

CONTROL DE CAMBIOS

Revisión del documento	Sección Modificada	Fecha de modificación	Observaciones
1		viernes, 23 de enero de 2026	

ESTADO DE REVISIÓN Y APROBACIÓN

1	ene-26	Ing. JORGE MAYID GENE BELTRÁN Especialista en Ingeniería Hidráulica _____	Ing. JORGE MAYID GENE BELTRÁN Especialista en Ingeniería Hidráulica _____	INTERVENTORÍA/SUPERVISIÓN _____	
Revisión Nro.	Fecha	Elaborado por	Complementado y Revisado por / Firma	Aprobado por / Firma	Estado
VALIDACIÓN: _____ _____ _____ _____ Cumple con los requisitos del Cliente: SI_ NO_					

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	5
2. OBJETIVOS.....	6
2.1 OBJETIVO GENERAL	6
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
3. GENERALIDADES DEL PROYECTO	7
4. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO.....	7
5. HIDROGRAFÍA	10
6. CLIMA.....	11
6.1 RÉGIMEN CLIMÁTICO ANUAL:.....	14
6.2 REGIMEN CLIMÁTICO DIARIO.....	16
6.3 CURVA IDF	17
7. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA	18
8. TIPO DE SUELO	20
9. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS	20
10. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN	26
11. PRECIPITACIÓN MEDIA DE PONDERADA DE LA SUBCUENCA	29
12. CÁLCULO DE CAUDALES DE DISEÑO.....	31
12.1 MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO	31
13. ESTUDIO HIDRÁULICO	37
13.1 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA.....	37
13.2 CARACTERIZACIÓN DEL RIO GUACAICA EN EL TRAMO DE MODELACIÓN	38
13.3 METODOLOGÍA.....	39
14. ESTUDIO DE SOCAVACIÓN.....	51
14.1 PROCESO DE SOCAVACIÓN.....	51
14.2 CÁLCULO SOCAVACIÓN GENERAL	51
15. CONCLUSIONES.....	57
16. BIBLIOGRAFÍA.....	59

Listado de Figuras

Figura 1. Localización del proyecto Sistema de coordenadas CTM-12 Origen Nacional.....	8
Figura 2. Mapa de delimitación de la Cuenca Hidrográfica y de la Red de Drenaje del río Guacaica	11
Figura 3. Delimitación de las estaciones para la cuenca hidrográfica a analizar..	12
Figura 4. Registros históricos de precipitación multianual	14
Figura 5. Registros históricos de precipitación mensual multianual	15
Figura 6. Variación típica mensual de precipitación	15
Figura 7. Curva de doble masa correspondiente a la precipitación registrada en la estación seleccionada La Nubia.....	16
Figura 8. Confiabilidad del conjunto de datos.....	17
Figura 9. Curva intensidad duración frecuencia Estación Apto La Nubia Manizales	18
Figura 10. Resultado de la delimitación de la subcuenca del río Guacaica.	19
Figura 11. Pendiente longitudinal Tramo de análisis Río Guacaica.....	23
Figura 12. Curva hipsométrica Subcuenca río Guacaica	24
Figura 13. Fotografía de la Geografía Característica de la cuenca del río Guacaica.....	24
Figura 14. Fotografía de la Geografía Característica de la cuenca del río Guacaica.....	25
Figura 15. Polígono de frecuencia Subcuenca Río Guacaica	26
Figura 16. Hietogramas empleados en Hec HMS para la modelación hidrológica de la subcuenca	35
Figura 17. Vista en planta del plano producto del levantamiento topográfico realizado para el presente proyecto	37
Figura 18. Esquema de un río recto de montaña con su forma típica en planta. ..	39
Figura 19. Fotografías representativas río Guacaica en el sitio donde se plantea la construcción del puente peatonal	44
Figura 20. Condiciones de frontera – Flujo Permanente.....	49
Figura 21. Resultados de la Lámina de Agua en las secciones transversales para un Periodo de retorno asociado de Tr 100 años.....	50
Figura 22. Abscisado para diferentes secciones del modelo hidráulico.	52
Figura 23. Sección correspondiente a la estructura del puente nuevo a construir.	52
Figura 24. Distribución granulométrica ajustada con retiro material superior a 5" .	53

Listado de Tablas.

Tabla 1. Datos generales del proyecto	7
Tabla 2 Estaciones meteorológicas consultadas. Fuente IDEAM.	13
Tabla 3. Parámetros Morfométricos – Subcuenca Rio Guacaica.....	21
Tabla 4. Pendiente ponderada del cauce principal del rio Guacaica.....	22
Tabla 5. Cálculo de tiempos de concentración Tc. Subcuenca rio Guacaica	29
Tabla 6. Precipitación Máxima Multianual para cada estación	30
Tabla 7 Precipitación Ponderada calculada por medio del método de los Polígonos de Thiessen a partir de la Precipitación Máxima en 24 horas multianual	31
Tabla 8. Valores de los coeficientes a,b,c y d para el cálculo de las curvas IDF, para Colombia Región Andina,	33
Tabla 9. Información de ingreso al programa Hec-HMS.....	36
Tabla 10. Caudal asociado a los diferentes periodos de retorno utilizando Método Hidrograma Unitario	36
Tabla 11. Información de la Modelación	42
Tabla 12. Valores para nb según Benson & Dalrymple (1967) y Chow (1959)	45
Tabla 13. Valores Seleccionados para cálculo del Coeficiente de Manning del rio Guacaica.....	48

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

**ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA
MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE
PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO
GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE
LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA
DEPARTAMENTO DE CALDAS.**

ESTUDIO DE HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN

I. INTRODUCCIÓN

El presente Estudio Hidrológico e Hidráulico se desarrolla como parte de los estudios técnicos requeridos para el proyecto de diseño y construcción de un puente peatonal sobre el río Guacaica, localizado en el municipio de Manizales en el departamento de Caldas, con el objetivo de garantizar condiciones adecuadas de seguridad hidráulica, funcionalidad y sostenibilidad de la infraestructura propuesta.

El río Guacaica forma parte de un sistema hídrico de carácter torrencial, propio de la región andina central colombiana, el cual se encuentra condicionado por fuertes pendientes, regímenes de precipitación elevados, alta variabilidad hidrológica y procesos activos de erosión y transporte de sedimentos, factores que inciden directamente en el comportamiento hidráulico del cauce y en la estabilidad de las estructuras asociadas a su cruce.

En este contexto, el estudio tiene como finalidad caracterizar el régimen hidrológico de la cuenca aportante, estimar los caudales de diseño para diferentes periodos de retorno y analizar el comportamiento hidráulico del cauce en la sección del proyecto, evaluando niveles de lámina de agua, velocidades, esfuerzos cortantes y posibles afectaciones por socavación general, que puedan comprometer la integridad estructural del puente peatonal y sus obras de aproximación.

El desarrollo del estudio se fundamenta en información climatológica, hidrológica, topográfica y geomorfológica disponible, complementada con análisis técnicos y criterios de diseño acordes con la normatividad colombiana vigente, las recomendaciones técnicas del sector infraestructura y las buenas prácticas de la ingeniería hidráulica, considerando además las condiciones particulares de riesgo hidrometeorológico del municipio de Manizales.

Los resultados obtenidos constituyen un insumo técnico esencial para la definición del gálibo hidráulico, la localización y tipología de apoyos, el diseño de obras de protección del cauce y la mitigación de riesgos asociados a crecientes, contribuyendo a que el proyecto se integre de manera segura y armónica con el entorno natural, minimizando impactos negativos y garantizando la operación segura del puente peatonal durante su vida útil.

Página 5	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------	--	---

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Desarrollar el estudio hidrológico e hidráulico del río Guacaica en el sector de implantación del puente peatonal, con el fin de determinar las condiciones hidrológicas e hidráulicas del cauce, establecer los caudales y niveles de diseño, y definir los criterios técnicos necesarios para el diseño seguro y funcional de la estructura, garantizando su estabilidad, operación y compatibilidad con el entorno natural.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Recopilar información espacio temporal de la zona de estudio. Analizar y caracterizar la cuenca hidrográfica aportante al río Guacaica en el sector del proyecto, mediante el análisis de sus condiciones físicas, geomorfológicas, climáticas y de uso del suelo, relevantes para el comportamiento hidrológico.

Analizar la información hidrometeorológica disponible (precipitación, escorrentía y registros históricos), con el fin de estimar los caudales máximos de diseño asociados a diferentes períodos de retorno, de acuerdo con la normatividad y criterios técnicos aplicables.

Definir los eventos hidrológicos de diseño para el puente peatonal, considerando las condiciones de riesgo hidrológico e hidráulico propias del contexto urbano y periurbano del municipio de Manizales.

Evaluar el comportamiento hidráulico del cauce del río Guacaica en la sección del proyecto, mediante el análisis de niveles de agua, velocidades de flujo y capacidad hidráulica para los caudales de diseño.

Determinar el gálibo hidráulico requerido para el puente peatonal, de manera que se garantice el paso seguro de las crecientes sin generar obstrucciones ni afectaciones aguas arriba o aguas abajo.

Analizar los procesos potenciales de socavación general, así como la estabilidad hidráulica del cauce en la zona de implantación de la estructura y sus accesos.

Definir criterios y lineamientos técnicos para el diseño de obras de protección hidráulica y control de erosión, en caso de ser requeridas, orientadas a la mitigación de riesgos asociados a crecientes y a la protección de la infraestructura proyectada.

Aportar insumos técnicos para la toma de decisiones de diseño, que permitan la adecuada integración del puente peatonal con el entorno, bajo criterios de seguridad, funcionalidad y sostenibilidad.

3. GENERALIDADES DEL PROYECTO

TIPO DE CONTRATO	Consultoría
OBJETO DE CONTRATO	ESTUDIOS TÉCNICOS, QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, EN CUMPLIMIENTO DE LA SENTENCIA JUDICIAL EMITIDA DENTRO DE LA ACCIÓN POPULAR NO. 17 001 33 33 002 2021 00251
CONTRATISTA	JIMÉNEZ CASTRO S.A.S

Tabla 1. Datos generales del proyecto

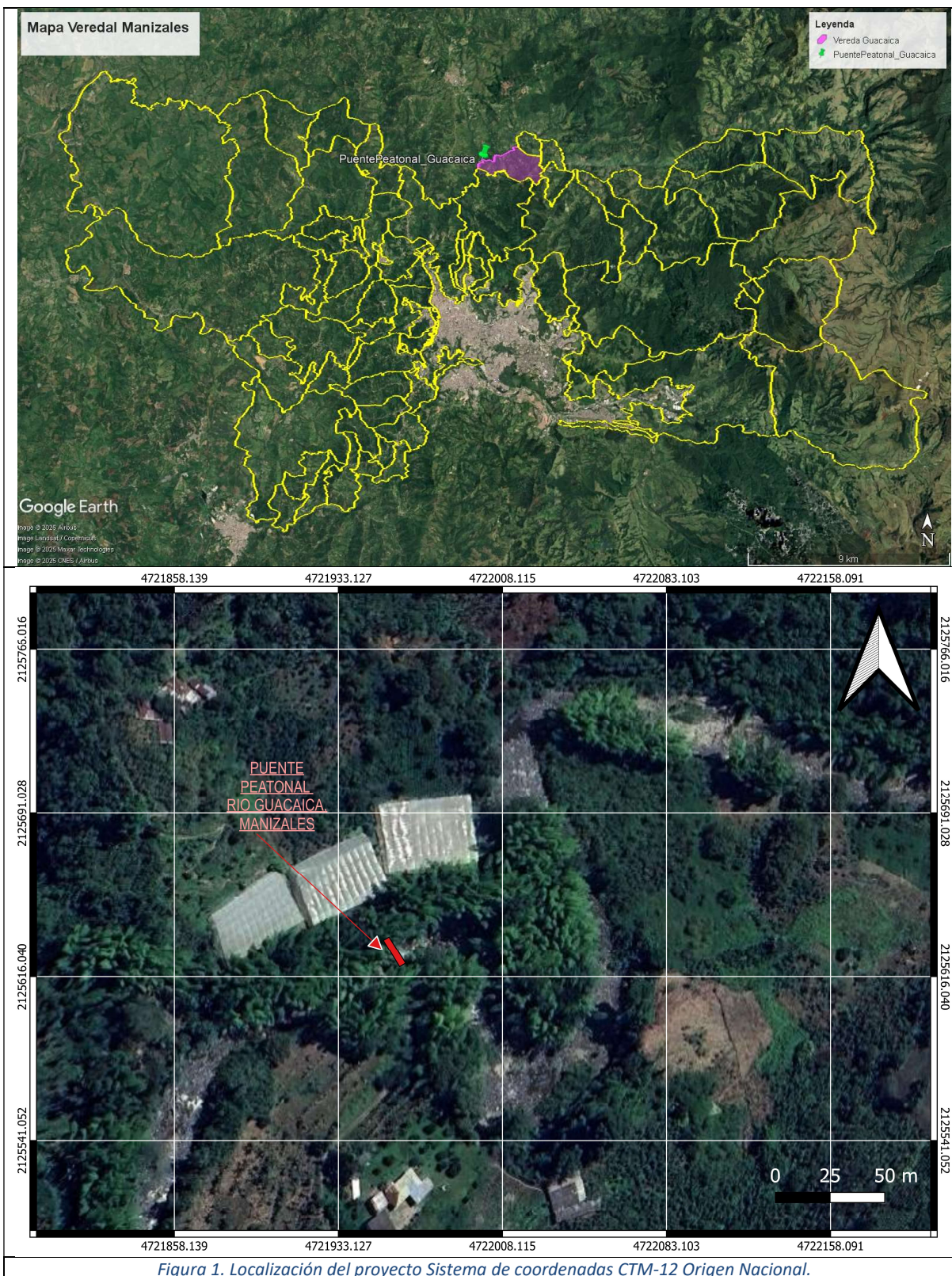
4. LOCALIZACIÓN Y DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto del puente peatonal sobre el río Guacaica se localiza en el municipio de Manizales, departamento de Caldas, en la región centro–occidental de Colombia, dentro del ámbito geográfico de la Cordillera Central, caracterizada por condiciones topográficas montañosas, alta pendiente y un régimen hidrológico de respuesta rápida a eventos de precipitación.

La localización específica del proyecto corresponde al punto definido por las coordenadas en el sistema de referencia Origen Nacional, así:

- Coordenada Este (X): 2.125.627,807
- Coordenada Norte (Y): 4.721.963,192

Estas coordenadas permiten identificar con precisión el sector de cruce del río Guacaica, ver figura Nro.1, el cual atraviesa una zona con influencia urbana y periurbana del municipio, donde el cauce presenta características propias de una corriente de montaña, con pendientes pronunciadas, sección irregular y dinámica hidráulica condicionada por los eventos de lluvia de alta intensidad típicos de la región.



	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

Desde el punto de vista hidrográfico, el río Guacaica forma parte de una red de drenaje secundaria que aporta a sistemas hídricos de mayor jerarquía dentro de la cuenca regional, siendo relevante su comportamiento frente a crecientes súbitas, transporte de sedimentos y procesos de erosión de márgenes, aspectos determinantes para el análisis hidrológico e hidráulico del proyecto.

El área de implantación del puente peatonal se encuentra en un entorno donde convergen factores topográficos, geológicos e hidrometeorológicos que influyen directamente en el comportamiento del cauce, tales como pendientes elevadas, suelos de origen volcánico y alta pluviosidad anual, condiciones que hacen indispensable una evaluación detallada de los niveles de agua, velocidades de flujo y posibles procesos de socavación asociados a eventos extremos.

La localización definida constituye el punto de referencia para el desarrollo de los análisis hidrológicos y hidráulicos, así como para la modelación del comportamiento del río Guacaica en la sección de cruce, la definición de caudales de diseño y la evaluación de la interacción entre el cauce y la infraestructura proyectada, garantizando que las soluciones de diseño se ajusten a las condiciones reales del sitio y a los criterios de seguridad establecidos.

El proyecto corresponde al desarrollo de los estudios y diseños técnicos para la construcción de un puente peatonal nuevo sobre el río Guacaica, localizado en el municipio de Manizales, departamento de Caldas, en el punto definido por las coordenadas Origen Nacional X=2.125.627,807 y Y=4.721.963,192. La infraestructura proyectada tiene como finalidad garantizar una conexión peatonal segura y funcional entre los sectores ubicados a ambos márgenes del río Guacaica, superando las limitaciones de accesibilidad existentes y mitigando los riesgos asociados al cruce informal del cauce, especialmente durante eventos de creciente.

El alcance del proyecto se enmarca en la fase de estudios y diseños, e incluye la elaboración de los insumos técnicos necesarios para definir la solución estructural y geométrica del puente peatonal, así como la evaluación de su interacción con el entorno natural, en particular con el comportamiento hidrológico e hidráulico del río en el sector de implantación. En esta fase no se contempla la ejecución de obras, sino la definición de criterios de diseño que permitan su posterior construcción en condiciones de seguridad, estabilidad y durabilidad.

Desde el punto de vista conceptual, el puente peatonal se proyecta como una estructura independiente, emplazada de manera que no interfiera con la capacidad hidráulica del cauce, garantizando un gálibo suficiente para el paso de las crecientes de diseño y minimizando la necesidad de apoyos dentro del lecho del río. La localización y configuración de los apoyos, así como la definición del tablero, se establecerán con base en los resultados de los estudios hidrológicos, hidráulicos, geotécnicos y estructurales.

El proyecto considera, además, la definición de obras complementarias asociadas a los accesos peatonales, tales como rampas, escaleras y elementos de transición, así como, de ser necesario, obras de protección hidráulica y control de erosión en las márgenes del cauce, orientadas a garantizar la estabilidad de la infraestructura y la adecuada integración con el entorno.

Página 9	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------	--	---

5. HIDROGRAFÍA

El área de estudio se localiza dentro del sistema hidrográfico del río Guacaica, el cual hace parte de la red de drenaje superficial del municipio de Manizales, departamento de Caldas, conforme con la cartografía hidrográfica oficial del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM) y la cartografía base del Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC).

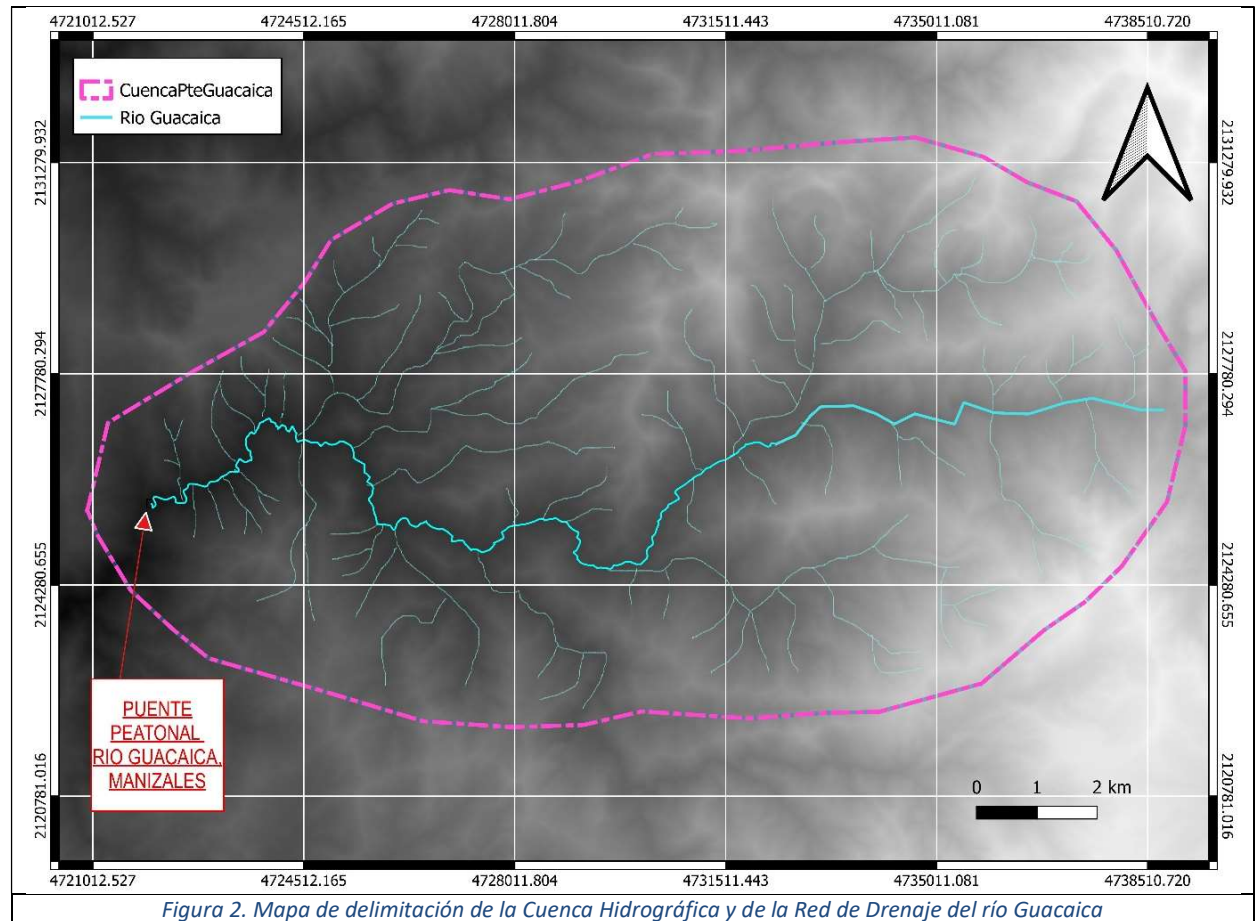
De acuerdo con dicha cartografía, el río Guacaica corresponde a una corriente de montaña de régimen predominantemente pluvial, con una respuesta hidrológica rápida frente a eventos de precipitación intensa, característica de las cuencas localizadas en la Cordillera Occidental Colombiana. Esta condición se encuentra asociada a la alta pluviosidad de la región, las pendientes pronunciadas y la configuración geomorfológica del terreno.

La interpretación de la cartografía topográfica del IGAC evidencia que, en el sector del proyecto, el cauce del río Guacaica presenta una geometría irregular, con taludes laterales definidos y un fondo conformado por materiales aluviales y coluviales de diversa granulometría. La disposición de las curvas de nivel y la morfología del relieve permiten identificar procesos activos de escorrentía concentrada, erosión de márgenes y transporte de sedimentos, propios de corrientes torrenciales.

La red hidrográfica asociada al área de estudio incluye drenajes secundarios y escorrentías superficiales que confluyen hacia el río Guacaica, los cuales han sido identificados a partir de la cartografía oficial del IDEAM y corroborados mediante el análisis topográfico. Estos aportes laterales, aunque de carácter intermitente, adquieren relevancia durante eventos de lluvia intensa, generando incrementos locales en los caudales y niveles de agua del cauce principal.

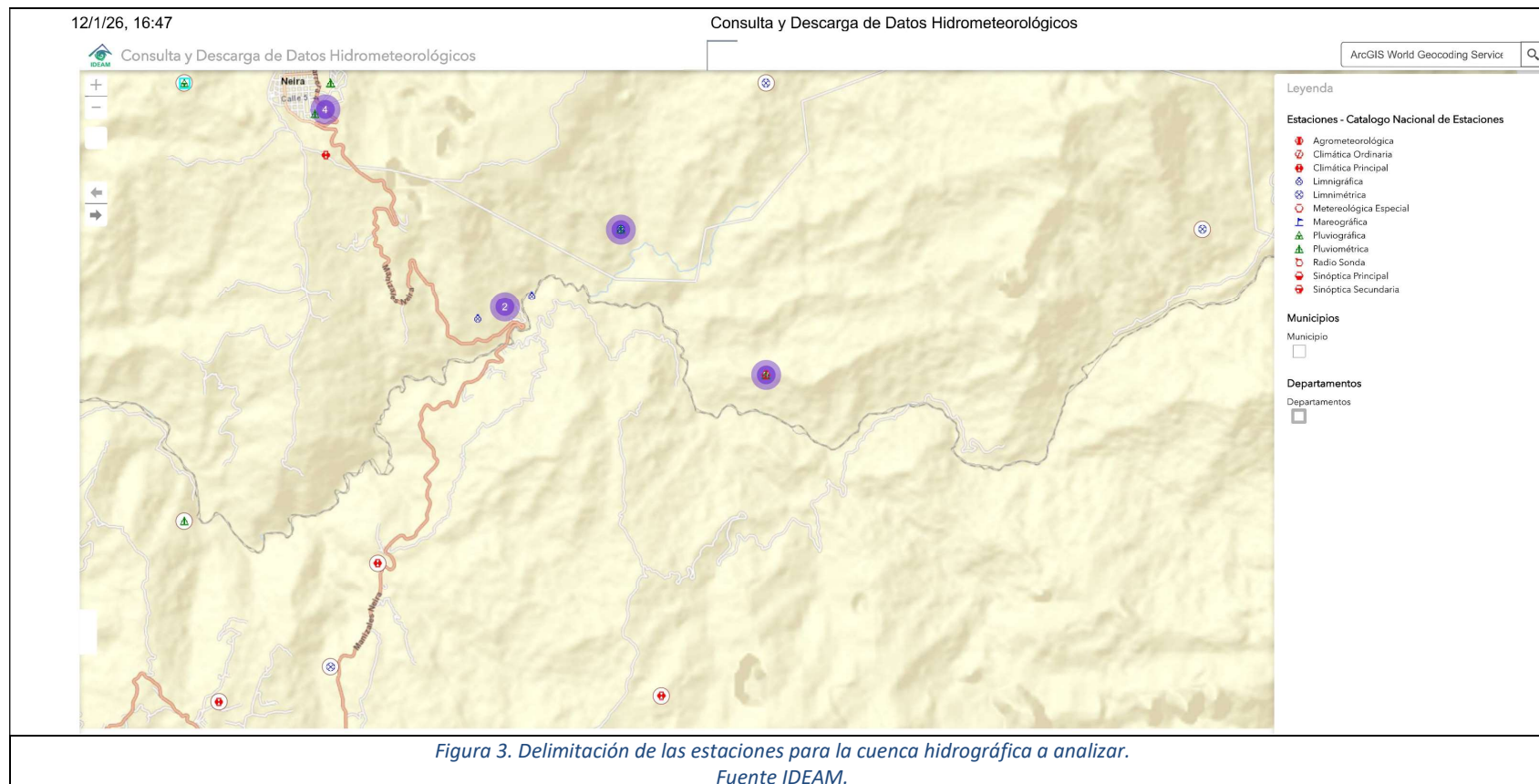
Asimismo, la cartografía del IGAC permite reconocer la interacción del río Guacaica con el entorno urbano y periurbano inmediato, donde se presentan modificaciones antrópicas del territorio que pueden incidir en el comportamiento hidrológico e hidráulico del cauce, tales como cambios en el uso del suelo y la presencia de infraestructura cercana.

Con el fin de soportar gráficamente esta caracterización, en la figura Nro.2 se muestra el Mapa de delimitación de la Cuenca Hidrográfica y de la Red de Drenaje del río Guacaica, en el cual se representa la delimitación de la cuenca aportante al punto de cruce del proyecto, la red hidrográfica principal y secundaria, la localización del eje del puente peatonal y su relación con el entorno topográfico. Este mapa se constituye como un insumo fundamental para la delimitación del área de influencia hidráulica, la estimación de caudales de diseño y el desarrollo de la modelación hidráulica del proyecto.



6. CLIMA

En la Figura Nro.3 se pueden observar las estaciones meteorológicas consultadas para demarcar la cuenca hidrográfica, las cuales se enuncian en la Tabla Nro.2.



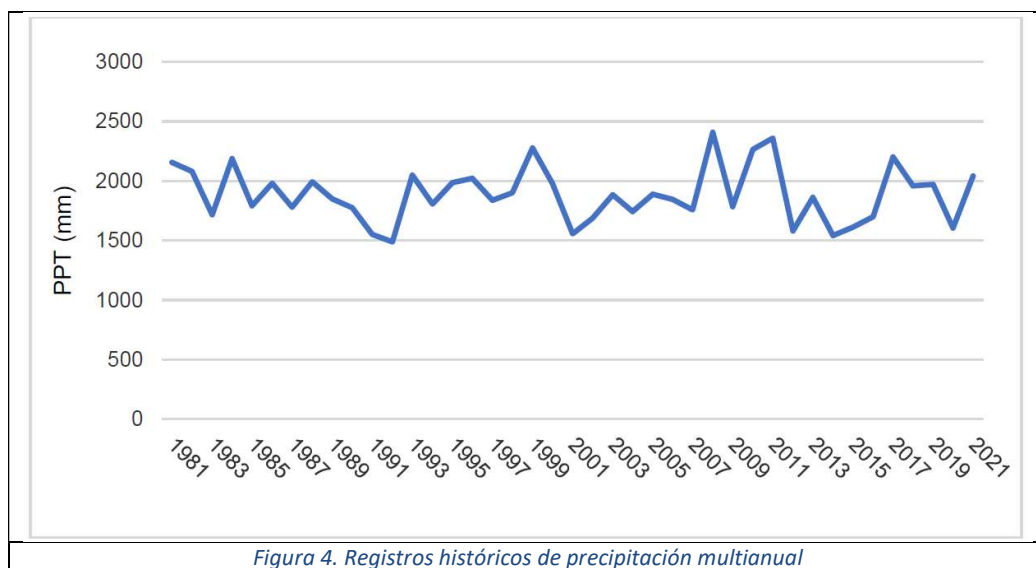
CODIGO	Tipo	ESTACION	MUNICIPIO
2615700067	Limnigráfica	PLANTA CHEC	NEIRA
2615700073	Limnigráfica	SAN MARCOS DE LEÓN	NEIRA
26157050	Limnimétrica	BOCATOMA	MANIZALES
26157010	Limnimétrica	BOCATOMA-EL RETIRO	MANIZALES
26157140	Limnimétrica	BOCATOMA-GUACAICA	NEIRA
2615500035	Climática Principal	YARUMOS	MANIZALES
2615500028	Climática Principal	PERALONSO-CHEC	NEIRA
2615500012	Climática Principal	ANTENAS ALTO DEL GUAMO	MANIZALES
2615500026	Climática Principal	MILAN PLANTA NIZA	MANIZALES
26160100	Pluviométrica	NEIRA	NEIRA
26160120	Pluviométrica	CRISTALINA LA	NEIRA
26150400	Pluviométrica	SANTA TERESA	MANIZALES
26155110	Hidrometeorológica	AEROPUERTO LA NUBIA	MANIZALES

Tabla 2 Estaciones meteorológicas consultadas. Fuente IDEAM.

La homogenización del área de estudio se realiza bajo el supuesto de una distribución espacial similar de la precipitación, lo que permite representar las condiciones climáticas generales a partir de registros puntuales. Este proceso comprende la recopilación y análisis de la información disponible, la validación de los datos empleados, el análisis climático en distintas escalas temporales y, finalmente, la determinación de la precipitación y las intensidades de diseño.

6.1 RÉGIMEN CLIMÁTICO ANUAL:

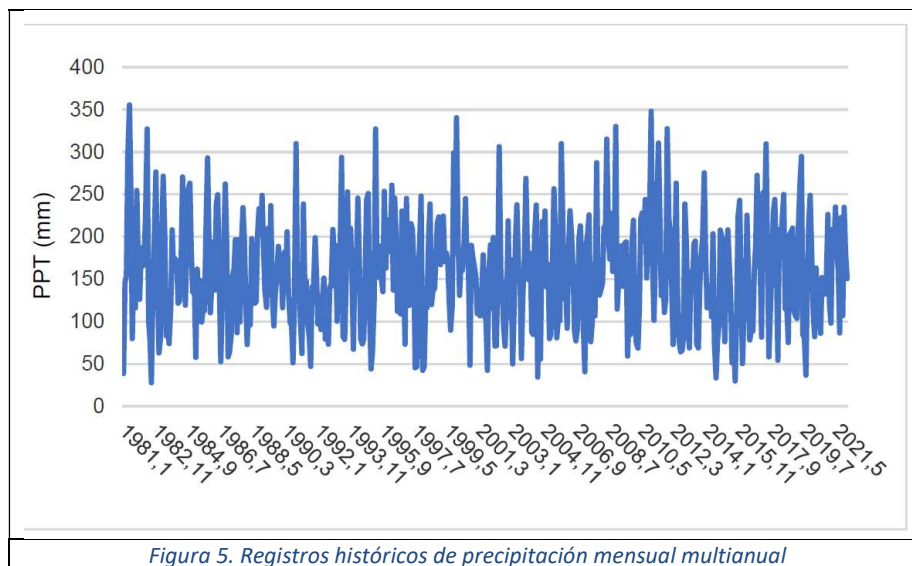
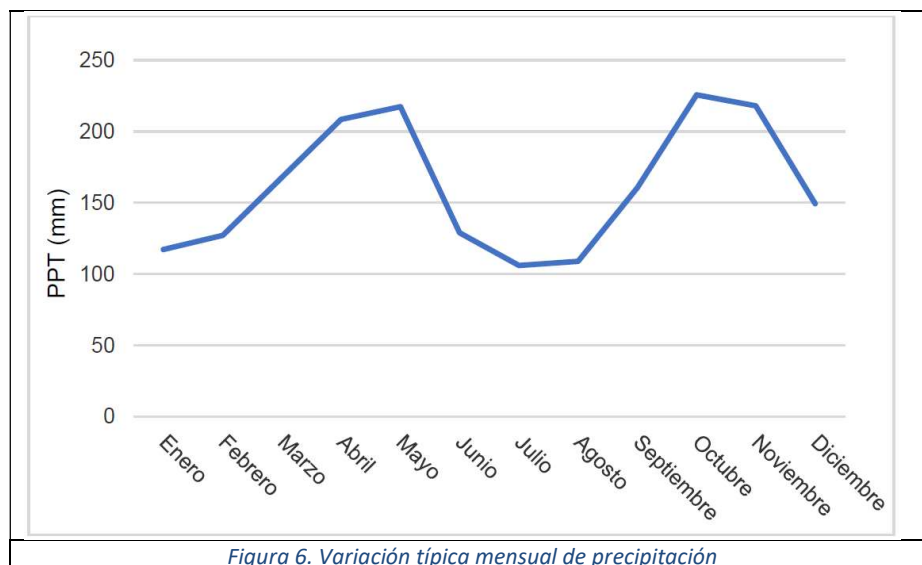
El régimen climático anual describe las características de fenómenos de variabilidad climática con el ENOS (El Niño Oscilación del Sur). A través de los registros históricos es posible identificar años de mayor y menor precipitación anual, así como la temperatura media del mismo año. Ver figura Nro.4



Del anterior gráfico es posible identificar años húmedos y años secos conforme con el contexto climático regional. Nótese los años 2011, 2008, 2000 y 1984 como años más húmedos y los años 2015, 2002, 1997 y 1992 como los años más secos.

Los máximos acumulados anuales de precipitación identificados en años como 1998, 2008, 2011 y 2022 se asocian claramente con la ocurrencia del fenómeno ENOS en su fase fría (La Niña). En contraste, los valores más bajos de precipitación anual registrados en periodos como 1989, 1992, 1994, 2001 y 2015 coinciden con la manifestación del ENOS en su fase cálida (El Niño). No obstante, debe señalarse que otros eventos del ENOS no generan valores extremos en los registros anuales, dado que su desarrollo se presenta dentro de un mismo año hidrológico o en transiciones entre años, superponiéndose parcialmente con condiciones climáticas normales.

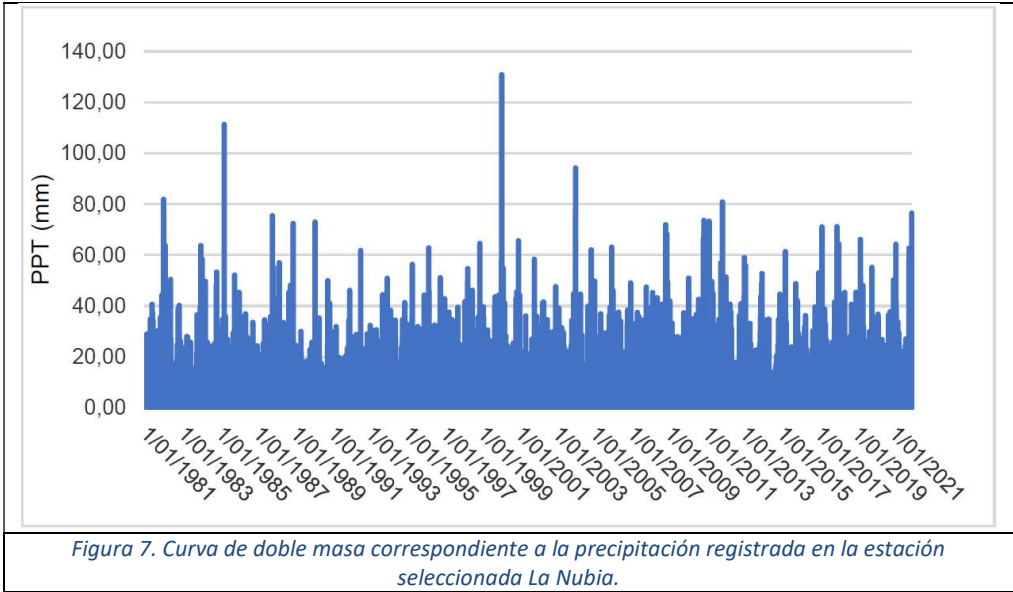
El análisis temporal de las variables climáticas permite reconocer la influencia de otro forzante atmosférico fundamental: la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT). Este sistema se localiza en la franja ecuatorial y se caracteriza por el encuentro de las masas de aire provenientes de ambos hemisferios, cuya posición varía estacionalmente en respuesta a la inclinación del eje terrestre. La interacción de este fenómeno con la configuración orográfica del territorio condiciona el régimen y la distribución de las precipitaciones a lo largo del ciclo anual. Ver figura Nro.5 y figura Nro.6

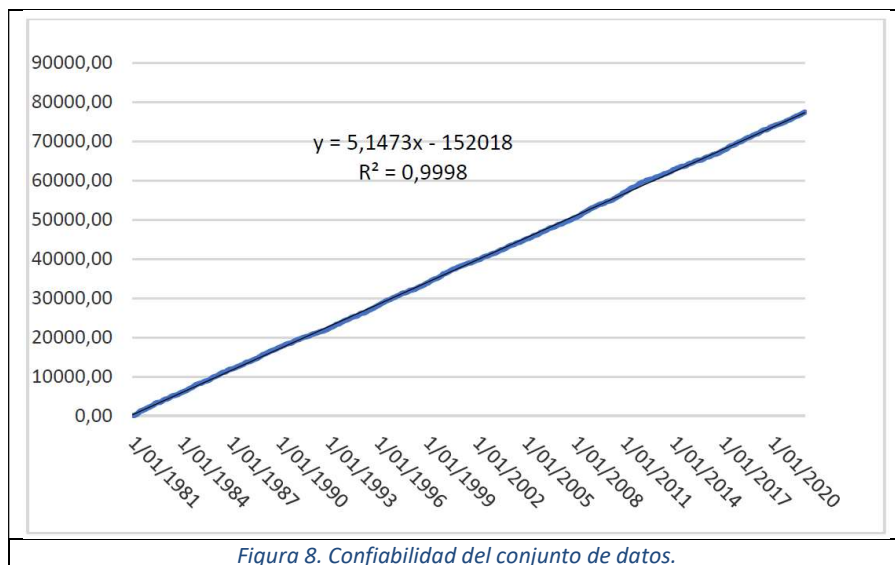


El análisis de las series históricas mensuales evidencia un comportamiento bimodal del régimen de humedad, con incrementos significativos durante los intervalos de abril a mayo y de octubre a noviembre, y reducciones marcadas en los periodos comprendidos entre diciembre y enero, así como entre julio y agosto. De manera complementaria, dichos registros muestran una disminución particular de la temperatura media en los meses de octubre, noviembre y diciembre en comparación con el resto del año.

6.2 REGIMEN CLIMÁTICO DIARIO.

La serie diaria analizada correspondiente a un horizonte temporal de 30 años, está conformada por 14.975 observaciones de precipitación. Dicha información es sometida a un proceso de control y depuración orientado a la detección de inconsistencias, tales como registros negativos o valores atípicos que excedan los límites físicamente plausibles de los fenómenos meteorológicos. Para este propósito se emplea el método de curvas de doble masa, el cual se basa en la representación gráfica de los acumulados progresivos de una estación frente a los de una o varias estaciones de referencia, bajo el supuesto de una relación aproximadamente lineal entre las series comparadas. En la siguiente figura Nro.7 se muestra la curva de doble masa correspondiente a la precipitación registrada en la estación seleccionada La Nubia.

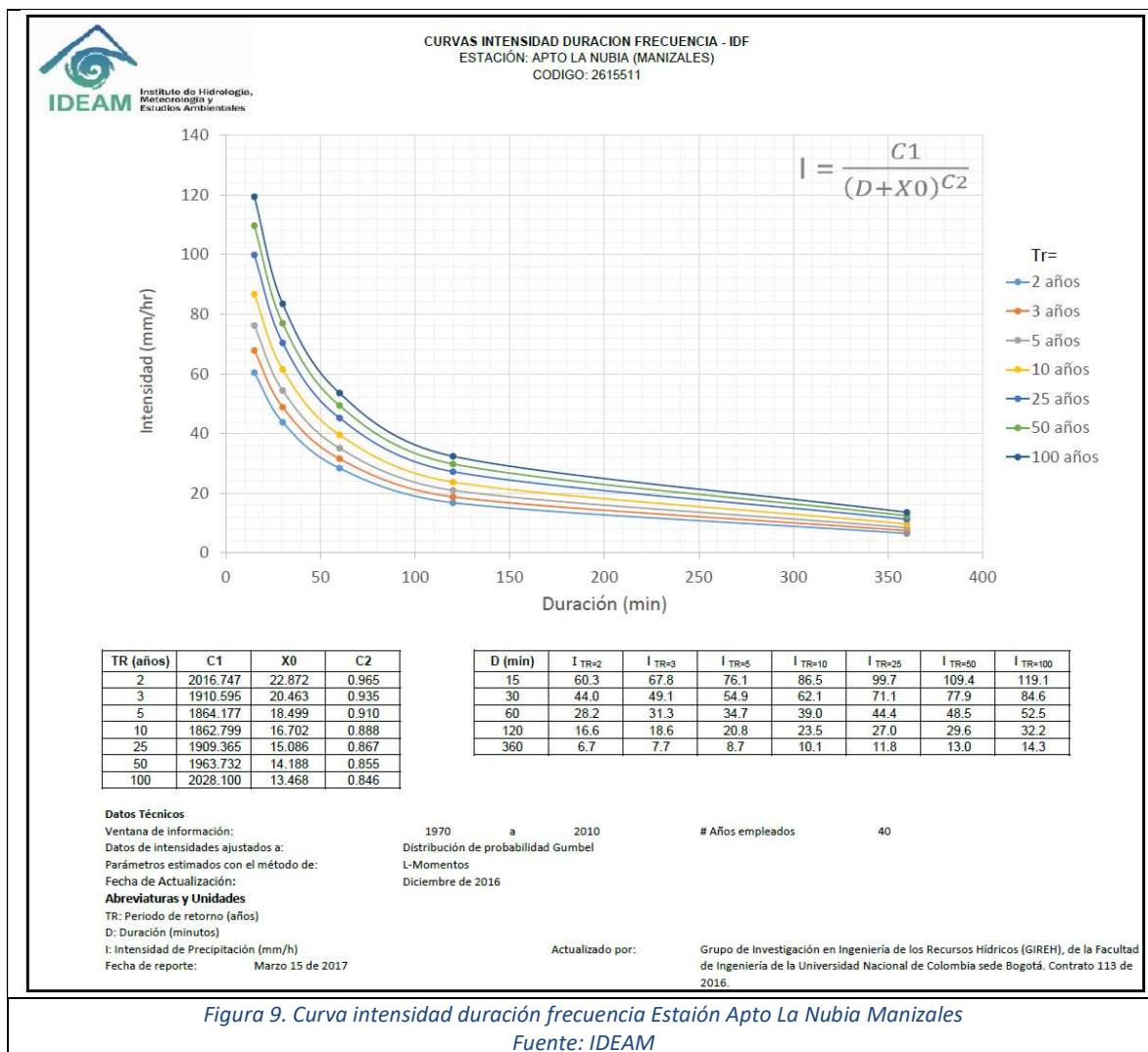




En la figura Nro.8 se presenta la confiabilidad del conjunto de datos sustentada en el comportamiento lineal evidenciado, lo cual respalda la idoneidad de los registros para su aplicación en los análisis posteriores. A partir de esta validación, la serie diaria será incorporada en los modelos de simulación hidrológica con el fin de caracterizar el régimen de caudales y analizar su propagación a lo largo del tramo evaluado.

6.3 CURVA IDF

La curva Intensidad–Duración–Frecuencia (IDF), ver figura Nro.9, constituye un insumo fundamental para la determinación de los caudales de diseño asociados a eventos extremos, los cuales sirven de base para la estimación de los Niveles de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) en el río Guacaica. Esta relación permite definir la intensidad de precipitación, expresada en milímetros por hora, correspondiente a una duración crítica del evento y a un periodo de retorno específico, representativo de escenarios hidrológicos extremos. Los parámetros derivados de la curva IDF son empleados directamente en la modelación hidrológica e hidráulica del cauce, con el fin de evaluar el comportamiento del flujo y los niveles máximos esperados en el tramo de análisis ubicado entre los municipios de Manizales y Neira.

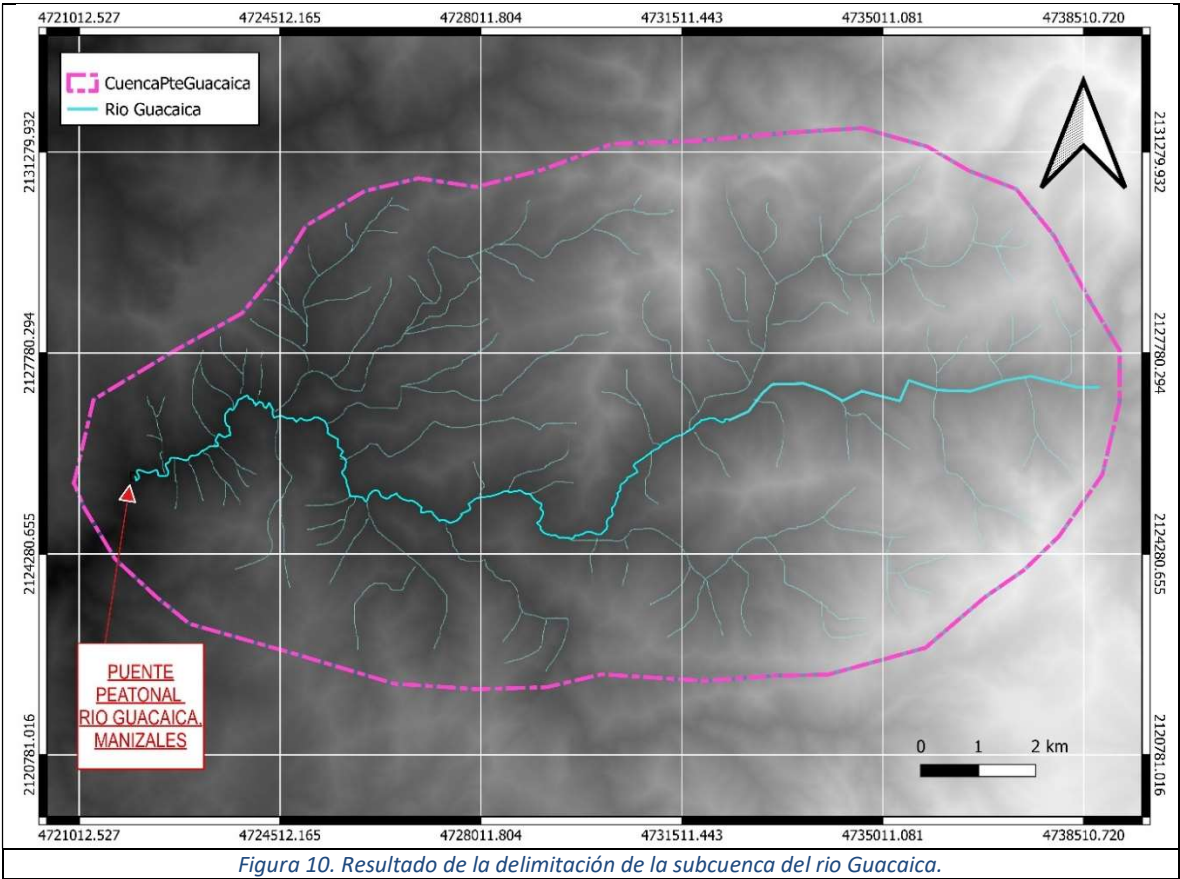


7. DELIMITACIÓN DE LA CUENCA

El ciclo hidrológico visto a nivel de una cuenca se puede esquematizar como un estímulo constituido por la precipitación a la que la cuenca responde mediante el escurrimiento en su salida. Entre el estímulo y la respuesta ocurren varios fenómenos que condicionan la relación entre uno y otra, que están controlados por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. Estas características se clasifican en: i) las que condicionan *el volumen de escurrimiento*, como el área de la cuenca y el tipo de suelo, y ii) las que condicionan *la velocidad de respuesta*, como son el orden de las corrientes, pendientes de la cuenca y los cauces, etc. (Aparicio, 1992)

La delimitación de la subcuenca del Río Guacaica del presente proyecto se realizó empleando un Modelo Digital de Elevación DEM de 12,5m, obtenido del sensor de radar ALOS PALSAR SENSOR de la Agencia Espacial Japonesa. El DEM utilizado es de tipo *High Resolution Terrain Corrected*, es decir de 12,5m por pixel. La subcuenca tiene un área total de 48.4Km² y su cierre se da unos metros adelante del sitio de proyecto del puente peatonal, ver Figura Nro.10.

La subcuenca se delimitó con base en el DEM, con ayuda del software QGis, que permite hacer esta labor gracias a herramientas que limitan por medio del concepto de *divisoria de aguas*, mejor conocida como la línea imaginaria formada por los puntos de mayor nivel topográfico, que separa la cuenca de las cuencas vecinas.



	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

8. TIPO DE SUELO

El número de Curva (CN) es un parámetro empírico que se calcula con el método desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos (SCS) actualmente Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS) de EEUU. Se representa mediante un número adimensional en curvas estandarizadas que varían entre 0 y 100; donde un área con CN = 0 no tiene escurrimiento y otra con CN = 100 es impermeable y toda la precipitación genera escurrimiento.

Según el método simplificado de Ponce y Hawkins, el CN se puede determinar empleando solamente la información del uso del suelo y del tipo del suelo.

La evaluación del tipo de suelo de la subcuenca de estudio se obtuvo gracias a los mapas de acceso público del *Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC*, los cuales se pueden descargar de la plataforma de *Datos Abiertos de la Subdirección de Agrología del IGAC* (<https://geoportal.igac.gov.co>).

La delimitación de la zona del proyecto, así como la definición del Número de Curva se realizó mediante las herramientas del software QGIS y la metodología de selección con base en el uso de suelo, tratamiento, pendiente y tipo de suelo, definidos con métodos empíricos por la literatura actualizada (*Aparicio, 1992*).

De este ejercicio se obtuvo como resultado que el Número de Curva (CN) para la subcuenca de estudio **CN = 65.6**, ponderado de acuerdo con las características de cada zona y la magnitud de las áreas, el cual indica que se trata de una zona con tendencia más permeable, aunque ha ido disminuyendo esta característica debido a las actividades de deforestación comúnmente practicada por los habitantes de la zona.

9. PARÁMETROS MORFOMÉTRICOS

Los parámetros morfométricos caracterizan físicamente la cuenca proporcionando la posibilidad de conocer la variación espacial de los elementos del régimen hidrológico. Las principales características morfológicas de la cuenca incluyen los siguientes parámetros, ver tabla Nro. 3:

Página 20	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	--	---

Descripción	Unidades	Valor
Área de la cuenca	Km ²	48,4
Perímetro de la cuenca	Km	29,925
Ancho medio	Km	4,451
Nivel de Terreno Máximo	m.s.n.m	2205
Nivel de Terreno Mínimo	m.s.n.m	1537
Desniveles de Cotas	m	668
Altitud media	m.s.n.m	1900,01
Altitud más frecuente	m.s.n.m	2125,0
Altitud de frecuencia media	m.s.n.m	684,05
Pendiente promedio de la cuenca	%	4,05
Orden de la Red Hídrica	und	4
Longitud de la cuenca	km	12,05
Longitud del cauce principal	km	16,51
Longitud de la red hídrica	km	94,0
Pendiente promedio de la red hídrica	%	4,05
Índice de Forma		0,33
Índice de compacidad		1,21
Coeficiente Número de Curva		84,0
Densidad de Drenaje	km/km ²	0,94

Tabla 3. Parámetros Morfométricos – Subcuenca Río Guacaica

- Área de la cuenca, A (km²): Corresponde a la superficie de drenaje hasta el punto de cierre determinado. Es el área o proyección horizontal incluida entre la divisoria topográfica de la cuenca y su medición se realiza a partir de digitalización de la divisoria de aguas.
- Perímetro de la cuenca, P (km): Se determina midiendo la longitud de la línea divisoria de aguas de la cuenca.
- Longitud del cauce principal, L (km): Se determina midiendo la longitud de la corriente principal desde su nacimiento hasta el punto de interés directamente sobre la cartografía.
- Pendiente del cauce principal, S (m/m): Es la pendiente del cauce principal de la cuenca desde su nacimiento hasta el punto de cierre de la cuenca. La pendiente longitudinal del cauce representativo de la cuenca se determinó mediante la medición de elevaciones y abscisas a lo largo del cauce sobre la base topográfica, ver figura Nro.11 y tabla Nro.4; la pendiente ponderada se halló por el método de Taylor, según la siguiente expresión:

$$\bar{S} = \left[\frac{L}{\sum_{i=1}^n \frac{l_i}{\sqrt{S_i}}} \right]^2$$

Donde:

- $\bar{S}$: Pendiente media del cauce (o pendiente de Taylor).
- L : Longitud total del cauce principal.
- l_i : Longitud del tramo i .
- S_i : Pendiente del tramo i .

Abscisa inicio	Abscisa fin	Longitud (m)	Diferencia de Nivel (m)	Pendiente S	Pendiente Longitudinal (MÉTODO TAYLOR)	Pendiente Longitudinal (MÉTODO TAYLOR) %
0	20	20	0,895	0,045	0,017	1,654
20	60	40	0,337	0,008		
60	90	30	1,547	0,052		
90	120	30	0,730	0,024		
120	150	30	0,349	0,012		
150	180	30	0,871	0,029		
180	230	50	0,455	0,009		
230	260	30	1,336	0,045		
260	320	60	2,738	0,046		
320	355	35	0,445	0,013		
355	390	35	0,535	0,015		
390	480	90	0,830	0,009		
480	515	35	1,499	0,043		
515	540	25	1,121	0,045		
540	565	25	1,012	0,040		

Tabla 4. Pendiente ponderada del cauce principal del Rio Guacaica obtenida por el método de Taylor.

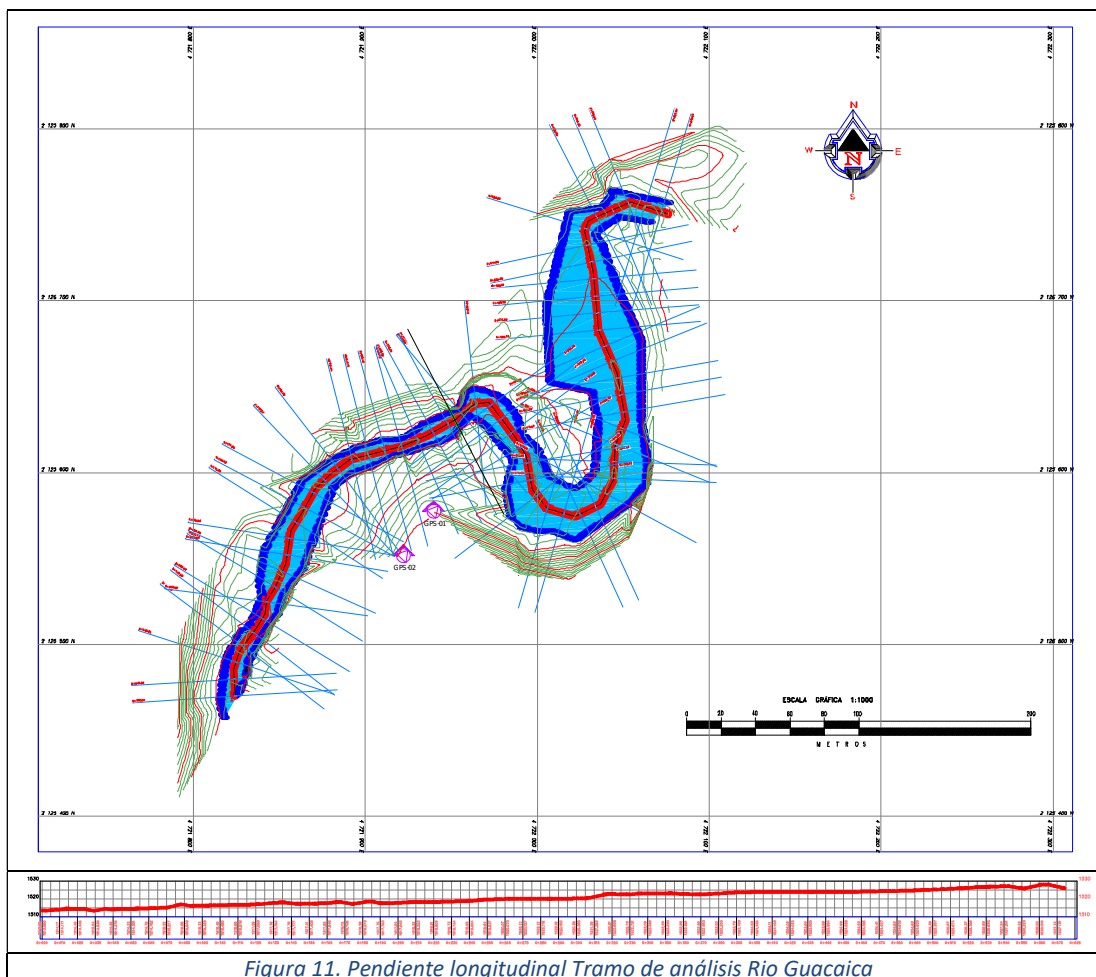


Figura 11. Pendiente longitudinal Tramo de análisis Rio Guacaica

- Ancho, A: es el ancho medio de la cuenca, calculado como la relación entre el Área de la cuenca y la longitud del cauce principal.
- Índice de compacidad (Gravelius), Kc: Con el perímetro de una cuenca y el perímetro de un círculo cuya área sea igual a la de la cuenca en estudio se determina el mencionado índice. El índice será mayor o igual a la unidad, de modo que cuanto más cercano se encuentre, más se aproximará su forma a la de un círculo, en cuyo caso la cuenca tendrá mayores posibilidades de producir crecientes con mayores picos (caudales). Por el contrario, si este valor se aleja de la unidad significa un mayor alargamiento en la forma de la cuenca. Se calcula como la relación entre 0.28 veces el perímetro y la raíz cuadrada del área de la cuenca.
- Curva Hipsométrica: la curva hipsométrica representa el área drenada variando con la altura de la superficie de la cuenca. También ha sido asociada con las edades de los ríos de las respectivas cuencas, ver Figura Nro.12

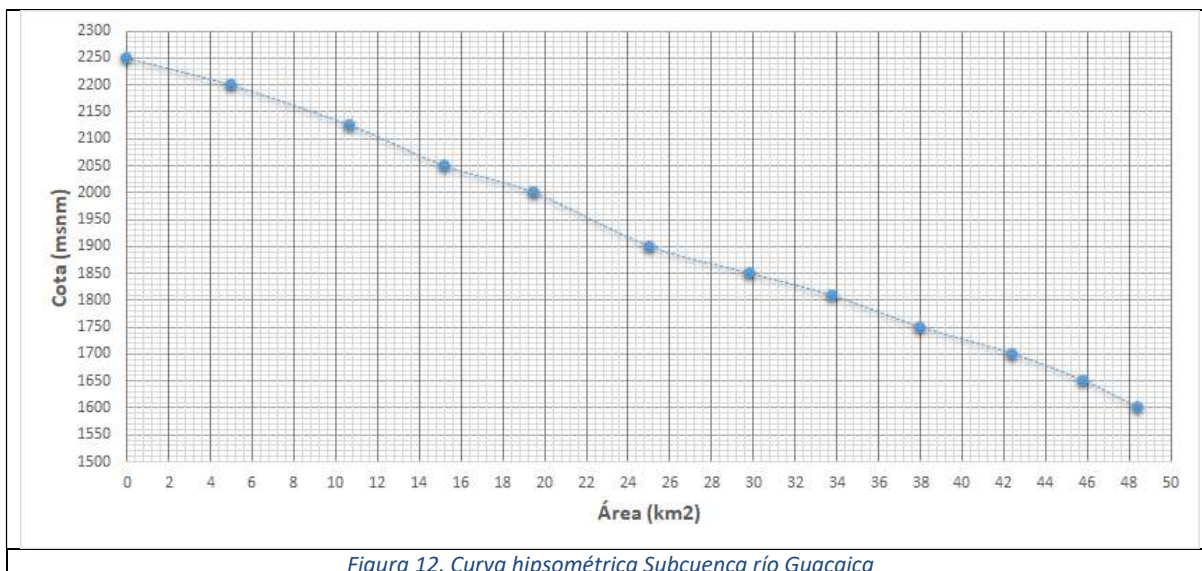


Figura 12. Curva hipsométrica Subcuenca río Guacaica

La curva hipsométrica muestra que se trata de un río característico de la zona, donde la geografía es consistente en áreas aferentes, pendientes y drenaje, tal y como se muestra en la Figura Nro.13 y figura Nro.14.

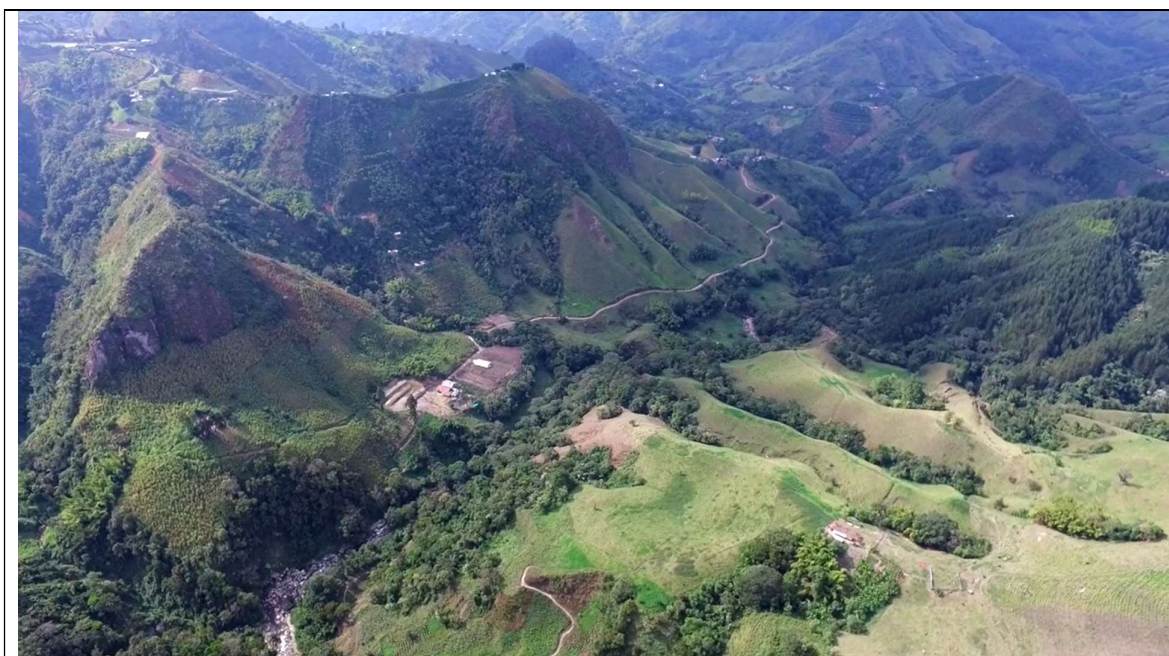
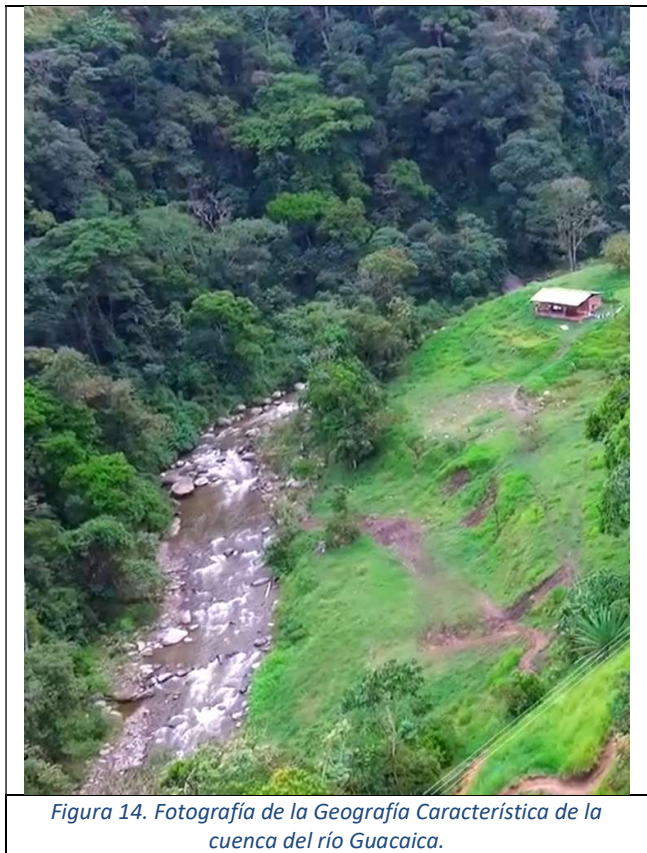
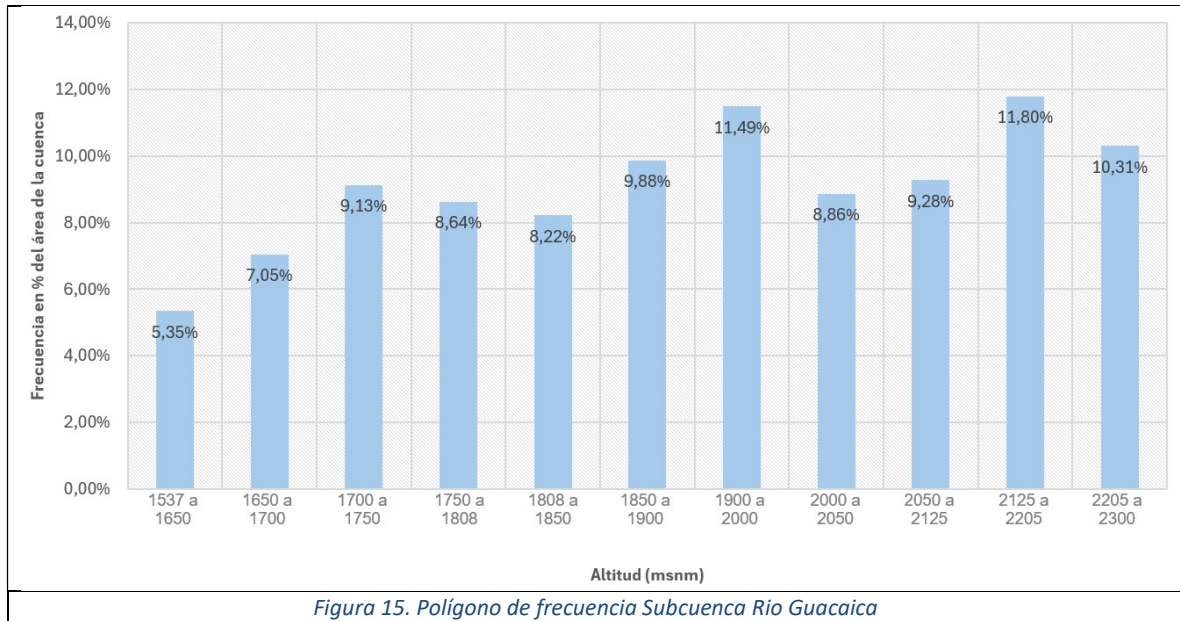


Figura 13. Fotografía de la Geografía Característica de la cuenca del río Guacaica.



- Factor de forma, K_f : Con el área de una cuenca y la longitud del cauce principal se determina el mencionado índice. Este indicador resume la forma geométrica de la cuenca. Si los valores tienden a la unidad, el riesgo de crecientes es mayor, así como su riesgo de erosión. Si los valores tienden a cero, el riesgo de inundación y erosión es menor. Se calcula como la relación entre el área de la cuenca y el cuadrado de la longitud axial. Para el caso de la Subcuenca, presenta un valor menor de 0,33, es decir que no tiene tendencias, asociadas a la forma, para desarrollar riesgo de crecientes ni riesgos críticos de erosión. En la figura Nro.15 se muestra el polígono de frecuencias de la subcuenca del río Guacaica.



10. TIEMPO DE CONCENTRACIÓN

Se calculó el tiempo de concentración siguiendo todas las metodologías señaladas en el Manual de Drenaje de INVIAS.

Estas expresiones son de las principales expresiones empleadas a nivel mundial para cauces y abarcan desde los resultados conservadores de la ecuación de Kirpich a los más holgados de la ecuación del US Corps of Engineers. Las ecuaciones empleadas son:

Ventura:

$$T_c = 0.12 \left(\frac{A}{S} \right)^{0.5} \quad (1)$$

Siendo,

T_c: tiempo de concentración (horas)

A: área de la cuenca (km²)

S: pendiente entre la máxima y la mínima elevación del curso principal (m/m)

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

Témez:

$$Tc = 0.3 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (2)$$

Siendo,

Tc: tiempo de concentración (horas)

L: longitud del curso principal (km)

S: pendiente entre la máxima y la mínima elevación del curso principal (m/m)

Kirpich:

$$Tc = 0.06628 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (3)$$

Siendo,

Tc: tiempo de concentración (horas)

L: longitud del curso principal (km)

S: pendiente entre la máxima y la mínima elevación del curso principal (m/m)

U.S. Corps of Engineers:

$$Tc = 0.28 \left(\frac{L}{S^{0.25}} \right)^{0.76} \quad (4)$$

Siendo,

Tc: tiempo de concentración (horas)

L: longitud del curso principal (km)

S: pendiente entre la máxima y la mínima elevación del curso principal (m/m)

Passini:

$$Tc = 0.09 \frac{(A*L)^{1/3}}{S^{0.5}} \quad (5)$$

Siendo,

Tc: tiempo de concentración (horas)

A: área de la cuenca (km²)

L: longitud del curso principal (km)

S: pendiente entre la máxima y la mínima elevación del curso principal (m/m)

P á g i n a 27	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------------	--	---

 JIMÉNEZ CASTRO S.A.S. GEOTECNIA ESPECIALIZADA	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

Bransby-Williams:

$$Tc = 58.5 \frac{L}{A^{0.1} S^{0.3}} \quad (6)$$

Siendo,

Tc: tiempo de concentración (minutos)

A: área de la cuenca (km²)

L: longitud del curso principal (km)

S: pendiente entre la máxima y la mínima elevación del curso principal (m/km)

California:

$$Tc = 0.066 \left(\frac{L}{S^{0.5}} \right)^{0.77} \quad (7)$$

Siendo,

Tc: tiempo de concentración (horas)

L: longitud del curso principal (km)

S: pendiente entre la máxima y la mínima elevación del curso principal (m/m)

Los tiempos de concentración presentan un amplio rango por lo que el valor final seleccionado se toma como el promedio de aquellos valores ubicados dentro del rango de la media más o menos una desviación estándar, las cuales definen los límites inferior y superior indicados. El valor final seleccionado para el tiempo de concentración de la subcuenca del río Guacaica es de 3.0h (180 minutos). Ver Tabla Nro.5.

Página 28	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	---	---

Ecuación	Tc (h)	Tc (min)
Ventura	1.38 – 4.49	83 – 270
Kirpich	1.97	118
Témez	4.65	279
Bransby-Williams	0.96	58
Cuerpo de Ingenieros (USACE)	4.34	260
Passini	1.84 – 5.99 Media=3.92	111 – 360 Media=235.5
California	1.98	119
Media	2.96h	
Desviación estándar	1.39h	
Límite Superior	4.36h	
Límite Inferior	1.57h	
Seleccionado	3.0h	

Tabla 5. Cálculo de tiempos de concentración Tc. Subcuenca rio Guacaica

II. PRECIPITACIÓN MEDIA DE PONDERADA DE LA SUBCUENCA

Para definir las tormentas de diseño se partió de los registros de las estaciones pluviométricas, a partir de los valores máximos anuales de precipitación en 24 horas para cada estación, determinando la precipitación máxima en 24 horas multianual, ver Tabla Nro.6. Luego de esto, se realizó mediante el método de los polígonos de Thiessen el cálculo del valor de la Precipitación para la Subcuenca. En la Tabla Nro.7 se presentan los resultados.

AÑO	PRECIPITACIÓN MÁXIMA ANUAL (mm)	
	AEROPUERTO LA NUBIA MANIZALES	CRISTALINA LA NEIRA
1996	260,1	422
1997	179,4	266
1998	212,3	451
1999	250,9	400
2000	204,6	288
2001	193,3	134
2002	333,4	358
2003	293,4	405
2004	212	244
2005	343,5	427
2006	235,1	362
2007	346,9	520
2008	346,5	564
2009	269,6	320
2010	250,3	412
2011	313,9	573
2012	284,8	364
2013	367	355
2014	245,1	294
2015	244,3	203
2016	185,6	186
2017	282,1	370
2018	223	309
2019	306,3	249
2020	138	-
2021	295,7	-
2022	225,1	-
2023	195,9	-
2024	270,6	387
2025	262,5	343
NUMERO DE DATOS	30	26
MEDIA	259,04	354,076923
DESVIACIÓN TÍPICA	57,0971622	107,72889
COEFICIENTE DE ASIMETRÍA	-0,32	0,41

Tabla 6. Precipitación Máxima Multianual para cada estación

CODIGO	Tipo	ESTACION	MUNICIPIO	% CON RESPECTO A ÁREA TOTAL	PM (mm)	A*P
32070040	PM	AEROPUERTO LA NUBIA	MANIZALES	40%	259.04	103.62
32010010	PM	CRISTALINA LA	NEIRA	60%	354.08	212.45
TOTAL				100.0%		

PM Ponderada	316.07	mm
---------------------	---------------	-----------

Tabla 7 Precipitación Ponderada calculada por medio del método de los Polígonos de Thiessen a partir de la Precipitación Máxima en 24 horas multianual

12. CÁLCULO DE CAUDALES DE DISEÑO

12.1 MÉTODO DEL HIDROGRAMA UNITARIO

Esta metodología establece un modelo lluvia-escorrentía en el que a partir de las precipitaciones máximas para diferentes períodos de retorno y con el uso de un hidrograma de escorrentía superficial se calcula la creciente máxima para el mismo período de retorno de la precipitación.

Este proceso se lleva a cabo en dos etapas:

- 1) Estimación de la lluvia neta.
- 2) Definición del hidrograma unitario y transformación lineal correspondiente.

-Estimación de la lluvia neta

Para la obtención de la lluvia neta se emplea el método propuesto por el *Soil Conservation Service* (SCS) basado en el concepto del "número de curva", CN.

De acuerdo con este método la escorrentía directa o precipitación efectiva producida por un evento de precipitación se calcula como:

$$P_e = \frac{(P - \alpha S)^2}{P + (1 - \alpha)S} \quad \text{si } P > S$$

$$P_e = 0 \quad \text{si } P \leq S$$

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

Donde,

Pe: precipitación efectiva (mm).

P: precipitación máxima para el periodo de retorno deseado (mm).

S: retención potencial máxima después que comienza la escorrentía (mm).

αS : umbral de escorrentía o abstracción inicial, es decir todas las pérdidas antes que comience la escorrentía (mm).

El SCS propone un valor de 0.2 para el parámetro y relaciona la retención potencial máxima (S) con el suelo y las condiciones de cobertura de la cuenca a través del número de curva (CN).

Esta relación para condiciones normales de humedad antecedente está dada por:

$$S = \frac{1000}{CN} - 10$$

El número de curva para la cuenca se obtiene a partir de la ponderación dentro del área de las diferentes unidades de suelo y cobertura vegetal definidas a partir de la información secundaria investigada en el IGAC.

-Lluvia de diseño

El Histograma de la precipitación de diseño o distribución de la lluvia empleado para el cálculo de caudales máximos, se obtiene por el método del bloque alterno, en el que se calcula la profundidad de precipitación como el producto de la intensidad (estimada con la curva IDF) por la duración.

Tomando diferencias entre valores sucesivos de profundidad de precipitación, se encuentra entonces la cantidad de lluvia que debe añadirse por cada unidad adicional de tiempo y los bloques o incrementos se reordenan en una secuencia temporal de modo que la intensidad máxima ocurra en el centro de la duración del aguacero y que los demás bloques queden en orden descendente alternativamente hacia la derecha y hacia la izquierda del bloque central.

Es importante asociar la precipitación total acumulada en cada hietograma de precipitación generado con las precipitaciones máximas probables en 24 horas obtenidas del análisis de frecuencias a partir de las distribuciones de probabilidad de mejor ajuste a los registros. Esto para representar de manera adecuada una precipitación que, de acuerdo con los registros, se estima probable y distribuida a lo largo del evento conforme con la información empírica de la región.

P á g i n a 32	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------------	--	---

Esta metodología consiste en generar los hietogramas a partir de las curvas IDF con el método de bloque alterno, con la diferencia que el hietograma debe ser ajustado de manera que la precipitación total acumulada en el evento coincida con la precipitación máxima probable correspondiente a cada periodo de retorno, y de esa manera, generar un hietograma de evento asociado a las diferentes probabilidades de ocurrencia con base en registros pluviométricos del área de estudio.

En la obtención de la lluvia de diseño al aplicar el hidrograma unitario, el factor para calcular la precipitación máxima promedio en la hoya se realiza con ayuda de la fórmula de *Frühling* que esta expresada de la siguiente manera:

$$F = 1 - 0.0054 * A^{0.25}$$

Donde,

F: factor de reducción.

A: área de la cuenca (m²)

De acuerdo con los 48.4 km² de área de la cuenca, el factor de reducción de *Frühling* corresponde a $F=0,55$, por lo que las precipitaciones de diseño obtenidas por los métodos mencionados anteriormente, se reducen en promedio aplicando ese factor para realizar una distribución espacial sobre la subcuenca del río Guacaica.

En la Tabla Nro.8 se presentan los coeficientes denotados por el Manual de Drenaje del INVÍAS para la zona Andina para el cálculo de los hietogramas de crecientes y la ecuación utilizada para el cálculo de los hietogramas de diseño.

REGIÓN	a	b	c	d
Andina	0,94	0,18	0,66	0,83

Tabla 8. Valores de los coeficientes a,b,c y d para el cálculo de las curvas IDF, para Colombia Región Andina, utilizados para este estudio.

Fuente: INVÍAS

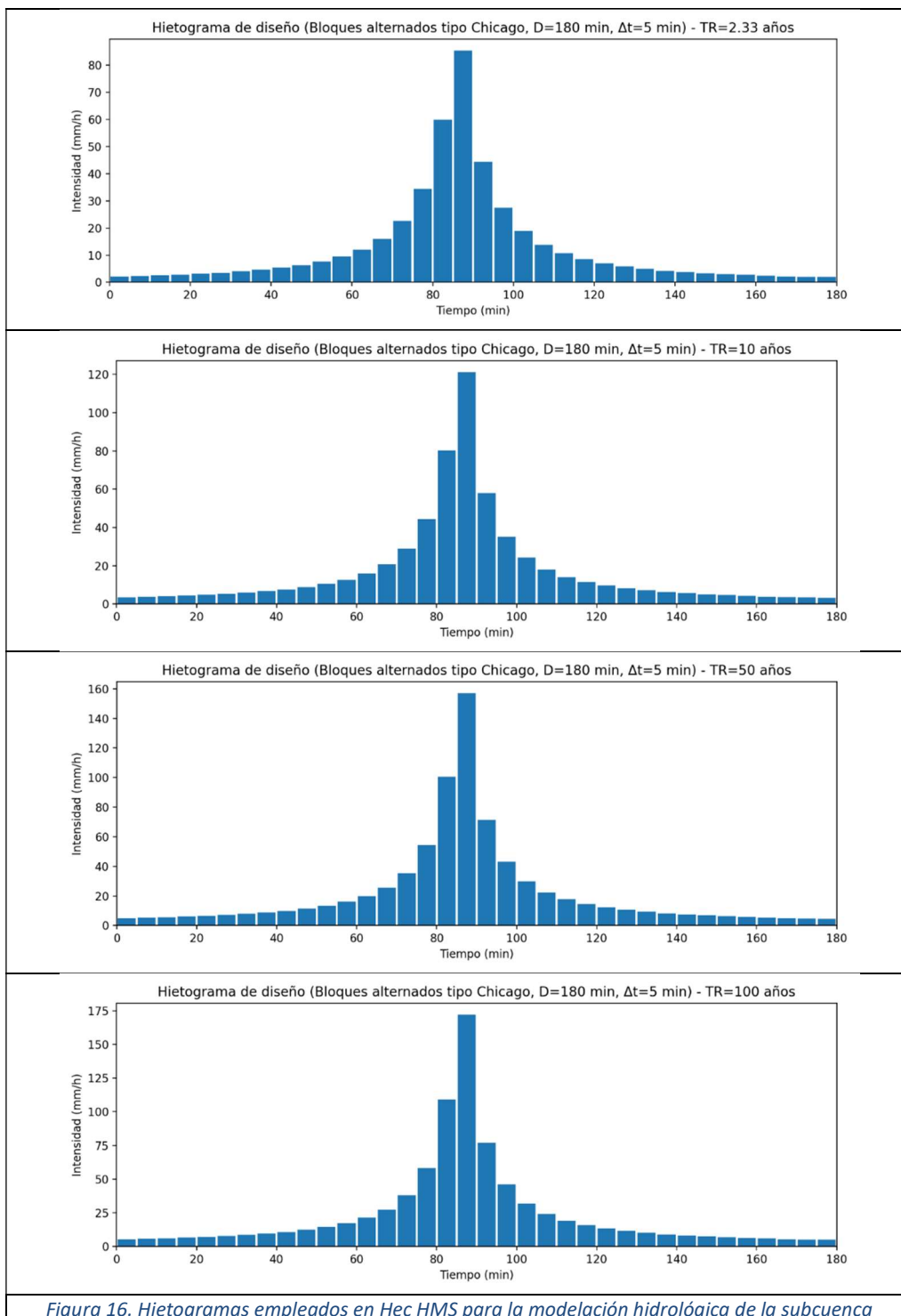
$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{t^c}$$

$$i = \frac{0.94 \times T^{0.18} \times M^{0.83}}{t^{0.66}}$$

donde,

- I: intensidad de precipitación (mm/h)
 T: Periodo de retorno (años)
 t: Duración de lluvia (min)
 M: precipitación máxima promedio anual en 24h a nivel multianual
 (P = 316,07 mm)

Los hietogramas utilizados dentro de la modelación hidrológica en Hec-HMS, producto de la metodología anteriormente descrita, se muestran en la figura Nro.16



En la tabla Nro.9, se especifica la información principal utilizada dentro de la modelación en Hec HMS para el presente estudio:

Parámetro	Valor
Área	48,4 Km ²
Loss Method	SCS Curve Number
Transform Method	SCS Unit Hydrograph
Initial Abstraction	25,45 mm
Hietogramas	Los especificados en la Figura Nro.16

Tabla 9. Información de ingreso al programa Hec-HMS

Con base en los hietogramas de diseño previamente elaborados se obtuvieron los caudales pico para periodos de retorno de 2.33 años, 10 años, 50 años y 100 años, usando un área de cuenca de 48.4 km², un coeficiente de escorrentía de 0.60 y las intensidades de lluvia correspondientes a una duración de 120 minutos.

A partir de la curva IDF de la estación Apto La Nubia, se obtuvieron intensidades de 23.5, 29.6 y 32.2 mm/h para 10 años, 50 años y 100 años, respectivamente, mientras que para 2.33 años se adoptó una intensidad interpolada de 17.26 mm/h entre las recurrencias de 2 y 3 años. Como resultado, los caudales pico calculados fueron 139.34 m³/s, 189.72 m³/s, 238.96 m³/s y 259.95 m³/s para 2.33 años, 10 años, 50 años y 100 años, respectivamente.

El resumen de los caudales pico transitados en el programa HMS, con base en la modelación realizada para la subcuenca se presenta en la Tabla Nro.10.

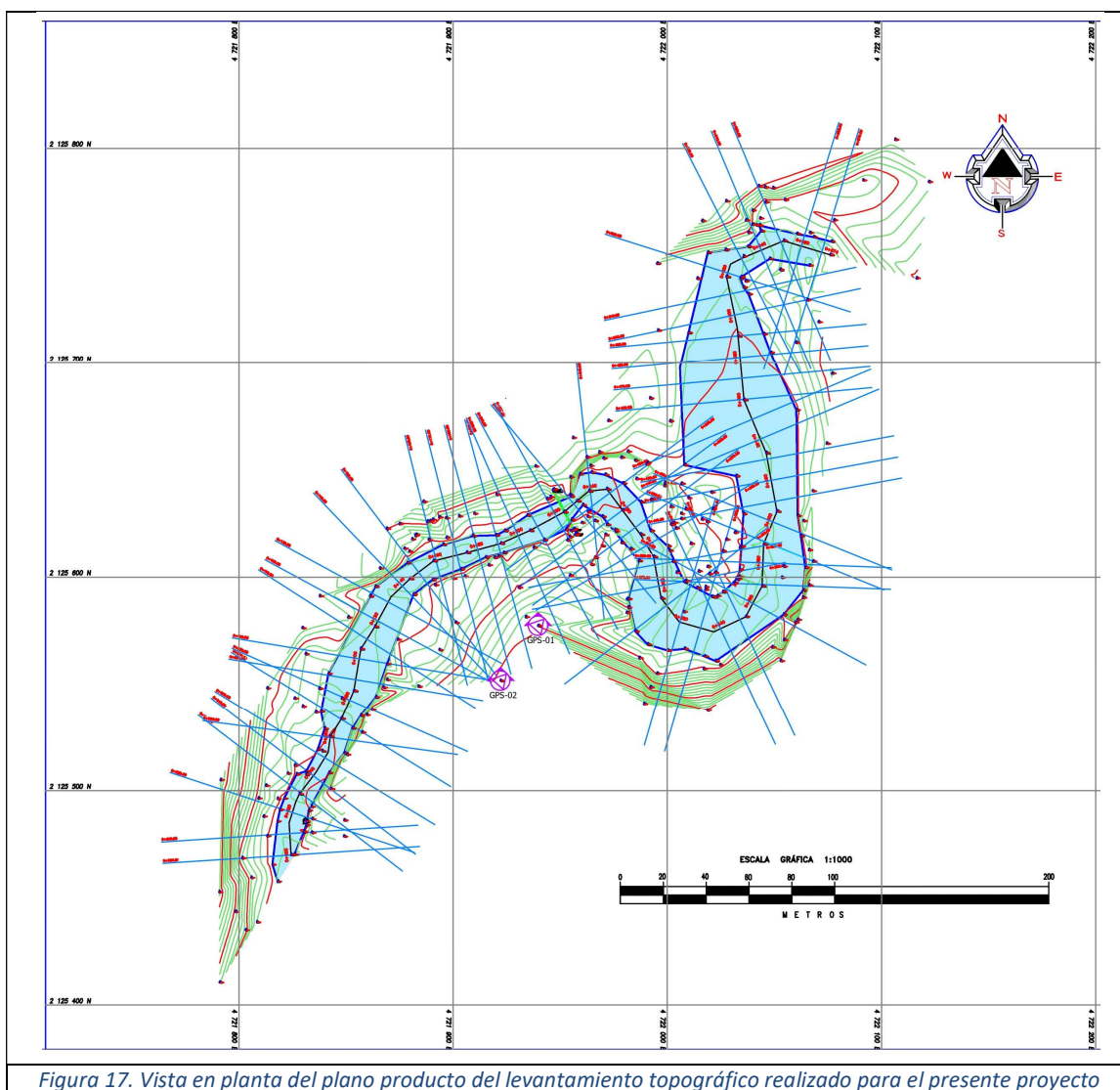
Periodo de Retorno (años)	Caudal Pico (m ³ /s)
Tr = 2,33	139.34
Tr = 10	189.72
Tr = 50	238.96
Tr = 100	259.95

Tabla 10. Caudal asociado a los diferentes periodos de retorno utilizando Método Hidrograma Unitario

13. ESTUDIO HIDRÁULICO

13.1 INFORMACIÓN TOPOBATIMÉTRICA

Como parte del desarrollo del estudio se realizó el levantamiento topobatimétrico en el río en secciones cada diez (10) metros en un total de 574,19 metros de longitud. En la Figura Nro.17 se presenta la localización del levantamiento topobatimétrico realizado en el Río Guacaica en el sector aguas arriba y aguas abajo donde se plantea la construcción del puente peatonal.



	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

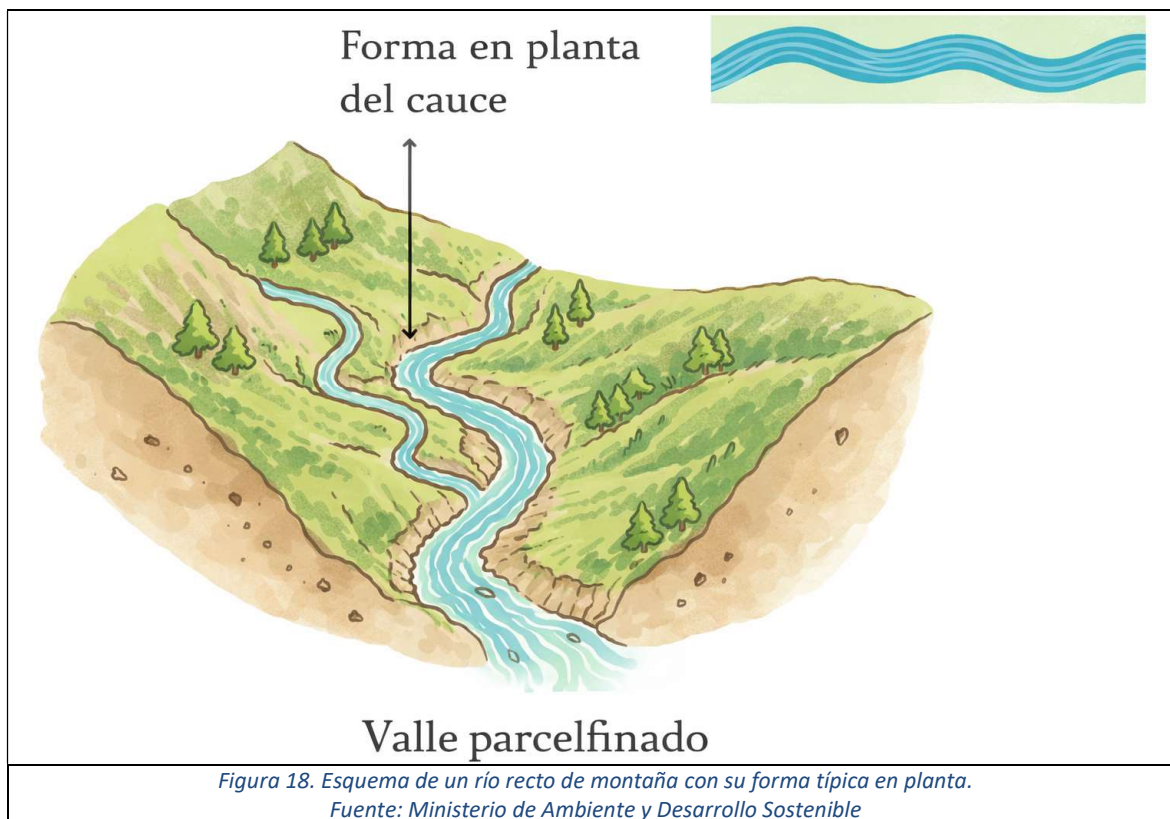
13.2 CARACTERIZACIÓN DEL RIO GUACAICA EN EL TRAMO DE MODELACIÓN

De acuerdo con la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia, el tramo del río Guacaica correspondiente al área de modelación del puente peatonal se clasifica geomorfológicamente como un río de montaña de un solo canal, en valle confinado a parcialmente confinado y con baja sinuosidad local. Esta interpretación se sustenta en la pendiente relativamente alta del cauce, el encajonamiento del valle, la ausencia de multicanalidad estable, la limitada expresión de llanura de inundación en el tramo inmediato y la evidencia de comportamiento torrencial. En consecuencia, el tramo no corresponde a un sistema meándrico, trenzado ni anastomosado, sino a una corriente de montaña cuya dinámica hidráulica y sedimentológica impone criterios conservadores para la implantación y protección del puente. Ver figura Nro.18.

La clasificación del tramo como río de montaña confinado de un solo canal tiene implicaciones directas para el diseño del puente:

- La ocupación del cauce debe ser mínima, evitando interferencias innecesarias con el canal activo y con las zonas de transporte de sedimentos.
- Los estribos y terraplenes deben quedar por fuera de la ronda activa funcional, conforme al criterio de la guía para corrientes de montaña.
- Debe prestarse especial atención a:
 - Socavación general,
 - paso de crecientes torrenciales,
 - Transporte de sedimentos gruesos y material flotante,
 - Estabilidad de márgenes y apoyos.
- La sección hidráulica no debe analizarse como una sección típica de planicie o de río meándrico, sino como una corriente de montaña con alta energía y limitada llanura de inundación.

Página 38	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	--	---



13.3 METODOLOGÍA

El análisis hidráulico del río Guacaica se realizó a partir de un modelo generado con la herramienta computacional HEC-RAS, desarrollada por el Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos de América (USACE, por sus siglas en inglés).

En el presente numeral se describen las bases matemáticas empleadas en la modelación, las características del modelo construido, los caudales de modelación y los escenarios planteados para el análisis.

13.1.1 Modelación del Cauce en HEC-RAS

Con el modelo generado es posible realizar análisis del comportamiento hidráulico de flujo a superficie libre para condiciones de flujo permanente y no permanente, cálculos hidrodinámicos de lecho móvil y transporte de sedimentos. El procedimiento básico se fundamenta en las siguientes ecuaciones y supuestos (HEC-RAS, River Analysis System Hydraulic Reference Manual, 2010):

✓ Ecuación de energía

$$y_2 + z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = y_1 + z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e$$

Donde,

y_1, y_2 = Profundidad del agua en la sección

z_1, z_2 = Cota de fondo en la sección

V_1, V_2 = Velocidad media

α_1, α_2 = coeficiente de Coriolis

g = aceleración de la gravedad

h_e = pérdida de energía

✓ Ecuación de Pérdida de Energía

$$h_e = LS_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right|$$

Donde,

L = Longitud equivalente de cada tramo

S_f = Pendiente de fricción representativa entre dos secciones

C = Coeficiente de pérdida por expansión o contracción

✓ **Longitud equivalente**

$$L = \frac{L_{izq}Q_{izq} + L_{central}Q_{central} + L_{der}Q_{der}}{Q_{izq} + Q_{central} + Q_{der}}$$

Donde,

L_{izq} , $L_{central}$, L_{der} = Longitud entre cada sección especificada para la ribera izquierda, cauce principal y ribera derecha

Q_{izq} , $Q_{central}$, Q_{der} = Caudal medio aritmético entre los flujos a través de la ribera izquierda, cauce principal y ribera derecha

✓ **Ecuación de Manning**

$$Q = \frac{1}{n} AS^{1/2}R^{2/3}$$

Donde,

Q = Caudal del cauce

n = Coeficiente de Manning (rugosidad del cauce)

S = Pendiente longitudinal del cauce

A = Área hidráulica

R = Radio hidráulico

13.1.2 Características del Modelo

El modelo hidráulico del río Gucaica se construyó para estudiar el comportamiento del río frente al tránsito de caudales asociados a crecientes extraordinarias, en régimen permanente. A continuación, se describen las características particulares del modelo:

✓ **Morfología del cauce**

Como se mencionó en el numeral 13.1, se recopiló información necesaria que permitiese modelar con un alto grado de detalle la morfología del río Guacaica. En la Tabla Nro.11 se relaciona la información empleada para la definición de la morfología.

Desde Abscisa	Hasta Abscisa	Long (m)	Fuente de información
K0+000	K0+220	220	Topobatemetría, 2025. Secciones cada 10 metros Número total secciones: 22
K0+220	K0+420	200	Topobatemetría, 2025. Secciones cada 10 metros Número total secciones: 20
K0+420	K0+574	154	Topobatemetría, 2025. Secciones cada 10 metros Número total secciones: 15
Total			Número total Secciones: 57

Tabla 11. Información de la Modelación

Con base en las fuentes de información relacionadas en la tabla Nro.11, fue posible generar la geometría en la modelación.

✓ **Coeficientes de rugosidad**

Después de analizar las características de la cobertura del lecho a lo largo del río Guacaica se determinó utilizar el método de Cowan o método multiparamétrico para seleccionar el coeficiente de rugosidad del río a utilizar en la modelación.

✓ **Método de Cowan o multiparamétrico**

Cowan, en 1956, desarrolló una expresión que permite determinar el valor del coeficiente de Manning a través de la interacción de diferentes parámetros que permiten describir o valorar características concretas de un cauce. La expresión es la siguiente:

$$n = (n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m$$

En esta expresión, el valor del coeficiente de rugosidad de Manning n depende de:

 JIMÉNEZ CASTRO S.A.S. GEOTECNIA ESPECIALIZADA	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

n_b : un valor base de n para un cauce recto, uniforme y liso en función del material de fondo

n_1 : factor de corrección para implementar el efecto de las irregularidades superficiales

n_2 : un valor que añade las variaciones de forma y tamaño de la sección del cauce

n_3 : un valor que implementa el efecto de obstrucciones

n_4 : un valor que incorpora el efecto de presencia de vegetación

m : un factor corrector que implementa la sinuosidad del cauce

Para poder dar valores al coeficiente de manning con base en la literatura, se presenta en referencia fotografías representativas del río Guacaica en el tramo modelado. Ver Figura Nro.19

P á g i n a 43	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------------	---	---



Figura 19. Fotografías representativas río Guacaica en el sitio donde se plantea la construcción del puente peatonal

A continuación se presenta la base para la selección de los valores para la ecuación:

Selección de valores para n_b

n_b : su valor depende si se clasifica como un *canal estable* (Stable channel) o un *canal de arena* (sand Channel).

Un *canal estable* se define como un canal en el que la cama se compone de suelo firme, grava, adoquines, cantos rodados, o roca y que permanece relativamente sin cambios a través de la mayor parte de la gama en el flujo. La Tabla Nro.12 (Aldridge & Garrett, 1973, citado por Arcement & Schneider, 1984) enumera los valores base n para canales estables y canales de arena. Los valores de n_b de Benson y Dalrymple generalmente se aplican a las condiciones cercanas al promedio, mientras que los valores n_b de Ven Te Chow son el valor más suave posible para un material de cama base.

Channel or flood-plain type	Millimeters	Benson and Dalrymple (1967) ¹	Chow (1959) ²
Sand Channels	0.2	0.012	-
	0.3	0.017	-
	0.4	0.020	-
	0.5	0.022	-
	0.6	0.023	-
	0.8	0.025	-
	1.0	0.026	-
Stable Channels and Flood plains			
Concrete		0.012-0.018	0.011
Rock Cut		-	0.025
Firm Soil	-	0.025-0.032	0.025
Coarse sand	-	0.026-0.035	-
Fine gravel	-	-	0.024
Gravel	-	0.028-0.035	0.024
Coarse gravel	-	-	0.026
Cobble	-	0.030-0.050	-
Boulder	-	0.040-0.070	-

¹ Straight uniform channel

²Smoothest channel attainable in indicated material

Tabla 12. Valores para n_b según Benson & Dalrymple (1967) y Chow (1959)

Para el caso, se supone un valor para Canales de Roca de $n_b = 0.025$, tomado según Chow (1959) y teniendo en cuenta el comportamiento registrado en las fotografías de la lámina de agua, el cual indica un régimen bajo de flujo.

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

Selección de valores para n_1 – Irregularidad

Donde la proporción de ancho a profundidad es pequeña, la rugosidad causada por los bancos erosionados y escallozados, los puntos de proyección y las raíces de los árboles expuestos a lo largo de los bancos deben ser contabilizadas por ajustes bastante grandes. Chow (1959) y Benson & Dalrymple (1967) mostraron que los bancos severamente erosionados y escallozados pueden aumentar los valores de n hasta 0,02. Pueden ser necesarios ajustes más grandes para los bancos muy grandes e irregulares que tienen puntos de proyección.

Para el caso se considera que no aplica la corrección del n_1 por irregularidad para ningún tramo del río modelado, es decir que $n_1 = 0.000$.

Selección de valores para n_2 – Variación en las Secciones Transversales del Canal

El valor de n no se ve afectado significativamente por los cambios relativamente grandes en la forma y el tamaño de las secciones transversales si los cambios son graduales y uniformes. Una mayor rugosidad está asociada con la alternancia de secciones grandes y pequeñas donde los cambios son abruptos. El grado del efecto de los cambios en el tamaño del canal depende principalmente del número de alternancias de secciones grandes y pequeñas y secundariamente de la magnitud de los cambios. Los efectos de las curvas agudas, las constricciones y el cambio de lado a lado del canal de agua baja pueden extenderse río abajo durante varios cientos de pies. El valor n para un alcance por debajo de estas perturbaciones puede requerir un ajuste, aunque ninguno de los factores que producen rugosidad son evidentes en el alcance del estudio. Un aumento máximo en n de 0,003 será el resultado de la cantidad usual de curvatura del canal que se encuentra en los canales diseñados y los alcances de los canales naturales utilizados para computar la descarga

Para el caso se considera que no aplica la corrección del n_2 por variación de las secciones transversales, es decir que $n_2 = 0.000$.

Selección de valores para n_3 – Obstrucciones

Las obstrucciones-como troncos, tocones, cantos rodados, escombros, revestimientos y muelles de puentes-perturban el patrón de flujo en el canal y aumentan la rugosidad. La cantidad de aumento depende de la forma de la obstrucción; su tamaño en relación con el de la sección transversal; y el número, la disposición y el espaciado de las obstrucciones. El efecto de las obstrucciones en el coeficiente de rugosidad es una función de la velocidad del flujo. Cuando la velocidad de flujo es alta, una obstrucción ejerce una esfera de influencia que es mucho mayor que la obstrucción porque la obstrucción afecta el patrón de flujo para distancias considerables en cada lado. La esfera de influencia para las velocidades que generalmente ocurren en los canales que tienen pendientes suaves a moderadamente pronunciadas es de aproximadamente 3 a 5 veces el ancho de la obstrucción. Varias obstrucciones pueden crear las esferas superpuestas de influencia y pueden causar perturbaciones

P á g i n a 46	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------------	--	---

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

considerables, a pesar de que las obstrucciones pueden ocupar sólo una pequeña parte de una sección transversal del canal.

Para el caso se considera que la corrección del n_3 es nula, dadas las dimensiones del río, su sección y las obstrucciones que para el caso se trata de un puente peatonal, es decir que $n_3 = 0.000$.

Selección de valores para n_4 – Vegetación

A medida en que la vegetación afecta a n depende de las profundidades de flujo, el porcentaje del perímetro humedecido cubierto por la vegetación, la densidad de vegetación por debajo de la línea de agua alta, el grado en que la vegetación es aplanada por el agua alta, y el alineamiento de la vegetación en relación con el flujo. Las filas de vegetación que se encuentran paralelas al flujo pueden tener menor efecto de filas de vegetación que son perpendiculares al flujo. Los valores de ajuste dados se aplican a los canales construidos que son estrechos en anchura. En los canales anchos que tienen pequeñas proporciones de profundidad a anchura y no hay vegetación en la cama, el efecto de la vegetación del Banco es pequeño, y el ajuste máximo es de aproximadamente 0,03. Los valores de ajuste más grandes que se dan se aplican sólo en lugares donde la vegetación cubre la mayor parte del canal.

Para el caso se considera que el valor de n_4 debe considerarse $n_4 = 0,000$, dado que la lámina mínima y máxima siempre está sobre el material granular, sin vegetación.

Selección de valores para m – Serpenteo

Al seleccionar el valor de m , el grado de meandro depende de la relación de la longitud total del alcance del canal serpenteante. El meandro se considera *menor* para las proporciones de 1.0 a 1.2; *apreciable* para las proporciones de 1.2 a 1.5, y *severa* para las proporciones de 1.5 y mayores; los meandros pueden aumentar los n valores tanto como 30 por ciento donde el flujo está confinado dentro de un canal de la corriente. El ajuste de meandro solo debe tenerse en cuenta cuando el flujo se limita al canal. Puede haber muy poco flujo en un canal serpenteante cuando hay flujo de inundación-llanura.

Para el caso, $m = 1.0$, dado que se considera menor el serpenteo.

En la Tabla Nro.13 se presenta los valores seleccionados para el canal principal y la zona de taludes del río Guacaica.

Página 47	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	--	---

Valores	Canal Principal
n _b	0,025
n ₁	0,000
n ₂	0,000
n ₃	0,000
n ₄	0,000
m	1,0
n	0,025

Tabla 13. Valores Seleccionados para cálculo del Coeficiente de Manning del río Guacaica

Para confirmar el cálculo se realizó determinación de granulometría del material del río, mediante la norma INVIAS E213-07 y se calculó el n de manning mediante la siguiente ecuación:

$$n = 0,041 * D_m^{1/6}$$

donde $D_m = 1.25 * D_{50}$

n : coeficiente de manning

D_{50} : tamaño de la partícula de una muestra dada, tal que la masa de las partículas de diámetro inferior es igual a la masa de las partículas del diámetro superior, $D_{50} = 0,050m$.

Así mismo, se calculó el n de Manning con las ecuaciones de Garde & Raju ($n = 0.047 * D_{50}^{1/6}$) y de Strickler ($n = 0.0417 * D_{50}^{1/6}$), promediando todos estos valores y obteniendo un coeficiente de rugosidad de **0.025**.

✓ Condiciones de frontera

Para las condiciones de frontera tanto aguas arriba como aguas abajo, se llevó a cabo un cálculo hidráulico para profundidad normal de flujo, determinando de esta forma el tipo de flujo y estableciendo si el perfil hidráulico se construye a partir de un flujo supercrítico, subcrítico o mixto. A continuación, se presentan las condiciones de frontera para el modelo hidráulico del río Guacaica, ver Figura Nro.20.

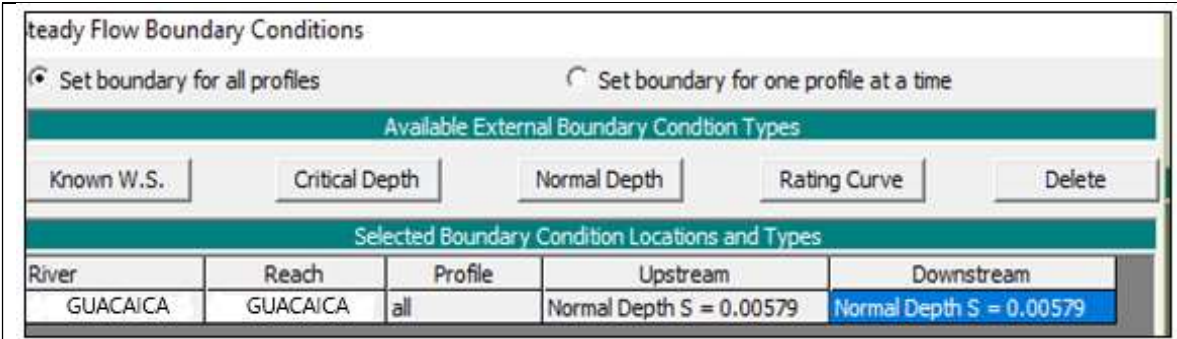
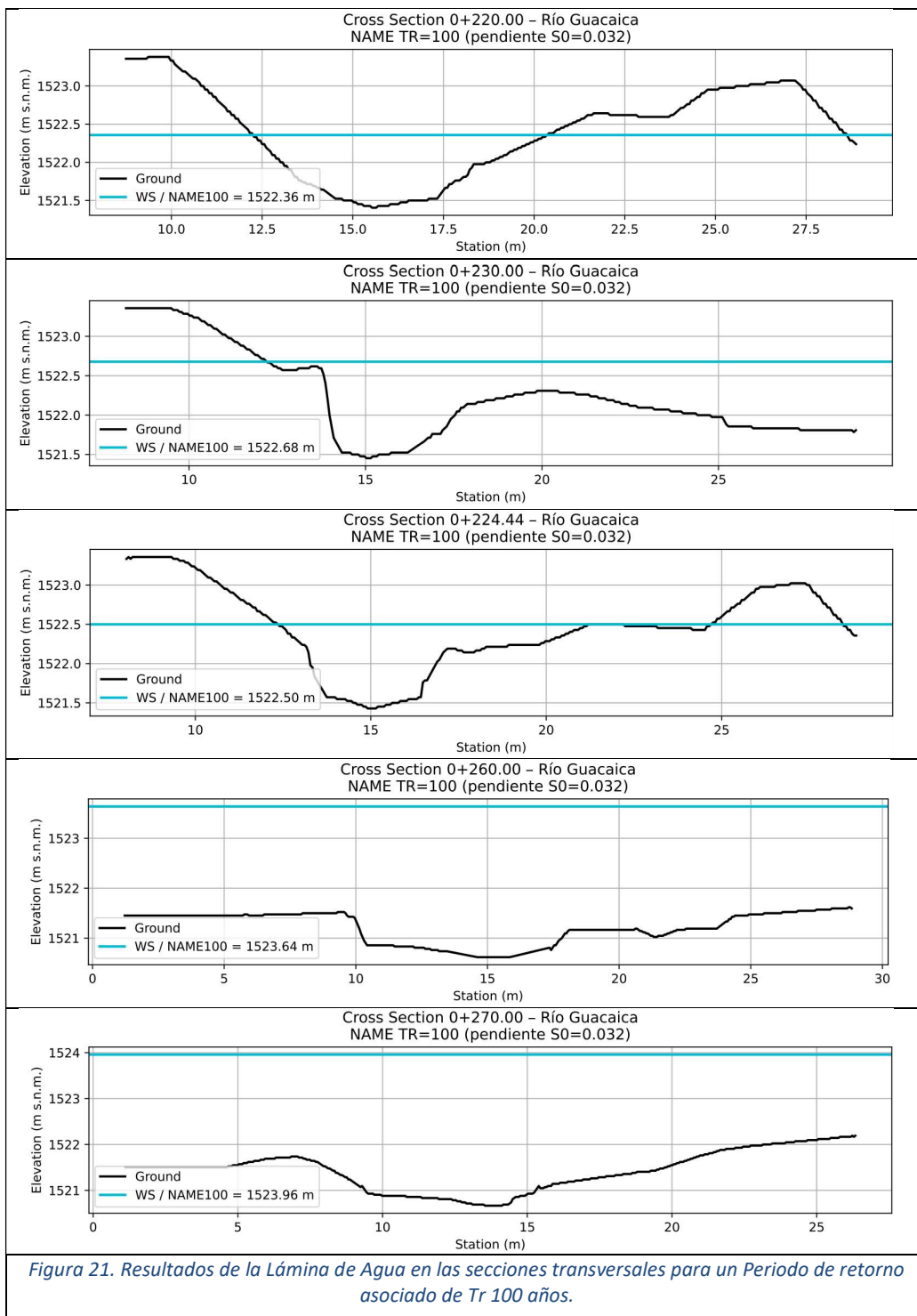


Figura 20. Condiciones de frontera – Flujo Permanente.

✓ **Resultados**

En la figura Nro.21, se presentan algunas secciones resultado para la lámina de agua del tramo modelado para un periodo de retorno de 100 años.



	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

14. ESTUDIO DE SOCAVACIÓN

14.1 PROCESO DE SOCAVACIÓN

La socavación es un proceso natural de los ríos en el cual la interacción del flujo con el cauce genera procesos de pérdida y depósito del material de fondo, principalmente por la velocidad del flujo en determinado tramo del cauce. Generalmente esta socavación es invisible porque todo ocurre bajo el agua y por ello el problema no es considerado hasta cuando se manifiesta de manera irreversible en fallas de las estructuras. Para el presente caso, el proceso a analizar será la socavación general que pueda ocurrir en la sección.

La socavación o sedimentación general del lecho son cambios que se producen a largo plazo y tramos de longitud considerable, lo cual se produce por desbalances naturales o inducidos externamente. Por medio de estos cambios el río trata de alcanzar de nuevo su estado de equilibrio.

El mecanismo de socavación/sedimentación del lecho se da por el continuo desbalance entre la capacidad de transporte sólido y el transporte sólido real de las secciones del río. Cuando la capacidad de transporte excede al transporte sólido real en la sección se produce la socavación del lecho hasta que se dé un nuevo equilibrio, cuando la capacidad de transporte es menor al transporte sólido real en la sección se produce la sedimentación del lecho.

14.2 CÁLCULO SOCAVACIÓN GENERAL

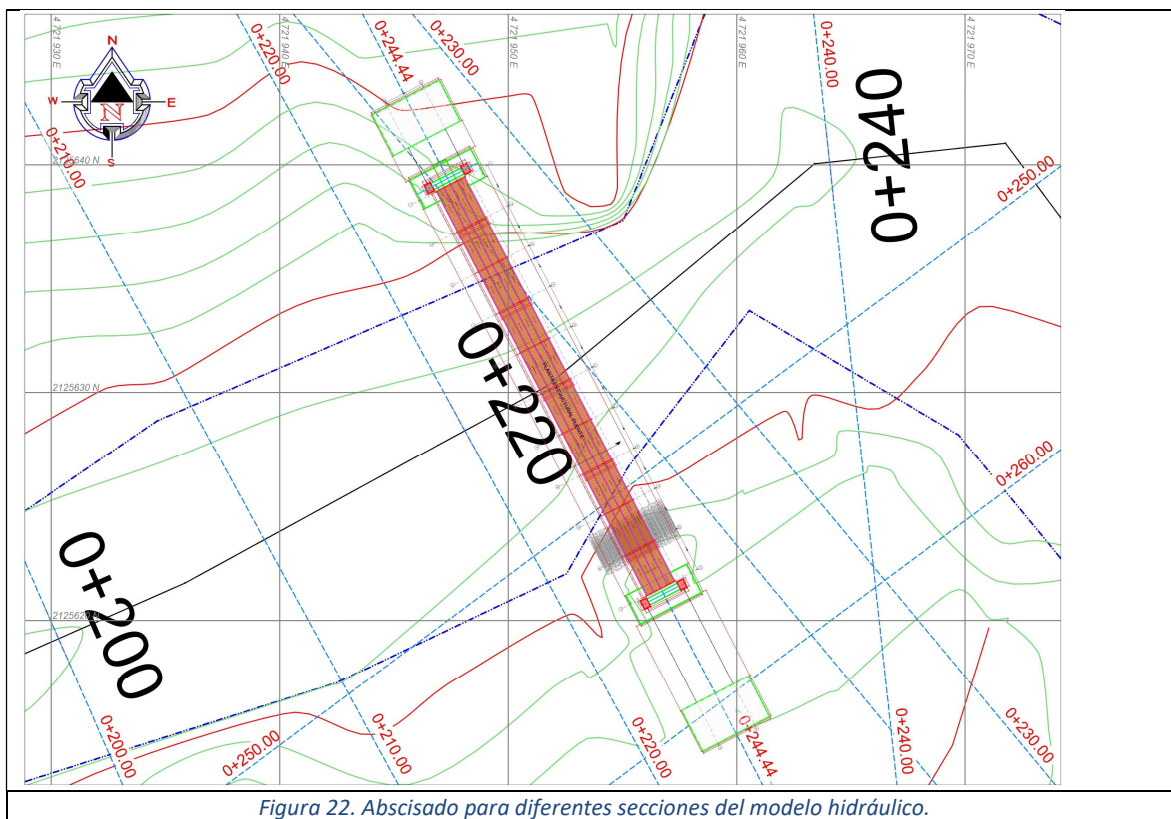
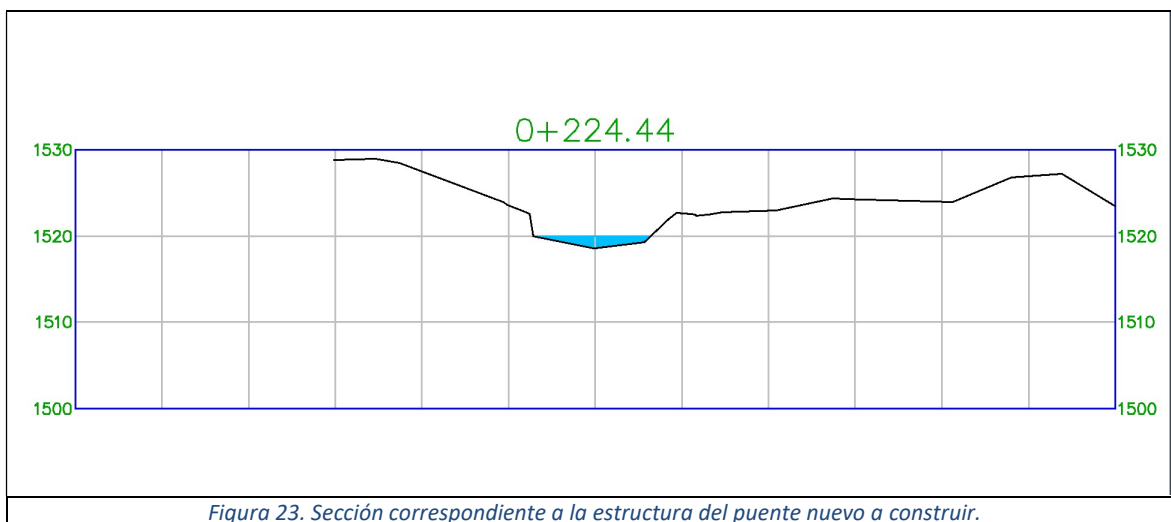
Para el cálculo de socavación, se llevó a cabo el procedimiento incluido en el Manual de Drenaje para Carreteras del INVIAS, así como la Metodología para Socavación de Puentes de la Universidad del Cauca. De lo anterior, se tiene en cuenta la siguiente información:

$B = 16.67\text{m}$ Ancho del cauce.

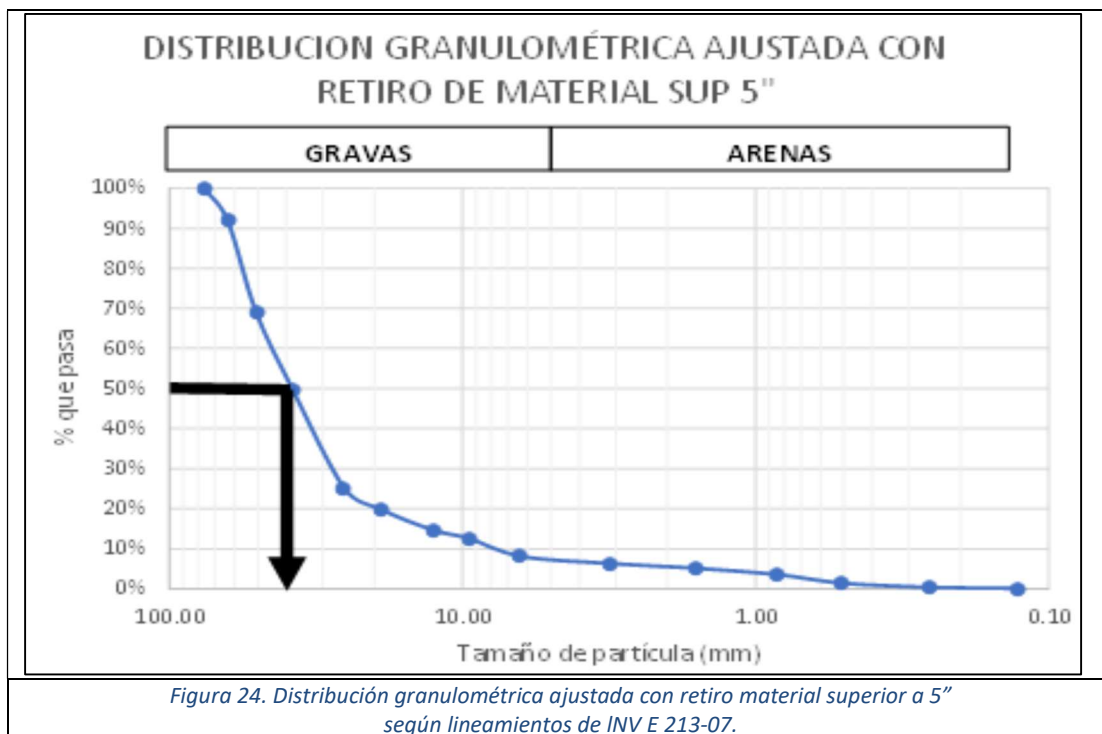
$B_e = 16.67\text{m}$ Ancho efectivo del cauce.

La sección K0+244.44 refleja el perfil donde se ubicará la nueva estructura del puente peatonal a construir como se observa en la figura Nro.22 y figura Nro.23.

Página 51	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	--	---



Para obtener D_{50} se realiza un análisis granulométrico al material de fondo, obteniéndose la siguiente distribución granulométrica como se muestra en la Figura Nro.24, donde $D_{50}=0.05m$:



La profundidad h para la sección K0+244.44, se tiene que el NAME hallado para un periodo de retorno de 100 años corresponde a la cota 1522.50 y que el fondo se encuentra en la cota 1518.588; es así como la profundidad antes de la socavación medida desde el NAME, correspondiente al valor de 3,912m; luego la velocidad de flujo hallada corresponde a:

$$V_c = 6.19 * h^{\frac{1}{6}} * D_{50}^{\frac{1}{3}} \quad V_c = 2.86m/s$$

Así mismo, teniendo en cuenta la Ecuación de Manning, se halla la velocidad normal del flujo para la tormenta de diseño, así:

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

$$n = 0.025$$

$$A_m = 88.53m^2$$

$$P_m = 30.41m$$

$$R_h = 2.91m$$

$$S_0 = 0.00579$$

$$v = \frac{1}{n} * R_h^{\frac{2}{3}} * S_0^{\frac{1}{2}} = 6.20m/s$$

Según HEC-18/FHWA, la Velocidad Erosiva se obtiene a partir del diámetro característico del sedimento del lecho mediante la siguiente expresión:

$$V_c = K\sqrt{(s - 1) * g * D} = 0.99m/s$$

donde:

V_c = velocidad crítica de erosión (m/s)

s = peso específico relativo del sedimento (~2.65 para cuarzo)

g = gravedad (9.81 m/s²)

D = diámetro del sedimento (m) = 0.05m

$K \approx 1.0 - 1.2$ (coeficiente empírico) = 1.1 (para el presente caso)

Para la sección del puente (K0+224.44) y con el NAME de 100 años adoptado, la velocidad media de flujo es de 2.86m/s mientras que la velocidad erosiva del lecho para el material granular del cauce es de 0.99m/s. Como la velocidad de flujo es superior a la velocidad erosiva, el flujo de avenida de 100 años presenta capacidad suficiente para movilizar arenas gruesas, gravas y cantos pequeños a medianos, lo cual confirma que en el tramo del puente existe potencial erosivo durante crecientes extraordinarias y es susceptible a procesos de socavación en ausencia de protección y/o empotramiento suficiente de la cimentación. Se calculó el coeficiente de frecuencia β y el exponente empírico del fondo del cauce ante la acción del flujo z , así:

$$\beta = \text{coeficiente de frecuencia} = 0.7929 + 0.0973 * \text{Log}(T_r) = 0.9875$$

$$z = 0.394557 - 0.04136 * \text{Log}(D) - 0.00891\text{Log}^2(D) = 0.298598$$

Página 54	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	--	---

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

La profundidad de socavación general en la sección del puente se calculó mediante la metodología de **Lischvan–Lebediev** para material granular homogéneo:

$$h_s = \left(\frac{h_0^{5/3} \cdot S^{1/2}}{n \cdot 0.68 \cdot \beta \cdot D_m^{0.28}} \right)^{\frac{1}{1+x}}$$

donde:

- h_s = **tirante final de equilibrio** después de la socavación,
- h_0 = tirante inicial antes de la socavación,
- S = pendiente hidráulica,
- n = coeficiente de Manning,
- β = coeficiente por período de retorno
- D_m = diámetro medio del material granular en **mm**,

Adoptando un tirante inicial $h_0=2.50\text{m}$, pendiente hidráulica $S=0.032$, coeficiente de Manning $n=0.045$, coeficiente de frecuencia $\beta=0.9875$ para período de retorno de 100 años y un diámetro medio representativo del lecho $D_m=50\text{ mm}$. Con estos parámetros se obtuvo un tirante final de equilibrio $h_s=5.21\text{ m}$, equivalente a una profundidad de socavación general de **$y_s=2.71\text{m}$** respecto al fondo inicial.

Se recomienda la instalación de bolsacretos o similares en la margen sur del puente, desde el nivel actual del fondo del cauce hasta la cota correspondiente al NAME para período de retorno de 100 años, como medida de protección hidráulica orientada a controlar los procesos de erosión y socavación en dicho sector. Esta intervención busca estabilizar el talud del cauce y proteger la base de la margen frente a las velocidades y esfuerzos hidráulicos asociados a eventos de creciente extraordinaria. En contraste, en la margen norte del puente se adelantaron investigaciones geológicas y geotécnicas, incluyendo exploración directa mediante sondeos y reconocimiento del macizo, las cuales evidenciaron la presencia de roca competente aflorante o a muy poca profundidad, condición que proporciona estabilidad natural frente a procesos erosivos. En consecuencia, y de acuerdo con los resultados obtenidos en dichas investigaciones, no se considera necesaria la implementación de obras de protección adicionales en la margen norte, limitándose las medidas de control de socavación al sector sur del cauce.

P á g i n a 55	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------------	--	---

 JIMÉNEZ CASTRO S.A.S. GEOTECNIA ESPECIALIZADA	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

Así mismo, se recomienda que el borde de la zapata de cimentación del puente se disponga a una distancia horizontal mínima igual o superior a 1.75m respecto a la cara del talud de la margen del río, con el fin de garantizar un adecuado margen de seguridad frente a posibles procesos de erosión y socavación en el entorno inmediato del cauce. Esta medida busca evitar que la cimentación se ubique dentro de la zona potencialmente afectada por la inestabilidad del talud o por la acción directa del flujo durante eventos de creciente, permitiendo además mantener un confinamiento adecuado del suelo de apoyo y preservar la integridad estructural de la zapata. En consecuencia, durante la implantación definitiva de la estructura se deberá verificar que la ubicación de la cimentación cumpla con esta separación mínima, ajustando su posición si es necesario para asegurar condiciones apropiadas de estabilidad geotécnica e hidráulica en la margen del río.

Página 56	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	--	---

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

15. CONCLUSIONES

A partir de la información hidrológica, topográfica, geomorfológica y geotécnica disponible, así como del análisis hidráulico realizado para el tramo del río Guacaica en el sector del proyecto del puente peatonal, se establecen las siguientes conclusiones:

- El análisis hidrológico realizado a partir de la información pluviométrica disponible y de las curvas IDF de la estación Apto La Nubia permitió estimar los caudales de diseño asociados a diferentes períodos de retorno, obteniéndose para el evento extremo de 100 años un caudal aproximado de 260 m³/s, valor adoptado como base para el análisis hidráulico del cauce en el sitio del proyecto.
- El análisis hidráulico desarrollado con base en las secciones topográficas levantadas en el cauce permitió estimar el comportamiento del flujo en el tramo de modelación, determinándose para el evento de 100 años un Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) aproximado de 1522.50 m.s.n.m. en la sección del puente, valor que fue propagado aguas arriba y aguas abajo considerando la pendiente hidráulica del cauce.
- El comportamiento geomorfológico del tramo analizado corresponde a un río de montaña de un solo canal, con valle confinado a parcialmente confinado y baja sinuosidad local, condición que implica una dinámica fluvial dominada por pendientes relativamente altas, mayor energía hidráulica y capacidad de transporte de sedimentos.
- Las velocidades estimadas para el evento de diseño indican que el flujo presenta capacidad de movilización de material granular del lecho, lo cual es consistente con la morfología observada en campo y confirma la posibilidad de ocurrencia de procesos de erosión y socavación durante crecientes extraordinarias.
- La evaluación de la socavación general mediante la metodología de Lischtván–Lebediev permitió estimar una profundidad de socavación del orden de 2.7m respecto al fondo actual del cauce, valor coherente con las condiciones hidráulicas y sedimentológicas del tramo analizado.
- El análisis geológico–geomorfológico del cauce indica que la margen norte del río presenta afloramientos de macizo rocoso competente, lo cual proporciona condiciones naturales de estabilidad frente a procesos erosivos, reduciendo significativamente la probabilidad de socavación en dicho sector.
- Por el contrario, la margen sur presenta materiales más susceptibles a erosión, razón por la cual requiere la implementación de medidas de protección hidráulica que contribuyan a garantizar la estabilidad del cauce y la seguridad de la estructura proyectada.

Página 57	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
-------------	--	---

	VOLUMEN IV. HIDROLOGÍA, HIDRÁULICA Y SOCAVACIÓN	RG-04-IO1001
		Versión 1
		Abril 2024

- En términos generales, los resultados obtenidos indican que el cauce del río Guacaica en el tramo del proyecto presenta condiciones hidráulicas compatibles con la implantación de un puente peatonal, siempre que se adopten medidas adecuadas de protección y se respeten las distancias mínimas de seguridad entre el cauce y los elementos de cimentación.

Con base en los resultados del análisis hidrológico e hidráulico realizado, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas para el diseño e implantación del puente peatonal:

- Se recomienda adoptar como referencia para el diseño hidráulico de la estructura el Nivel de Aguas Máximas Extraordinarias (NAME) correspondiente al período de retorno de 100 años, estimado en 1522.50 m.s.n.m. en la sección del puente, garantizando que los elementos estructurales del tablero mantengan el gálibo hidráulico requerido sobre este nivel.
- Considerando los resultados del análisis de socavación, se recomienda que los elementos de cimentación del puente se dispongan a una profundidad suficiente para garantizar su estabilidad frente a los procesos de erosión potencial del cauce, teniendo en cuenta la profundidad de socavación estimada y un margen adicional de seguridad estructural.
- Con el fin de reducir los procesos de erosión en la margen sur del cauce, se recomienda la instalación de bolsacretos desde el nivel actual del fondo del río hasta la cota del NAME de 100 años, de manera que se estabilice el talud de la margen y se controle el desarrollo de procesos de socavación local durante eventos de creciente.
- Se recomienda igualmente que el borde de la zapata de cimentación del puente se disponga a una distancia horizontal mayor a 1.70 m respecto a la cara del talud de la margen del río, con el fin de evitar que la cimentación se ubique dentro de la zona potencialmente afectada por procesos erosivos o por inestabilidad del talud.
- Teniendo en cuenta la presencia de macizo rocoso competente en la margen norte del río, evidenciada y reportada en las investigaciones geológicas y geotécnicas realizadas, no se considera necesaria la implementación de obras adicionales de protección hidráulica en dicho sector.
- Se recomienda que durante la etapa de construcción se realice un control adecuado de las actividades dentro del cauce, evitando alteraciones innecesarias de la sección hidráulica que puedan modificar el comportamiento del flujo o inducir procesos erosivos adicionales.
- Finalmente, se recomienda que cualquier modificación futura en el entorno del cauce, como cambios en el uso del suelo o intervenciones hidráulicas aguas arriba, sea evaluada desde el punto de vista hidrológico e hidráulico con el fin de verificar que no se generen cambios significativos en las condiciones de flujo consideradas en el presente estudio.

P á g i n a 58	ESTUDIOS TÉCNICOS QUE PERMITAN DETERMINAR LA ALTERNATIVA MÁS ADECUADA PARA LA CONSTRUCCIÓN DE UN PUENTE PEATONAL SEGURO, ESTABLE Y DURADERO SOBRE EL RÍO GUACAICA, LOCALIZADO EN LA ZONA RURAL EN EL LÍMITE ENTRE LOS MUNICIPIOS DE MANIZALES Y NEIRA DEPARTAMENTO DE CALDAS.	3148464789 www.jimenezcastro.com.co direccion@jimenezcastro.com.co Nit:900.806.877-7
------------------	--	---

16. BIBLIOGRAFÍA

- Aparicio, F. J. (2013). Fundamentos de hidráulica de ríos y obras fluviales. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Chow, V. T. (1959). Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill.
- Federal Highway Administration – FHWA. (2012). HEC-18: Evaluating Scour at Bridges. Hydraulic Engineering Circular No. 18.
- Federal Highway Administration – FHWA. (2016). HEC-RAS River Analysis System – Hydraulic Reference Manual. U.S. Army Corps of Engineers.
- Instituto Nacional de Vías – INVÍAS. (2018). Manual de drenaje para carreteras. Bogotá, Colombia.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia. Bogotá, Colombia.
- Lischtván, G., & Lebediev, V. (1959). Métodos de cálculo de socavación general en cauces aluviales.
- U.S. Army Corps of Engineers. (2016). HEC-RAS Hydraulic Reference Manual.