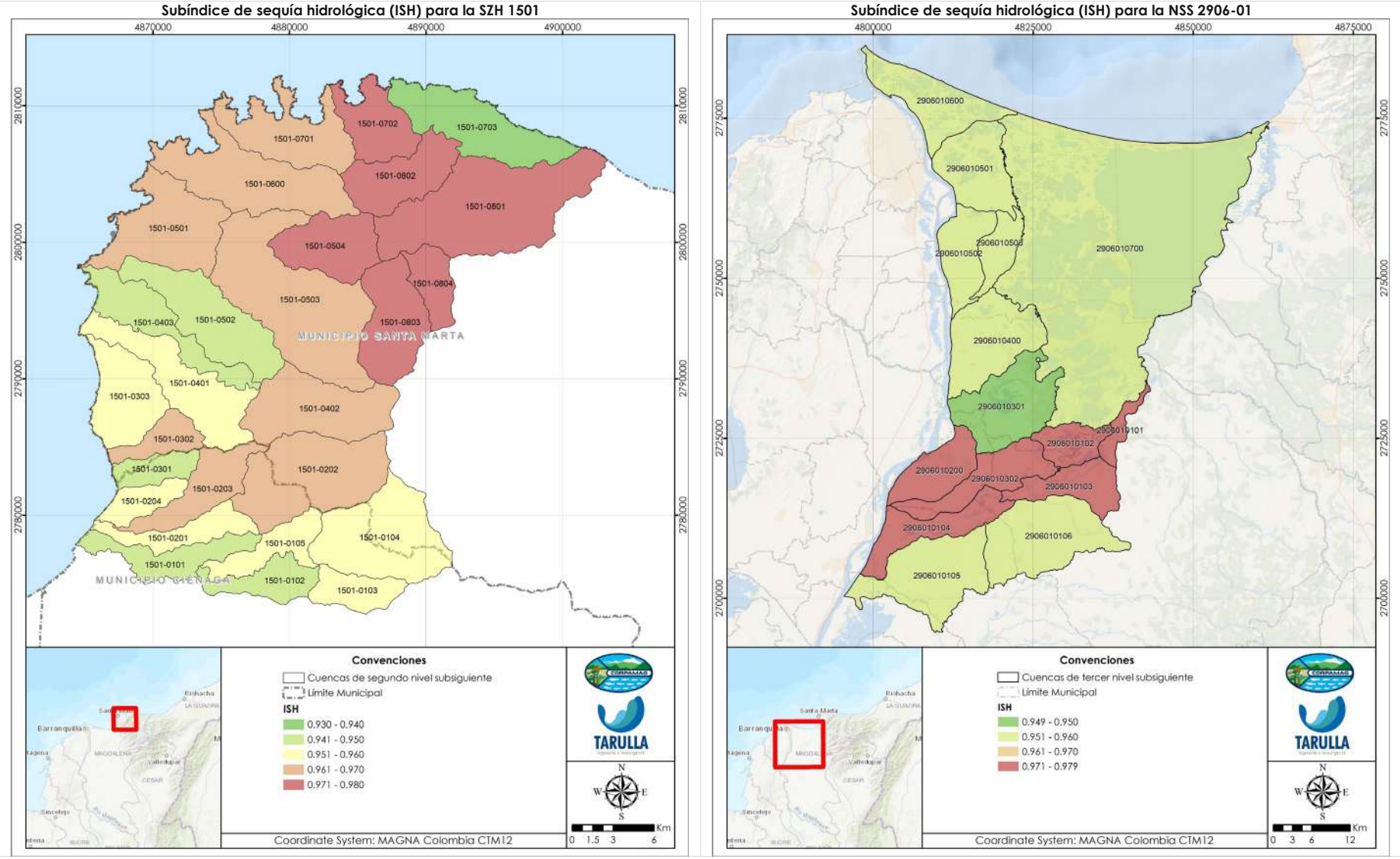
### *5.1.3.3. ISH*

El ISH corresponde al valor normalizado del SDI, obtenido mediante tres ecuaciones que consideran los valores de probabilidad típicos de la distribución normal y los valores del SDI entre "0" y "−3" (de la misma forma que el SPI, ver Tabla 9). Para normalizar el SDI entre 0 y 1, se utilizan los valores de probabilidad acumulada de una curva normal, asumiendo que los valores del SDI de −1, −2 y −3 están asociados con las probabilidades acumuladas de hasta 1, 2 y 3 desviaciones estándar en el lado derecho de la curva.

Los valores del ISH, resultado de la normalización del SDI, arroja valores superiores a 0,93 en las dos áreas de estudio (ver Figura 57). En la SZH 1501 los valores más altos del ISH se encuentran en las cuencas ubicadas al noreste de esta.

En cuanto a la NSS 2906-01, los valores más altos del ISH se observan en las cuencas localizadas al sur. Además, la cuenca Complejo Ciénaga de Buenavista (2906010301), situadas en la zona norte de la NSS 2906-01, presentan los valores más bajos del ISH.

**Figura 57 Subíndice de sequía hidrológica (ISH) en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

### 5.1.4. Índice de amenaza por desabastecimiento de agua para consumo (SIA)

El SIA consta de subíndices que representan los tres componentes que caracterizan diferentes aspectos de las sequías: meteorológico, agrícola e hidrológico (ver Figura 3). La formulación del índice de amenaza (SIA) se presenta en la siguiente ecuación:

$$SIA = ISM \times wm \; + \; ISA \; \times wa \; + \; ISH \; \times wh$$

Donde:

ISM, subíndice de sequía meteorológica

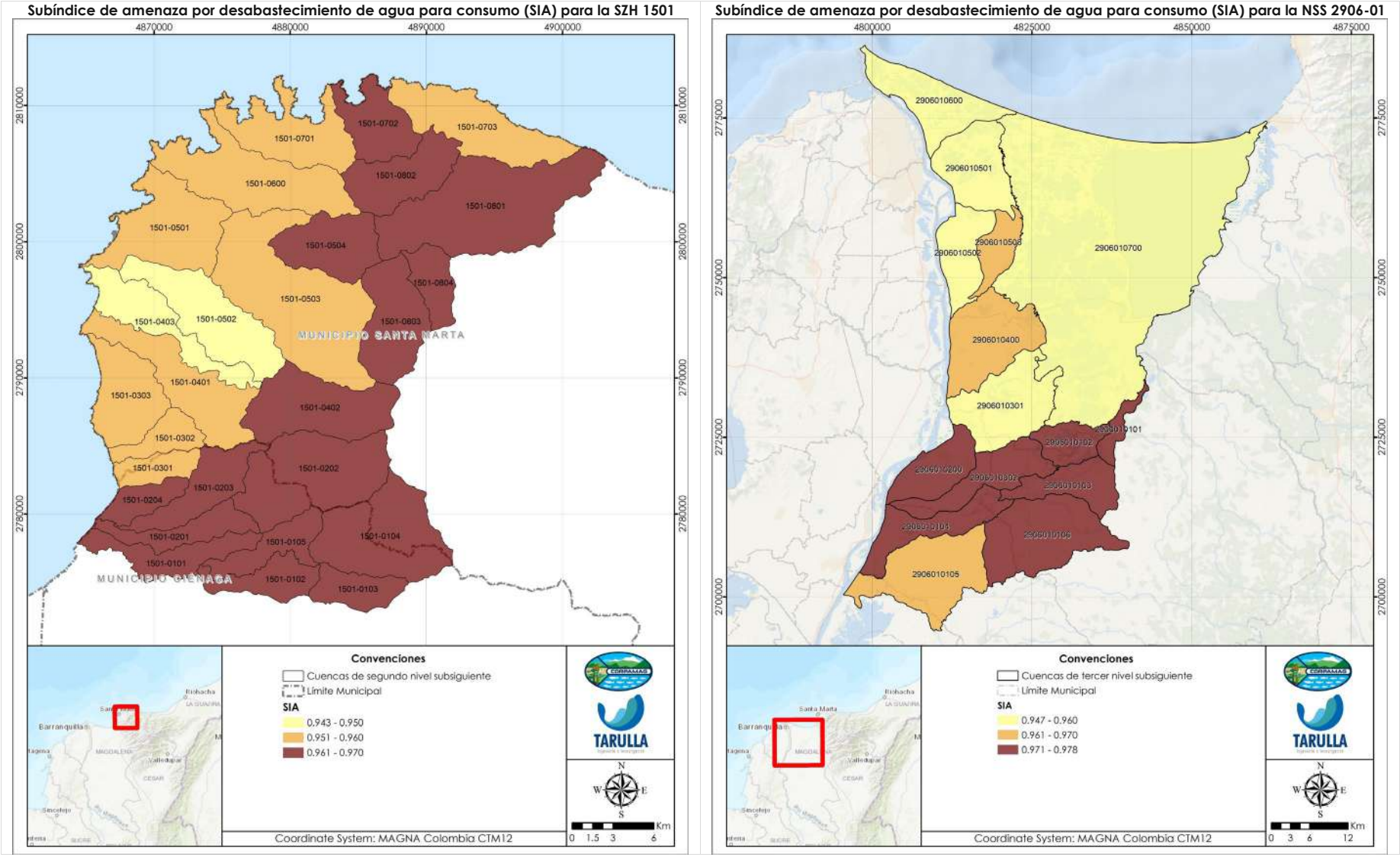
ISA, subíndice de sequía agrícola

ISH, subíndice de sequía hidrológica

$wm$, $wa$, y $wh$ son las ponderaciones asociadas a cada subíndice

A cada uno de los componentes del SIA se le asigna el mismo peso (0.3333). Como resultado del indicador se observa que la zona sur de la NSS 2906-01 presenta las cuencas que arrojan los valores más alto de este indicador (ver Figura 58). Asi mismo, se evidencia valores altos del indicador en las cuencas de la SZH 1501 ubicadas en la zona sur y oriental.

**Figura 58 Subíndice de amenaza por desabastecimiento de agua para consumo (SIA)en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

## 5.2.Vulnerabilidad por desabastecimiento de agua para consumo (SIV)

El SIV se caracteriza por subíndices que representan la vulnerabilidad económica y vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento. La formulación del índice de vulnerabilidad se presenta en la siguiente ecuación:

$$SIV = IVH \times IVE$$

Donde, IVH es el Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento e IVE es el indicador de vulnerabilidad económica.

### 5.2.1. Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH)

El índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) relaciona de forma cualitativa a) el Índice de Uso del Agua – IUA, y b) el Índice de Retención y Regulación Hídrica – IRH, mostrando la fragilidad de los sistemas hídricos superficiales de mantener la oferta de agua dadas sus condiciones de regulación y de demanda, pudiéndose presentar susceptibilidad al desabastecimiento (IDEAM, 2023b).

El Índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento, tanto en año hidrológico medio como seco, se determina a partir de la matriz de asociación de los rangos de interpretación del Índice de retención y regulación hídrica (IRH) y del Índice de Uso de Agua (IUA) (ver Tabla 20). Entre más alto es el uso del agua y menor es la regulación, la vulnerabilidad por desabastecimiento aumenta; disminuye cuando mejora la regulación de agua o se presenta un menor uso del agua (IDEAM, 2023b).

**Tabla 20 Matriz de asociación del índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento - IVH.**

| Índice de Uso del Agua - IUA | Índice de Retención y Regulación hídrica -IRH | | | |
|---|---|---|---|---|
| Categoría | Alto | Moderado | Bajo | Muy bajo |
| Muy Bajo | Muy baja | Baja | Media | Media |
| Bajo | Baja | Baja | Media | Media |
| Medio | Media | Media | Alta | Alta |
| Alto | Media | Alta | Alta | Muy Alta |
| Muy alto | Media | Alta | Alta | Muy Alta |
| Crítico | Muy alta | Muy Alta | Muy Alta | Muy Alta |

*Fuente: IDEAM (2023b)*

#### *5.2.1.1. Usos del agua*

En Colombia la definición de usos del agua se encuentra establecido en el Decreto 1076 de 2015. Estos usos se atribuyen a las cuencas y microcuencas del país. En la Tabla 21 se presentan de los usos que se pueden dar a los cuerpos de agua.

**Tabla 21 Usos del agua establecidos en el Decreto 1076 de 2015.**

| Usos de los cuerpos de agua | Descripción |
|---|---|
| Consumo humano y doméstico | Se entiende por uso del agua para consumo humano y doméstico su utilización en actividades tales como: |

| Usos de los cuerpos de agua | Descripción |
|---|---|
| Artículo 2.2.3.3.2.2. | 1. Bebida directa y preparación de alimentos para consumo inmediato.<br>2. Satisfacción de necesidades domésticas, individuales o colectivas, tales como higiene personal y limpieza de elementos, materiales o utensilios.<br>3. Preparación de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución, que no requieran elaboración. |
| Preservación de flora y fauna<br>Artículo 2.2.3.3.2.3. | Se entiende por uso del agua para preservación de flora y fauna, su utilización en actividades destinadas a mantener la vida natural de los ecosistemas acuáticos y terrestres y de sus ecosistemas asociados, sin causar alteraciones sensibles en ellos. |
| Pesca, Maricultura y Acuicultura<br>Artículo 2.2.3.3.2.4. | Se entiende por uso para pesca, maricultura y acuicultura su utilización en actividades de reproducción, supervivencia, crecimiento, extracción y aprovechamiento de especies hidrobiológicas en cualquiera de sus formas, sin causar alteraciones en los ecosistemas en los que se desarrollan estas actividades. |
| Agrícola<br>Artículo 2.2.3.3.2.5. | Se entiende por uso agrícola del agua, su utilización para irrigación de cultivos y otras actividades conexas o complementarias. |
| Pecuario<br>Artículo 2.2.3.3.2.6. | Se entiende por uso pecuario del agua, su utilización para el consumo del ganado en sus diferentes especies y demás animales, así como para otras actividades conexas y complementarias. |
| Recreativo<br>Artículo 2.2.3.3.2.7. | Se entiende por uso del agua para fines recreativos, su utilización, cuando se produce:<br>1. Contacto primario, como en la natación, buceo y baños medicinales.<br>2. Contacto secundario, como en los deportes náuticos y la pesca. |
| Industrial<br>Artículo 2.2.3.3.2.8. | Se entiende por uso industrial del agua, su utilización en actividades tales como:<br>1. Procesos manufactureros de transformación o explotación, así como aquellos conexos y complementarios.<br>2. Generación de energía.<br>3. Minería.<br>4. Hidrocarburos.<br>5. Fabricación o procesamiento de drogas, medicamentos, cosméticos, aditivos y productos similares.<br>6. Elaboración de alimentos en general y en especial los destinados a su comercialización o distribución. |

| Usos de los cuerpos de agua | Descripción |
|---|---|
| Navegación y Transporte Acuático<br>Artículo 2.2.3.3.2.9. | Se entiende por uso del agua para transporte su utilización para la navegación de cualquier tipo de embarcación o para la movilización de materiales por contacto directo. |
| Estético<br>Artículo 2.2.3.3.2.10. | Se entenderá por uso estético el uso del agua para la armonización y embellecimiento del paisaje. |

*Fuente: Artículo 2.2.3.3.2.1. al Artículo 2.2.3.3.2.10. Decreto 1076 de 2015.*

La descripción y verificación de los usos actuales para la SZH 1501 y NSS 2906-01 se realiza a partir de la información de los usuarios obtenida en abril del 2024 mediante la consulta de las resoluciones del portal web de la Corporación Autónoma Regional del Magdalena– CORPAMAG[5]. La información de las concesiones de agua superficiales emitidas por las resoluciones en las dos cuencas objeto de estudio y las resoluciones pueden ser consultadas en el Anexo 16. Resoluciones de las concesiones de agua.

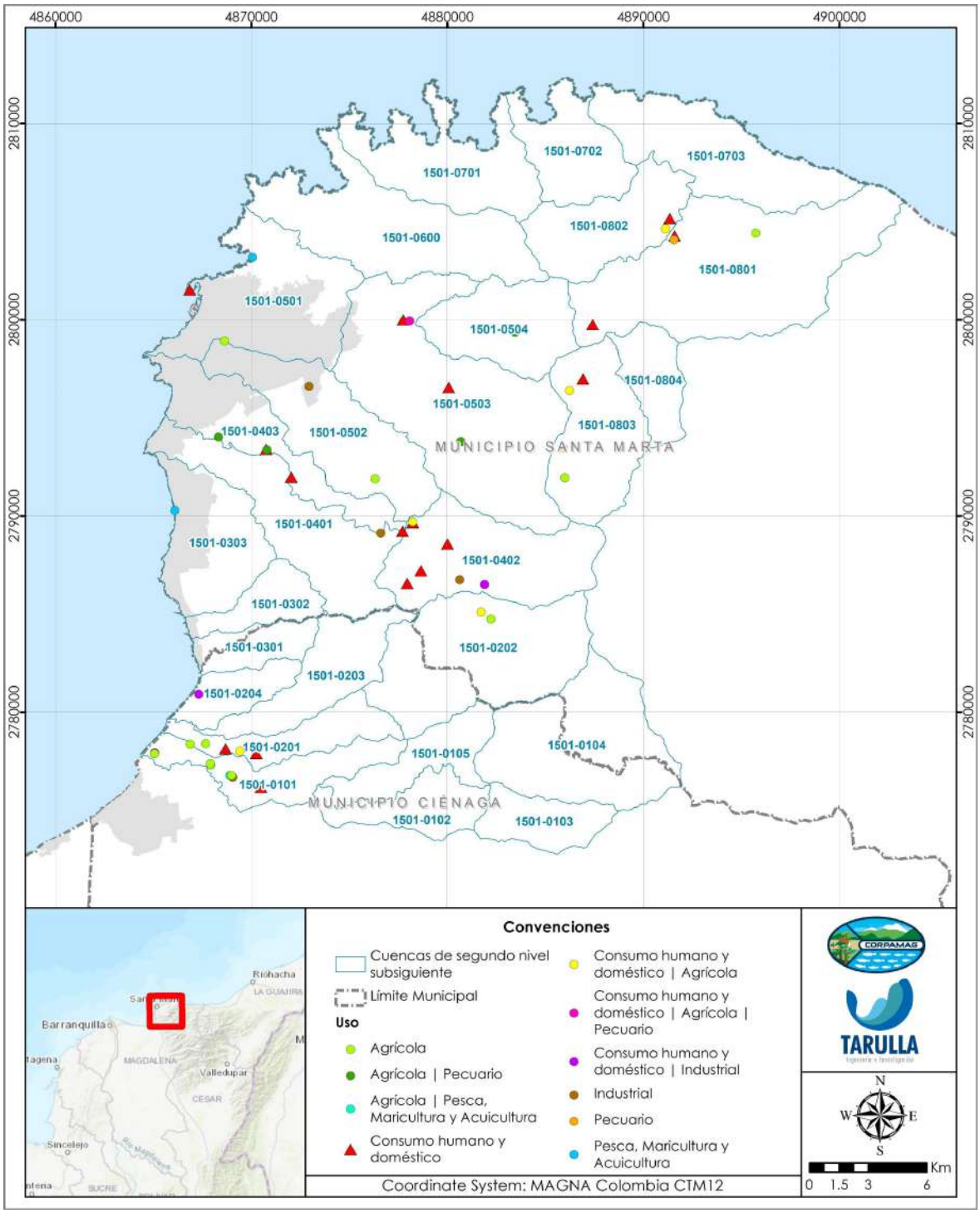
#### 5.2.1.1.1. Inventario de usuarios del recurso hídrico

- Río Piedras, Río Manzanares y otros afluentes directos al Caribe (SZH 1501)

A partir de la información de las concesiones de agua superficial de CORPAMAG se realiza el inventario de los usos actuales y la cuantificación del caudal total concesionado para la cuenca objeto de aprovechamiento del Río Piedras, Río Manzanares y otros afluentes directos al Caribe (SZH 1501). En la Figura 59 se presenta la ubicación de las concesiones de agua registradas en la SZH 1501. Gran parte de las concesiones de agua superficial se ubican en las cuencas de segundo nivel subsiguiente del Río Córdoba-Sector Cordobita (1501-0101), Río Gaira entre la Cuchilla de San Lorenzo y Minca (1501-0402), Río Toribio entre vereda El Vergel y Mar Caribe (1501-0201), Directos al rio Gaira entre Minca y el mar Caribe (md) (1501-0403), Río Manzanares entre la Cuchilla de San Lorenzo y Santa Marta (1501-0503), Río Piedras entre San Isidro y el Mar Caribe (1501-0801).

[5] https://www.corpamag.gov.co/transparencia/normatividad/consulta-de-resoluciones

**Figura 59 Usos y usuarios en la SZH 1501.**




*Fuente: Elaboración propia*

En la SZH 1501 se han emitido un total de 51 resoluciones que autorizan la captación de agua superficial con un caudal total concesionado de 2.809,25 l/s (ver Tabla 22). En el río Córdoba a través de 9 resoluciones se ha concesionado 931,7 l/s, seguido del río Gaira con un caudal concesionado de 688,73 l/s en 8 resoluciones.

**Tabla 22 Caudal concesionado por fuente y número de resoluciones – SZH 1501.**

| Fuente | Caudal concesionado (l/s) | Cantidad de resoluciones |
|---|---|---|
| Acequia Bureche | 30,35 | 1 |
| Manantial | 33,93 | 4 |
| Mar Caribe | 20,77 | 3 |
| Quebrada Donama | 10,36 | 1 |
| Quebrada El Jabalí | 20 | 1 |
| Quebrada El Recuerdo | 0,31 | 1 |
| Quebrada La India | 0,13 | 1 |
| Quebrada La Nube | 2,5 | 1 |
| Quebrada Malabrigo | 1,1 | 1 |
| Quebrada Marinka | 0,5 | 1 |
| Quebrada Santa Teresa | 4,41 | 2 |
| Quebrada La Tigrera | 4 | 3 |
| Quebrada Victoria | 0,15 | 1 |
| Quebrada Vira Vira | 7 | 1 |
| Río Córdoba | 931,7 | 9 |
| Río Gaira | 688,73 | 8 |
| Río Manzanares | 336,5 | 2 |
| Río Piedras | 442,33 | 4 |
| Río Toribio | 274,48 | 6 |
| **Total** | **2.809,25** | **51** |

*Fuente: Elaboración propia*

Las captaciones autorizadas se presentan para 43 usuarios, entre los cuales se encuentran: Empresa de Servicios Públicos del Distrito de Santa Marta - ESSMAR E.S.P., Operadores de Servicios de la Sierra S.A.E.S.P. y la Asociación de Usuarios Canal Río Córdoba – ASUCORC. A continuación, se listan los 43 usuarios presentes en la cuenca objeto de aprovechamiento.

1. A&L Dávila S.C.A.
2. Agropecuaria e Inversiones Cotes Habeysh S. En C.
3. Agropecuaria Frigorífico Rodeo LTDA
4. Alcaldía Distrital de Santa Marta
5. Antonio José Riascos Torres
6. Asociación de Usuarios Canal Río Córdoba - ASUCORC
7. Asociación de Usuarios de Minca - ASUAMIN
14. Constructora Bolívar S.A.
15. Costera Progestur LTDA y CIA S En C
16. Diego José Romero Rivero
17. Drummond LTD
18. Ecobio Colombia S.A.S.
19. Empresa de Servicios Públicos del Distrito de Santa Marta - ESSMAR E.S.P.
20. Gloria Carmona Ospina
21. Hernán Enrique Carrillo Pacheco
28. Luz Marina Cabas de Labarces
29. Maria Danies Silva
30. Martha Elena Lacouture
31. Mateo Restrepo Builes
32. Mirna Ferrer Ornes
33. Operadores de Servicios de la Sierra S.A.E.S.P.
34. Pharmacol Cannabis S.A.S.
35. Portuaria del Río Córdoba S.A.
36. Portuaria Regional de Santa Marta S.A.
37. Promotora DGC S.A.S.

8. C.I. Compras Américas S.A.S. y Victoria Cecilia Bernier Feliciano
9. Carlos Rueda Vesga
10. Cervecería Nevada S.A.S.
11. CI Andiminerals S.A.S.
12. Cincinnati Coffe Company S.A.S.
13. Consorcio Constructor Santa Marina
22. Hotel Irotama S.A.S.
23. Inversiones Fernath S.A.S.
24. Inversiones Jardines de Jerusalen S.A.S.
25. Inversiones MFJP S.A.S.
26. Juan Miguel de Vengoechea y CIA. S. En C.S.
27. La Granja El Oasis de la Sierra
38. Reserva Natural Tierra Adentro
39. Santa Cruz de Papare S.A.S.
40. Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA)
41. Universidad Cooperativa de Colombia Sede Santa Marta
42. Universidad del Magdalena
43. Victoria Bernier Feliciano

En los municipios de Ciénaga y Santa Marta se reportan cuatro empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto, de las cuales tres están actualmente en estado operativa, como se indica en la Tabla 23. Esta información ha sido generada por el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI)[6], que es administrado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

**Tabla 23 Empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto – SZH 1501.**

| ID Empresa | Fecha Ultima Actualización RUPS | Clasificación | Razón Social | Fecha de inicio de Operaciones | Estado del prestador | Municipio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 37396 | 2020-02-24 | Mas de 2500 suscriptores | Proactiva Santa Marta S A ESP | 2019-08-14 | Inactiva | Santa Marta |
| 2989 | 2024-03-22 | Mas de 2500 suscriptores | Operadores De Servicios De La Sierra S.A.S. E.S.P. | 2000-08-18 | Operativa | Ciénaga |
| 3307 | 2023-08-24 | Hasta 2500 suscriptores | Junta Administradora Acueducto Corregimiento De Bonda | 1992-11-30 | Operativa | Santa Marta |
| 1107 | 2024-01-15 | Mas de 2500 suscriptores | Empresa De Servicios Públicos Del Distrito De Santa Marta E.S.P. | 1992-11-24 | Operativa | Santa Marta |

*Fuente: SUI, 2024*

De las empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto reportadas en el SUI, se relacionan dos en el inventario de las concesiones de aguas superficiales otorgadas por CORPAMAG, ESSMAR E.S.P. y Operadores de Servicios de La Sierra S.A.S. E.S.P.

ESSMAR E.S.P. presta el servicio de acueducto en la ciudad de Santa Marta y capta sus aguas del río Manzanares, Gaira y Piedras. La concesión de aguas para el río Manzanares establece un caudal de 330 l/s, según la Resolución No. 3828 del 9 de septiembre de 2019. En el río Gaira, se ha autorizado un caudal de 380 l/s en temporada seca y de 650 l/s durante el resto del año, de acuerdo con la Resolución No. 1311 del 3 de agosto de 2020. En cuanto al río Piedras, el

[6] https://sui.superservicios.gov.co/Servicios-Informativos/Empresas-prestadoras

caudal concesionado es de 435 l/s en invierno y de 210 l/s en verano, conforme a la Resolución No. 3292 del 25 de julio de 2022.

El sistema de acueducto presta servicio a 118.598 suscriptores[7] y consta de 2 plantas de potabilización, 4 fuentes de abastecimiento y 24 tanques de almacenamiento (Superservicios y Camacol, 2022). Además de las tres fuentes de abastecimiento de agua superficial, ESSMAR E.S.P. cuenta con una fuente de abastecimiento subterránea, que corresponden a 52 pozos profundos en funcionamiento para reforzar la disponibilidad hídrica, de los cuales 7 poseen concesiones vigentes (Superservicios y Camacol, 2022).

Por su parte, la empresa Operadores de Servicios de La Sierra S.A.S. E.S.P. abastece los acueductos de los municipios de Ciénaga y Pueblo Viejo, de acuerdo con lo establecido en la concesión de aguas superficiales otorgada en el río Córdoba mediante Resolución No. 2945 del 03 de agosto de 2018, con un caudal concesionado de 553 l/s. El sistema de acueducto presta servicio a 19.257 suscriptores[7]. La captación de agua en el río Córdoba se efectúa a través de un dique que embalsa el río y una bocatoma lateral situada en su costado izquierdo (Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios, 2019).

En cuanto a la Junta Administradora Acueducto Corregimiento De Bonda es una organización autorizada que presta el servicio de acueducto en el área rural del municipio de Santa Marta[8]. Sin embargo, no se dispone de información sobre los suscriptores del sistema de acueducto de esta junta en el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI).

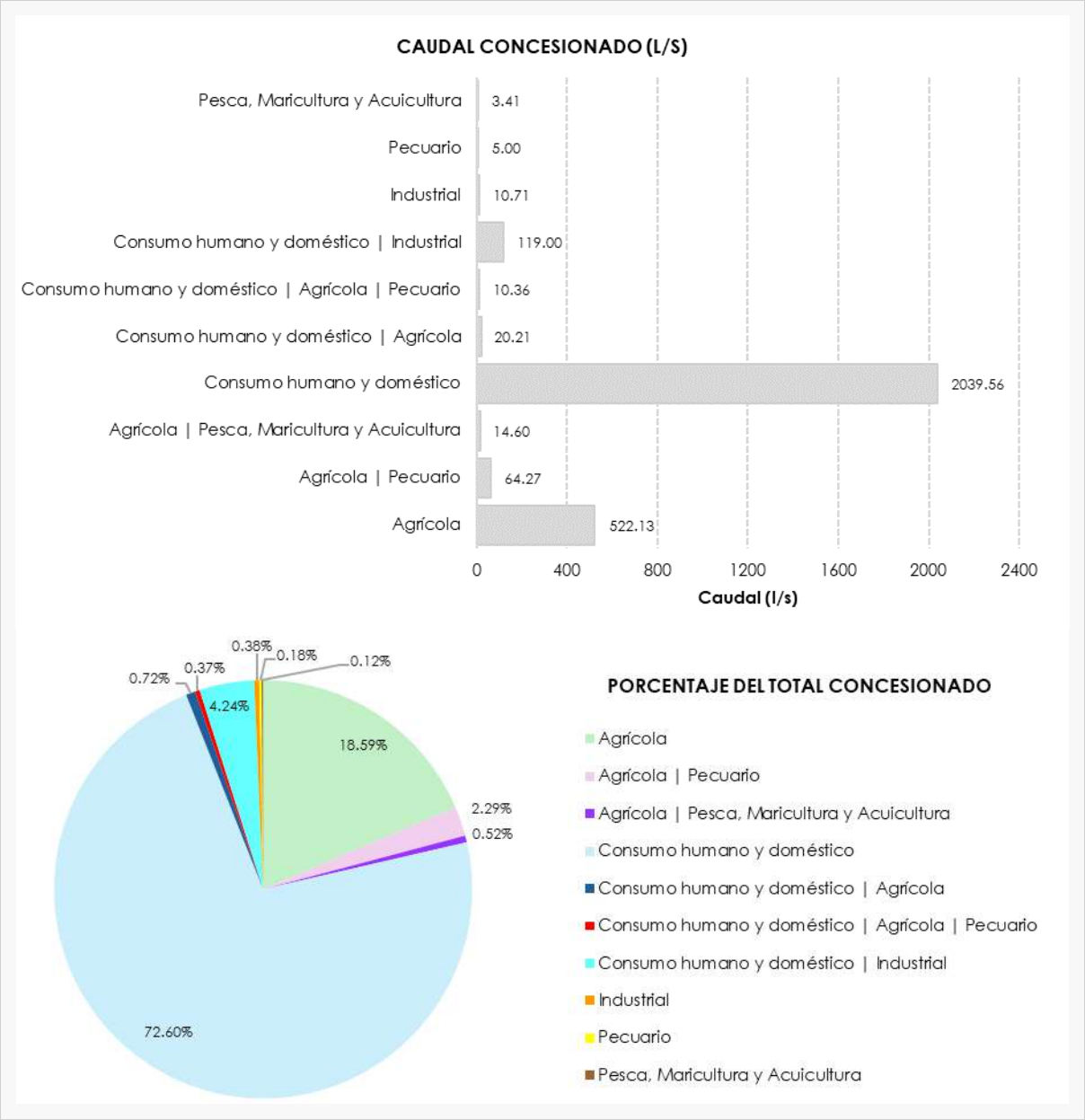
Según el inventario de las concesiones de aguas superficiales en la SZH 1501, el uso predominante es el consumo humano y doméstico, que representa el 72,6% del caudal concesionado, que en su mayoría corresponde al caudal concesionado a las empresas prestadoras del servicio de acueducto. Le sigue el uso agrícola, con el 18,59% del caudal total. Además, el 4,24% del caudal está destinado a uso industrial, junto con consumo humano y doméstico, y el 2,29% se asigna a uso agrícola y pecuario. La Figura 60 ilustra la distribución porcentual y el caudal total concesionado según los diferentes usos del agua en la SZH 1501.

En la Tabla 24 se presenta el inventario de las concesiones de agua superficial, la resolución, el caudal concesionado, vigencia y las coordenadas.

[7] Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado (2022), Anexo 3. Suscriptores del Servicio de acueducto. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Anexo-informe-sectorial-AA-2022.xlsx

[8] Estudio sectorial de los servicios públicos domiciliarios de Acueducto y Alcantarillado (2022), Anexo 1. Prestadores Activos. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/Anexo-informe-sectorial-AA-2022.xlsx

**Figura 60 Caudal concesionado por tipo de uso del agua en la SZH 1501.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 24 Concesiones de agua superficial en la SZH 1501.**

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 2361 | 10/11/2011 | Inversiones Jardines de Jerusalén S.A.S. | Río Manzanares | 6,5 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4877754,453 | 2800005,834 |
| 1177 | 13/06/2012 | María Danies Silva | Quebrada La Tigrera | 1,5 | Agrícola | 5 | 4868626,363 | 2798919,811 |
| 2499 | 21/12/2012 | A&L Dávila S.C.A. | Quebrada Donama | 10,36 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola \| Pecuario | 5 | 4878075,539 | 2799940,125 |
| 1177 | 18/06/2013 | Constructora Bolívar S.A. | Quebrada La Tigrera | 1 | Industrial | 1 | 4872944,878 | 2796604,511 |
| 23 | 13/01/2014 | Hernán Enrique Carrillo Pacheco | Río Gaira | 0,5 | Consumo humano y doméstico | 1 | 4870751,211 | 2793399,889 |
| 888 | 14/04/2014 | Alcaldía Distrital de Santa Marta | Río Toribio | 20,88 | Consumo humano y doméstico | 0,5 | 4870250,456 | 2777883,312 |
| 1963 | 29/07/2014 | C.I. Compras Americas S.A.S. y Victoria Cecilia Bernier Feliciano | Río Gaira | 1 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4878242,552 | 2789665,832 |
| 2282 | 29/08/2014 | Martha Elena Lacouture | Río Gaira | 24,42 | Agrícola \| Pecuario | 5 | 4868317,392 | 2794019,921 |
| 2042 | 28/07/2015 | Servicio Nacional de Aprendizaje (SENA) | Acequia Bureche | 30,35 | Agrícola \| Pecuario | 10 | 4870785,689 | 2793377,641 |
| 2961 | 14/10/2015 | Mirna Ferrer Ornes | Quebrada Santa Teresa | 4 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola | 5 | 4891132,359 | 2804637,381 |
| 468 | 4/03/2016 | Portuaria Regional de Santa Marta S.A. | Mar Caribe | 17,36 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4866854,286 | 2801533,402 |
| 3342 | 29/12/2016 | CI Andiminerals S.A.S. | Río Córdoba | 5 | Industrial | | 4869059,487 | 2776679,067 |
| 2208 | 8/08/2017 | Universidad Cooperativa de Colombia Sede Santa Marta | Río Piedras | 1 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4891602,692 | 2804270,369 |

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 2863 | 25/09/2017 | Asociación de Usuarios Canal Río Córdoba - ASUCORC | Río Córdoba | 250,9 | Agrícola | 10 | 4867903,315 | 2777351,937 |
| 2591 | 3/07/2018 | Agropecuaria Frigorífico Rodeo LTDA | Quebrada Vira Vira | 7 | Agrícola \| Pecuario | 5 | 4883453,64 | 2799360,029 |
| 2901 | 3/08/2018 | Diego José Romero Rivero | Quebrada La Nube | 2,5 | Agrícola \| Pecuario | 5 | 4880691,297 | 2793787,506 |
| 2945 | 3/08/2018 | Operadores de Servicios de la Sierra S.A.E.S.P. | Río Córdoba | 553 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4870497,532 | 2776156,827 |
| 3831 | 21/09/2018 | Drummond LTD | Río Toribio | 76 | Consumo humano y doméstico \| Industrial | 5 | 4867308,921 | 2780910,727 |
| 4746 | 14/11/2018 | Luz Marina Cabas de Labarces | Quebrada El Jabalí | 20 | Consumo humano y doméstico \| Industrial | 5 | 4881891,134 | 2786498,647 |
| 5394 | 18/12/2018 | Portuaria del Río Córdoba S.A. | Río Córdoba | 23 | Consumo humano y doméstico \| Industrial | 5 | 4865063,077 | 2777919,371 |
| 5438 | 28/12/2018 | Promotora DGC S.A.S. | Quebrada El Recuerdo | 0,31 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4878651,795 | 2787201,528 |
| 949 | 26/03/2019 | Eco-Bio Colombia S.A.S. | Manantial | 2,1 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola | 5 | 4886230,56 | 2796392,34 |
| 1259 | 8/04/2019 | Juan Miguel De Vengoechea y CIA S En CS | Río Córdoba | 34 | Agrícola | 5 | 4867926,985 | 2777278,755 |
| 3129 | 25/07/2019 | Pharmacol Cannabis S.A.S. | Río Piedras | 1,33 | Agrícola | 5 | 4895737,661 | 2804422,123 |
| 3828 | 9/09/2019 | ESSMAR E.S.P. | Río Manzanares | 330 | Consumo humano y doméstico | 10 | 4880073,958 | 2796551,042 |
| 603 | 2/03/2020 | La Granja El Oasis de la Sierra | Río Córdoba | 14,6 | Agrícola \| Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4868899,055 | 2776767,844 |

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 896 | 4/05/2020 | Cervecería Nevada S.A.S. | Quebrada Victoria | 0,15 | Industrial | 5 | 4880629,529 | 2786745,547 |
| 1311 | 3/08/2020 | ESSMAR E.S.P. | Río Gaira | 380 l/s en temporada seca y 650 l/s el resto del año | Consumo humano y doméstico | 10 | 4872038,764 | 2791971,722 |
| 1378 | 18/08/2020 | Costera Progestur LTDA y CIA S En C | Río Toribio | 7 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola | 5 | 4869411,552 | 2778007,953 |
| 1669 | 21/09/2020 | Juan Miguel de Vengoechea y CIA. S. En C.S. | Río Córdoba | 14 | Agrícola | 3 | 4868990,97 | 2776766,246 |
| 2693 | 30/11/2020 | Maria Danies Silva | Quebrada La Tigrera | 1,5 | Agrícola | 5 | 4876323,378 | 2791900,982 |
| 4356 | 14/10/2021 | Gloria Carmona Ospina | Río Piedras | 5 | Pecuario | 5 | 4891568,695 | 2804076,723 |
| 4599 | 26/10/2021 | Agropecuaria e Inversiones Cotes Habeysh S. En C. | Río Córdoba | 7,2 | Agrícola | 5 | 4865059,539 | 2777870,865 |
| 4589 | 26/10/2021 | Inversiones Fernath S.A.S. | Río Gaira | 0,38 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4877713,209 | 2789216,421 |
| 1669 | 9/05/2022 | Cincinnati Coffe Company S.A.S. | Quebrada Malabrigo | 1,1 | Agrícola | 5 | 4882218,375 | 2784747,133 |
| 2066 | 25/05/2022 | Santa Cruz de Papare S.A.S. | Río Toribio | 87,5 | Agrícola | 5 | 4867664,804 | 2778385,022 |
| | | | | 68,1 | Agrícola | 5 | 4866875,955 | 2778357,518 |
| 2129 | 31/05/2022 | Mateo Restrepo Builes | Río Gaira | 4,56 | Industrial | 5 | 4876596,924 | 2789130,07 |
| 3053 | 11/07/2022 | Hotel Irotama S.A.S. | Mar Caribe | 3 | Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4866093,576 | 2790280,416 |
| 3292 | 25/07/2022 | ESSMAR E.S.P. | Río Piedras | 435 l/s invierno y 210 l/s verano | Consumo humano y doméstico | 5 | 4886923,275 | 2796986,232 |

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 4158 | 26/08/2022 | Consorcio Constructor Santa Marina | Río Toribio | 15 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4868686,103 | 2778130,932 |
| 4222 | 29/08/2022 | Ecobio Colombia S.A.S. | Manantial | 1,6 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola | 5 | 4881734,355 | 2785086,674 |
| 2121 | 15/05/2023 | Ecobio Colombia S.A.S. | Manantial | 5,23 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola | 5 | 4885893,973 | 2793463,752 |
| 2122 | 15/05/2023 | Ecobio Colombia S.A.S. | Manantial | 25 | Agrícola | 5 | 4886003,496 | 2791937,831 |
| 2377 | 26/05/2023 | Victoria Bernier Feliciano | Río Gaira | 0,28 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola | 5 | 4878235,693 | 2789696,565 |
| 2619 | 5/06/2023 | Asociación de Usuarios de Minca - ASUAMIN | Río Gaira | 7,59 | Consumo humano y doméstico | 10 | 4880005,487 | 2788570,657 |
| 4494 | 17/08/2023 | Inversiones MFJP S.A.S. | Quebrada La India | 0,13 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4887418,047 | 2799755,206 |
| 5643 | 4/10/2023 | Antonio José Riascos Torres | Río Córdoba | 30 | Agrícola | 5 | 4867903,315 | 2777351,937 |
| 5730 | 9/10/2023 | Reserva Natural Tierra Adentro | Quebrada Marinka | 0,5 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4877954,903 | 2786560,813 |
| 6328 | 8/11/2023 | Carlos Rueda Vesga | Quebrada Santa Teresa | 0,41 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4891352,351 | 2805166,02 |
| 6421 | 14/11/2023 | Universidad del Magdalena | Mar Caribe | 0,41 | Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4870060,955 | 2803184,968 |

*Fuente: Elaboración propia*

- Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01)

A partir de la información de las concesiones de agua superficial de CORPAMAG se realiza el inventario de los usos actuales y la cuantificación del caudal total concesionado para la cuenca objeto de aprovechamiento del Complejo Humedales Ciénaga Grande de Santa Marta (NSS 2906-01). En la Figura 59 se presenta la ubicación de las concesiones de agua registradas en la NSS 2906-01. Gran parte de las concesiones de agua superficial se sitúan en las cuencas de tercer nivel subsiguiente que limitan con el río Magdalena.

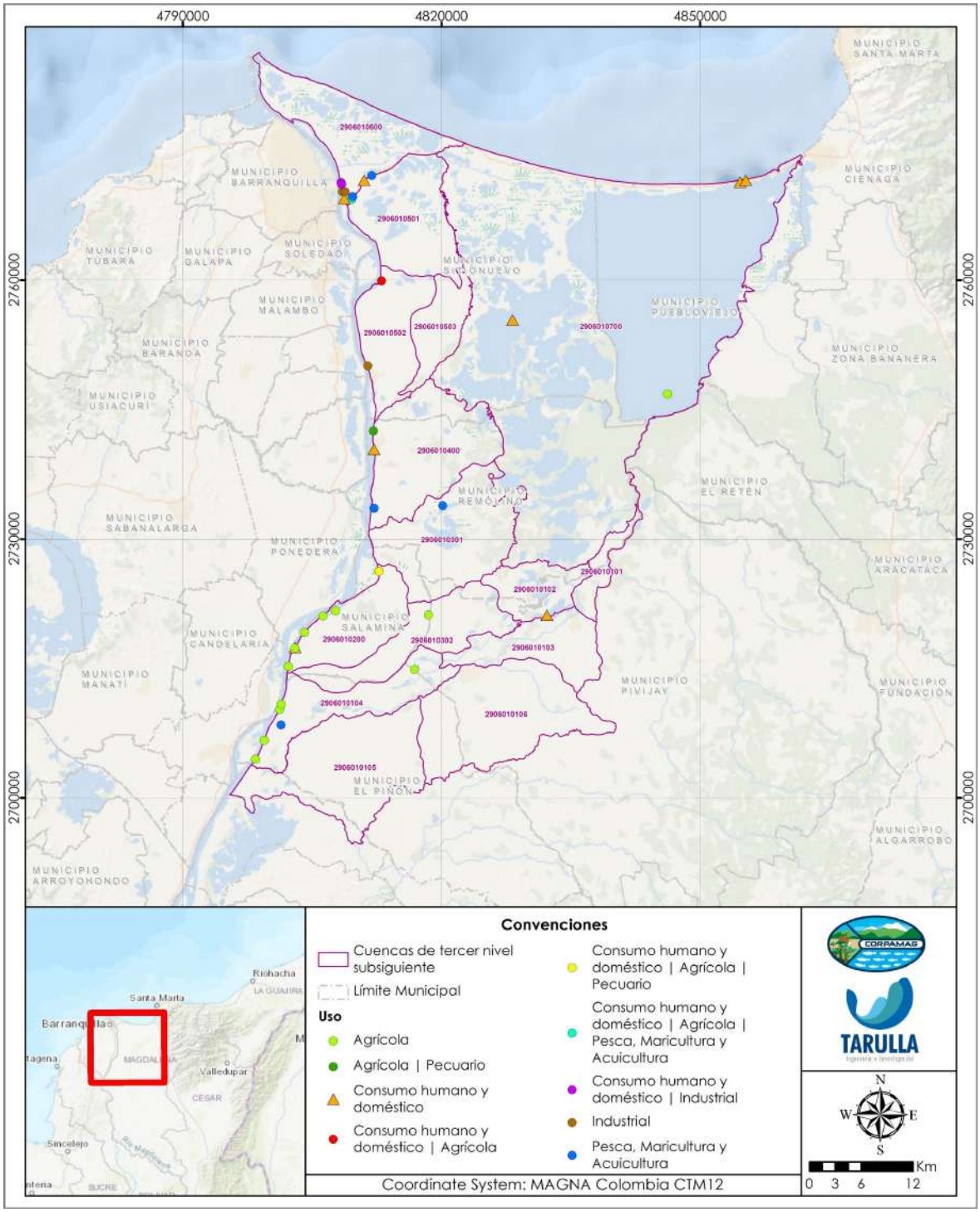
En la NSS 2906-01 se han emitido un total de 35 resoluciones que autorizan la captación de agua superficial con un caudal total concesionado de 3.390,94 l/s (ver Tabla 25). En el río Magdalena a través de 24 resoluciones se ha concesionado 3.210,14 l/s que corresponde a aproximadamente el 95% del caudal total concesionado, seguido del caño Condazo con un caudal concesionado de 100 l/s en 1 resolución.

**Tabla 25 Caudal concesionado por fuente y número de resoluciones – NSS 2906-01.**

| Fuente | Caudal concesionado (l/s) | Cantidad de resoluciones |
|---|---|---|
| Canal Uvito | 70% | 1 |
| Caño El Clarín | 4,03 | 3 |
| Caño Condazo | 100 | 1 |
| Caño La Concepción | 13,7 | 1 |
| Caño Martinica | 1,8 | 1 |
| Ciénaga de Bolaños | 49 | 1 |
| Ciénaga Grande de Santa Marta | 12,27 | 3 |
| Río Magdalena | 3.210,14 | 24 |
| **Total** | **3.390,94** | **35** |

*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 61 Usos y usuarios en la NSS 2906-01.**




*Fuente: Elaboración propia*

Las captaciones autorizadas se presentan para 34 usuarios, entre los cuales se encuentran: el Acueducto de los Corregimientos de Tasajera y Palmira, el Acueducto Rural del Corregimiento de Media Luna, EMPORIO E.S.P., el Acueducto del Corregimiento de Palermo, Trupillo S.A.S., Kryptos Ingeniería Integral S.A.S., Camaguey S.A., entre otros. A continuación, se listan los 34 usuarios presentes en la cuenca objeto de aprovechamiento.

1. ABE & CIA S.C.A.
2. Acueducto de los corregimientos de Tasajera y Palmira
3. Acueducto Rural del Corregimiento de Media Luna
4. Agroindustrial Palmaceite LTDA
5. Agropecuaria Genezareth S.A.S.
6. Agropecuaria La Codicia S.A.S.
7. Alcaldía del municipio de Remolino
8. C.J.S. Internacional S.A.S.
9. Camaguey S.A.
10. Centro de Desarrollo Integral Mana y/o Iglesia Concilio Evangélico Boston
11. Complejo Industrial y comercial Retramar S.A.S. - Petrocomercial
12. Consorcio Ribera Este
13. Diana Corporación S.A.S. - DISCORP
14. Empresa de Servicios Públicos del Rio E.S.P (EMPORIO E.S.P)
15. Etanoles del Magdalena Puerto Palermo - ETALMAG ZF S.A.S.
16. Ganadería Alemana Colombiana - GANALCO S.A.S.
17. Gobernación del Magdalena
18. Ingavama S.A.S.
19. Inversiones Daza y Martínez del Caribe S.A.S.
20. Inversiones Palmicultores del Caribe S.A.S.
21. Inversiones Pego y CIA. S. C. A.
22. Jose A. Caballero y CIA S. En C.
23. Junta de Acción Comunal del barrio Villa Clarín
24. Kryptos Ingeniería Integral S.A.S.
25. Municipio de Sitio Nuevo - Acueducto del corregimiento de Palermo
26. Palermo Usuario Operador de Zona Franca S.A.S.
27. Ruta del Sol II S.A.
28. Silvana Orozco García
29. Tilapia Roja De El Piñón 1 S.A.S.
30. Trupillo S.A.S.
31. Viviana Parada Cervantes
32. William Farud Ganem Wiencke
33. Yasser Quintero Carrascal
34. Zoocriadero Zoosel S.A.S.

En los municipios en los que se ubica la cuenca NSS 2906-01 se reportan siete empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto, como se indica en la Tabla 23. Esta información ha sido generada por el Sistema Único de Información de Servicios Públicos Domiciliarios (SUI)[9], que es administrado por la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios.

**Tabla 26 Empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto – NSS 2906-01.**

| ID Empresa | Fecha Ultima Actualización RUPS | Clasificación | Razón Social | Fecha de inicio de Operaciones | Estado del prestador | Municipio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 20317 | 2019-12-18 | Hasta 2500 suscriptores | Unidad Administrativa Especial De Servicios Públicos Del Municipio De Sitionuevo - UNIADESPSERPUSIT | 2013-02-08 | Operativa | Sitionuevo |

[9] https://sui.superservicios.gov.co/Servicios-Informativos/Empresas-prestadoras

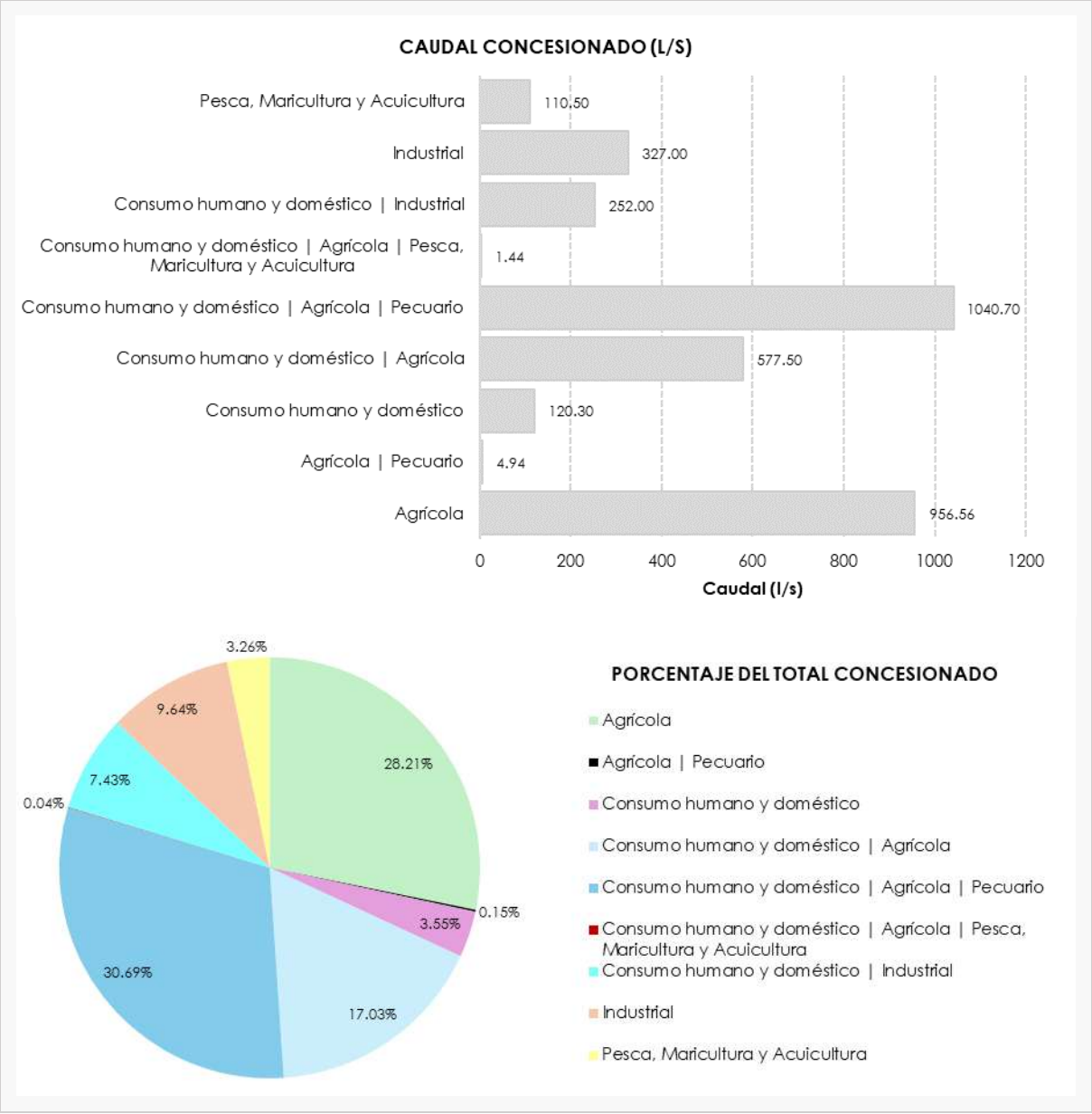
| ID Empresa | Fecha Ultima Actualización RUPS | Clasificación | Razón Social | Fecha de inicio de Operaciones | Estado del prestador | Municipio |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 39475 | 2023-04-19 | Mas de 2500 suscriptores | Administración Pública Cooperativa De Servicios Públicos De Pueblovieljo Limitada - SERVIPUEBLO APC LTDA | 2017-12-29 | Operativa | Pueblovieljo |
| 21819 | 2023-04-12 | Mas de 2500 suscriptores | Administración Pública Cooperativa Empresa De Servicios Públicos Del Rio E.S.P. - EMPORIO E S P | 2007-07-02 | Operativa | Salamina |
| 20296 | 2023-10-14 | Hasta 2500 suscriptores | Municipio De Remolino - UTSER | 2013-01-01 | Operativa | Remolino |
| 20118 | 2009-08-27 | Hasta 2500 suscriptores | Alcaldía Del Municipio De Pueblovieljo | 1985-01-01 | Operativa | Pueblovieljo |
| 25540 | 2014-09-09 | Hasta 2500 suscriptores | Cooperativa De Gestores Ambientales De Tasajera - COOPGEATAS | 2011-01-01 | Operativa | Pueblovieljo |
| 25528 | 2011-12-30 | Hasta 2500 suscriptores | Cooperativa Aguas De Remolino LTDA E.S.P. - COAGUAR | 2011-05-02 | Operativa | Remolino |

*Fuente: SUI, 2024*

De las empresas prestadoras del servicio público domiciliario de acueducto reportadas en el SUI, se relacionan dos en el inventario de las concesiones de aguas superficiales otorgadas por CORPAMAG, Empresa de Servicios Públicos del Rio E.S.P (EMPORIO E.S.P) y Alcaldía del municipio de Remolino.

Según el inventario de las concesiones de aguas superficiales en la NSS 2906-01, el uso predominante es el destinado a consumo humano y doméstico, agrícola y pecuario, que representa el 30,69% del caudal concesionado. Le sigue el uso agrícola, con el 28,21% del caudal total. Además, el 17,03% del caudal está destinado a uso agrícola, junto con consumo humano y doméstico. El agua de uso agrícola se destina principalmente para el riego de cultivos como: arroz, pasto, caña, palma africana, palma de aceite, maíz, entre otros. La Figura 60 ilustra la distribución porcentual y el caudal total concesionado según los diferentes usos del agua en la NSS 2906-01. En la Tabla 24 se presenta el inventario de las concesiones de agua superficial, la resolución, el caudal concesionado, vigencia y las coordenadas.

**Figura 62 Caudal concesionado por tipo de uso del agua en la NSS 2906-01.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 27 Concesiones de agua superficial en la NSS 2906-01.**

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 696 | 26/04/2011 | Complejo Industrial y comercial Retramar S.A.S. - Petrocomercial | Río Grande de la Magdalena | 300 | Industrial | 5 | 4808863,597 | 2770185,219 |
| 938 | 11/05/2012 | Acueducto de los corregimientos de Tasajera y Palmira | Ciénaga Grande de Santa Marta | 11,57 | Consumo humano y doméstico | 2 | 4855318,003 | 2771564,471 |
| 2612 | 5/11/2013 | Empresa de Servicios Públicos del Rio E.S.P (EMPORIO E.S.P) | Río Magdalena | 17 | Consumo humano y doméstico | 15 | 4803074,126 | 2717388,105 |
| 423 | 27/02/2014 | Inversiones Pego y CIA. S. C. A. | Ciénaga de Bolaños - Río Magdalena | 49 | Agrícola | 5 | 4816878,960 | 2714850,499 |
| 425 | 27/02/2014 | Tilapia Roja De El Piñón 1 S.A.S. | Río Magdalena | 2 | Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4801400,998 | 2708417,917 |
| 840 | 8/04/2014 | Centro de Desarrollo Integral Mana y/o Iglesia Concilio Evangélico Boston | Ciénaga Grande de Santa Marta | 0,6 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4854662,123 | 2771323,539 |
| 842 | 8/04/2014 | Yasser Quintero Carrascal | Caño Clarín Nuevo - Río Magdalena | 1,44 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola \| Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4809563,921 | 2769328,299 |
| 3195 | 24/11/2014 | Junta de Acción Comunal del barrio Villa Clarín | Caño Clarín Nuevo | 2,5 | Pesca, Maricultura y Acuicultura | 10 | 4809718,176 | 2769654,838 |
| 445 | 2/03/2015 | Zoocriadero Zoosel S.A.S. | Río Magdalena | 5 | Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4812194,394 | 2733532,412 |
| 2217 | 13/08/2015 | Consorcio Ribera Este | Río Magdalena | 2 | Industrial | 3 | 4811466,449 | 2750049,525 |

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 1574 | 1/07/2016 | Camaguey S.A. | Río Magdalena | 520,3 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola \| Pecuario | 5 | 4812740,327 | 2726281,947 |
| 2912 | 17/11/2016 | Gobernación del Magdalena | Ciénaga Grande de Santa Marta | 0,1 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4828250,824 | 2755373,485 |
| 892 | 8/04/2017 | Palermo Usuario Operador de Zona Franca S.A.S. | Río Magdalena | 202 | Consumo humano y doméstico \| Industrial | 5 | 4808380,377 | 2771287,485 |
| 2547 | 30/08/2017 | Trupillo S.A.S. | Río Magdalena | 577,5 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola | 5 | 4813064,781 | 2759901,045 |
| 3400 | 23/10/2017 | Municipio de Sitio Nuevo | Río Magdalena | 52,24 | Consumo humano y doméstico | 10 | 4808752,678 | 2769443,887 |
| 3124 | 13/08/2018 | Ruta del Sol II S.A. | Caño Clarín | 0,09 | Consumo humano y doméstico | 5 | 4811058,181 | 2771554,258 |
| 1142 | 1/04/2019 | Etanoles del Magdalena Puerto Palermo - ETALMAG ZF S.A.S. | Río Magdalena | 25 | Industrial | 5 | 4808511,258 | 2770257,425 |
| 2932 | 15/07/2019 | Acueducto Rural del Corregimiento de Media Luna | Caño La Concepción | 13,7 | Consumo humano y doméstico | 10 | 4832246,540 | 2721139,321 |
| 985 | 9/06/2020 | Viviana Parada Cervantes | Río Magdalena | 80 | Agrícola | 5 | 4801252,320 | 2710212,829 |
| 1192 | 16/07/2020 | Ganadería Alemana Colombiana - GANALCO S.A.S. | Río Magdalena | 123,26 | Agrícola | 5 | 4799456,793 | 2706630,281 |
| 1194 | 16/07/2020 | Ganadería Alemana Colombiana - GANALCO S.A.S. | Río Magdalena | 128,6 | Agrícola | 5 | 4798438,793 | 2704446,393 |

*Condiciones actuales de riesgos por desabastecimiento de agua y contaminación hídrica*

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 1195 | 16/07/2020 | Ingavama S.A.S. | Río Magdalena | 50 | Agrícola | 5 | 4802286,668 | 2715197,341 |
| 1193 | 16/07/2020 | José A. Caballero y CIA S. En C. | Río Magdalena | 97 | Agrícola | 5 | 4801439,186 | 2710826,080 |
| 1439 | 26/08/2020 | C.J.S. Internacional S.A.S. | Río Magdalena | 17,3 | Agrícola | 5 | 4803016,017 | 2717327,006 |
| 104 | 14/01/2021 | William Farud Ganem Wiencke | Río Magdalena | 4,94 | Agrícola \| Pecuario | 5 | 4812123,912 | 2742500,347 |
| 476 | 24/02/2021 | ABE & CIA S.C.A. | Río Magdalena | 202 | Agrícola | 5 | 4804131,693 | 2719143,624 |
| 1485 | 14/05/2021 | Agroindustrial Palmaceite LTDA | Canal Uvito | 70% | Agrícola | 5 | 4846237,750 | 2746776,673 |
| 5851 | 28/12/2021 | Kryptos Ingeniería Integral S.A.S. | Río Magdalena | 520,4 | Consumo humano y doméstico \| Agrícola \| Pecuario | 5 | 4812776,910 | 2726247,345 |
| 453 | 16/02/2022 | Agropecuaria La Codicia S.A.S. | Río Magdalena | 99 | Agrícola | 5 | 4806268,488 | 2721052,771 |
| 1424 | 20/04/2023 | Alcaldía del municipio de Remolino | Río Magdalena | 25 | Consumo humano y doméstico | 10 | 4812198,875 | 2740362,164 |
| 5260 | 20/09/2023 | Silvana Orozco García | Caño Martinica | 1,8 | Agrícola | 5 | 4818500,751 | 2721182,464 |
| 5789 | 10/10/2023 | Inversiones Palmicultores del Caribe S.A.S. | Río Magdalena | 108,6 | Agrícola | 5 | 4807730,313 | 2721664,999 |
| 7038 | 18/12/2023 | Inversiones Daza y Martínez del Caribe S.A.S. | Río Magdalena | 1 | Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4811927,178 | 2772100,004 |
| 7186 | 28/12/2023 | Agropecuaria Genezareth S.A.S. | Caño Condazo | 100 | Pesca, Maricultura y Acuicultura | 5 | 4820159,543 | 2733846,170 |

*Condiciones actuales de riesgos por desabastecimiento de agua y contaminación hídrica*

| Resolución | Fecha de Resolución | Usuario | Fuente | Caudal (l/s) | Uso | Vigencia (años) | Coordenadas origen nacional CTM12 | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | Este (m) | Norte (m) |
| 7151 | 28/12/2023 | Diana Corporación S.A.S. - DISCORP | Río Magdalena | 50 | Consumo humano y doméstico \| Industrial | 5 | 4808425,080 | 2771094,327 |

*Fuente: Elaboración propia*

### *5.2.1.2. Índice de Uso del Agua (IUA)*

El índice de Uso del Agua (IUA) corresponde a la cantidad de agua utilizada por los diferentes sectores usuarios, en un período determinado y unidad espacial de análisis (área, zona, subzona, etc.) en relación con la oferta hídrica superficial disponible para las mismas unidades temporales y espaciales (IDEAM, 2023a). El IUA se calcula a partir de la siguiente fórmula:

$$IUA_j = \frac{DHMN_j}{OHDS_j}\ 100$$

Donde,

$IUAj$ Índice de Uso del Agua en la unidad espacial de referencia j para condición hidrológica promedio o de año seco (%)

$DHMNj$ Demanda Hídrica Multisectorial Nacional en la unidad espacial de referencia j ($mm^3$/año)

$OHDSj$ Oferta Hídrica Disponible Superficial en la unidad espacial de referencia j para condición hidrológica promedio o de año seco ($mm^3$/año). En la OHDS el factor de reducción corresponde solamente al caudal ambiental.

Los resultados del indicador van en un rango de valores mayores a 0 y las categorías de interpretación de muy bajo a crítico de acuerdo con la Tabla 28.

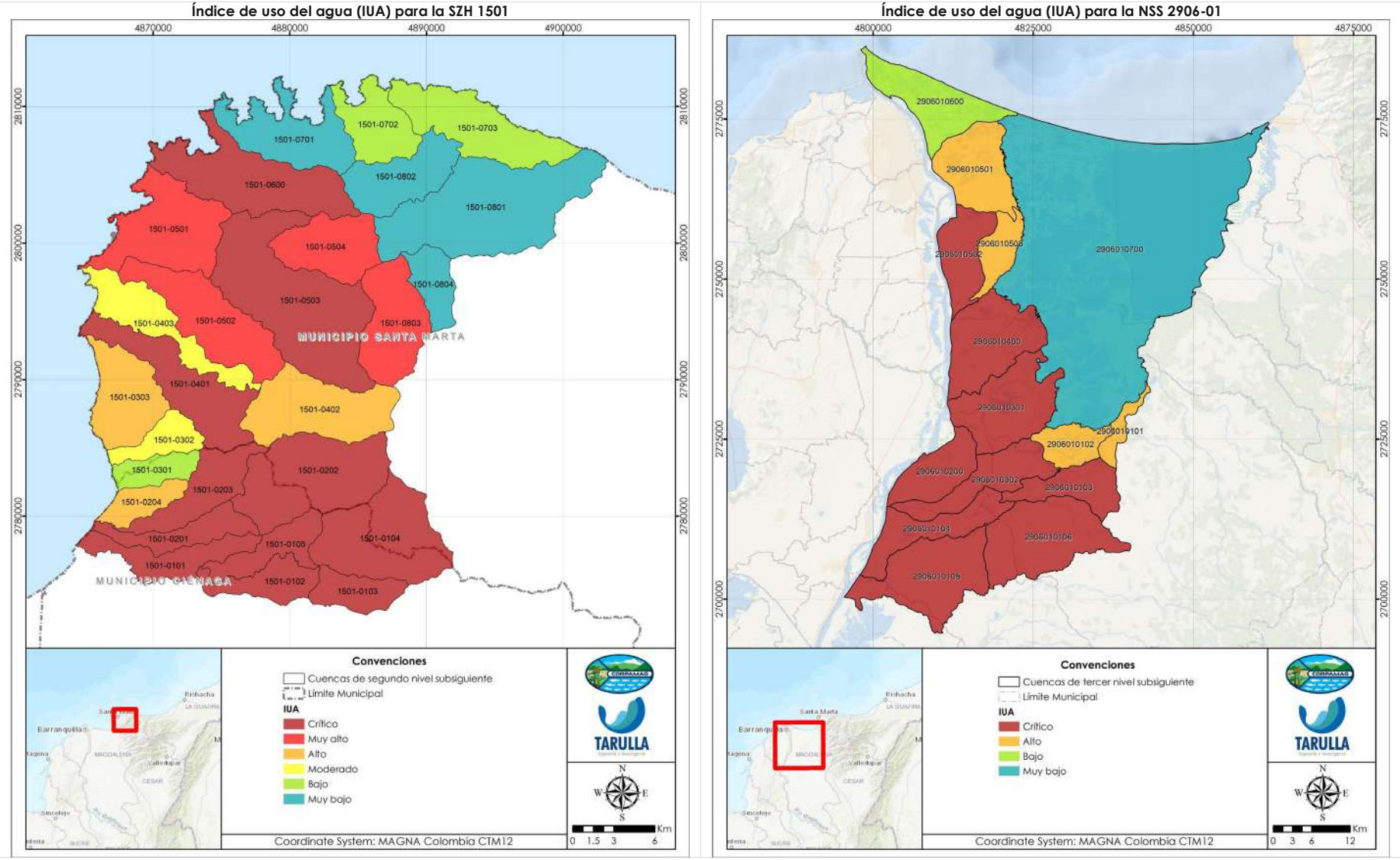
**Tabla 28 Categorías del índice de uso del agua.**

| Rango índice de Uso del Agua | Categoría | Interpretación Índice de Uso del Agua |
|---|---|---|
| > 100 | Crítico | La presión supera las condiciones de la oferta superficial disponible |
| 50,01 - 100 | Muy alto | La presión de la demanda es muy alta respecto a la oferta superficial disponible |
| 20,01 - 50 | Alto | La presión de la demanda es alta respecto a la oferta superficial disponible |
| 10,01 - 20 | Moderado | La presión de la demanda es moderada respecto a la oferta superficial disponible |
| 1,0 - 10 | Bajo | La presión de la demanda es baja respecto a la oferta superficial disponible |
| ≤ 1 | Muy bajo | La presión de la demanda no es significativa respecto a la oferta superficial disponible |

*Fuente: IDEAM (2023a)*

La clasificación del IUA para las áreas de estudio se muestra en la Figura 63, que muestra las áreas donde la presión supera las condiciones de la oferta hídrica superficial disponible hacia el sur y occidente de la NSS 2906-01, así como en la zona sur y centro de la SZH 1501.

**Figura 63 Índice de uso del agua (IUA)en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

### 5.2.1.3. Índice de retención y regulación hídrica (IRH)

El Índice de retención y de regulación evalúa la capacidad de la cuenca para mantener un régimen de caudales, producto de la interacción del sistema suelos vegetación con las condiciones climáticas y con las características físicas morfométricas de la cuenca. Este índice permite evaluar la capacidad de regulación del sistema en su conjunto.

El índice se calculó con base en la curva de duración de caudales medios mensuales, esta curva permite reconocer las condiciones de regulación de las cuencas y los valores característicos medios de caudales, e interpretar, en forma general, las características del régimen hidrológico de un río, y el comportamiento de la retención y la regulación de humedad en la cuenca. La expresión matemática de cálculo es la siguiente:

$$IRH = \frac{Vp}{Vt}$$

Donde:

$IRH$ es el índice de retención y regulación hídrica

$Vp$ corresponde al volumen representado por el área que se encuentra por debajo de la línea del caudal medio (Q 50%).

$Vt$ es el volumen total representado por el área total de la curva de duración de caudales.

Los valores obtenidos con la estimación del IRH se agrupan en rangos para facilitar las comparaciones. A cada rango se le asigna una calificación que corresponde a la descripción que se presenta en la Tabla 29.

**Tabla 29 Clasificación del IRH.**

| IRH | Clasificación | Descripción |
|---|---|---|
| >0,85 | Muy Alta | Muy alta retención y regulación de humedad |
| 0,74 – 0,85 | Alta | Alta retención y regulación de humedad |
| 0,65 – 0,74 | Moderada | Media retención y regulación de humedad |
| 0,50 – 0,65 | Baja | Baja retención y regulación de humedad |
| <0,50 | Muy Baja | Muy Baja retención y regulación de humedad |

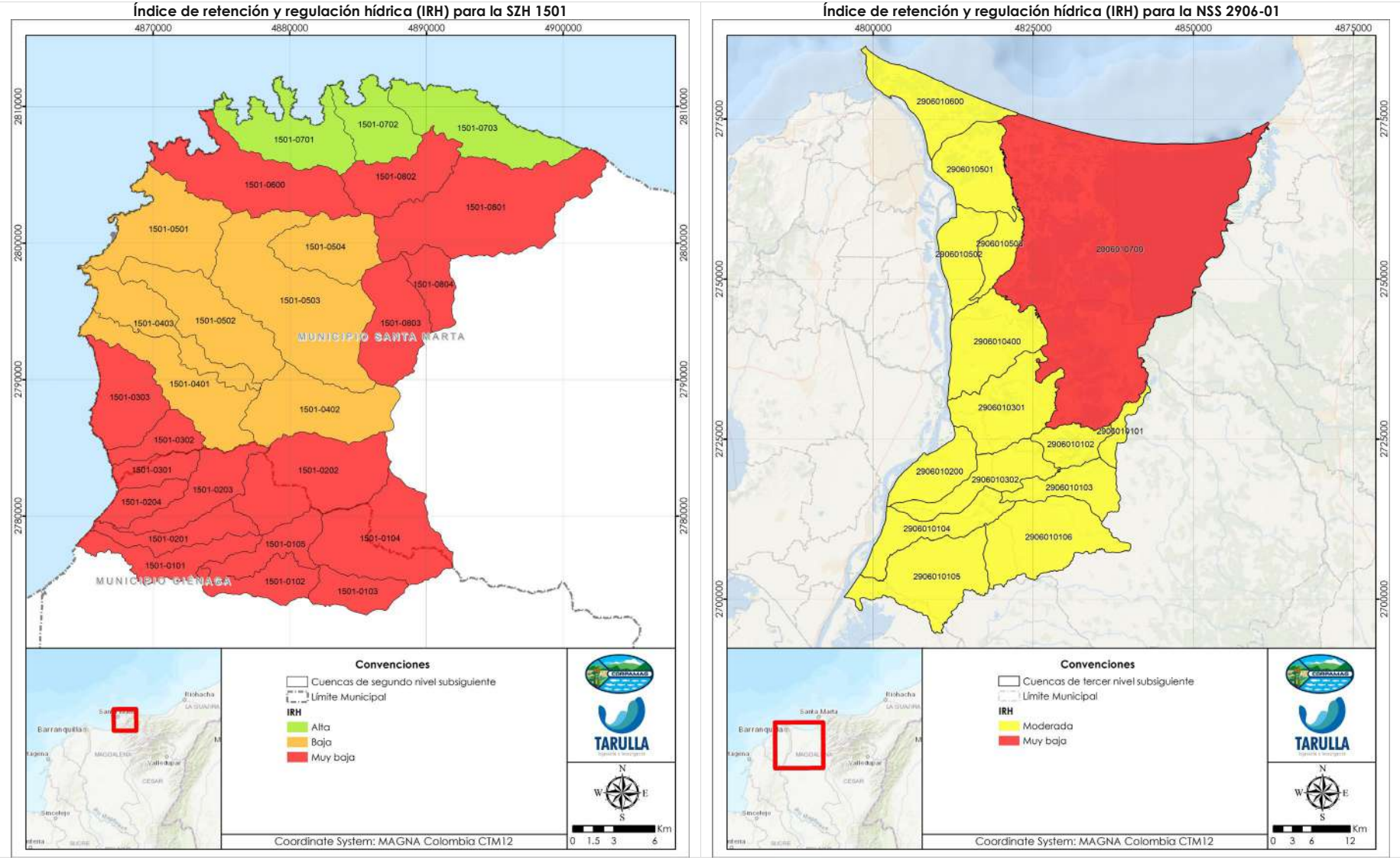
*Fuente: Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2019)*

En la Figura 64 se muestra la clasificación del IRH en las dos áreas de estudio. Se observa que para la SZH 1501, existe una variación significativa en la capacidad de retención y regulación hídrica. La región norte, que incluye las subcuencas 1501-0701 y 1501-0702, muestra un índice alto de retención y regulación hídrica, indicando una mayor capacidad para retener y regular el agua. Sin embargo, la mayoría del área, especialmente en el centro y sur, presenta una capacidad muy baja de retención hídrica.

En contraste, la NSS 2906-01 muestra una situación relativamente mejor. La mayoría de sus subcuencas presentan una capacidad moderada de retención y regulación hídrica, sugiriendo una gestión del agua más efectiva en comparación con la SZH 1501. No obstante, una sección significativa en el norte de esta zona tiene una capacidad muy baja de retención hídrica, similar a las áreas más críticas de la SZH 1501. Al igual que en la SZH 1501, estas áreas necesitarán medidas específicas para mejorar su capacidad de retención y regulación hídrica, como puede ser programas de reforestación y conservación del suelo.

En términos comparativos, la SZH 1501 tiene una mayor proporción de áreas con capacidad muy baja de retención hídrica en comparación con la NSS 2906-01. Esta última presenta una mayor extensión de áreas con capacidad moderada, lo que indica una mejor situación general en términos de gestión hídrica.

**Figura 64 Índice de retención y regulación hídrica (IRH) en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

#### 5.2.1.4. IVH

La clasificación del IVH en la SZH 1501 y NSS 2906-01 se presentan en la Figura 65 y Figura 66, respectivamente. Para la normalización de este indicador se utilizó un esquema de normalización lineal mediante la siguiente expresión (Juwana et al., 2012):

$$S_i = \frac{I_i - I_{min}}{I_{max} - I_{min}}$$

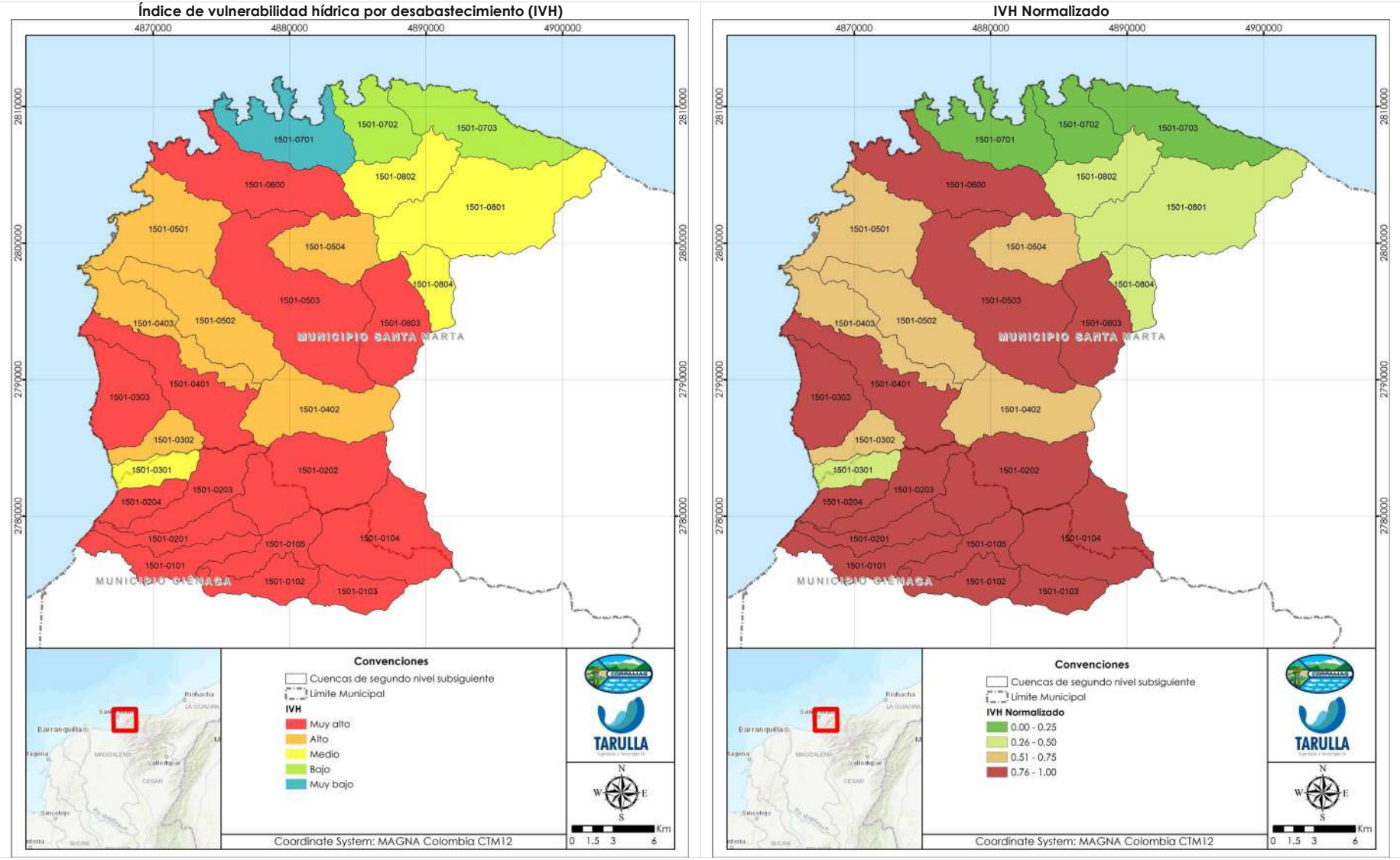
La Figura 65 y Figura 66 muestran el Índice de Vulnerabilidad Hídrica (IVH) por desabastecimiento para las zonas hidrográficas SZH 1501 y NSS 2906-01. Las áreas con vulnerabilidad muy alta y alta indican que estas zonas tienen una capacidad limitada para retener y gestionar el agua, lo que las hace más propensas a problemas de desabastecimiento hídrico. Las regiones con vulnerabilidad moderada pueden enfrentar algunos problemas de desabastecimiento, pero en menor medida que las áreas con vulnerabilidad alta y muy alta.

En la SZH 1501, se observa una distribución significativa de la vulnerabilidad hídrica. Las subcuencas en rojo, como 1501-0401, 1501-0501, 1501-0203 y 1501-0102, muestran una vulnerabilidad muy alta, indicando una capacidad extremadamente baja para satisfacer sus necesidades de agua. Las subcuencas en naranja, como 1501-0803 y 1501-0402, presentan una vulnerabilidad alta, mientras que las subcuencas en amarillo, como 1501-0802 y 1501-0503, tienen una vulnerabilidad moderada. Las subcuencas en verde, principalmente en el norte (1501-0701, 1501-0702 y 1501-0703), muestran una vulnerabilidad baja, indicando una mayor capacidad para satisfacer sus necesidades hídricas.

En la NSS 2906-01, la distribución del IVH también varía. Las subcuencas en rojo, como 2906010200 y 2906010301, presentan una vulnerabilidad muy alta, indicando una capacidad extremadamente baja para satisfacer sus necesidades de agua. Las subcuencas en naranja, como 2906010501, tienen una vulnerabilidad alta, y las subcuencas en amarillo, como 2906010700, muestran una vulnerabilidad moderada.

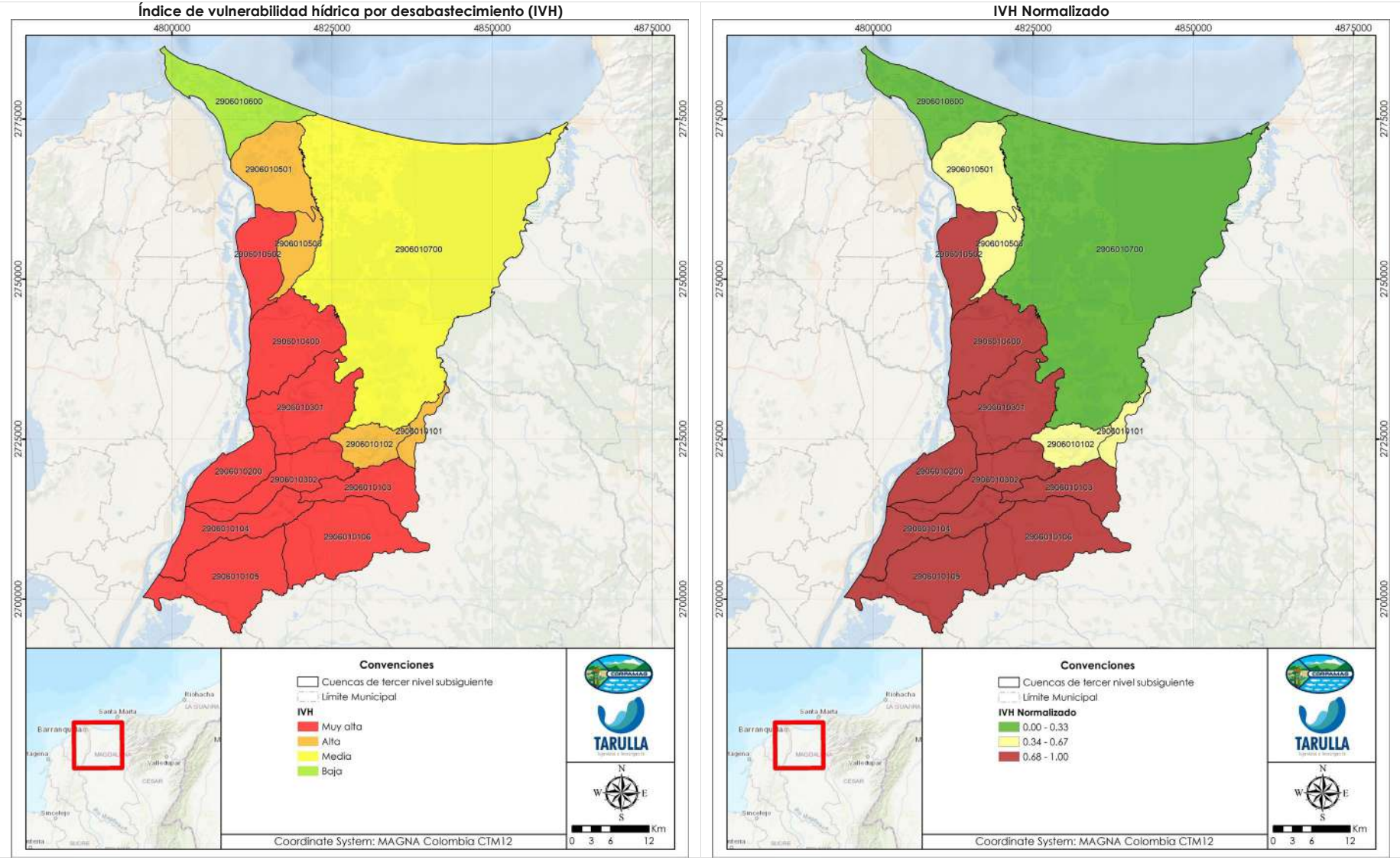
En ambos casos, el IVH resalta la necesidad urgente de implementar estrategias para reducir la vulnerabilidad hídrica. Estas estrategias pueden incluir la conservación y restauración de ecosistemas mediante reforestación y protección de cuencas, la construcción de infraestructura verde como reservorios y sistemas de captación de agua de lluvia, y la mejora de la gestión del agua a través de tecnologías de ahorro, tratamiento y reutilización de aguas residuales. Además, la educación y concienciación pública sobre el uso eficiente del agua, el desarrollo de políticas integradas de gestión hídrica y la regulación del uso del agua son esenciales para asegurar la sostenibilidad de los recursos hídricos en estas zonas.

**Figura 65 Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) en la SZH 1501.**




*Fuente: Elaboración propia*

**Figura 66 Índice de vulnerabilidad hídrica por desabastecimiento (IVH) en la NSS 2906-01.**




*Fuente: Elaboración propia*

### 5.2.2. Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC)

Los siguientes indicadores se utilizan para representar la vulnerabilidad económica: el producto interno bruto (PIB) per cápita (IVE1) y el nivel de competencia con la oferta humana (IVE2).

El uso del PIB per cápita tiene como objetivo caracterizar la exposición de las actividades económicas al riesgo de escasez de agua. Cuanto mayor sea el PIB per cápita de una región, mayor será el impacto en una situación de escasez de agua. Este indicador se calcula para cada municipio del área de estudio a partir de una ecuación lineal que normaliza el PIB per cápita. Posteriormente, este valor se asigna a cada una unidad siguiendo una proporción de área, entre el área de la unidad ($A_{unidad}$) y el área del municipio ($A_{Municipio}$):

$$PIB_{unidad} = \sum_{m=1}^{M} \frac{A_{unidad}}{A_{Municipio}} * PIB_{Municipio}$$

El indicador integrado final para el área de estudio se calcula utilizando el promedio ponderado del PIB de cada municipio.

Para ajustar esta ecuación, el PIB per cápita promedio del país se asocia con una vulnerabilidad igual a 0,5, y el de la ciudad con mayor PIB per cápita del país se asocia con una vulnerabilidad de 1 (ver Tabla 30).

**Tabla 30 Determinación de indicador de vulnerabilidad económica - IVE1.**

| PIB per cápita | Indicador de vulnerabilidad económica: IVE1 (0–1) | PIB per cápita - Colombia | Ecuación ajustada |
|---|---|---|---|
| Ciudad con mayor PIB per cápita | 1 | 0,54264859 | $IVE_1 = c \times PIB\ per\ cápita + d$, donde c y d son los parámetros ajustados de la ecuación del $IVE_1$. |
| PIB per cápita promedio del país | 0,5 | 0,022691608 | |

*Fuente: Thomaz et al., (2023) y DANE, Valor Agregado por municipio - Serie 2022p*

Ahora bien, cuando se produce escasez de agua, se prioriza el uso del agua para consumo humano y abrevadero de animales. Por lo tanto, cualquier otro tipo de uso del agua puede verse afectado en primer lugar en casos de escasez de agua. El segundo indicador de vulnerabilidad económica (IVE2) es el nivel de competencia por el uso general del suministro humano de agua. Este indicador se construye con el propósito de caracterizar los impactos sobre las actividades industriales ubicadas en cuencas donde se utiliza agua para abastecimiento humano. Por lo tanto, en una cuenca donde hay extracciones de agua tanto industriales como humanas, cuantos menores sean los flujos extraídos para el suministro industrial en comparación con los extraídos para el suministro humano, mayor será la vulnerabilidad. IVE2 se expresa mediante la siguiente ecuación:

$$IVE_2 = \left(1 - \frac{Q_i - Q_a}{Q_{cap}}\right)$$

Donde Qi es el caudal abstraído por el sector industrial ($m^3/s$); Qa es el flujo abstraído por el sector de suministro humano ($m^3/s$); y Qcap es el caudal total abstraído ($m^3/s$).

$$IVE_2 = 1, \qquad donde \left(1 - \frac{Q_i - Q_a}{Q_{cap}}\right) > 1$$

La Tabla 31 y Tabla 32 presenta los resultados de la vulnerabilidad económica dada por el producto interno bruto (PIB) per cápita (IVE1) y el nivel de competencia con la oferta humana (IVE2), para la NSS 2906-01 y SZH 1501, respectivamente.

**Tabla 31 Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) de la NSS 2906-01.**

| Nombre Cuenca | Código Cuenca | Municipio | PIB Unidad | IVE1 | IVE2 | IVE-DAC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Caño Schiller entre El Jagüey y SFF CGSM | 2906010101 | Pivijay | 7,58772E-05 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Remolino | 0,000127731 | | | |
| | | Total | 0,000203608 | | | |
| Complejo Ciénaga Playazo | 2906010102 | Pivijay | 0,00011342 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Remolino | 0,000441772 | | | |
| | | Total | 0,000555192 | | | |
| Caño Schiller entre La Loma y El Jagüey | 2906010103 | Pivijay | 0,000399752 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Caño Schiller entre el rio Magdalena y La Loma | 2906010104 | Cerro De San Antonio | 2,37937E-08 | 0,48 | 0,98 | 0,73 |
| | | El Piñón | 0,001209908 | | | |
| | | Pivijay | 7,47192E-05 | | | |
| | | Salamina | 2,6803E-05 | | | |
| | | Total | 0,001311454 | | | |
| Arroyo Pacheco y otros directos al Caño Schiller | 2906010105 | Cerro De San Antonio | 0,001446506 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | El Piñón | 0,002102981 | | | |
| | | Total | 0,003549487 | | | |
| Arroyos Palma de Vino, Pertuz y Los Puercos | 2906010106 | El Piñón | 0,000580767 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Pivijay | 0,000722046 | | | |
| | | Total | 0,001302813 | | | |
| Caños Hondo, El Loro y otros directos al rio Magdalena | 2906010200 | Salamina | 0,004206665 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Complejo Ciénaga de Buenavista | 2906010301 | Pivijay | 3,0704E-05 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Remolino | 0,001795145 | | | |
| | | Salamina | 0,00098382 | | | |
| | | Total | 0,002809669 | | | |
| Complejo Ciénaga El Diluvio | 2906010302 | El Piñón | 0,000126736 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Pivijay | 0,000244343 | | | |
| | | Remolino | 9,30376E-05 | | | |
| | | Salamina | 0,001930518 | | | |
| | | Total | 0,002394635 | | | |
| Complejo Caño El Salado | 2906010400 | Remolino | 0,00171011 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Sitionuevo | 0,00027024 | | | |

| Nombre Cuenca | Código Cuenca | Municipio | PIB Unidad | IVE1 | IVE2 | IVE-DAC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Total | 0,00198035 | | | |
| Complejo Cenagoso-Sector Palermo | 2906010501 | Sitionuevo | 0,001059092 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Complejo Cenagoso-Sector Sitionuevo | 2906010502 | Remolino | 1,02577E-06 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Sitionuevo | 0,000766734 | | | |
| | | Total | 0,000767759 | | | |
| Caño Los Micos | 2906010503 | Sitionuevo | 0,000451502 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Complejo de Ciénagas Vía Parque Isla Salamanca | 2906010600 | Sitionuevo | 0,001082804 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Complejo Lagunar Ciénaga Grande | 2906010700 | Pivijay | 4,03995E-06 | 0,50 | 1 | 0,75 |
| | | Puebloviejo | 0,019484013 | | | |
| | | Remolino | 0,003498347 | | | |
| | | Sitionuevo | 0,003960884 | | | |
| | | Total | 0,026947284 | | | |

*Fuente: Elaboración propia*

**Tabla 32 Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) de la SZH 1501.**

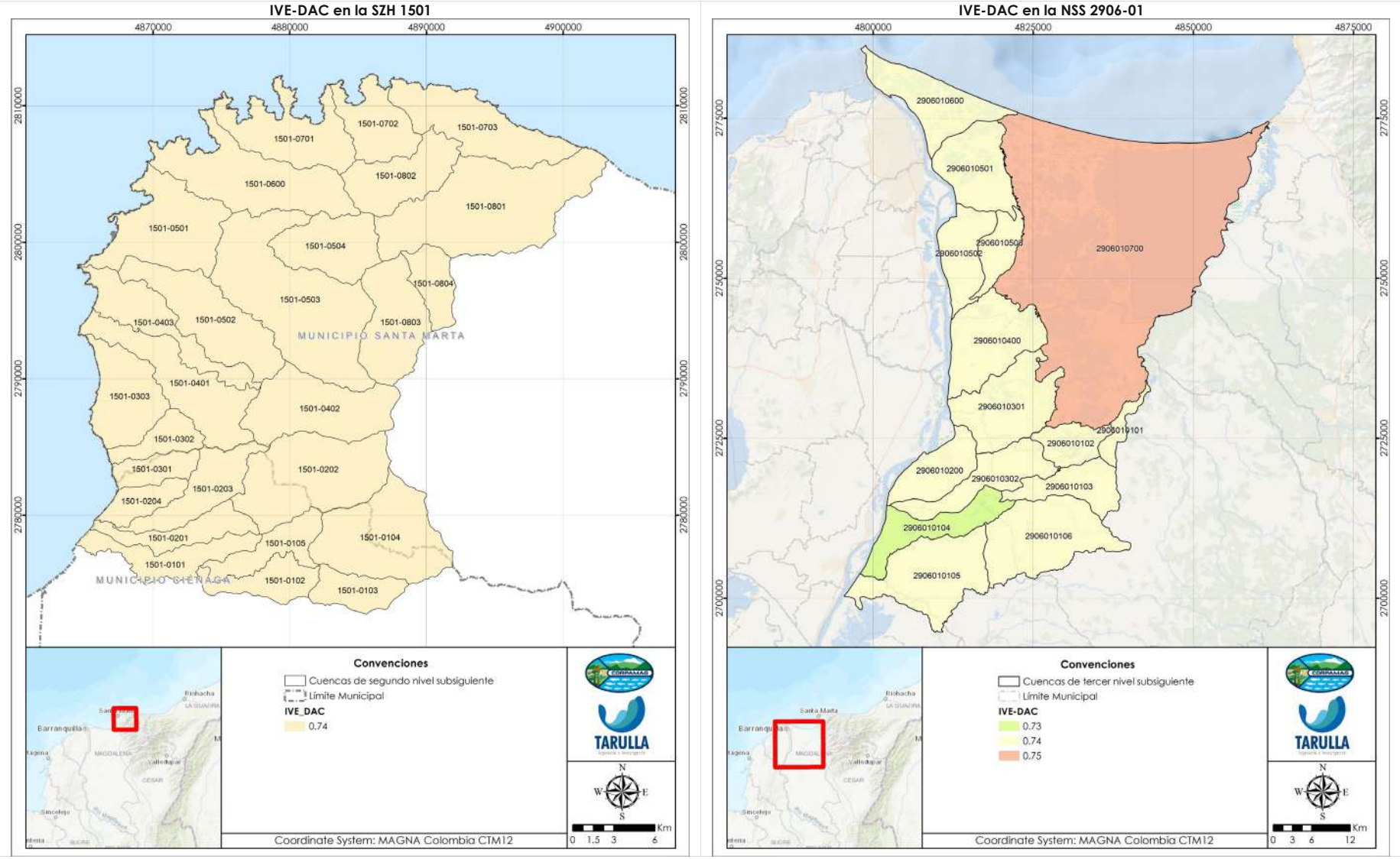
| Nombre Cuenca | Código Cuenca | Municipio | PIB Unidad | IVE1 | IVE2 | IVE-DAC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Río Cordoba-Sector Agualinda | 1501-0104 | Ciénaga | 0,000344212 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 0,000129537 | | | |
| | | Total | 0,000473748 | | | |
| Quebrada El Ebano y otros directos al Caribe | 1501-0303 | Santa Marta | 0,000334839 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Río Toribio entre Guayabal y El Vergel | 1501-0202 | Ciénaga | 0,000208824 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 0,000408092 | | | |
| | | Total | 0,000616916 | | | |
| Directos al Río Gaira entre Minca y el mar Caribe (mi) | 1501-0401 | Ciénaga | 2,6262E-07 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 0,000433499 | | | |
| | | Total | 0,000433762 | | | |
| Quebradas Santa Rosa, Playa Brava y otros directos al Caribe | 1501-0703 | Santa Marta | 0,000251259 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada Concha | 1501-0600 | Santa Marta | 0,000320831 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Río Manzanares en Santa Marta | 1501-0501 | Santa Marta | 0,00027348 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Río Piedras entre San Isidro y el Mar Caribe | 1501-0801 | Santa Marta | 0,000488794 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada Jordan | 1501-0802 | Santa Marta | 0,000178127 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada Cinto y otros directos al Caribe | 1501-0702 | Santa Marta | 0,000146925 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada Gayraca y otros directos al Caribe | 1501-0701 | Santa Marta | 0,000217422 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada Matogiro (Donama) | 1501-0504 | Santa Marta | 0,000175237 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada La Lisa | 1501-0804 | Santa Marta | 8,84633E-05 | 0,48 | 1 | 0,74 |

| Nombre Cuenca | Código Cuenca | Municipio | PIB Unidad | IVE1 | IVE2 | IVE-DAC |
|---|---|---|---|---|---|---|
| Río Piedras entre la Cuchills de San Lorenzo y San Isidro | 1501-0803 | Santa Marta | 0,000208493 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Río Manzanares entre la Cuchilla de San Lorenzo y Santa Marta | 1501-0503 | Santa Marta | 0,00050615 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Río Gaira entre la Cuchilla de San Lorenzo y Minca | 1501-0402 | Ciénaga | 6,97833E-07 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 0,000261265 | | | |
| | | Total | 0,000261963 | | | |
| Quebrada Tamaca | 1501-0502 | Santa Marta | 0,000255759 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Directos al rio Gaira entre Minca y el mar Caribe (md) | 1501-0403 | Santa Marta | 0,00017499 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada Don Jaca | 1501-0302 | Ciénaga | 2,62321E-07 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 7,93567E-05 | | | |
| | | Total | 7,9619E-05 | | | |
| Quebrada El Doctor | 1501-0301 | Ciénaga | 0,000105881 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 1,61302E-05 | | | |
| | | Total | 0,000122011 | | | |
| Quebrada Marinca | 1501-0203 | Ciénaga | 0,000283639 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 7,5468E-07 | | | |
| | | Total | 0,000284394 | | | |
| Quebrada El Guayabo | 1501-0204 | Ciénaga | 0,000137904 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Río Toribio entre vereda El Vergel y Mar Caribe | 1501-0201 | Ciénaga | 0,000201684 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Río Cordoba-Sector Cordobita | 1501-0101 | Ciénaga | 0,000247856 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada El Quindio y otros directos al Río Cordoba (md) | 1501-0105 | Ciénaga | 0,000206847 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| | | Santa Marta | 1,54622E-07 | | | |
| | | Total | 0,000207002 | | | |
| Quebrada Lourdes y otros directos al Río Cordoba (mi) | 1501-0102 | Ciénaga | 0,000195294 | 0,48 | 1 | 0,74 |
| Quebrada La Sierrita | 1501-0103 | Ciénaga | 0,000174944 | 0,48 | 1 | 0,74 |

*Fuente: Elaboración propia*

El subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) se determina a partir del IVE1 e IVE2, cada uno con igual peso de ponderación. La Figura 67 muestra los resultados del IVE-DAC normalizado de 0 a 1, evidenciando que en todas las cuencas de la SZH 1501 presentan un valor del indicador de 0,74, mientras que la cuenca Complejo Lagunar Ciénaga Grande (2906010700) de la NSS 2906-01 presenta el valor más alto del indicador.

**Figura 67 Subíndice de vulnerabilidad económica por desabastecimiento de agua para consumo (IVE-DAC) en las áreas de estudio.**




*Fuente: Elaboración propia*

## 5.3.RDAC

La determinación del riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC) se propone realizar a partir del producto ponderado entre el índice de amenaza por desabastecimiento de agua (SIA) y el índice de vulnerabilidad al desabastecimiento de agua (SIV). Matemáticamente, este se expresa como:

$$RDAC = SIA^{wh} \times SIV^{wc}$$

Donde *wh* y *wc* son los pesos asociados a los índices de amenaza (SIA) y vulnerabilidad (SIV), respectivamente.

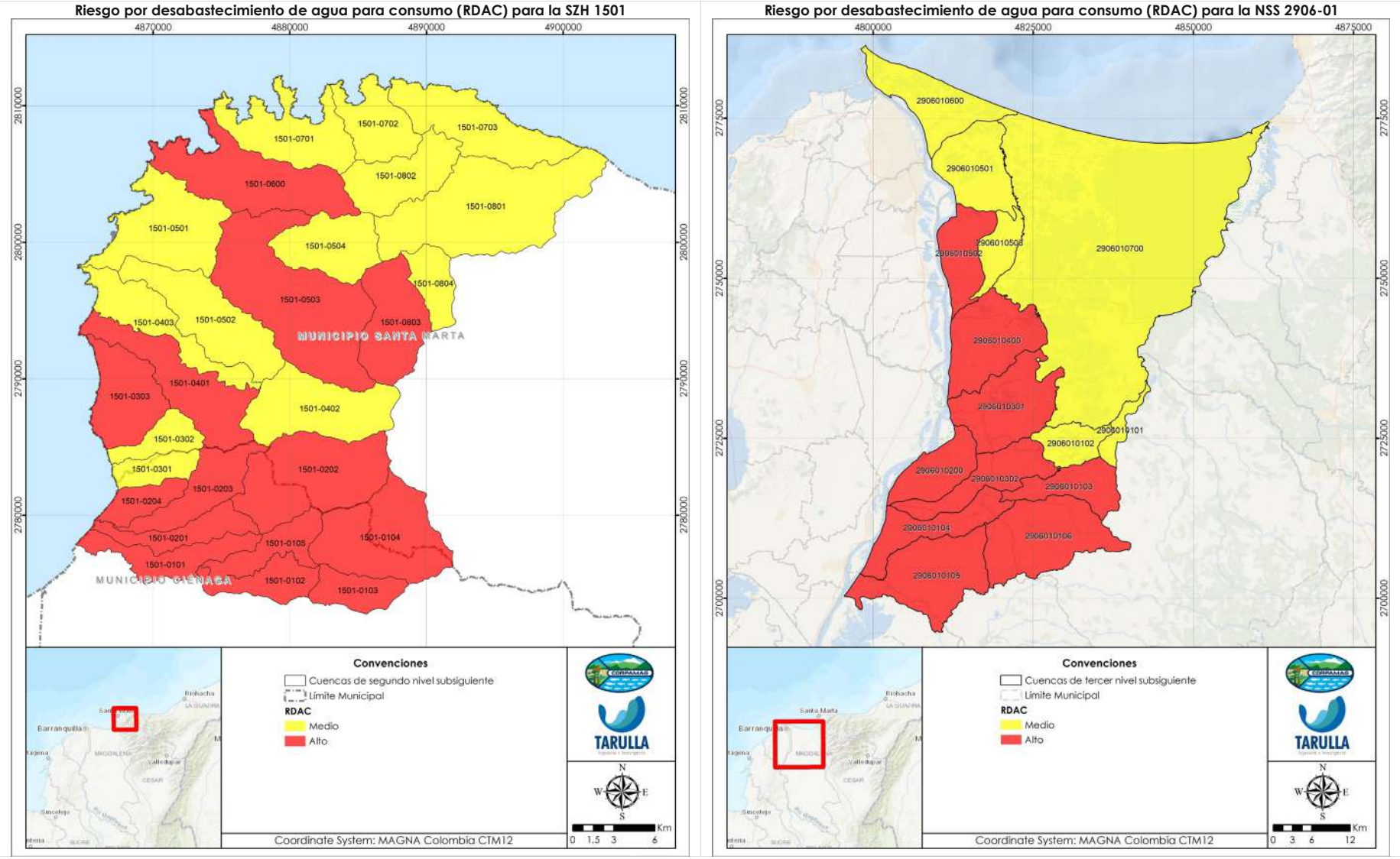
La Figura 68 muestran el índice de riesgo de desabastecimiento por condiciones adversas (RDAC) para las zonas hidrográficas SZH 1501 y NSS 2906-01, permitiendo identificar las áreas con diferentes niveles de riesgo y sus implicaciones en términos de suministro hídrico.

En la SZH 1501, se observa una variada distribución del riesgo de desabastecimiento. Las subcuencas en rojo, como 1501-0401, 1501-0502, 1501-0504, 1501-0600, 1501-0202 y varias más en el sur, indican un riesgo alto de desabastecimiento. Esto indica que estas áreas tienen una capacidad limitada para gestionar sus recursos hídricos en condiciones adversas, lo que podría llevar a desafíos en la disponibilidad de agua. Por otro lado, las subcuencas en amarillo, ubicadas principalmente en el norte (1501-0701, 1501-0702, 1501-0703, 1501-0801) y algunas en el centro (1501-0804), presentan un riesgo medio de desabastecimiento, lo que sugiere una capacidad moderada para enfrentar condiciones adversas, aunque todavía pueden experimentar problemas de suministro.

En la NSS 2906-01, el riesgo de desabastecimiento también muestra variaciones significativas. Las subcuencas en rojo, como 2906010502, 2906010200, 2906010301, 2906010202, 2906010103 y otras en el sur, presentan un riesgo alto de desabastecimiento, indicando ciertas limitaciones en la gestión del agua durante condiciones adversas. Las subcuencas en amarillo, ubicadas principalmente en el norte (2906010700, 2906010600, 2906010501) y algunas en el centro (2906010102, 2906010101), tienen un riesgo medio de desabastecimiento, mostrando una mejor preparación comparada con las áreas de alto riesgo, aunque todavía pueden enfrentar desafíos en la gestión de sus recursos hídricos.

Estos resultados subrayan una necesidad urgente de abordar las deficiencias en la gestión hídrica en ambas zonas hidrográficas. La evidencia de un alto y medio riesgo de desabastecimiento indica que, sin una intervención adecuada, las comunidades en estas áreas podrían enfrentar serias dificultades para satisfacer sus necesidades de agua, especialmente durante periodos de condiciones adversas. Esto resalta la necesidad de desarrollar y aplicar estrategias efectivas para mejorar la resiliencia hídrica y garantizar un suministro de agua adecuado para la población que habita en estas regiones.

**Figura 68 Riesgo por desabastecimiento de agua para consumo (RDAC)en las cuencas.**




*Fuente: Elaboración propia*

# 6. REFERENCIAS


ANLA. (2013). *Metodología Para La Definición De La Longitud De Influencia De Vertimientos Sobre Corrientes De Agua Superficial*. www.anla.gov.co

Beer, T., & Young, P. C. (1983). Longitudinal Dispersion in Natural Streams. *Journal of Environmental Engineering*, *109*(5), 1049–1067. https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1983)109:5(1049)

Cañada R., Cervera B., Moreno, A. (2008). *Sistemas y analisis de la informacion geografica manual de autoaprendizaje con Argics* (Vol. 23).

Cerpa Reyes, L. J. (2021). *Ajuste del índice de precipitación estandarizado (SPI), bajo condiciones de precipitación mensual cero*. Universidad del Norte.

Chapra, S. C. (2008). *Surface water-quality modeling*. Waveland press.

Correa-Caselles, D. (2022). *Metodología para la estimación del destino y transporte de mercurio presente en los ríos de Colombia*. https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/54564

Dawson, C. W., Abrahart, R. J., & See, L. M. (2007). HydroTest: A web-based toolbox of evaluation metrics for the standardised assessment of hydrological forecasts. *Environmental Modelling and Software*, *22*(7), 1034–1052. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.06.008

Dominguez. (2016). *a. a*.

FAO. (2003). *Manual curso Analsis Espacial Arciew 8.2*.

Garnett P., W. (1997). *Chaos Theory Tamed*.

Grubbs, F. E. (1969). Procedures for Detecting Outlying Observations in Samples. *Technometrics*, *11*(1), 1–21. https://doi.org/10.1080/00401706.1969.10490657

IDEAM. (2013a). *Hoja metodológica del indicador Índice de calidad del agua (Versión 1,00)* (Issue 571). www.ideam.gov.co

IDEAM. (2013b). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*.

IDEAM. (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*.

IDEAM. (2023a). *Hoja metodológica del Índice de Uso del Agua (Versión 1,3)*.

IDEAM. (2023b). *Hoja metodológica del Índice de Vulnerabilidad Hídrica por desabastecimiento (Versión 1,3)*.

Juwana, I., Muttil, N., & Perera, B. J. C. (2012). Indicator-based water sustainability assessment — A review. *Science of The Total Environment*, *438*, 357–371. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.093

Lees, M. J., Camacho, L., & Whitehead, P. (1998). Extension of the QUASAR river water quality model to incorporate dead-zone mixing. *Hydrology and Earth System Sciences*, *2*(2/3), 353–365. https://doi.org/10.5194/hess-2-353-1998

Leys, C., Ley, C., Klein, O., Bernard, P., & Licata, L. (2013). Detecting outliers: Do not use standard deviation around the mean, use absolute deviation around the median. *Journal of Experimental Social Psychology*, *49*(4), 764–766. https://doi.org/10.1016/j.jesp.2013.03.013

Mamani, J. A. (2022). *Desarrollo de un modelo numérico de calidad del agua en un marco probabilístico de soporte a las decisiones a escala nacional*. https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/60182

Molano Marin, Y., & García Quiroga, P. D. (2021). *Evaluación de la amenaza y vulnerabilidad por contaminación del recurso hídrico en Cundinamarca, caso Río Negro, Zipaquirá* [Universidad de la Salle]. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_civil/931

Monsalve, S. G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. Escuela Colombiana de Ingeniería.

Navas, A. (2016). *Factores de asimilación de carga contaminante en ríos - una herramienta para la identificación de estrategias de saneamiento hídrico en países en desarrollo*. https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/13945

Nogales, J., Rogéliz-Prada, C., Cañon, M. A., & Vargas-Luna, A. (2023). An integrated methodological framework for the durable conservation of freshwater ecosystems: a case study in Colombia's Caquetá River basin. *Frontiers in Environmental Science*, *11*. https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1264392

Pum, J. (2019). *A practical guide to validation and verification of analytical methods in the clinical laboratory* (pp. 215–281). https://doi.org/10.1016/bs.acc.2019.01.006

Rojas, A. (2011). *Aplicación de factores de asimilación para la priorización de la inversión en sistemas de saneamiento hídrico en Colombia* [Thesis, Universidad Nacional de Colombia]. https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/7652

Rosner, B. (1983). Percentage Points for a Generalized ESD ManyOutlier Procedure. *Technometrics*, 165–172. https://doi.org/10.1080/00401706.1983.10487848

Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. (2019). *Evaluación Integral de Prestadores Operadores de Servicios de la Sierra S.A.S. E.S.P.* https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/evaluacion_integral_operadores_de_la_sierra_s.a.s._e.s.p.2019.pdf

Superservicios y Camacol. (2022). *DocumentoTécnico Municipal*. https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inline-files/SANTA%20MARTA.pdf

Thomaz, F. R., Miguez, M. G., de Souza Ribeiro de Sá, J. G., de Moura Alberto, G. W., & Fontes, J. P. M. (2023). Water Scarcity Risk Index: A Tool for Strategic Drought Risk Management. *Water (Switzerland)*, *15*(2). https://doi.org/10.3390/w15020255

Tsakiris, G., & Vangelis, H. (2005). Establishing a Drought Index Incorporating Evapotranspiration. *European Water*.

Ven Te Chow et al. (1994). *a*.

WMO. (2011). *Guía de Prácticas Climatológicas*.

Xiang, K., Li, Y., Horton, R., & Feng, H. (2020). Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration – a review. *Agricultural Water Management*, *232*, 106043. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106043

# 7. ANEXOS

A continuación, se presenta en el enlace los anexos del documento.