

# FORTALECIMIENTO AL PROYECTO DE FORMULACIÓN ADOPCIÓN E IMPLEMENTACIÓN DEL PLAN DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL POT DEL MUNICIPIO DE BARRANCABERMEJA, SANTANDER. CONTRATO No. 3349-17

Estudio De Amenaza Por Inundación Y Avenidas Torrenciales En El  
Área Rural Y Urbana Del Municipio De Barrancabermeja  
Volumen I: Estudio del Área Rural  
*Barrancabermeja, Santander, Colombia - Febrero 2018*



BARRANCABERMEJA  
ES POSIBLE



## Gestores del Proyecto

**Darío Echeverri Serrano**

Alcalde Municipio de Barrancabermeja 2016-2019,  
Municipio de Barrancabermeja

**Elizabeth Lobo Gualdrón,**

Asesora de Planeación  
Oficina Asesora de Planeación, Barrancabermeja

## Autores

**Gabriel Alberto Bayona Fetecua**

Geólogo, Universidad EAFIT • Magíster en Ciencias de la Tierra. Universidad EAFIT • Director de Proyecto,  
SAGGES S.A.S. • info@sagges.com.

**Andrés Felipe Duque Pérez**

Ingeniero Civil, Universidad Escuela de Ingeniería de Antioquia • Magíster En Ingeniería - Aprovechamiento De Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia – Sede Medellín • Coordinador de ingeniería hidrología,  
SAGGES S.A.S.

## Colaboradores

**Christian Camilo Herrera Uribe**

Ingeniero Civil, Universidad de Medellín • Especialista en Vías y Transporte, Universidad Nacional de Colombia  
•Ingeniero Especialista, SAGGES S.A.S.

## TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN .....	1
1 GENERALIDADES.....	3
1.1 Localización del Área de Estudio.....	3
1.1.1 Localización General.....	3
1.1.2 Localización Hidrográfica.....	4
1.1.3 Área de Estudio .....	11
1.2 Objetivos .....	11
1.2.1 Objetivo General.....	11
1.2.2 Objetivos Específicos .....	11
1.2.3 Alcance del Estudio .....	12
1.2.4 Descripción de Actividades.....	13
2 ANTECEDENTES, DIAGNÓSTICO Y MARCO CONCEPTUAL.....	15
2.1 Antecedentes.....	15
2.1.1 Caracterización Histórica de Amenazas y Eventos Amenazantes.....	15
2.1.2 Estudios Previos .....	19
2.2 Análisis Conceptual de la Problemática y Diseño de la Metodología de Trabajo .....	27
2.2.1 Modelo hidrológico e hidráulico adecuado.....	28
2.2.2 Metodología General para la Zonificación de la Amenaza.....	28
3 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD .....	30
4 METODOLOGÍA E INFORMACIÓN UTILIZADA .....	32
4.1 Metodología Inundaciones Lentas .....	32
4.1.1 Estimación de Niveles Máximos de la Lámina de Agua .....	32
4.1.2 Estimación de Zonas Inundadas Asociadas a los Eventos de Niveles Máximos.....	36
4.2 Zonificación de la Amenaza .....	37
4.3 Información Utilizada.....	39
4.3.1 Modelo Digital de Elevación (MDE) .....	39
4.3.2 Red de Monitoreo de Datos Hidrológicos del IDEAM .....	40
4.3.3 Amarre Geodésico de la Red de Monitoreo del IDEAM .....	46
4.4 Área de Estudio de inundaciones lentas.....	47
5 ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO.....	48
5.1 Análisis de Series de nivel .....	48
5.1.1 Análisis de valores atípicos.....	48
5.1.2 Análisis de Homogeneidad y Tendencia.....	50
5.1.3 Resultados .....	53
5.1.4 Caracterización Hidrológica de Valores Medios .....	59
5.1.5 Caracterización Hidrológica de Valores Máximos .....	63
5.1.6 Pruebas de Bondad y Ajuste.....	63



5.2	Estimación de las Zonas Inundadas Asociadas a los Eventos de Niveles Máximos ..	68
5.2.1	Manchas de Inundación .....	68
5.2.2	Análisis de Resultados .....	72
6	ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA.....	75
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	78
8	BIBLIOGRAFÍA .....	80

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1	Localización general del municipio de Barrancabermeja .....	3
Figura 1.2	Localización hidrográfica del municipio de Barrancabermeja .....	4
Figura 1.3	modelo simplificado de la estructura del drenaje del municipio .....	6
Figura 1.4	Área de estudio .....	11
Figura 2.1	Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área rural.....	16
Figura 2.2	Reporte de eventos de inundación en el área rural del municipio.....	17
Figura 2.3	Eventos reportados por año .....	18
Figura 2.4	Afectaciones reportadas por año .....	18
Figura 2.5	Región de estudio del POMCA de los ríos Opón y Sogamoso, con respecto a la extensión espacial del área rural .....	20
Figura 2.6	Metodología para la estimación del grado de susceptibilidad a inundaciones en la cuenca del río Opón.....	21
Figura 2.7	Modelo hidrológico-hidráulico implementado en la cuenca del río Opón .....	22
Figura 2.8	Grado de amenaza por inundaciones asociado a las características de flujo en la cuenca del río Opón .....	22
Figura 2.9	Diagrama de flujo para la evaluación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales en la cuenca del río Opón .....	24
Figura 2.10	Susceptibilidad a eventos de inundación en el área rural del municipio .....	25
Figura 2.11	Susceptibilidad a eventos de avenidas torrenciales en el área rural del municipio.....	26
Figura 2.12	Zonificación de la amenaza por inundación en el área rural del municipio...	26
Figura 2.13	Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales en el área rural del municipio.....	27
Figura 3.1	Susceptibilidad a eventos de inundación .....	30
Figura 3.2	Susceptibilidad a eventos de avenidas torrenciales.....	31
Figura 4.1	Proceso para la estimación de la extensión de la inundación.....	32
Figura 4.2	DEM esquemático con red de drenaje en azul y estaciones hidrológicas en rojo.....	33
Figura 4.3	Línea de energía definida hasta la salida del DEM.....	34
Figura 4.4	Línea de energía definida desde la estación con el nivel mas alto hasta la siguiente estación que encuentra a lo largo de la red de drenaje.....	34
Figura 4.5	Línea de energía definida para todos los puntos de la red de drenaje dentro de las estaciones de nivel .....	35
Figura 4.6	Línea de energía generada en todos los puntos pertenecientes a la red de drenaje.....	35
Figura 4.7	Metodología para la obtención de las matrices $i_s$ y $j_s$ .....	36
Figura 4.8	Esquematación del mapa de inundaciones asociado al DEM y niveles máximos.....	37
Figura 4.9	Tipos de daño por inundación y condiciones de flujo .....	38
Figura 4.10	Modelo Digital de Elevación ALOS-PALSAR .....	40

Figura 4.11	Localización de las estaciones hidrológicas utilizadas .....	41
Figura 4.12	Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Ayacucho.....	41
Figura 4.13	Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Barrancabermeja Automática .....	42
Figura 4.14	Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Maldonado .....	42
Figura 4.15	Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Peñas Blancas .....	43
Figura 4.16	Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Puente Ferrocarril (río Opón).....	43
Figura 4.17	Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Puente Ferrocarril (ciénaga San Silvestre) .....	44
Figura 4.18	Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Puente Sogamoso .....	44
Figura 5.1	Análisis de la serie de niveles de la estación Puente Ferrocarril (río Opón)..	55
Figura 5.2	Análisis de la serie de niveles de la estación Ayacucho.....	55
Figura 5.3	Análisis de la serie de niveles de la estación Puente Sogamoso .....	56
Figura 5.4	Análisis de la serie de niveles de la estación Maldonado .....	56
Figura 5.5	Análisis de la serie de niveles de la estación Peñas Blancas .....	57
Figura 5.6	Análisis de la serie de niveles de la estación Puente Ferrocarril (ciénaga San Silvestre).....	58
Figura 5.7	Análisis de la serie de niveles de la estación Barrancabermeja Automática .	58
Figura 5.8	Gráficos de las pruebas de bondad y ajuste para las estaciones de nivel ....	65
Figura 5.9	Profundidad de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 2,33$ años .....	68
Figura 5.10	Profundidad de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 10$ años.....	69
Figura 5.11	Profundidad de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 100$ años .....	69
Figura 5.12	Profundidad de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 500$ años .....	70
Figura 5.13	Elevación de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 2,33$ años .....	70
Figura 5.14	Elevación de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 10$ años .....	71
Figura 5.15	Elevación de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 100$ años .....	71
Figura 5.16	Elevación de flujo para una creciente asociada a un $Tr = 500$ años .....	72
Figura 5.17	Diferencias entre los resultados de la zonificación POMCA y la zonificación POT.....	73
Figura 5.18	Extensión espacial de las zonas inundadas asociadas a las crecientes con período de retorno de 10, 100 y 500 años.....	74
Figura 6.1	Amenaza por inundación estimadas en el estudio.....	75
Figura 6.2	Amenaza por inundación unificando los resultados del estudio y el POMCA .	76
Figura 6.3	Amenaza por avenidas torrenciales en el área rural del municipio de Barrancabermeja .....	77

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 1.1	Quebradas y caños representativos del área rural del municipio.....	7
Tabla 1.2	Cuerpos de agua en el municipio.....	7
Tabla 2.1	Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área rural.....	17
Tabla 2.2	Grado de susceptibilidad a inundaciones asociado a las unidades geomorfológicas en la cuenca del río Opón.....	22
Tabla 2.3	Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET) en la cuenca del río Opón.....	24
Tabla 2.4	Categorización de amenaza por avenidas torrenciales.....	24
Tabla 4.1	Categorización de amenaza por inundación .....	38
Tabla 4.2	Estaciones de nivel utilizadas en el estudio de amenaza por inundación en el municipio de Barrancabermeja.....	45
Tabla 4.3	Estaciones con información de niveles en el área de estudio.....	46
Tabla 5.1	Resultado de las pruebas de detección de datos anómalos .....	49
Tabla 5.2	Resultado de las pruebas de detección de cambio en la media .....	53
Tabla 5.3	Resultado de las pruebas de detección de cambio en la varianza.....	54
Tabla 5.4	Resultado de las pruebas de tendencia .....	54
Tabla 5.5	Modificación de las series de nivel utilizadas .....	59
Tabla 5.6	Niveles medios mensuales multianuales estación Pte Ferrocarril (río Opón)	60
Tabla 5.7	Niveles medios mensuales multianuales estación Ayacucho .....	60
Tabla 5.8	Niveles medios mensuales multianuales estación Pte Sogamoso .....	60
Tabla 5.9	Niveles medios mensuales multianuales estación Maldonado .....	61
Tabla 5.10	Niveles medios mensuales multianuales estación Peñas Blancas .....	61
Tabla 5.11	Niveles medios mensuales multianuales estación Pte Ferrocarril (Ciénaga San Silvestre).....	62
Tabla 5.12	Niveles medios mensuales multianuales estación Barrancabermeja Automática .....	62
Tabla 5.13	Resultados de la prueba de bondad y ajuste para las estaciones de nivel ...	63
Tabla 5.14	Niveles máximos de las crecientes asociados a diferentes períodos de retorno en las estaciones hidrológicas en centímetros.....	67
Tabla 5.15	Elevaciones máximas de las crecientes asociados a diferentes períodos de retorno en las estaciones hidrológicas en msnm.....	67
Tabla 5.16	Diferencia de elevaciones entre las crecientes asociados asociada a un período de retorno de 2,33 y 500 años .....	73
Tabla 6.1	Categorización de amenaza por inundación .....	75

## INTRODUCCIÓN

La gestión del riesgo es un proceso social orientado a la formulación, ejecución, seguimiento y evaluación de las políticas, estrategias, planes, programas, regulaciones, instrumentos, medidas y acciones permanentes para el conocimiento y la reducción del riesgo para el manejo de desastres, con el propósito explícito de contribuir a la seguridad, el bienestar, la calidad de vida de las personas y el desarrollo sostenible.

Mediante la ley 1523 de 2012, en la cual el gobierno de Colombia adopta la política nacional de riesgo, se constituye la gestión del riesgo como una política de desarrollo indispensable para asegurar la sostenibilidad, la seguridad territorial, los derechos e intereses colectivos, mejorar la calidad de vida de las poblaciones y las comunidades en riesgo y, por lo tanto, está intrínsecamente asociada con la planificación del desarrollo seguro, con la gestión ambiental sostenible, en todos los niveles del gobierno y la efectiva participación de la población.

Posteriormente con la implementación del decreto 1807 de 2014, siguiendo lo estipulado en el artículo 189 del decreto de ley 019 de 2012, se establecen los alcances, metodologías, información base y escalas de trabajo para la implementación de la gestión de riesgo en los planes de ordenamiento territorial, teniendo en cuenta las determinaciones del artículo 9 de la Ley 388 de 1997. Éste es incorporado al Decreto Único Reglamentario del Sector Vivienda, Ciudad y Territorio mediante el decreto 1077 de 2015.

Al incorporar la gestión del riesgo al POT, definida como la herramienta para la planificación del territorio de cada municipio, se adicionan nuevos elementos y nuevo conocimiento, para una planeación, de corto y largo plazo, enmarcada en el desarrollo sostenible; contribuyendo efectivamente a la seguridad, el bienestar y el mejoramiento en la calidad de vida de las personas.

En el desarrollo de este proyecto, teniendo en cuenta los alcances definidos en el decreto 1077 de 2015, se realiza la zonificación de amenazas de origen hidrológico (inundaciones y avenidas torrenciales) en el área rural y urbana del municipio de Barrancabermeja, la cual puede ser utilizada como una herramienta fundamental en la planificación de su territorio. Este estudio incluye un análisis de los factores antrópicos que pueden influir directamente sobre los eventos naturales amenazantes analizados.

Con el objetivo de describir detalladamente las metodologías utilizadas, la información base utilizada y los resultados del estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales, el presente documento se estructura de la siguiente manera:

- **VOLUMEN I: ESTUDIO DEL ÁREA RURAL**

- **Capítulo 1 - Generalidades:** se presenta la localización general del área de estudio, los objetivos y alcances definidos.
- **Capítulo 2 - Antecedentes, Diagnóstico y Marco Conceptual:** se estudian los eventos históricos de desastres que han ocurrido en el municipio, se indaga sobre los trabajos previos realizados con respecto a la gestión del riesgo en el área rural del municipio; se realiza un diagnóstico general de la problemática y se plantea el marco conceptual y metodológico de trabajo.
- **Capítulo 3 – Análisis de Susceptibilidad:** se definen las zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales
- **Capítulo 4 – Metodología e Información Utilizada:** se describe de forma detallada la información utilizada y los aspectos teóricos y prácticos de las metodologías implementadas.



- **Capítulo 5 – Estudio Hidrológico e Hidráulico:**se estiman los niveles máximos de creciente asociados a diferentes períodos de retorno con los cuales, mediante la metodología planteada, se estiman las zonas de inundación.
  - **Capítulo 6 – Zonificación de la Amenaza:**se clasifica el grado de amenaza para las zonas definidas como inundables.
  - **Capítulo 7 – Conclusiones y Recomendaciones:**se presentan las principales conclusiones del estudio y se realizan recomendaciones futuras para la mejora constante del estudio de las amenazas en el área rural.
- **VOLUMEN II: ESTUDIO DEL ÁREA URBANA**

# 1 GENERALIDADES

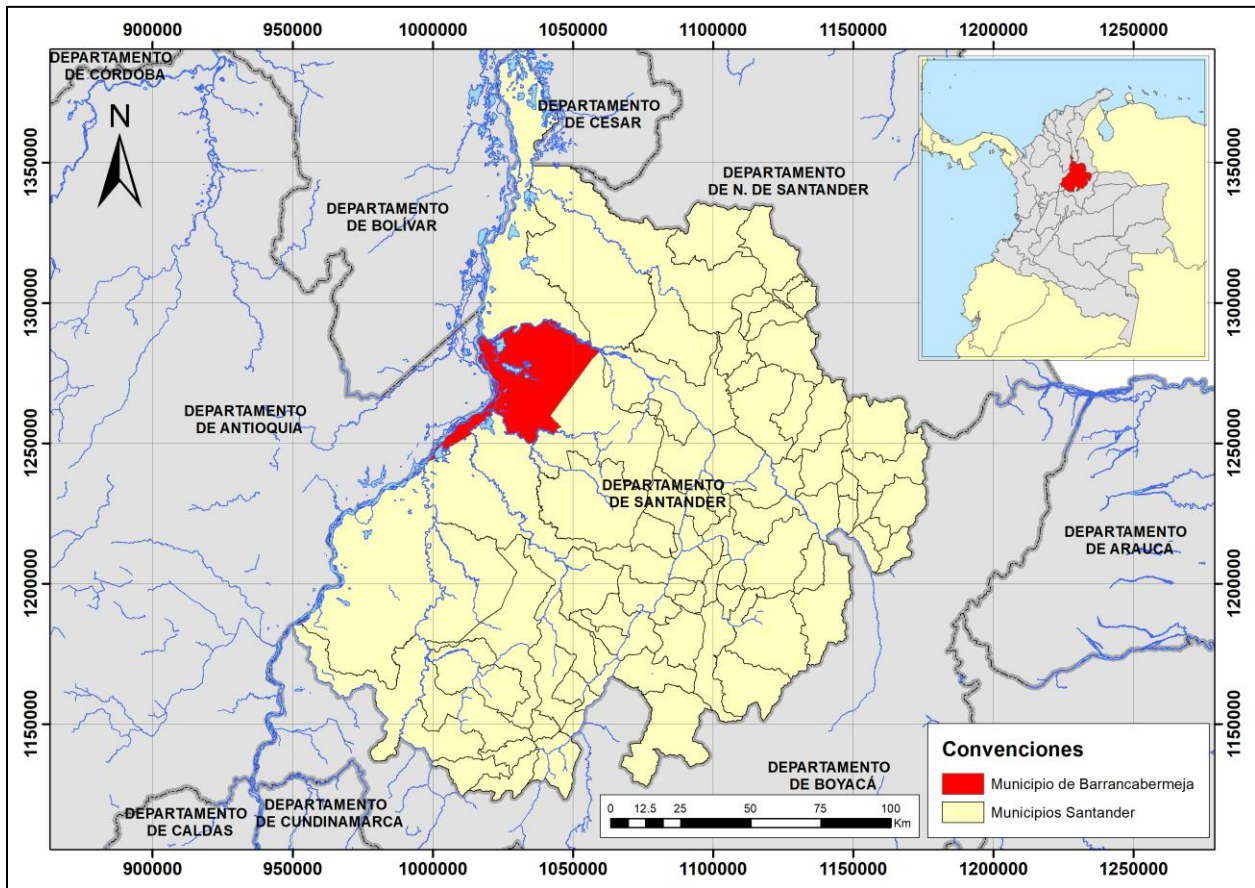
En el presente capítulo se describe la localización general del área de estudio, se realiza una descripción de los sistemas lénticos y lóticos en dicha área con el objetivo de delimitar el área objeto del estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales. Posteriormente, se definen los objetivos generales y específicos, así como el alcance de este trabajo.

## 1.1 LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

### 1.1.1 Localización General

El municipio de Barrancabermeja se encuentra localizado en la zona nororiental del país en el Departamento de Santander; está ubicada a 120 km al occidente de Bucaramanga, a orillas del Río Magdalena, en la región del Magdalena Medio, siendo el municipio más importante de ésta y segundo en todo el departamento. Limita al Norte con el municipio de Puerto Wilches, al Sur con los municipios de Puerto Parra, Simacota y San Vicente de Chucurí, al Oriente con el municipio de San Vicente de Chucurí y Girón, y al Occidente con el Río Magdalena.

**Figura 1.1 Localización general del municipio de Barrancabermeja**

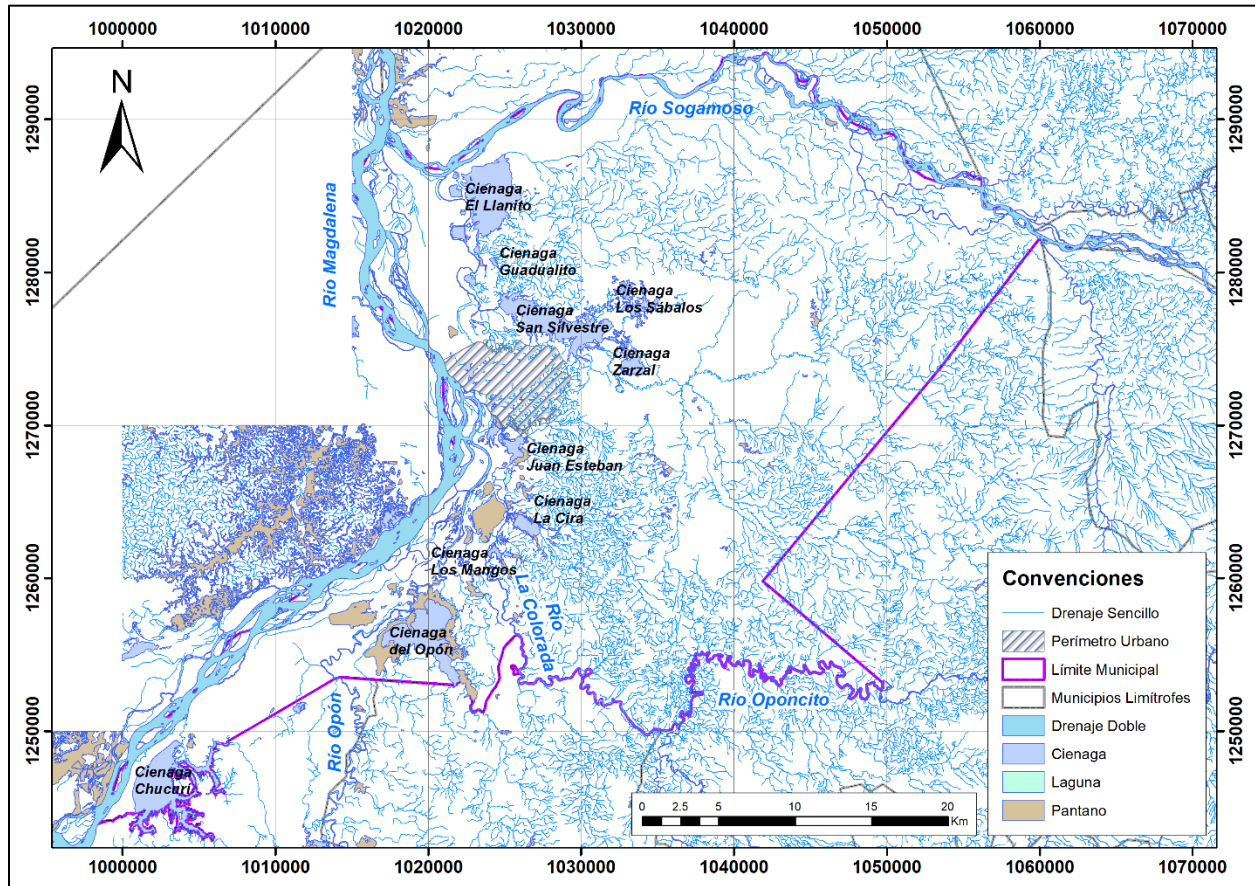


### 1.1.2 Localización Hidrográfica

Barrancabermeja está situada en el valle del Magdalena, en la margen derecha del río que da nombre al valle. Está rodeado de una gran cantidad de cuerpos lénticos y lóticos los cuales generan los eventos de inundaciones y avenidas objeto del presente estudio.

Entre los cuerpos de agua lóticos en el municipio destacan los ríos Magdalena, Sogamoso, Opón, La Colorada y Oponcito, mientras que los principales sistemas lénticos son corresponden las ciénagas de El Llanito, San Silvestre, Los Sábalos, Brava, Zarzal, Juan Esteban, La Cira, Los Mangos, Opón y Chuchurí.

**Figura 1.2 Localización hidrográfica del municipio de Barrancabermeja**



#### 1.1.2.1 Descripción General de los Principales Sistemas Lénticos y Lóticos

Según Barrancabermeja (2002), el territorio municipal se enmarca entre el río Magdalena, al Occidente, y las grandes cuencas de dos de sus principales tributarios, el Sogamoso y el Opón, al Norte y Sur, respectivamente, que descienden del macizo santandereano al Oriente. La dirección general del drenaje es Noroeste.

La importancia del río Magdalena en esta parte del departamento de Santander es innegable, si se tienen en cuenta factores como la capacidad de carga, el caudal, la complejidad de los materiales que transporta y la actividad del mismo río. El cauce, en la zona, es trenzado. La capacidad de carga está relacionada con el caudal, por lo cual adquiere más valor en las épocas de lluvias fuertes, las cuales concuerdan con la mayor depositación de materiales sobre la zona de derrame de su gran planicie aluvial.

- Río Sogamoso

Formado por la unión de los ríos Suárez y Chicamocha, entra a la zona estudiada aproximadamente por su parte media y la atraviesa varios kilómetros hasta su confluencia con el Magdalena. Es el más caudaloso de los afluentes del Magdalena, con influencia en el área de San Vicente, Barrancabermeja y Puerto Wilches; sirve de límite entre los dos últimos municipios.

El tipo de drenaje predominante en el cauce del Sogamoso y dentro del área estudiada, parece ser el dendrítico, teniendo en cuenta también las formas de sus tributarios, entre los cuales sobresalen el Chucurí, las quebradas Putana, Lisama y Gayumba.

La actividad del río es notable y aún se encuentran algunos rápidos en la parte baja de su recorrido. Se forman también pequeñas islas y orillares y en las épocas de invierno inunda gran parte de su llanura aluvial, limitando su uso. La duración de las inundaciones ocasionadas por el río Sogamoso no es muy significativa, pero sí importante por la cantidad de agua de desborde y los materiales que entonces deposita.

Desde el punto de vista del drenaje, si se tiene en cuenta el área influenciada por el río o sus afluentes, es el más importante de los tributarios del Magdalena (Barrancabermeja, 2002).

- Río Opón

En la zona estudiada prácticamente carece de importancia este río, por lo cual se hace referencia únicamente a un afluente, el río la Colorada, que tiene mayor influencia.

El río la Colorada nace en la parte alta de la rama Occidental de la cordillera Oriental y sirve de límite a los municipios de Simacota y San Vicente; tiene dos afluentes importantes: el Llano que se forma por la unión del Cascajales y el río Sucio, y el Oponcito. El Cascajales, afluye la quebrada Vergelana y al Oponcito el caño Arrugas y la quebrada la Llena.

Los ríos enumerados y otros afluentes pequeños sirven de drenaje a la mayor parte del municipio de San Vicente y parte de Barrancabermeja. En épocas de invierno, aumenta el caudal de estos ríos y ocasiona algunas inundaciones que limitan el uso de sus llanuras aluviales. y ocasiona algunas inundaciones que limitan el uso de sus llanuras aluviales.

Como el caudal normal es pequeño, la influencia es relativamente escasa; pero si se tiene en cuenta la pendiente, los materiales de transporte y los esporádicos aumentos de caudal, es preciso concederle importancia a la actividad de estos ríos.

El patrón de drenaje predominante parece ser el dendrítico, con pequeños afluentes de drenaje variable. En la parte alta hay gran influencia de estos ríos debido a la cantidad de material que arrancan y transportan con ayuda de la fuerza de gravedad.

En la zona Norte de Puerto Wilches, especialmente desde Bocas del Rosario hasta la desembocadura del río Lebrija, se encuentran varios sistemas de drenaje complejo. Esta zona es bastante pantanosa y también inundable por desbordamiento del Magdalena (Barrancabermeja, 2002).

- Cuencas internas

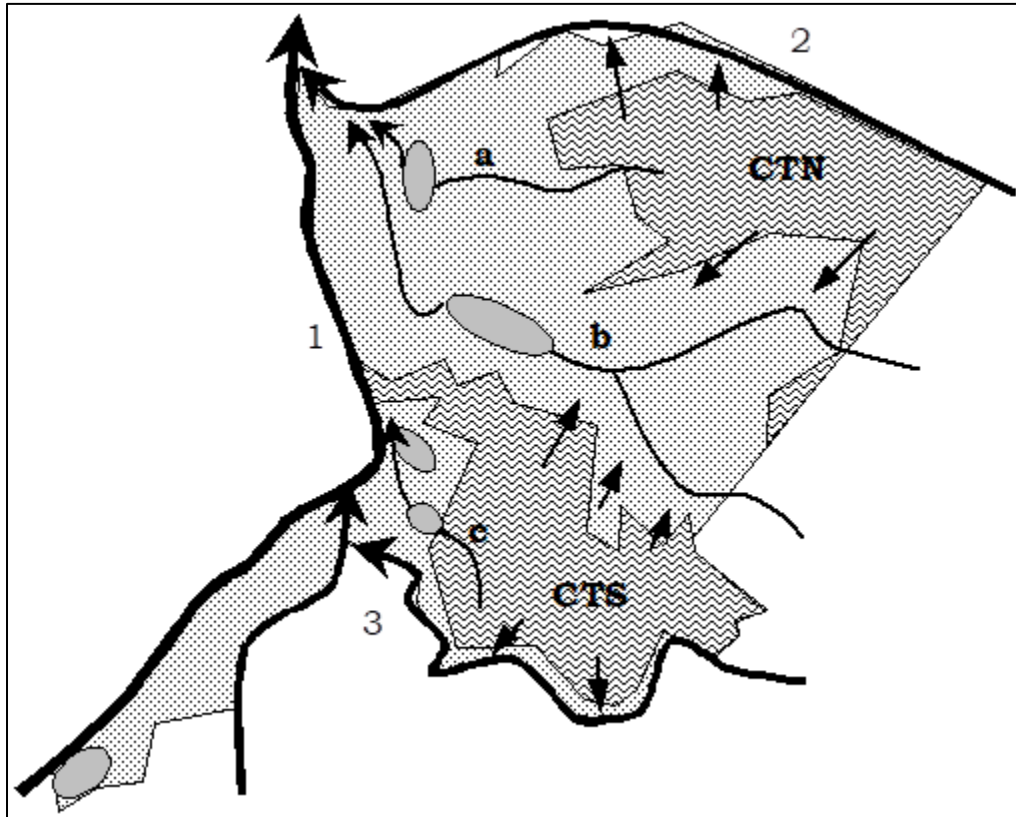
A su interior, el territorio está conformado por tres cuencas principales que corren en dirección general Noroeste: las dos menores drenan las terrazas altas del norte (El Llanito) y del sur (La Cira – Juan Esteban) dentro del propio municipio y desembocan a ciénagas que a su vez desaguan al río Sogamoso y al caño Cardales, respectivamente, que a su vez vierten al Magdalena.

La tercera, la cuenca de la ciénaga San Silvestre, es la mayor; discurre por el tercio medio del municipio de oriente a occidente; nace en la Cordillera Oriental en el municipio vecino de

San Vicente de Chucurí y recoge afluentes de las terrazas y colinas del norte y del sur del municipio, drenando hasta la ciénaga mencionada y de allí, por el caño de San Silvestre vierte al tramo final del río Sogamoso.

En el modelo de la figura se presenta la base física natural del territorio, conformada por la estructura hidrográfica y orográfica (Barrancabermeja, 2002).

**Figura 1.3 modelo simplificado de la estructura del drenaje del municipio**



**Fuente: Barrancabermeja, 2002**

▪ *Sistemas lénticos*

En el área urbana se encuentran las ciénagas Miramar y Juan Esteban, las cuales se hayan en la actualidad en un alto grado de contaminación, merced a los vertimientos que reciben, producto de actividades humanas y actividades industriales (aguas servidas). Estas ciénagas fueron ecosistemas naturales, de alto potencial turístico y pesquero que generaban sustento a los habitantes de la región.

En el área rural encontramos un gran número de ciénagas, algunas haciendo parte de ecosistemas estratégicos como el caso de las ciénagas San Silvestre (Cuenca hidrográfica ciénaga San Silvestre), la gran mayoría de estas ciénagas presentan algún grado y forma de deterioro: sedimentación, tala de bosques, vertimientos de aguas residuales, etc.

Las principales ciénagas del área rural son: San Silvestre, El Llanito, Brava, Zarzal, Zapatero, Salado, Guadalito, Tierradentro, Sábalo, El Tigre, El Castillo, La Cira, Chucurí, Del Guamo (Barrancabermeja, 2002).

▪ Sistemas lóticos

Incluyen quebradas, caños y ríos; los principales ríos del Municipio, y que además sirven de límites de este son: Magdalena, Sogamoso, La Colorada y el Oponcito. Siendo los dos primeros los más importantes desde el punto de vista de la navegabilidad; el Magdalena con capacidad para todo tipo de embarcaciones y el Sogamoso para embarcaciones pequeñas.

Existe un gran número de caños y quebradas ubicadas en el área urbana y convertidos en la actualidad en cauces de aguas servidas, estos son: quebradas Lavanderas y Las Camelias; y los caños: Cardales, Rosario, Palmira, Internacional. La totalidad de dichos vertimientos se entrega a los humedales o directamente al río Magdalena sin tratamiento alguno.

En el área rural las quebradas y caños son los cuerpos hídricos de mayor significancia, aunque en épocas de verano bajan ostensiblemente sus caudales. La pesca en ellos incluye variedad de especies como: mojarra, blanquillo, bocachico, comelón, dorada, nicuro, arenca, etc.

Las quebradas y caños más representativos del área rural del Municipio de Barrancabermeja son:

**Tabla 1.1 Quebradas y caños representativos del área rural del municipio**

La Llana	La Vizcaína	Del Guamo
Las Lajas	La Meseta	San Silvestre
La Arenosa	Agua clara	Rojo
La Raíz	Llanito	Mal abrigo
La Pedregosa	Guarumo	Agua bonita
La Lizama	Tapazón	La Cira
La Putana	Zarzal	La María
Tabla roja	Jeringa	El Cuarenta
La Cristalina	De la muerte	El Salado

**Fuente: Barrancabermeja (2002)**

En estas subcuencas y sistemas de ciénagas se encuentra gran variedad de quebradas, ciénagas y caños, ente los cuales se mencionan los siguientes:

**Tabla 1.2 Cuerpos de agua en el municipio**

Ciénagas	Quebradas	Caños
San Silvestre	El Llanito	El Llanito
El Llanito	Aguas claras	El Rosario
Opón	Zarzal	Guarumo
Brava	La Llana	De la Muerte
Zapatero	Arenosa	Del Guamo
Juan Esteban	La Raíz	El Tigre
Salado	La Pedregosa	Zarzal
Guadualto	Lizama	La Jeringa
Tierra Adentro	La Putana	San Silvestre
Sábalo	Tabla Roja	Rojo

Ciénagas	Quebradas	Caños
El Tigre	La Cristalina	Mal Abrigo
	Vizcaína	La Rompida
	De la Meseta	

**Fuente: Barrancabermeja (2002)**

▪ Humedales y Ciénagas

Las ciénagas son elemento constituyente básico del plano inundable, por tal razón sus formas y tamaños considerados en un año hidrológico, son función del nivel del agua en el sistema.

Las estructuras orgánicas de las ciénagas permiten agruparlas en 4 tipos:

**Ciénaga de tipo 1:** Es una ciénaga simple y primaria, conectada directamente con el río.

**Ciénaga de tipo 2:** Es el Conjunto o racimo de ciénagas, consiste en una ciénaga primaria (conectada directamente con el río) y una o más ciénagas secundarias conectadas directamente o indirectamente con la ciénaga primaria.

**Ciénaga tipo 3:** Una ciénaga primaria conectada indirectamente con el río.

**Ciénaga tipo 4:** Ciénaga aislada, sin conexión con el río.

Específicamente, ciénagas del tipo 1,3 y 4 poseen el máximo tamaño; mientras que las ciénagas de tipo 2 en los períodos de altos niveles de agua, se expanden hasta conformar un solo cuerpo de agua, denominado célula hidrológica (Barrancabermeja 2002).

En la parte media se diferencian dos complejos de Biomas de Humedales, las ciénagas que rodean la Empresa Colombiana de Petróleos, que presentan alteraciones antrópicas de origen industrial y las ciénagas que conservan parte de su estado in situ, con alteraciones de origen cultural.

Las Ciénagas del Llanito, San Silvestre, La Brava, el Zarzal, Juan Esteban y Miramar. La mayoría de estas ciénagas recibieron descargas desechos de hidrocarburos, afectando su dinámica acuática, cabe resaltar que la ciénaga de Miramar fue la más afectada y la cual posee el mayor número de estudios para su recuperación.

Dentro de las principales ciénagas y humedales localizados en jurisdicción del municipio de Barrancabermeja se tienen.

• **Ciénaga El Castillo**

El área está conformada por terrazas antiguas disecadas, sobre las que se asienta el municipio de Barrancabermeja y el Valle aluvial actual, compuesto por diques medios y bajos.

Sobre las terrazas, los ecosistemas terrestres se encuentran totalmente reemplazados por la zona urbana del municipio de Barrancabermeja y por praderas de pastos para la ganadería; en el valle aluvial reciente, los bacines más profundos alojan un complejo de ciénagas que permanecen con agua todo el año o la mayor parte de él; algunas de estas áreas inundadas, tienen gran extensión y mayor profundidad, es el caso de las Ciénagas de San Silvestre o la de Juan Esteban las cuales alcanzan profundidades hasta de unos seis metros.

El humedal, El Castillo es un sistema complejo de pantanos y esteros cuyo nivel de agua promedio anual es de 3,5 m. El nivel menor alcanzado en la época de sequía es

de 1.5 metros, desaguan hacia el río Magdalena a través de drenajes menores que llegan al caño Cardales (Barrancabermeja, 2002).

- **Ciénaga El Llanito y San Silvestre**

La ciénaga San Silvestre y El Llanito se encuentran ubicada en una depresión inundable, sobre el margen derecho del río Magdalena, en el municipio de Barrancabermeja y a la confluencia del río Sogamoso.

Esta ciénaga está formada por un sistema de cuerpos de agua, que están unidos por estrechos caños, constituyendo un área aproximada de 280 hectáreas. Los caños Jeringas y el Llanito alimentan la ciénaga con las aguas provenientes de los terrenos ondulados de origen petrolero, el caño de Jeringas se encuentra parcialmente obstruido disminuyendo su aporte a la ciénaga.

Es importante destacar la estrecha relación que existe con la Ciénaga San Silvestre, esta cubre un área de 9 Km<sup>2</sup> está unida a otras ciénagas como La Brava, El Zarzal y El Sábalo; este sistema es alimentado por las aguas provenientes de los caños Zarzal, La Tigra, La Vizcaína, esta última proveniente de los caños petroleros.

Esta ciénaga vierte sus aguas al río Sogamoso por el caño San Silvestre, el cual a cincuenta metros aproximadamente de su desembocadura, se le unen las aguas de la ciénaga El Llanito. Estos humedales forman un sistema amortiguador de las crecientes durante la época de lluvias de los ríos Sogamoso y Magdalena siendo visibles los procesos de refugio y remanso, dándose la inundación de la cuenca. Hay una clara influencia del caño el Rosario el cual vierte sus aguas contaminantes provenientes de los afluentes industriales de la petroquímica de Barrancabermeja; determinando el mecanismo hidrológico de la contaminación para estas ciénagas (Barrancabermeja, 2002).

- **Ciénaga Miramar**

Situada al Lado del Complejo Industrial de Barrancabermeja, se alimenta de las quebradas Las Lavanderas y Las Camelias que llevan las aguas servidas de Barrancabermeja y junto a los crudos que recibe del complejo, es una de las ciénagas más contaminadas de la zona (Barrancabermeja, 2002).

- **Ciénaga de Juan Esteban**

El área de la ciénaga está ubicada en el suroriente de Barrancabermeja, con un espejo de agua de aproximadamente 10 Ha.

El área de la cuenca que drena a la ciénaga es de aproximadamente 120 hectáreas, donde el Caño La Cira es el principal afluente. Otros caños como el Agua Blanca y el Verdum que se encuentran sedimentados y taponados como resultado de la contaminación causada por los asentamientos humanos en la periferia del cuerpo de agua.

El caño eferente llamado Juan Esteban gestor del caño Cardales presenta problemas de sedimentación en épocas de verano que a veces es imposible entrar por este camino a la ciénaga según los pescadores y habitantes de la región.

Los habitantes de la zona son de bajos recursos económicos, algunos residen en los barrios periféricos de Barrancabermeja, la situación económica les ha conllevado a disponer de los recursos naturales de una forma inapropiada, causando la destrucción casi total de la vegetación y el desplazamiento de especies faunísticas de la región que se han desplazado a otros ambientes naturales.

La mayor parte de la vegetación ha sido reemplazada por pastizales y para el uso de la agricultura. Esto ha permitido grandes deslizamientos de suelo por escorrentía causados por el agua de lluvia que sin duda permite el avance de la erosión incontrolable. Este desplazamiento y la caza está por terminar lo poco que queda de fauna fuertemente amenazadas en los últimos años (Barrancabermeja, 2002).

- **Ciénaga del Opón**

Su principal afluente es la quebrada Vizcaína y caño Limones; desemboca por medio del caño Mal Abrigo al río Magdalena, su cuenca tiene un área de 42,36 Kms<sup>2</sup>.



En sus orillas se destacan los corregimientos de Punta de Piedra y Las Mercedes que también hacen parte de este humedal (Barrancabermeja, 2002).

- Sistema Chucurí

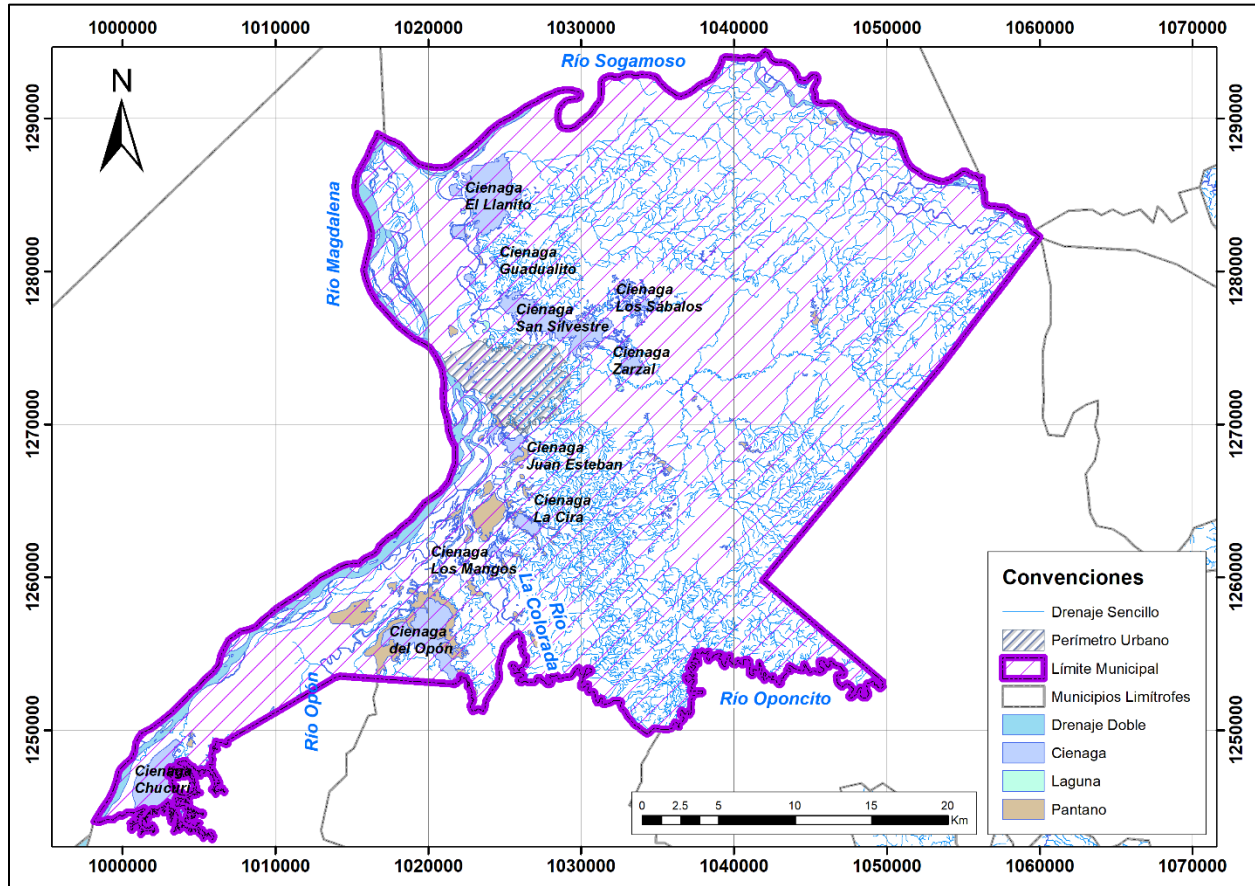
Se encuentra en el límite entre los municipios de Barrancabermeja y Puerto Parra, forman parte la ciénaga de Chucurrí, Aguas Blancas, Aguas Mansas, El Barro y Aguas Negras. Sus principales afluentes son Quebradas las Montoyas, La Tigra y los Patos, mediante un caño desemboca en el río Magdalena. Su cuenca mide 112.38 Kms<sup>2</sup>.

Su canal de salida no es muy definido a partir de las quebradas que le circundan, pero parece tener una estrecha relación con la infiltración hacia las corrientes superficiales cercanas (Barrancabermeja, 2002).

### 1.1.3 Área de Estudio

El área de estudio corresponde a todos los cuerpos de agua superficiales localizados en el área rural del municipio de Barrancabermeja.

**Figura 1.4 Área de estudio**



## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo General

Delimitar y zonificar el grado de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el área rural del municipio de Barrancabermeja.

### 1.2.2 Objetivos Específicos

- Recopilar y analizar información contenida en el plan de ordenamiento territorial, estudios regionales, técnico o informes técnicos, cartografía base, información de bases de datos institucionales y la información de redes de monitoreo de amenaza existentes.
- Identificar zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales.
- Estudiar el comportamiento hidrológico e hidráulico de las zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales.
- Delimitar las zonas susceptibles a eventos de inundación y avenidas torrenciales.
- Clasificar el grado de amenaza en las zonas inundables.

### 1.2.3 Alcance del Estudio

Considerando lo expuesto en el decreto 1077 de 2015, el estudio de zonificación de amenazas por inundación y avenidas torrenciales en el área rural del municipio de Barrancabermeja contempla los siguientes aspectos:

#### 1.2.3.1 Estudios básicos de amenaza por inundación

- Escala de trabajo

La escala de trabajo para el área rural corresponde a 1:25.000.

- Área de estudio

Corresponde al área en las cuales exista alguna posibilidad de presentarse inundación, sean aledañas o no a ríos, caños, quebradas, humedales y otros cuerpos de agua o aquellas que hagan parte de su área de influencia.

- Insumos mínimos

- **Geomorfología:** identificación de las diferentes sub-unidades geomorfológicas asociadas a los paisajes aluviales, con especial énfasis en las geoformas correspondientes a la llanura de inundación.
- **Modelo Digital de Elevación:** a la escala de trabajo asociada
- **Registro de eventos de inundación:** con base en la información disponible en diferentes entidades a nivel nacional, regional o local, interrelacionada con la información de la comunidad, identificar cuales han sufrido afectaciones por inundación y en qué fecha.
- **Hidrología:** caracterización del régimen hidrológico en la región a la cual pertenece el municipio mediante un análisis de eventos hidroclimáticos máximos identificando para cuales períodos de retorno se están presentando las afectaciones y las áreas afectadas por los mismos.

- Alcance

Para la zonificación de la amenaza se emplean tres categorías: alta, media y baja, teniendo en cuenta el registro de eventos, la recurrencia de los mismos y la intensidad de la inundación.

Para el suelo urbano, de expansión urbana y rural se utilizará, como mínimo, análisis de tipo histórico y geomorfológico. De acuerdo con la información disponible se podrán complementar con análisis hidrológico-hidráulicos y métodos asistidos por sensores remotos y sistemas de información geográfica.

En todo caso, los análisis se realizarán en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y disponibilidad de la información.

- Productos

- Mapas de zonificación de amenaza por inundación
- Documento técnico que contenga las metodologías empleadas y los resultados obtenidos

#### 1.2.3.2 Estudios básicos de amenaza por avenidas torrenciales

- Escala de trabajo

La escala de trabajo para el área rural corresponde a 1:2.000.

- Área de estudio

Todos los cauces presentes o con influencia en el municipio, que por sus condiciones topográficas puedan tener un comportamiento torrencial.

- Insumos mínimos

- **Geomorfología:** identificación de las diferentes sub-unidades geomorfológicas asociadas a eventos torrenciales.
- **Estudio hidrológico de la cuenca:** orientado al flujo torrencial, considerando el ciclo de sedimentos.
- **Cartografía base:** escala 1:2.000
- **Análisis hidráulico:** teniendo en cuenta factores detonantes como precipitación o movimientos en masa.

- Alcance

Para la zonificación de la amenaza se emplean tres categorías: alta, media y baja, dependiendo de la frecuencia de recurrencia de los eventos y sus características: la profundidad de la lámina de agua, los materiales de arrastre y la velocidad de flujo.

Utilizar, como mínimo, alguno de los siguientes análisis: estadísticos, determinísticos o probabilísticos.

En todo caso, los análisis se realizan en función de la magnitud de la amenaza, su intensidad, consecuencias y la disponibilidad de información.

#### **1.2.4 Descripción de Actividades**

Las actividades planteadas para el desarrollo del presente trabajo se pueden agrupar de la siguiente manera:

##### **1.2.4.1 Preparación de la información**

Se define la información requerida para el desarrollo de todas las actividades (cartografía, series hidrológicas, entre otros)

##### **1.2.4.2 Caracterización de eventos históricos**

Se realiza un análisis de los eventos de históricos mediante la búsqueda de información documental disponible y registros en bases de datos de eventos de desastre.

##### **1.2.4.3 Diseño de la metodología de trabajo**

Con base en la información disponible y la problemática identificada se plantean las metodologías y modelos que se ajusten a las necesidades planteadas en los alcances del estudio.

##### **1.2.4.4 Análisis hidrológico**

El análisis hidrológico comprende inicialmente la caracterización física de la zona de estudio y la caracterización hidrológica general a partir de los aspectos observados en la visita de campo y de lo encontrado en la información secundaria consultada. Esta actividad también incluye la recopilación de información como valores de niveles, con base en la cual se debe adelantar la respectiva evaluación de los aspectos hidrológicos de la zona de estudio.



#### **1.2.4.5 Análisis hidráulico**

Mediante la implantación de los modelos hidráulicos definidos se estiman los niveles y velocidades de flujo de las crecientes asociadas a diferentes períodos de recurrencia.

#### **1.2.4.6 Zonificación de la amenaza**

Con base en los criterios técnicos definidos (geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos) se clasifica el grado de amenaza para las crecientes máximas definidas. Con base en los resultados obtenidos se generarán mapas de zonificación en los que se delimitarán los sectores expuestos a diferentes grados de amenaza definidos cualitativamente.

## 2 ANTECEDENTES, DIAGNÓSTICO Y MARCO CONCEPTUAL

En esta sección se realiza el análisis de los antecedentes y la información existente de estudios regionales con respecto a inundaciones y avenidas torrenciales. Se presenta un diagnóstico de la problemática encontrada en el área rural del municipio de Barrancabermeja y se plantea un marco conceptual para el estudio de dicha problemática.

### 2.1 ANTECEDENTES

El estudio de los antecedentes de eventos de inundación y avenidas torrenciales comprende la recopilación y análisis de la información de eventos históricos disponible en la base de datos de nacionales, regionales y locales, así como de informes técnicos previamente realizados asociados al estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el área rural del municipio.

#### 2.1.1 Caracterización Histórica de Amenazas y Eventos Amenazantes

##### 2.1.1.1 Fuentes de información

Se realizó una búsqueda exhaustiva de información referente a eventos de inundación y avenidas torrenciales en el municipio de Barrancabermeja. Esta se clasificó en dos tipos de información; el primero corresponde a documentación bibliográfica, la cual comprende todos los estudios previos relacionados cualquier forma con el estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales; el segundo tipo de información corresponde a bases de datos que contengan registros de eventos históricos en el área rural del municipio.

##### ▪ Documentación

En primera instancia, se consultó la información disponible en el archivo documental (digital) del área de planeación del municipio y de la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS) encontrando que los estudios más relevantes en el área rural del municipio corresponden a:

- Proyecto POMCA Río Opón
- Proyecto POMCA Río Sogamoso

En dichos estudios se presenta la caracterización de la amenaza y el riesgo por inundación y avenidas torrenciales en toda la extensión de dichas cuencas, las cuales abarcan el 100% del área rural y urbana del municipio de Barrancabermeja. La escala de trabajo de estos estudios es 1:25.000. Asimismo, presentan un inventario georreferenciado de eventos históricos de inundaciones y avenidas.

##### ▪ Bases de datos

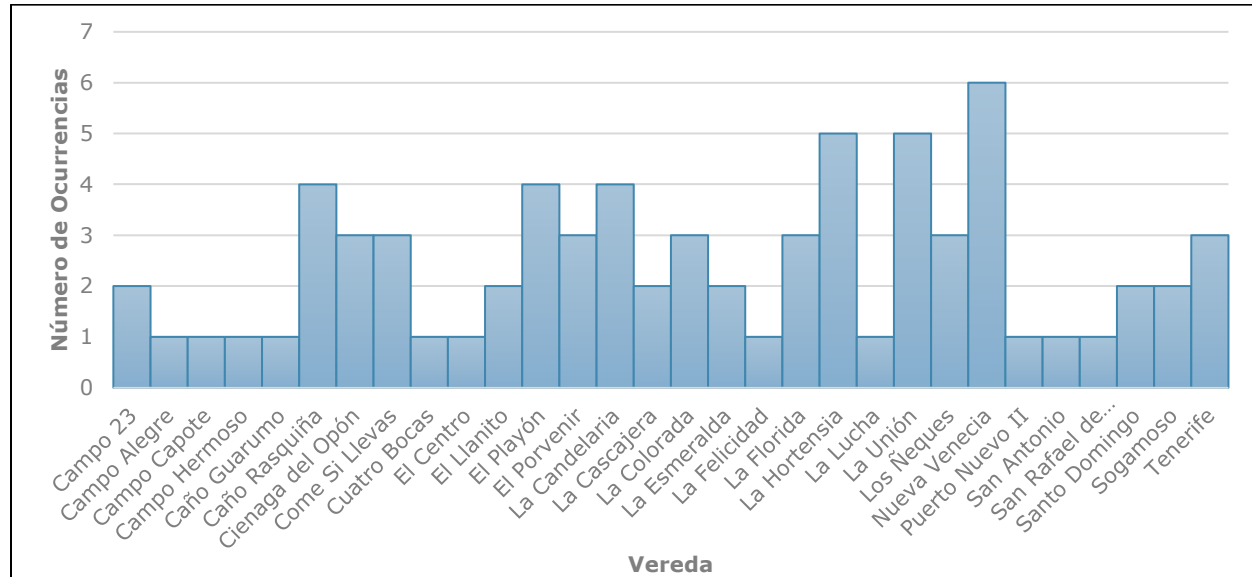
La Unidad Nacional de Gestión del Riesgo (UNGRD), cuenta con una base de datos que contiene los registros de desastres generados por eventos extremos de diferente naturaleza entre los años 1998 y 2016. Esta información fue cotejada con el registro de atención de emergencias de la Alcaldía Municipal.

Vale la pena aclarar que también se consultó la base de datos del Sistema de Inventario de Efectos de Desastres (DESINVENTAR). Sin embargo, no disponen de registros en el departamento de Santander.

### 2.1.1.2 Catálogo de eventos históricos de inundación y avenidas torrenciales

Con base en la información documental y de las bases de datos disponibles se elaboró un catálogo de eventos históricos de inundación (no se reportan avenidas torrenciales), el cual se presenta de manera detallada en el Anexo A, adjunto al presente documento.

**Figura 2.1 Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área rural**

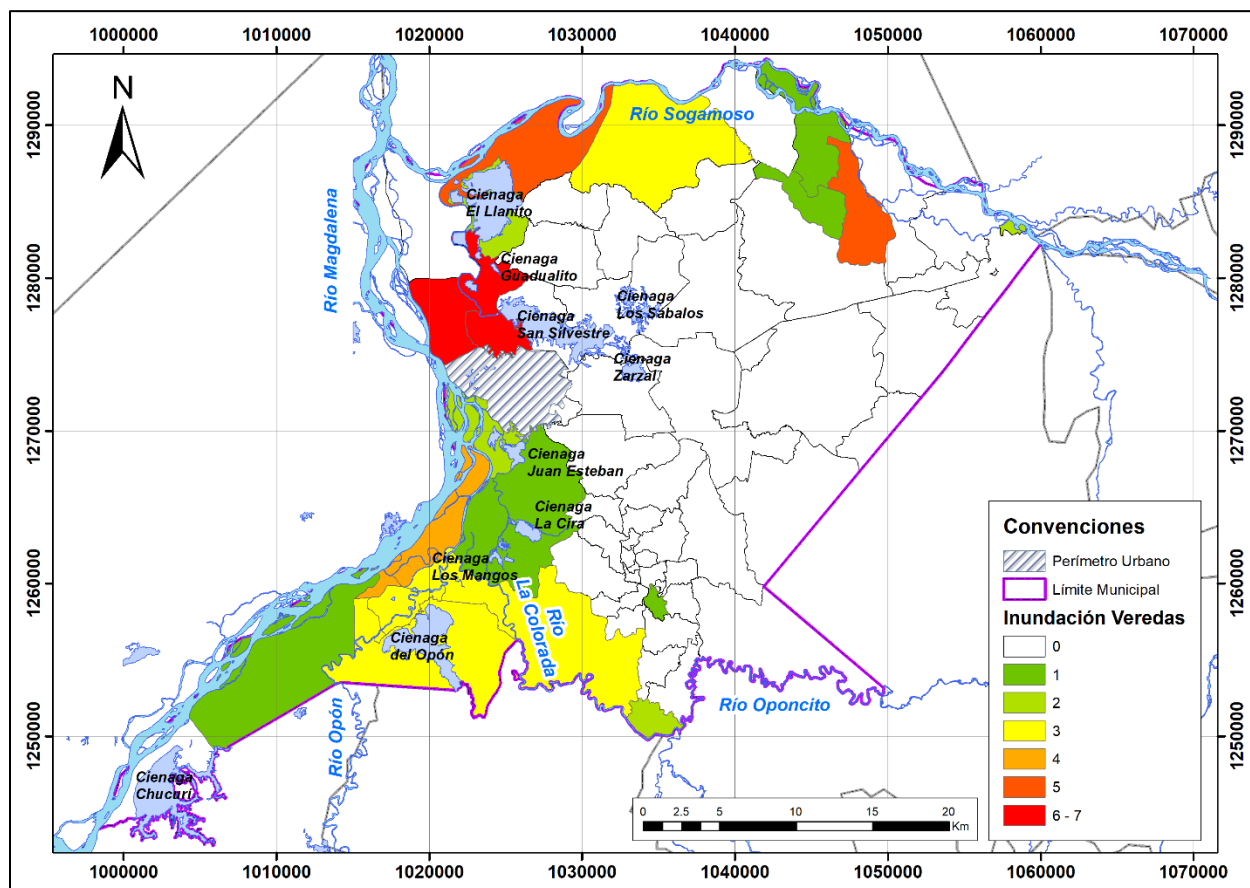


Se concluye que el total de eventos registrados corresponde a 72 y las veredas que más ocurrencias de eventos de inundación reportan son:

- **Corregimiento El Llanito:** Nueva Venecia (6), La Hortensia (5) y El Porvenir
- **Corregimiento Ciénaga del Opón:** La Unión (5), Caño Rasquiña (4), El Playón (4), Ciénaga del Opón (3), Come Si Llevas (3), La Colorada (3), La Florida (3) y Los Ñeques (3) del corregimiento Ciénaga del Opón
- **Corregimiento El Centro:** vereda Tenerife
- **Vereda La Candelaria (Campo Galán):** actual zona de expansión del área urbana.

Las demás veredas presentan una ocurrencia de menos de eventos en 20 años de registros disponibles.

**Figura 2.2 Reporte de eventos de inundación en el área rural del municipio**



**Tabla 2.1 Eventos de desastres asociados a eventos de inundación reportados en el área rural**

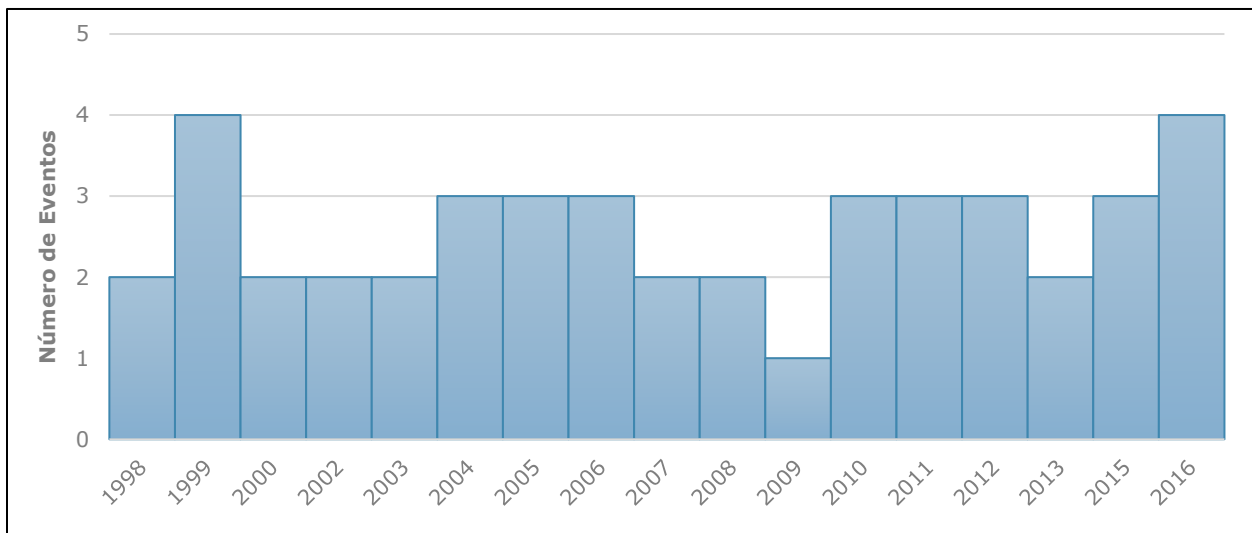
Vereda	# Eventos	Vereda	# Eventos	Vereda	# Eventos
Campo Galán	7	La Colorada	3	Campo Alegre	1
Nueva Venecia	6	La Florida	3	Campo Capote	1
La Hortensia	5	Los Ñeques	3	Campo Hermoso	1
La Unión	5	Tenerife	3	Caño Guarumo	1
Caño Rasquiña	4	Campo 23	2	Cuatro Bocas	1
El Playón	4	El Llanito	2	El Centro	1
La Candelaria	4	La Cascajera	2	La Felicidad	1
Ciénaga del Opón	3	La Esmeralda	2	La Lucha	1
Come Si Llevas	3	Santo Domingo	2	San Antonio	1
El Porvenir	3	Sogamoso	2	San Rafael de Chucurí	1
<b>Total, general</b>					<b>72</b>

En la Figura 2.3 se presenta el número de eventos registrados por años, encontrando que, en el área rural, se reportó un número máximo de 4 eventos en los años 1999 y 2016. En los años 2010 y 2011, conocidos por ser los años de la emergencia invernal, se reportaron únicamente 3 eventos. En la Figura 2.4 se presentan las afectaciones asociadas a los

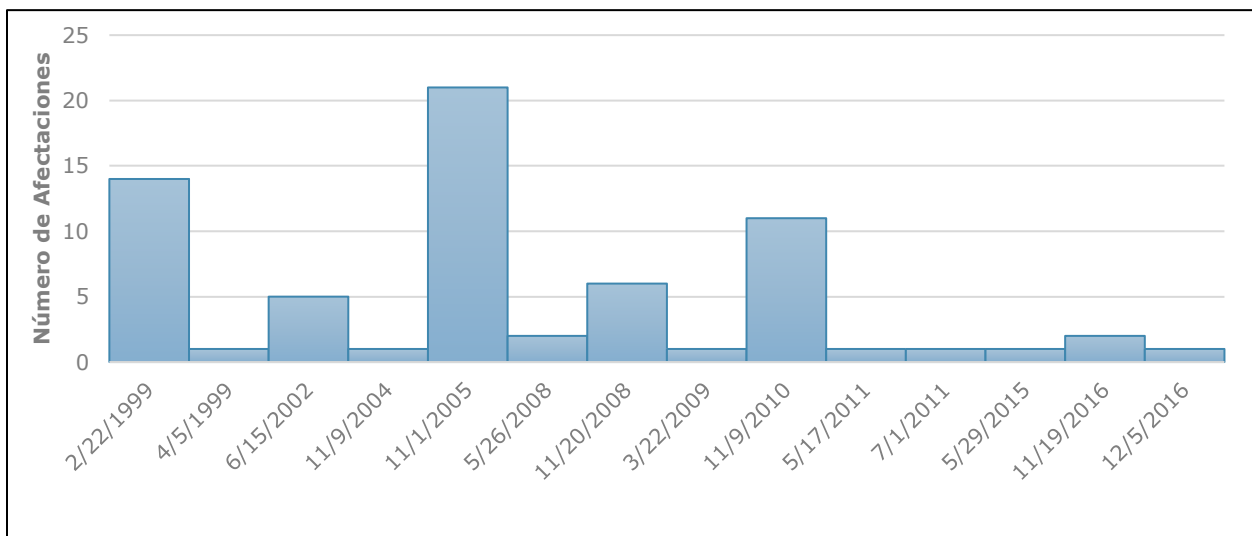


eventos reportados, es decir el total de reportes por vereda para cada evento, encontrando que, en los años 1999, 2005 y 2010, se reportaron afectaciones en más de 10 veredas.

**Figura 2.3 Eventos reportados por año**



**Figura 2.4 Afectaciones reportadas por año**



Las principales limitaciones del catálogo generado son:

- No es posible georreferenciar los eventos en la mayoría de los casos debido a que en el UNGRD no se reporta esta información.
- Los eventos en la documentación de la Alcaldía Municipal carecen de registro temporal (fecha)

## 2.1.2 Estudios Previos

Examinando detalladamente el archivo documental de La Alcaldía Municipal se encuentra que existen diversos estudios en los cuales se caracteriza la amenaza y el riesgo por inundación en el municipio. Sin embargo, estos se encuentran enfocados en el área urbana y las zonas de expansión proyectadas en el POT.

Por otra parte, la Corporación Autónoma Regional de Santander (CAS), ha desarrollado el Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca de los ríos Opón y Sogamoso, en los cuales se caracteriza la amenaza y riesgo por inundación y avenidas torrenciales. Actualmente, dichos estudios se encuentran en fase de revisión y a aprobación para su publicación oficial. A continuación, se describe la información base y las metodologías utilizadas, así como los resultados obtenidos en el estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales presentado en dichos trabajos.

### 2.1.2.1 Proyecto POMCA ríos Opón y Sogamoso

La cuenca constituye una unidad adecuada para la planificación ambiental del territorio, dado que sus límites fisiográficos se mantienen en un tiempo considerablemente mayor a otras unidades de análisis, además involucra una serie de factores y elementos tanto espaciales como sociales, que permiten una comprensión integral de la realidad del territorio (MADS, 2014). Algunas de las razones que explican este contexto son:

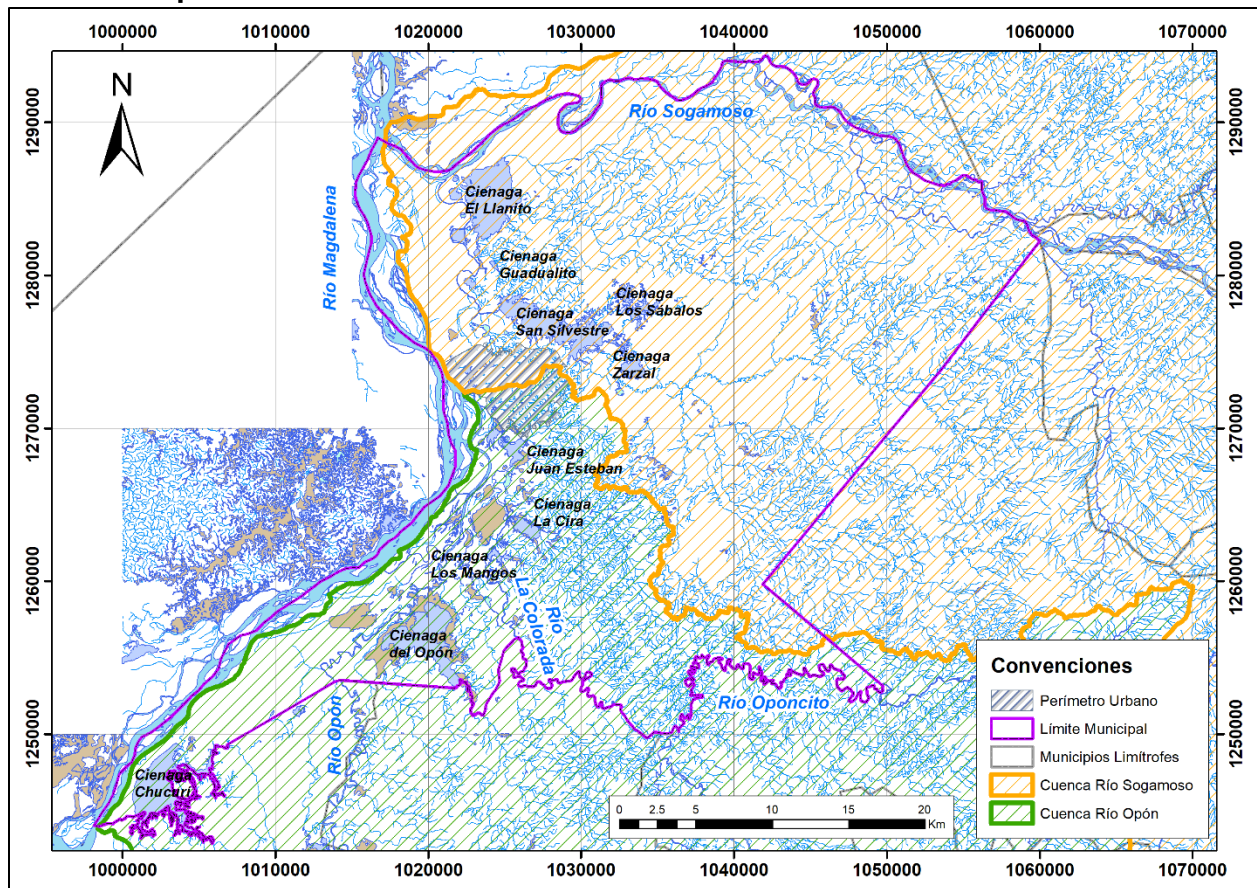
- *"Las cuencas constituyen un área donde interactúan, en un proceso permanente y dinámico, el agua con los sistemas físicos (recursos naturales) y bióticos (flora y fauna). Los cambios en el uso de los recursos naturales, principalmente tierra, acarrearán aguas arriba una modificación del ciclo hidrológico dentro de la cuenca aguas abajo en cantidad, calidad, oportunidad y lugar."*
- *"En las cuencas, se produce la interrelación e interdependencia entre los sistemas físicos y bióticos y el sistema socio económico (...) La dependencia de un sistema hídrico compartido y de los caminos y vías de acceso y el hecho de que deban enfrentar riesgos similares, confieren a los habitantes de una cuenca características socioeconómicas y culturales comunes."*

Teniendo en cuenta estos argumentos, es necesario que el enfoque de desarrollo del presente estudio se integre de una manera lógica y coherente con las metodologías utilizadas en el POMCA de los ríos Opón y Sogamoso. De esta forma se realiza un análisis del área geográfica de trabajo, las escalas de trabajo, de la información base y las metodologías empleadas, así como de los resultados del estudio de zonificación de amenaza por inundación y avenidas torrenciales presentados en dichos trabajos.

#### ▪ Área de estudio

El área de estudio de los POMCA de los ríos Opón y Sogamoso, abarca el 100% del área rural del municipio de Barrancabermeja, por lo que su integración espacial al presente trabajo se puede realizar de manera generalizada en todo el territorio (ver Figura 2.5).

**Figura 2.5 Región de estudio del POMCA de los ríos Opón y Sogamoso, con respecto a la extensión espacial del área rural**



▪ Escala de trabajo

La escala de trabajo corresponde a una escala 1:25.000 la cual corresponde con la escala del presente trabajo, por lo tanto, la integración de los resultados de los POMCA al presente trabajo se puede realizar de manera consistente.

▪ Información utilizada

La información base utilizada para los POMCAS, asociada al estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales corresponde a:

- Modelo Digital de Elevación re-muestreado a un tamaño de pixel de 10 m.
- Cartografía de los cuerpos de agua superficiales asociada al MDE.
- Información de Intensidad-Duración-Frecuencia de la estación Yaraguies.
- Cobertura vegetal y tipo de suelos de las cuencas.
- Clasificación de unidades geomorfológicas con origen fluvial.
- Inventario de ocurrencia de desastres recopilado mediante trabajo con las comunidades.

▪ Metodología para la zonificación de amenaza por inundación

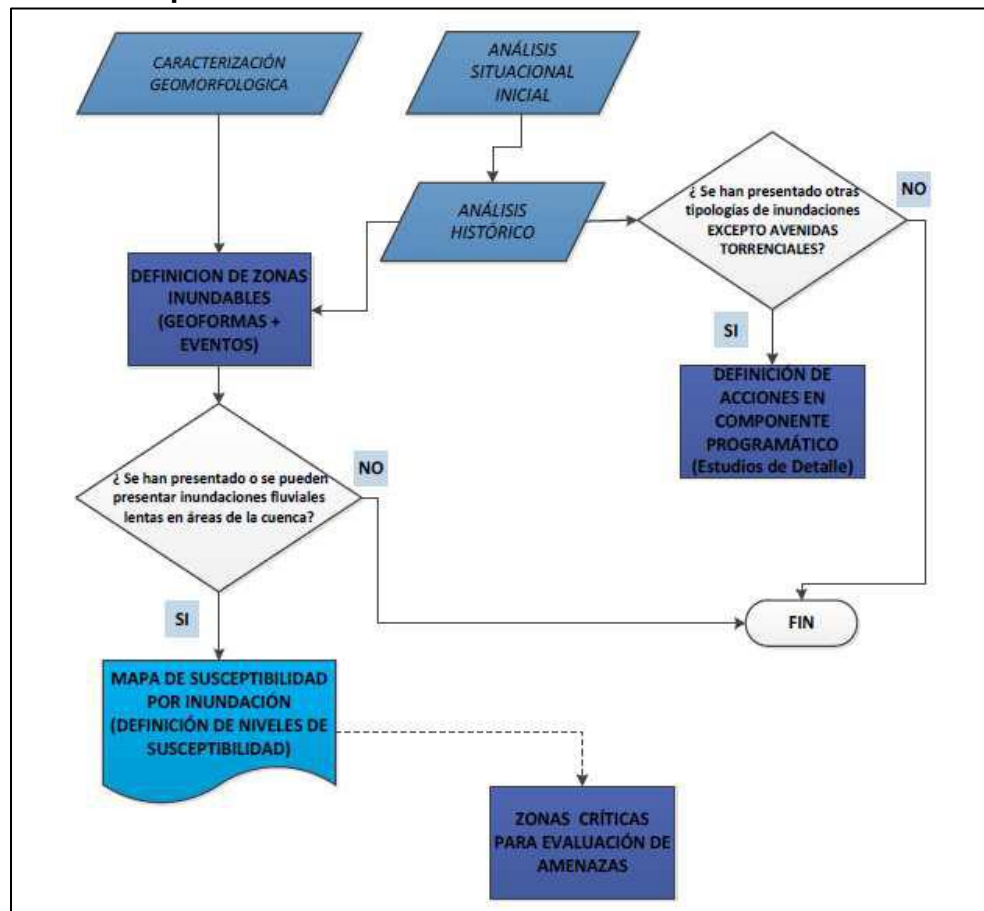
La metodología utilizada para la zonificación de amenaza por inundación se puede resumir de la siguiente forma:

1. Contraste del análisis geomorfológico basado en el método de Carvajal (2011), en el cual se determinan ambientes fluviales con sus unidades; y la cartografía

geomorfológica basada en el método de Zinck (2012) que define paisajes geomorfológicos, tipos de relieve, modelados y geoformas asociados a eventos de inundación.

2. Validación de la caracterización de eventos históricos identificados en la cuenca (ver Figura 2.6).
3. Se asocia un grado de susceptibilidad de amenaza por inundación para cada unidad geomorfológica (ver Tabla 2.2).
4. Implementación de modelos lluvia escorrentía en las zonas identificadas como susceptibles a eventos de inundación (ver Figura 2.7).
5. Zonificación de la amenaza con base en la probabilidad de ocurrencia, profundidad de la lámina de agua y velocidad de flujo (ver Figura 2.8).

**Figura 2.6 Metodología para la estimación del grado de susceptibilidad a inundaciones en la cuenca del río Opón**



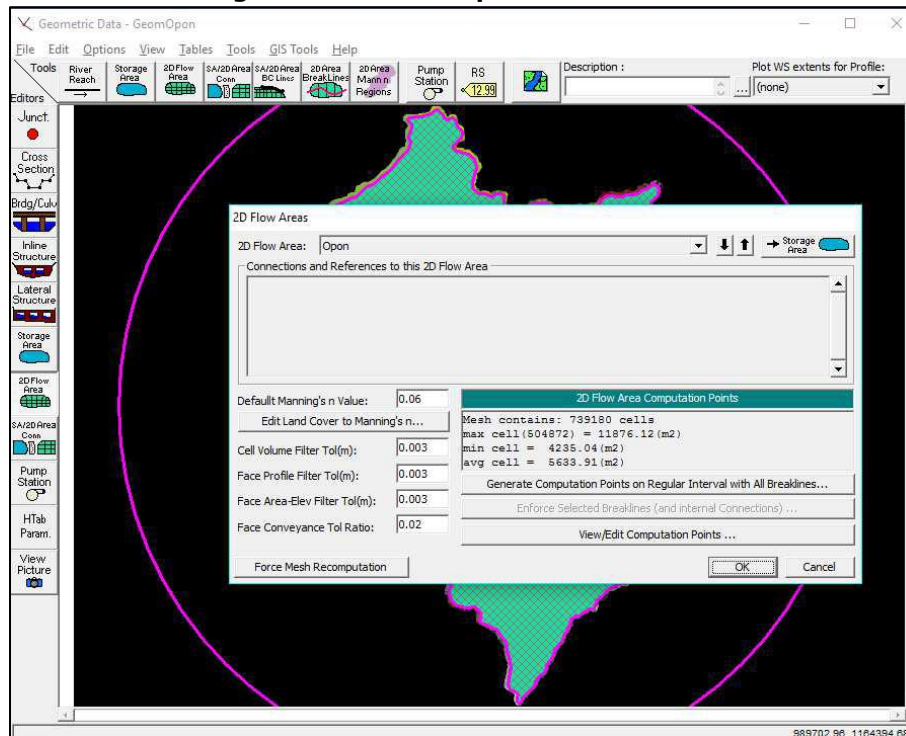
Fuente: POMCA río Opón (CAS, 2017)

**Tabla 2.2 Grado de susceptibilidad a inundaciones asociado a las unidades geomorfológicas en la cuenca del río Opón**

Susceptibilidad a Inundación	Caracterización Geomorfológica
Alta	Clasificación geomorfológica en región fluvial y denudacional en unidades de llanura de inundación, terrazas bajas, lomas y napas dedesborde; con procesos propios de las zonas topográficamente másbajas como encharcamientos, inundaciones, erosión superficial,erosiónlateral y desbordes.
Media	Región geomorfológica denudacional y fluvial en unidades de lomasbajas, terrazas aluviales, llanuras de inundación y abanicos aluviales;presentan normalmente escurrimientos, encharcamientos, reptación einundaciones.
Baja	Región geomorfológica fluvial y denudacional, con unidades deterrazasaluviales y lomas; presentan procesos de escurrimiento,encharcamiento, desprendimientos y derrumbes.
Nula	Clasificación geomorfológica en región estructural y/o denudacional con unidades de escarpes, espinazos, crestas, facetas triangulares, mesas,depósitos de laderas, lomas y cuestras; comúnmente presentan procesosde derrumbes, desplomes, soliflucción, escurrimiento, terracetas,reptación, deslizamientos por distintos mecanismos y diferentes clasesde erosión superficial.

Fuente: POMCA río Opón (CAS, 2017)

**Figura 2.7 Modelo hidrológico-hidráulico implementado en la cuenca del río Opón**



Fuente: POMCA río Opón (CAS, 2017)

**Figura 2.8 Grado de amenaza por inundaciones asociado a las características de flujo en la cuenca del río Opón**

Grado de Amenaza	Características de la inundación
Alta	Corresponde a las superficies próximas a los cauces, con diferencias

Grado de Amenaza	Características de la inundación
	altitudinales menores a 50 m, y pendiente topográfica plana a suavemente inclinada ( $< 5^\circ$ ); se caracteriza por tener niveles de 0,213m y velocidades de flujo de hasta 72,34m/s. La categoría representa el 5,73% de área total en ordenación y se presenta en los municipios de Vélez, La Paz, Guacamayo, Aguada, Contratación, Landázuri, Santa Helena del Opón, Simacota, El Carmen de Chucurí y San Vicente de Chucurí, Barrancabermeja y Puerto Parra.
Media	Zona comprendida entre las manchas de inundación de los periodos de retornos de 15 a 100 años, con diferencias altitudinales menores a 50 m, y pendiente topográfica plana a suavemente inclinada ( $< 5^\circ$ ); se caracteriza por tener niveles de 0,266m y velocidades de flujo de hasta 122,72m/s. La categoría representa el 2,48% de área total de la cuenca, y se encuentra distribuida en toda la cuenca, en los municipios del Guacamayo, Aguada, Landázuri, Simacota, El Carmen de Chucurí, San Vicente de Chucurí, La Paz, Contratación, Santa Helena del Opón y Vélez.
Baja	Corresponde a las manchas de inundación de los periodos de retorno entre 100 y 500 años, se caracteriza por tener niveles de 0,301m y velocidades de flujo de hasta 211,68m/s. La categoría representa el 7,75% de área total de la cuenca, y se encuentra distribuida en la cuenca, en los municipios de Vélez, La Paz, Guacamayo, Aguada, Contratación, Landázuri, Santa Helena del Opón, Simacota, El Carmen de Chucurí y San Vicente de Chucurí, Barrancabermeja y Puerto Parra.
Nula	Corresponde a las manchas de inundación de periodos de retorno superiores a 500 años, representa el 84,04% de área total de la cuenca, y se encuentra en las superficies con diferencias altitudinales superiores a 50m y pendiente topográfica de suavemente inclinada a abrupta distribuida en toda el área de la cuenca.

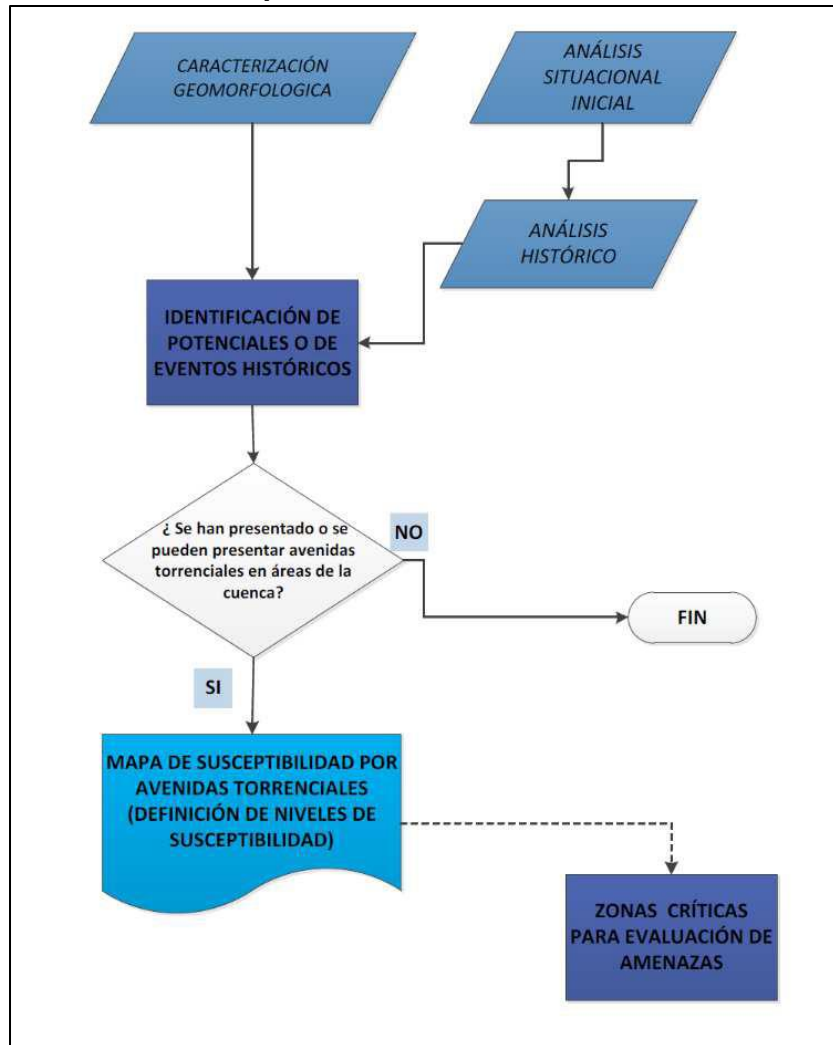
**Fuente: POMCA río Opón (CAS, 2017)**

▪ Metodología para la zonificación de amenaza por inundación

La metodología utilizada para la zonificación de amenaza por avenidas torrenciales se puede resumir de la siguiente forma:

1. Estimación de la susceptibilidad mediante la evaluación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET), el cual se estima con base en el índice morfométrico de cada una de las subcuencas y el índice de variabilidad de caudales (ver Tabla 2.3).
2. Para las áreas con susceptibilidad media y alta a la ocurrencia de avenidas torrenciales se realiza una categorización del grado de amenaza según los criterios definidos en la Tabla 2.4.

**Figura 2.9 Diagrama de flujo para la evaluación de la susceptibilidad por avenidas torrenciales en la cuenca del río Opón**



Fuente: POMCA río Opón (CAS, 2017)

**Tabla 2.3 Clasificación del índice de vulnerabilidad frente a eventos torrenciales (IVET) en la cuenca del río Opón**

Índice de Variabilidad	Índice Morfométrico de Torrencialidad				
	Muy baja	Baja	Media	Alta	Muy Alta
Muy Baja	Baja	Baja	Media	Alta	Alta
Baja	Baja	Media	Media	Alta	Muy Alta
Media	Baja	Media	Alta	Alta	Muy Alta
Alta	Media	Media	Alta	Muy Alta	Muy Alta
Muy Alta	Media	Alta	Alta	Muy Alta	Muy Alta

Fuente: POMCA río Opón (CAS, 2017)

**Tabla 2.4 Categorización de amenaza por avenidas torrenciales**

Grado de Amenaza	Descripción
Alta	Zonas identificadas con actividad reciente y con evidencias históricas

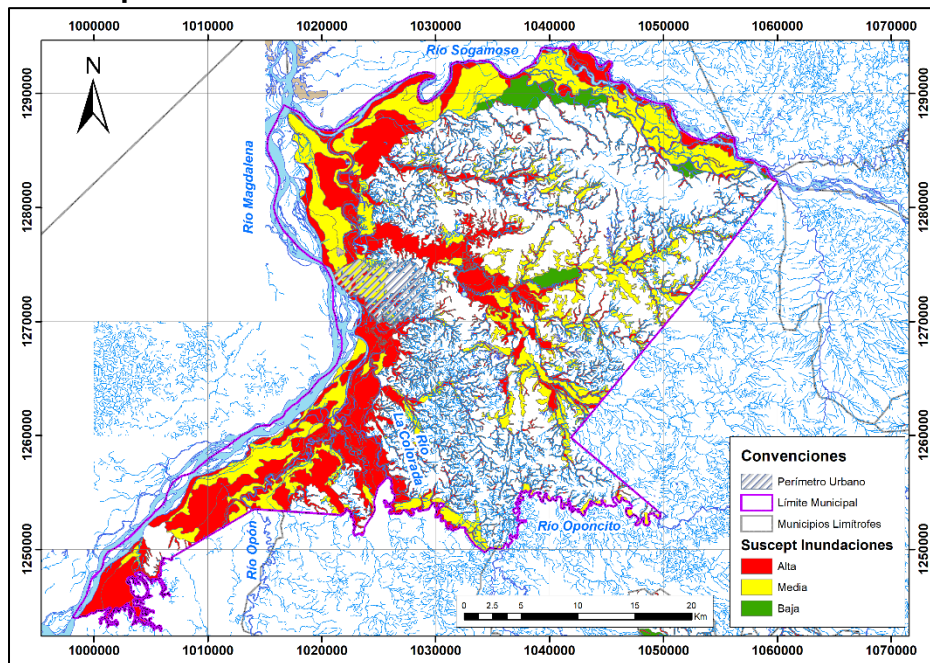
Grado de Amenaza	Descripción
	claras(más de un evento histórico identificado).
Media	Zonas con actividad torrencial que cumplen al menos uno de los siguientes aspectos: existencia de evidencias históricas de al menos una avenida torrencial; elevación insuficiente por encima del canal torrencial de acuerdo con las características de la cuenca, principalmente del área de drenaje (en general diferencias de elevaciones menores a 1.5 metros); aguas abajo de un punto de avulsión potencial (disminución brusca de la sección, puentes o entubaciones de poca sección que puedan ser obstruidos por el material arrastrado).
Baja	Áreas torrenciales identificadas por fotointerpretación (a la escala de trabajo o mayores), las cuales no pueden ser identificadas dentro de las categorías anteriores (zonas alejadas de los canales torrenciales y sin evidencias claras de eventos históricos y sus afectaciones).
Nula	No presenta ningún tipo de afectación a partir de los rasgos geomorfológicos, geológicos y áreas reportadas por la comunidad

**Fuente: POMCA río Opón (CAS, 2017)**

▪ Resultados y aplicabilidad

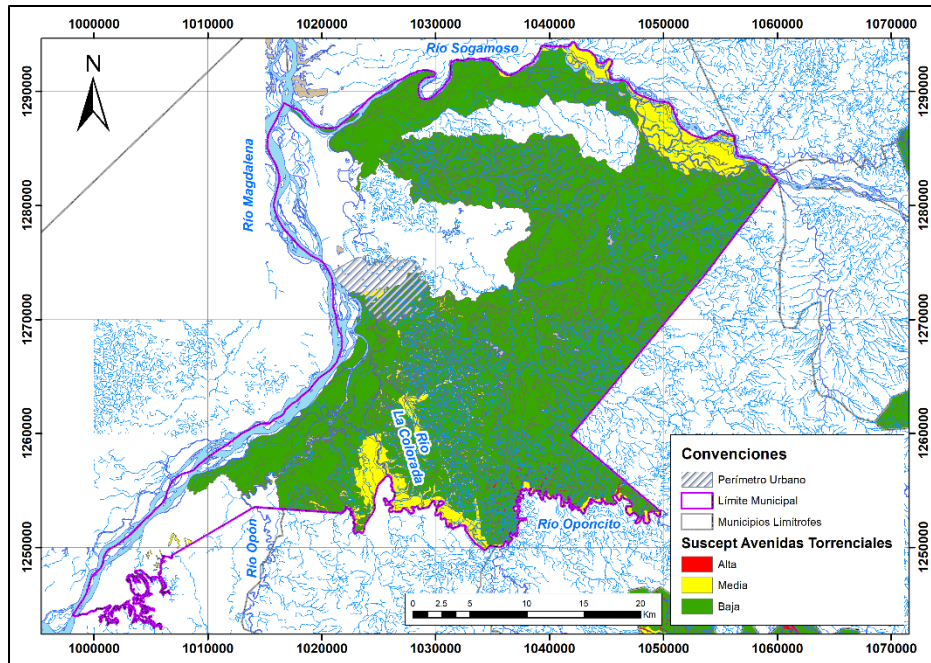
A continuación, se muestran los resultados obtenidos para el municipio de Barrancabermeja en el estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales presentado en los POMCA de los ríos Opón y Sogamoso.

**Figura 2.10 Susceptibilidad a eventos de inundación en el área rural del municipio**

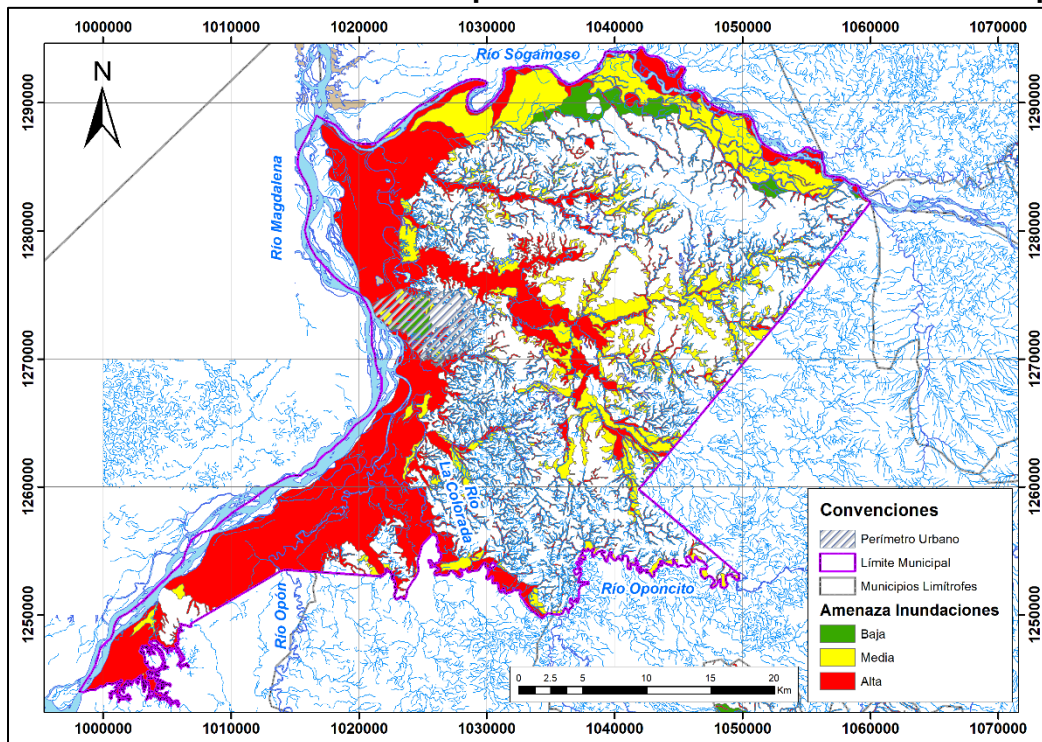




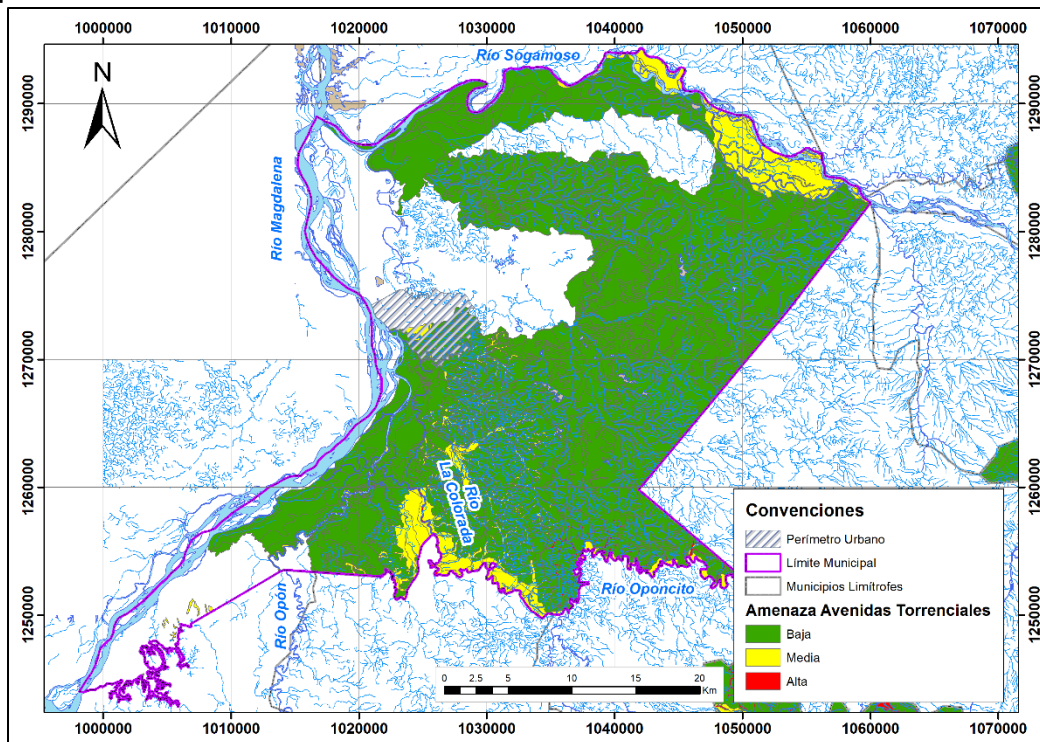
**Figura 2.11 Susceptibilidad a eventos de avenidas torrenciales en el área rural del municipio**



**Figura 2.12 Zonificación de la amenaza por inundación en el área rural del municipio**



**Figura 2.13 Zonificación de la amenaza por avenidas torrenciales en el área rural del municipio**



Mediante revisión del decreto 1077 de 2015, se encontró que el estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales cumple con los requisitos exigidos en el alcance de la normativa (análisis histórico, análisis geomorfológico y análisis hidrológico-hidráulico), por lo que estos resultados pudiesen ser incorporados directamente al componente rural del POT. Sin embargo, como se describe posteriormente en la propuesta metodológica, la generación de información nueva para el componente urbano e información no utilizada en el presente trabajo, se propone una nueva zonificación de amenaza por inundación en el área rural del municipio de Barrancabermeja.

## 2.2 ANÁLISIS CONCEPTUAL DE LA PROBLEMÁTICA Y DISEÑO DE LA METODOLOGÍA DE TRABAJO

Con base en la revisión de antecedentes, se concluye que gran parte del área rural de municipio de Barrancabermeja tiene un alto grado de susceptibilidad a ser afectado por eventos de inundación (no se tiene reporte de avenidas torrenciales). Estos eventos se presentan de manera frecuente y afectan significativamente a la población.

El principal mecanismo de generación de este tipo de amenaza corresponde a crecientes "lentas", las cuales se dan principalmente por el desbordamiento de los ríos Magdalena, Sogamoso, Opón y La Colorada, y a los caños y quebradas que descargan sus aguas estos.

Como se describió anteriormente, el área de estudio se encuentra enmarcada dentro de sistema hidrográfico complejo con abundantes cuerpos de agua lénticos y lóticos, interconectados de forma superficial y subsuperficial, cuya interacción, desde un punto de científico es difícil de modelar, medir y verificar.

Los aspectos que destacar en la caracterización de la dinámica fluvial del sistema hidrográfico son:

- Caños y quebradas altamente intervenidos por acciones antrópicas
- Caños y quebradas con problemas de sedimentación
- El intercambio de flujos entre el sistema río-humedal
- Atenuación de los eventos de crecientes debido a las amplias llanuras de inundación
- Áreas planas sin direcciones de flujo claramente definidas

### 2.2.1 Modelo hidrológico e hidráulico adecuado

La selección del modelo depende de la información disponible y de las características hidráulicas de las crecientes en el área de estudio.

#### 2.2.1.1 Información disponible

El municipio de Barrancabermeja cuenta varias estaciones de medición de caudal y nivel en sus principales corrientes. Con base en estos registros es posible calibrar diferentes tipos de modelos hidrológicos e hidráulicos para la definición de las zonas amenazadas

#### 2.2.1.2 Modelo seleccionado

Para el presente trabajo, teniendo en cuenta la información disponible y que las crecientes son “lentas”, se plantea un modelo hidrológico-hidráulico implementado en SIG, el cual se basa en el HAND (“*Height Above Nearest Drainage*”) para definir las zonas inundadas.

Es un modelo recomendado para estudios de gestión del riesgo (Nobre *et al.*, 2011, 2015) y sus ventajas y desventajas modelo son:

Ventajas	Desventajas
Poca información	La cobertura espacial se limita a los tramos de río con instrumentación
Implementación en SIG	No permite estimar las velocidades de flujo
No requiere información batimétrica	
Las inundaciones se estiman directamente con base en la información de nivel	
Bajos requerimientos computacionales	

### 2.2.2 Metodología General para la Zonificación de la Amenaza

Si bien la caracterización de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales en la cuenca de los ríos Opón y Sogamoso presentada en los proyectos POMCA, cumplen con los alcances estipulados en el decreto 1077 de 2015, y pudiesen ser articulados directamente al POT, la implementación de un modelo hidrológico – hidráulico permite generar información adicional relevante para la gestión de la amenaza y el riesgo por inundación en el municipio de Barrancabermeja.

Con el ánimo de integrar la información que se generará en el presente estudio y la información generada en el proyecto POMCA, la metodología propuesta para la zonificación de la amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el área rural del municipio de Barrancabermeja consiste en:

- Se toma como escenario base la zonificación de inundación y avenidas torrenciales propuestas por el proyecto POMCA



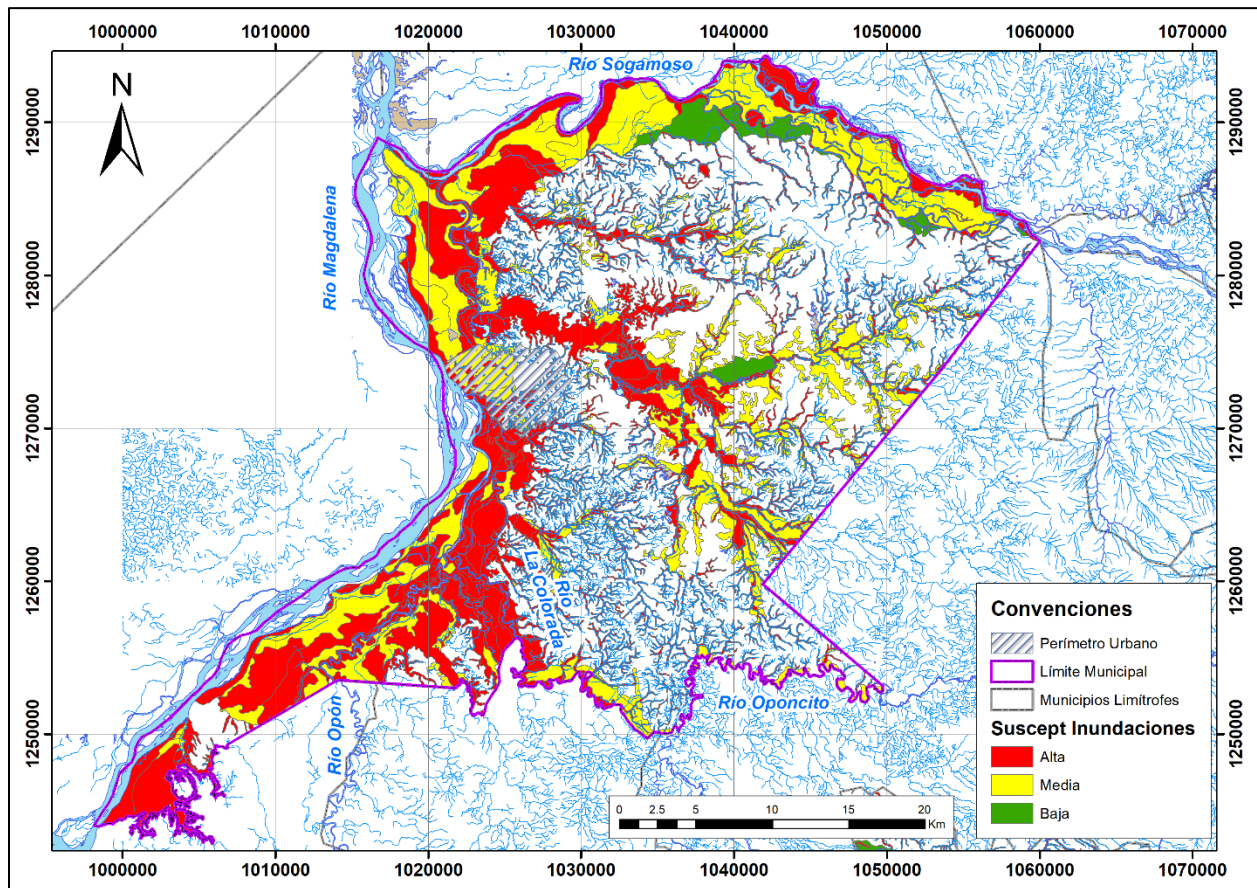
- Se identifican las zonas geográficas donde, con la información disponible y las metodologías planteadas, se pueda mejorar la zonificación del escenario base.
- Zonificar la amenaza por inundación y avenidas torrenciales con base en los modelos propuestos.
- El escenario final de amenaza por inundación y avenidas torrenciales corresponderá a la superposición de ambas zonificaciones, utilizando un criterio conservador, dada la naturaleza del presente estudio.

### 3 ANÁLISIS DE SUSCEPTIBILIDAD

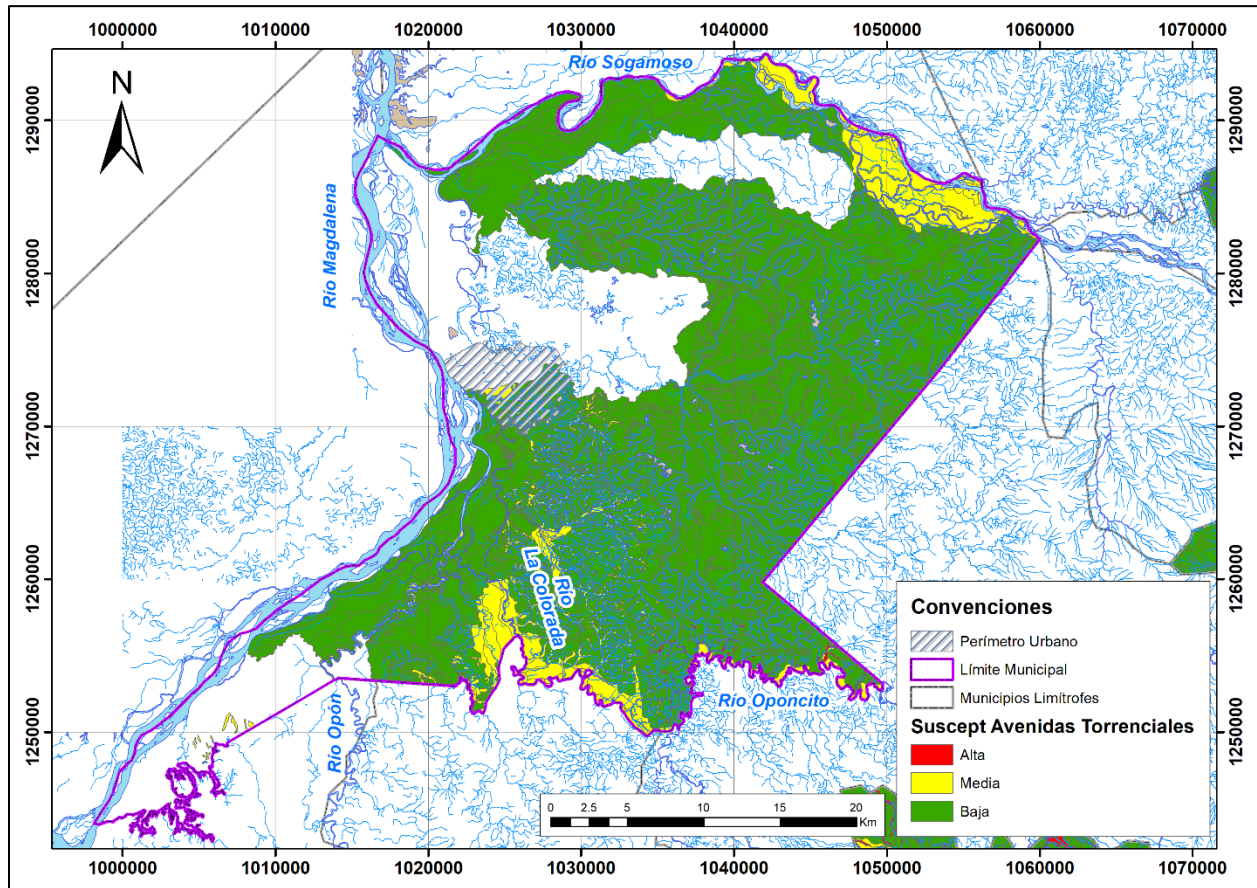
El análisis de susceptibilidad permite definir las zonas que, por sus condiciones fisiográficas, son propensos a sufrir eventos de determinado tipo. La susceptibilidad a eventos de inundación y avenidas torrenciales se puede clasificar con base en las unidades geomorfológicas, ya que estas describen el origen de las geformas del terreno y si estas están relacionadas con procesos fluviales o no.

En el presente trabajo utiliza la zonificación de desarrollada en los proyectos de POMCA de los ríos Opón y Sogamoso como escenario base de susceptibilidad por inundación y avenidas torrenciales. En la Figura 3.1 y en la Figura 3.2, se muestran los mapas de la zonificación de susceptibilidad, mientras que la memoria explicativa de estas se presentó detalladamente en la sección 2.1.2.1.

**Figura 3.1 Susceptibilidad a eventos de inundación**



**Figura 3.2 Susceptibilidad a eventos de avenidas torrenciales**



## 4 METODOLOGÍA E INFORMACIÓN UTILIZADA

En el presente capítulo se describe detalladamente la metodología utilizada para la modelación de los eventos de inundación asociados a diferentes períodos de retorno, así como el método empleado para la clasificación del grado de amenaza de estos. También se describe la información base utilizada y el uso que se le dio en el desarrollo de las actividades.

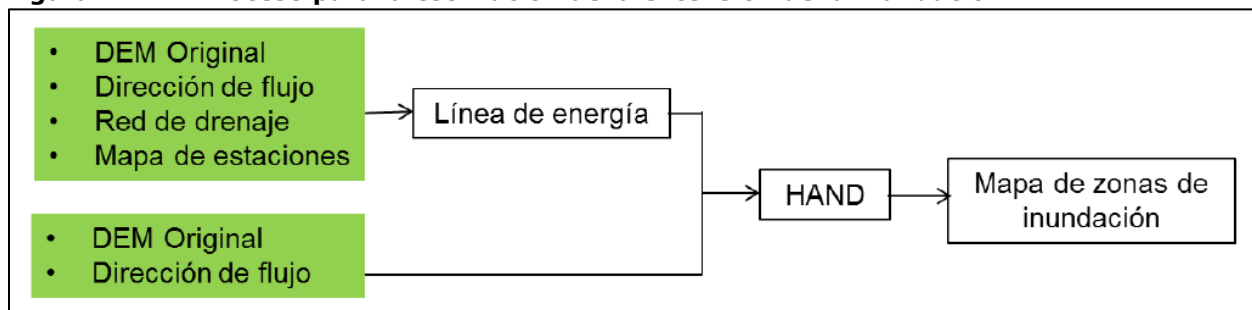
### 4.1 METODOLOGÍA INUNDACIONES LENTAS

Siguiendo la metodología planteada por UNAL (2013), la estimación de la extensión de la inundación se obtuvo a partir de un algoritmo con los siguientes parámetros de entrada: mapa de modelo digital de elevación, mapa de direcciones de drenaje, mapa de red de drenaje, mapa de estaciones de nivel amarradas.

El programa desarrollado, que permite calcular un mapa de amenaza por inundación asociado a niveles de lámina de agua, genera dos productos espaciales: el primero es el de línea de energía que es una interpolación de los valores de niveles de las estaciones a través de la red de drenaje (el nivel varía de acuerdo con el período de retorno), y el segundo, se obtiene por medio de la aplicación del algoritmo HAND (*"Height Above Nearest Drainage"*), es el mapa de amenaza por inundación que indica dónde el terreno es susceptible a inundaciones de acuerdo con los valores de los niveles de las estaciones (ver Figura 4.1).

La idea fundamental de este algoritmo HAND es la representación de un mapa de alturas con una pequeña variación con respecto al mapa de elevación original (DEM). El HAND tiene todos sus valores de elevación normalizados con respecto a la magnitud de la línea de energía en la red de drenaje existente, conformando así un mapa de elevaciones relativo a las corrientes existentes en las diferentes cuencas de la zona representada (UNAL, 2013).

**Figura 4.1 Proceso para la estimación de la extensión de la inundación**



Fuente: UNAL (2013)

#### 4.1.1 Estimación de Niveles Máximos de la Lámina de Agua

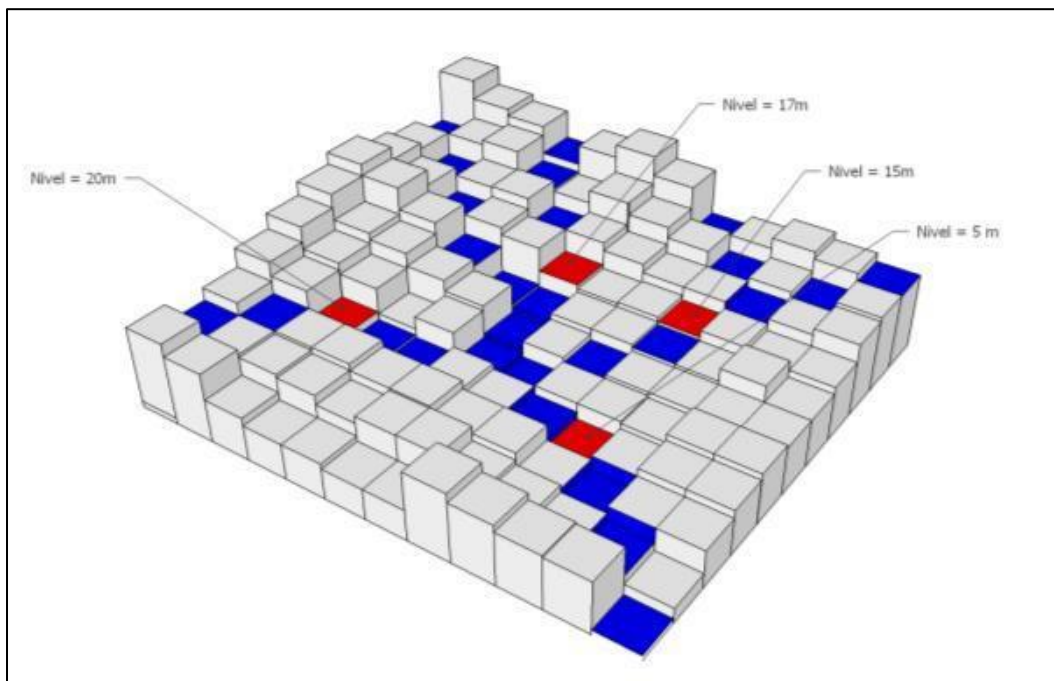
Siguiendo la metodología UNAL (2013), para generar la línea de energía a lo largo de la red de drenaje se empieza en el pixel más bajo de esta, así se garantiza que los pixeles de aguas arriba siempre encuentren un valor de nivel al bajar por la red de drenaje. Partiendo de la estación con nivel más bajo se recorre la red de drenaje hasta encontrar la salida del DEM asignando valores de niveles piezométricos a la red, que dependen de la pendiente del terreno (ver Figura 4.2).

Luego se hace un proceso desde las estaciones de aguas arriba hacia las estaciones de aguas abajo, siguiendo un nivel de jerarquización según el orden de magnitud de las corrientes en la red de drenaje. El proceso consiste en empezar desde los niveles máximos y moverse a lo largo de la red de drenaje calculando pendientes. En el momento en el que el proceso encuentra otra estación calcula la pendiente del tramo a partir de la diferencia entre los niveles y la longitud calculada (ver Figura 4.3).

Luego el proceso regresa desde la estación de aguas arriba asignando niveles piezométricos a toda la red por medio de la pendiente encontrada. El proceso se repite hasta pasar por todas las estaciones (ver Figura 4.5).

Después de tener línea de energía a lo largo del tramo de la red de drenaje con información de estaciones, se procede a llevar niveles piezométricos al resto de la red. Para esto se parte de todos los puntos de la red para los cuales no se tiene información partiendo de un nivel piezométrico conocido y asociando una altura piezométrica a cada pixel de la red de acuerdo con una pendiente calculada para los ríos en la zona de estudio. Para el caso de estudio se trabaja a partir de la pendiente calculada del terreno. Así, se viaja hacia aguas arriba hasta que el valor del DEM queda por encima del nivel piezométrico, en este caso el valor que se le asigna a la red de drenaje es el valor del DEM. Así se considerarán todos los pixeles que queden a la misma altura de la red de drenaje en las zonas encañonadas, pero no se harán sobre estimaciones considerando niveles piezométricos que en realidad no tienen por qué ser los verdaderos (ver Figura 4.67).

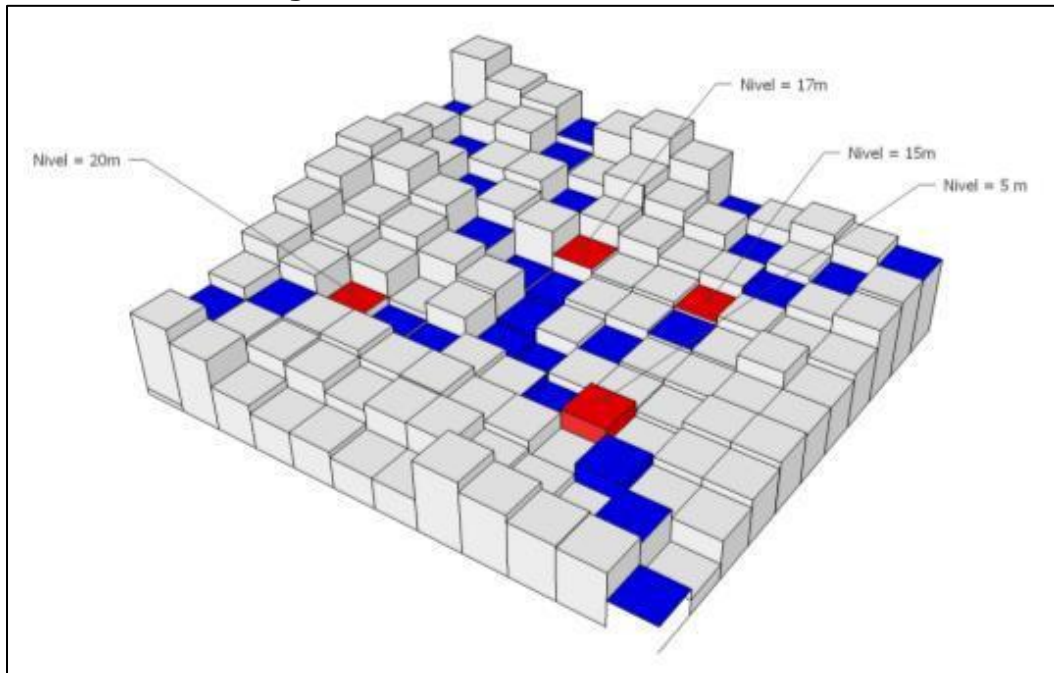
**Figura 4.2 DEM esquemático con red de drenaje en azul y estaciones hidrológicas en rojo**



**Fuente: UNAL (2013)**

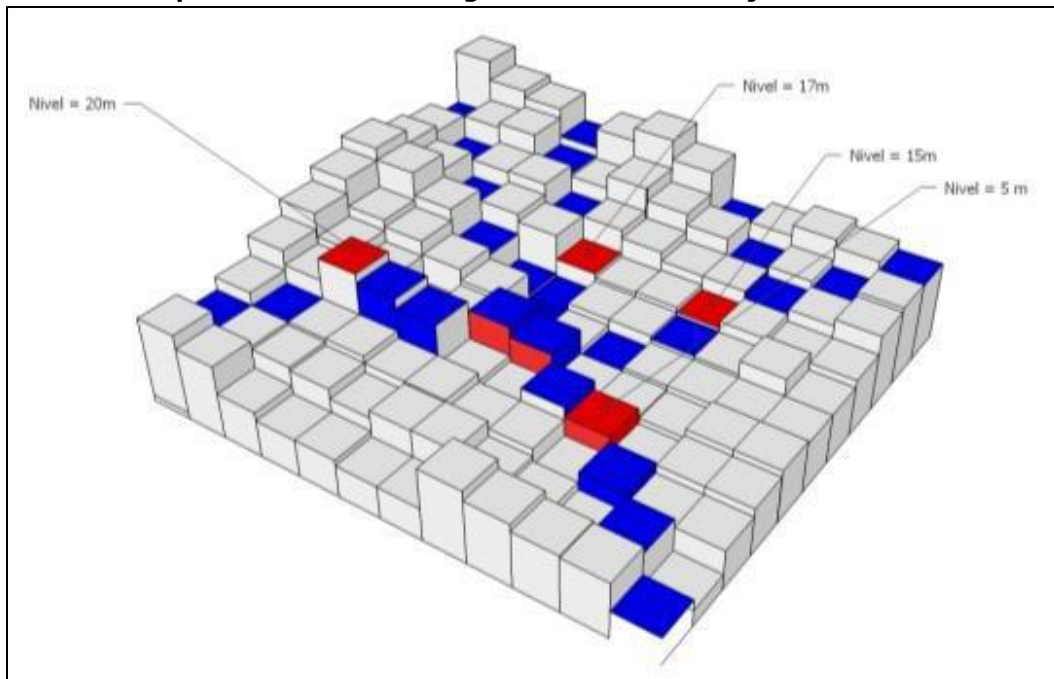


**Figura 4.3** Línea de energía definida hasta la salida del DEM



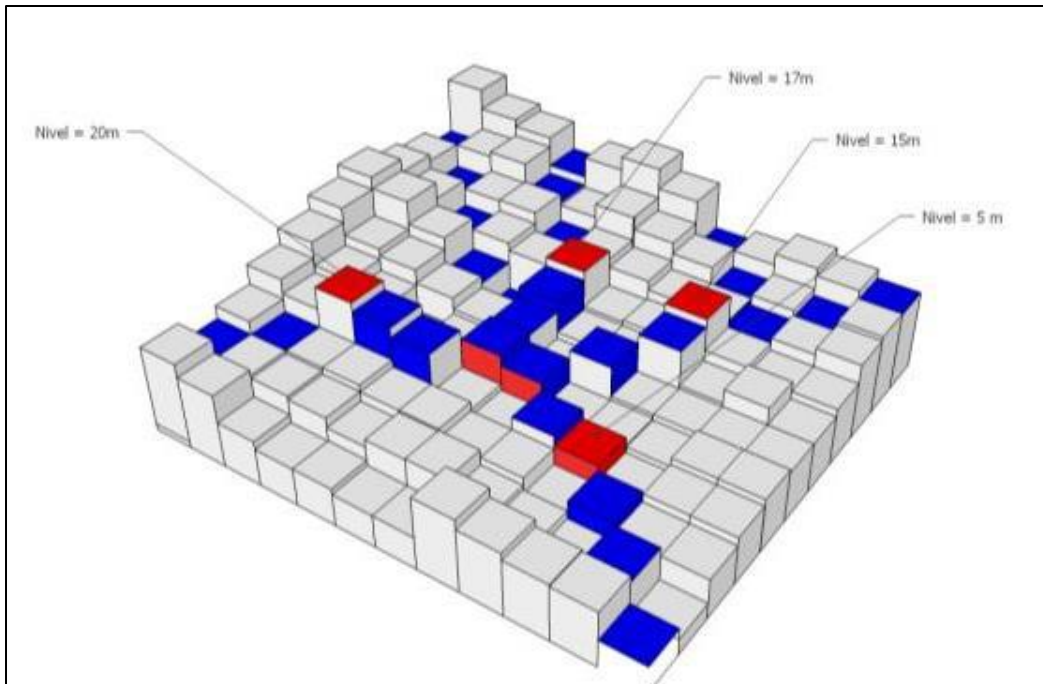
Fuente: UNAL (2013)

**Figura 4.4** Línea de energía definida desde la estación con el nivel mas alto hasta la siguiente estación que encuentra a lo largo de la red de drenaje



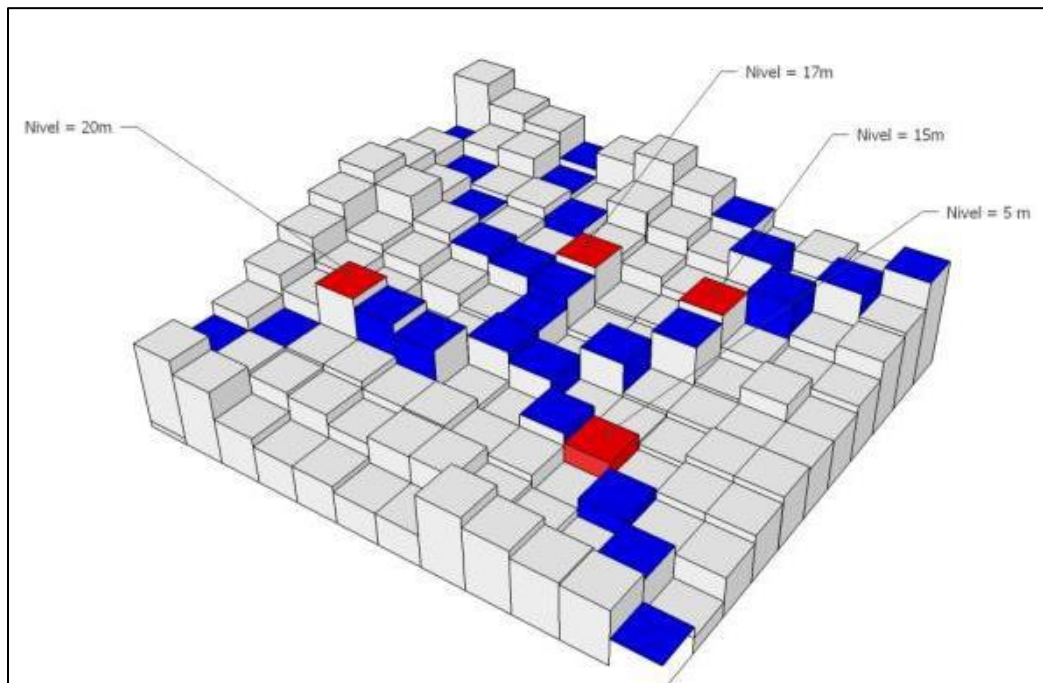
Fuente: UNAL (2013)

**Figura 4.5** Línea de energía definida para todos los puntos de la red de drenaje dentro de las estaciones de nivel



Fuente: UNAL (2013)

**Figura 4.6** Línea de energía generada en todos los puntos pertenecientes a la red de drenaje



Fuente: UNAL (2013)

#### 4.1.2 Estimación de Zonas Inundadas Asociadas a los Eventos de Niveles Máximos

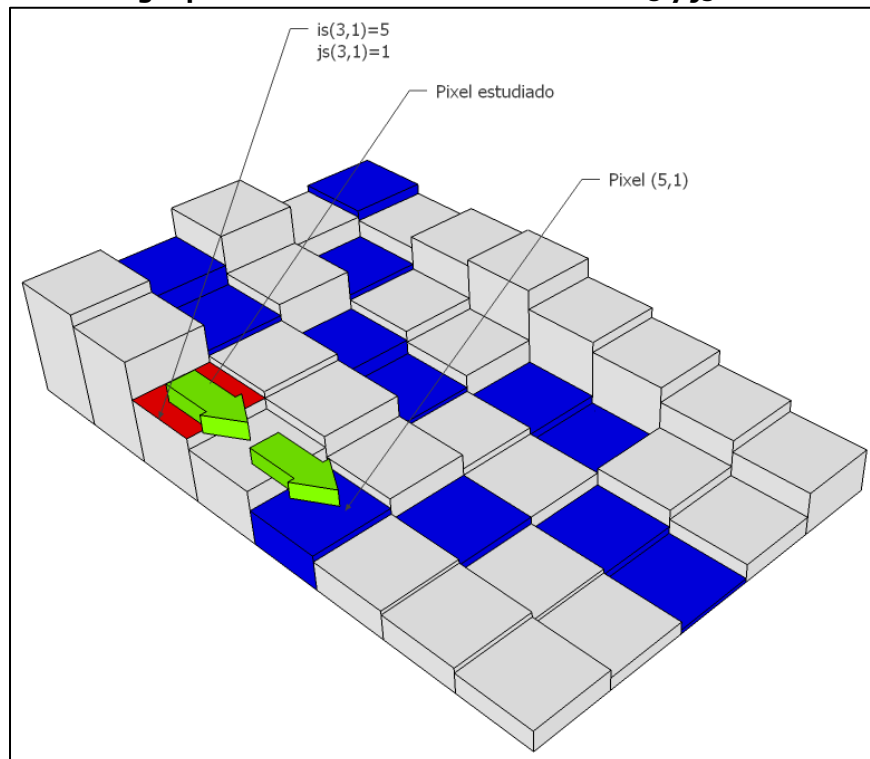
“Las matrices de  $i_s$  y  $j_s$  son calculadas según lo expuesto en la metodología del HAND. Las matrices tienen valores de la columna ( $j_s$ ) y la fila ( $i_s$ ) del pixel, en la red de drenaje, hacia el cual drena cada punto del terreno. La explicación se ve mejor en la Figura 4.7, donde el pixel para el cual se están calculando las matrices de  $i_s$  y de  $j_s$  es el pixel pintado de rojo. Se viaja a través del mapa de direcciones hasta llegar a un pixel de la red de drenaje. El valor de la fila del pixel de la red de drenaje es el valor para la matriz  $i_s$  en la celda roja y el valor de la columna del pixel de la red de drenaje es el valor para la matriz  $j_s$  en la celda roja” UNAL (2013).

El procedimiento se repite hasta que todos los pixeles dentro de la cuenca queden con valor de  $i_s$  y de  $j_s$ .

Teniendo las matrices de  $i_s$  y de  $j_s$  se hace un barrido por todo el DEM comparando el valor del pixel con el valor de la línea de energía del pixel asociado a las matrices  $i_s$  y  $j_s$ . Tal y como se muestra a continuación:

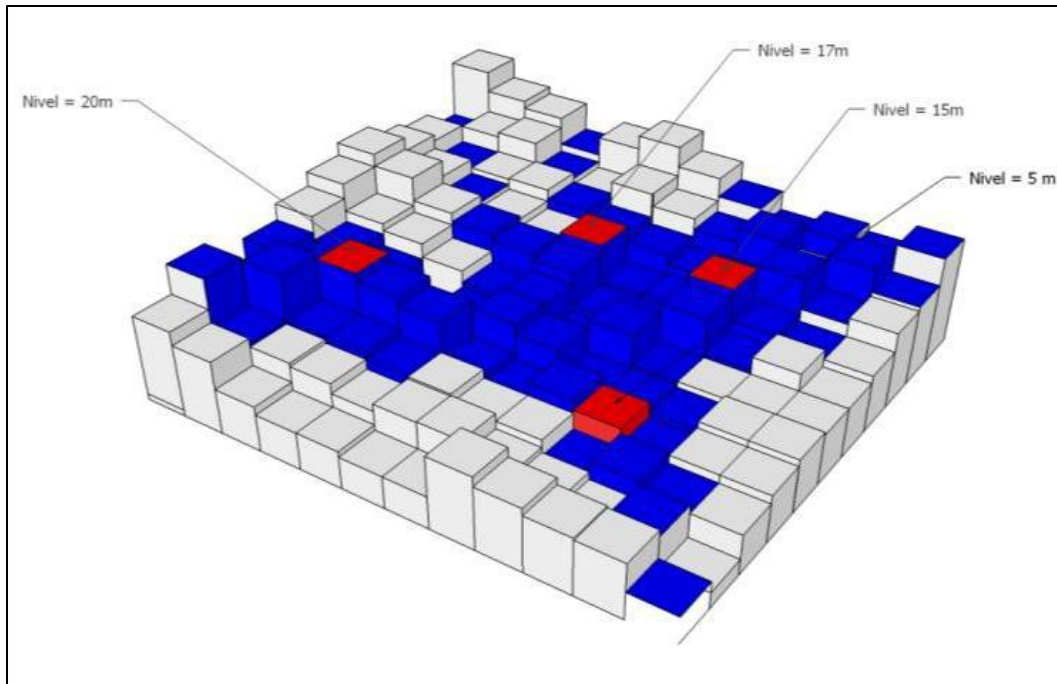
Si  $DEM(i, j) < Línea\ Energía[i_s(i, j), j_s(i, j)]$  se considera que el pixel se inunda. Si no, se considera que el pixel no se inunda. Esto teniendo en cuenta que  $i=1, 2, 3... N_0$ . Filas y  $j=1, 2, 3... N_0$ . de columnas. Así se hace para todos los pixeles hasta determinar todas las celdas dentro del DEM. Se obtiene así un raster de 1 y 0 donde el valor para las zonas inundadas es uno y el valor para las zonas no inundadas es cero, como se muestra en la Figura 4.8.

**Figura 4.7 Metodología para la obtención de las matrices  $i_s$  y  $j_s$**



**Fuente: UNAL (2013)**

**Figura 4.8 Esquematación del mapa de inundaciones asociado al DEM y niveles máximos**



Fuente: UNAL (2013)

#### **4.1.2.1 Ventajas y limitaciones**

Las principales ventajas de la metodología son:

- Requerimiento mínimo de información (DEM y estaciones de nivel)
- No requiere de levantamiento batimétrico
- Fácil implementación mediante SIG
- Es una metodología en el estado del arte, para la cual se ha comprobado su aplicabilidad para estudios de gestión del riesgo (Nobre *et al.*, 2011, 2015).

Sus principales limitaciones son:

- Estudio de crecientes lentas, asociadas a cuerpos de agua con bajas pendientes
- No es posible estimar las velocidades de flujo

#### **4.1.2.2 Criterios y suposiciones**

- La pendiente de la línea de energía entre dos estaciones varía linealmente independiente de la pendiente de fondo de la corriente.
- La definición de las elevaciones de pixeles intermedios esta jerarquizada en función del orden de magnitud de la corriente.
- Se asume que el evento asociado a determinado período de retorno ocurre de forma simultánea en todas las estaciones de la red de drenaje.

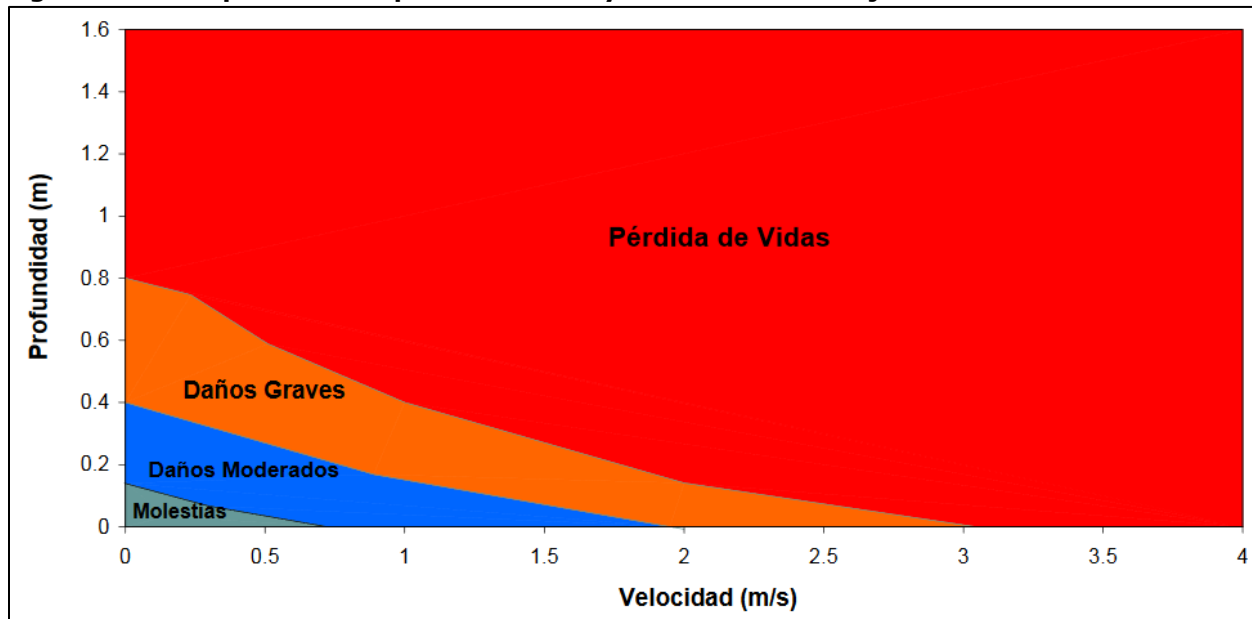
## **4.2 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA**

La categorización de la amenaza por eventos de inundación y avenidas torrenciales es el objetivo principal del presente trabajo. La relación que se establezca entre las

probabilidades de ocurrencia de los eventos y las categorías definidas es un tema de importancia mayor.

Los criterios para la clasificación del grado de amenaza son subjetivos, y generalmente están según la normativa local establecida para la gestión del riesgo por inundación (EU, 2014). Generalmente se aplican dos escenarios probabilísticos: en el primero se asocia una categoría alta, media o baja, según la probabilidad de ocurrencia del evento, 10, 100 y 500 años, respectivamente. En el segundo escenario se definen subjetivamente las clases en función de los daños generados, asociados a la profundidad y velocidad de flujo para un caudal asociado a determinado período de retorno, generalmente 100 años (ver Figura 4.9). Este último enfoque es utilizado por UNAL (2013).

**Figura 4.9 Tipos de daño por inundación y condiciones de flujo**



**Fuente: UNAL (2013)**

Como se mencionó anteriormente, se plantea que los resultados desarrollados en el presente estudio sean compatibles con los resultados obtenidos en el proyecto POMCA. Para ello se establecen los siguientes criterios de clasificación.

**Tabla 4.1 Categorización de amenaza por inundación**

Categoría de Amenaza	Descripción de la inundación
Alta	Probabilidad de ocurrencia alta. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno menor que 10 años.
Media	Probabilidad de ocurrencia media. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 10 y 100 años.
Baja	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 100 y 500 años.
Nula	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno mayor que 500 años.

### 4.3 INFORMACIÓN UTILIZADA

Con el objetivo de realizar las diferentes actividades con la información disponible más detallada a la fecha, se describen los datos utilizados en el desarrollo del presente trabajo.

#### 4.3.1 Modelo Digital de Elevación (MDE)

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo "raster" con estructura regular, el cual se genera utilizando equipo de cómputo y software especializados.

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital, las cuales varían dependiendo del método que se emplea para generarlos.

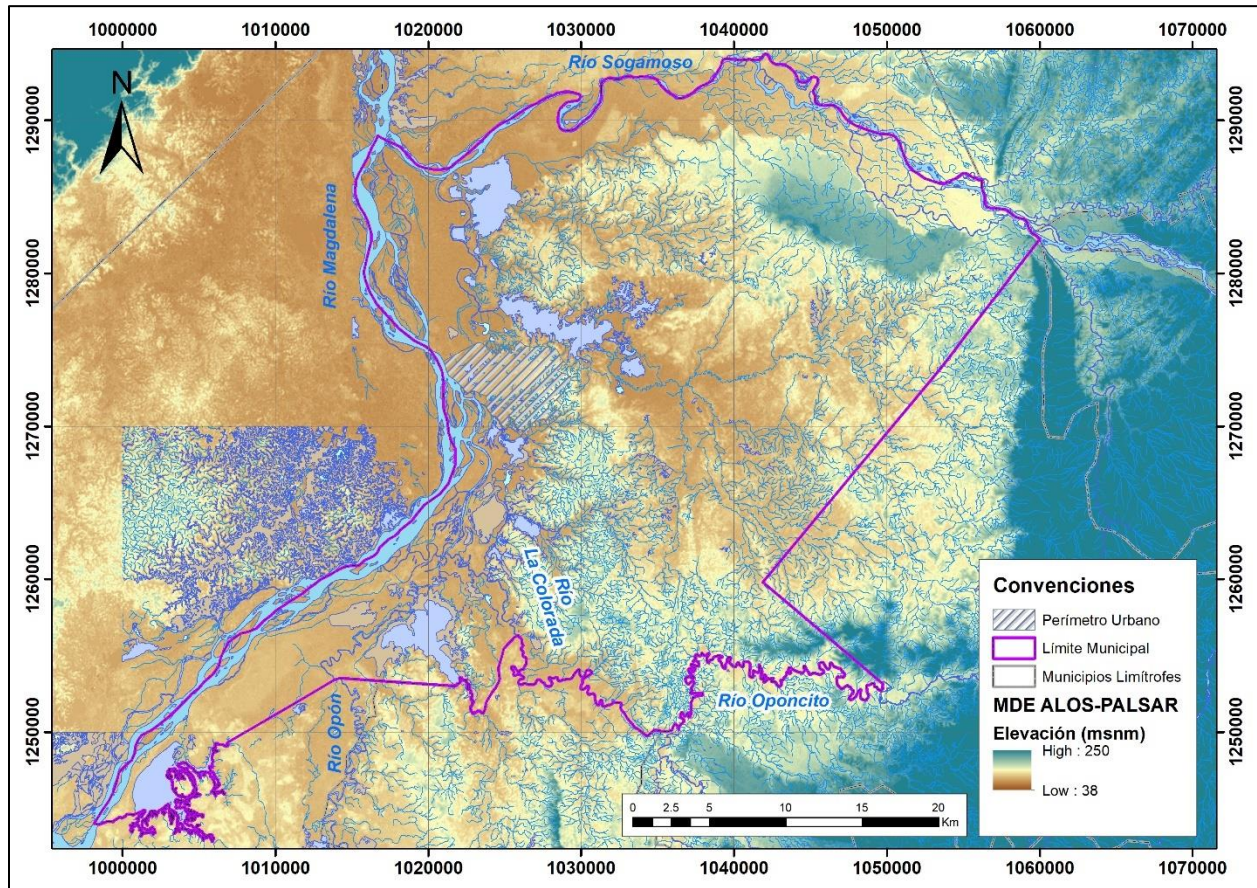
##### 4.3.1.1 ALOS-PALSAR

El MDE generado por el satélite ALOS ("The Advanced Land Observing Satellite") tiene una cobertura espacial global, con una resolución de pixel de 12,5 m. Para este trabajo se utilizó la información disponible entre las longitudes [74,0°W – 73,5°W] y las latitudes [6,5°N – 7,5°N]. La información se encuentra disponible de forma gratuita en la página <https://www.asf.alaska.edu/sar-data/palsar/>.

Esta información fue utilizada para el desarrollo de las siguientes actividades:

- Trazado de la red de drenaje
- Definición de la línea de energía
- Generación de las matrices  $i_s$  y  $j_s$
- Generación del HAND
- Estimación de las zonas inundadas asociadas a los eventos de niveles máximos

**Figura 4.10 Modelo Digital de Elevación ALOS-PALSAR**



### 4.3.2 Red de Monitoreo de Datos Hidrológicos del IDEAM

Como se describe en la metodología utilizada para la estimación de las líneas de energía y extensión de las inundaciones se requiere de varias estaciones en la red de drenaje. De esta manera se utilizó la información disponible en la red de monitoreo del IDEAM.

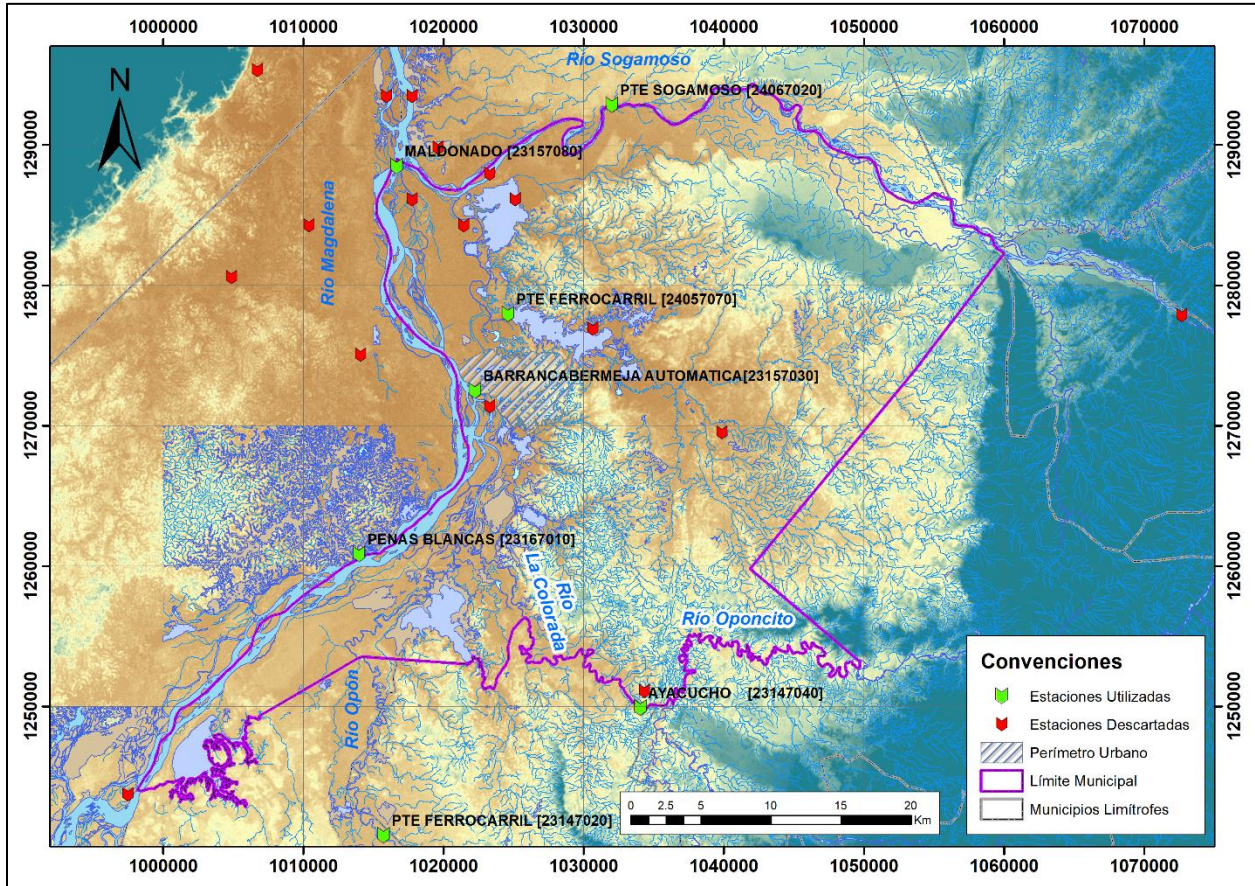
#### 4.3.2.1 Estaciones de Nivel

De las estaciones totales disponibles en el catálogo de estaciones del IDEAM, para noviembre de 2017, se utilizaron las estaciones que cumplen con los siguientes criterios:

- Longitud de registro mayor que 20 años.
- Año de suspensión de la estación mayor que el 2005.
- Porcentaje de datos faltantes menor que el 20%

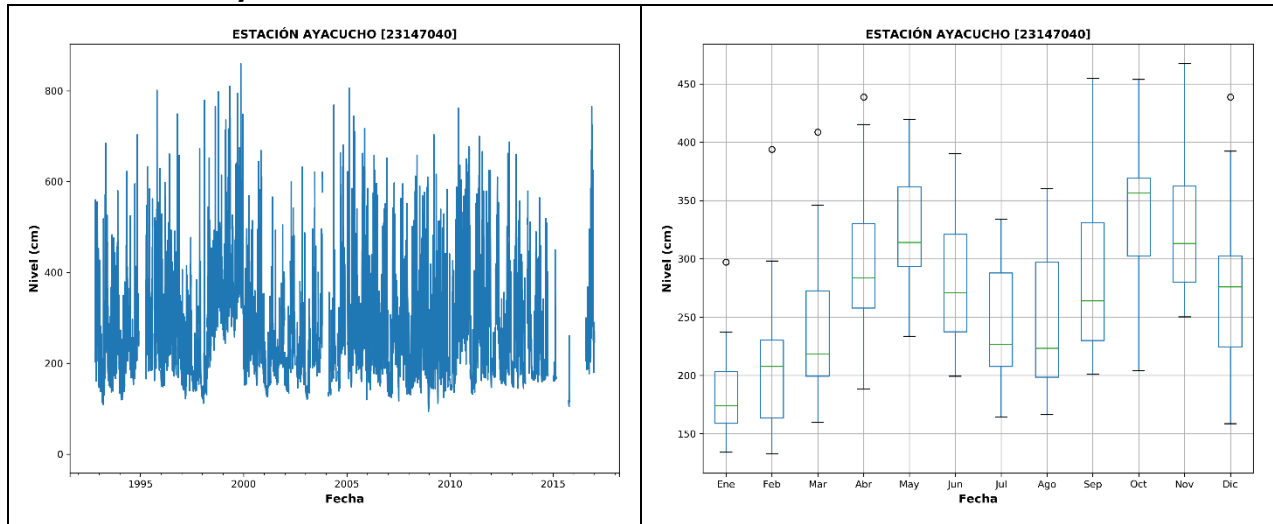
En la Tabla 4.2 se listan las estaciones de nivel en municipio de Barrancabermeja, mientras que en la Figura 4.11 se muestra su respectiva localización. En el Anexo B se adjuntan los registros y los gráficos de las estaciones utilizadas.

**Figura 4.11 Localización de las estaciones hidrológicas utilizadas**



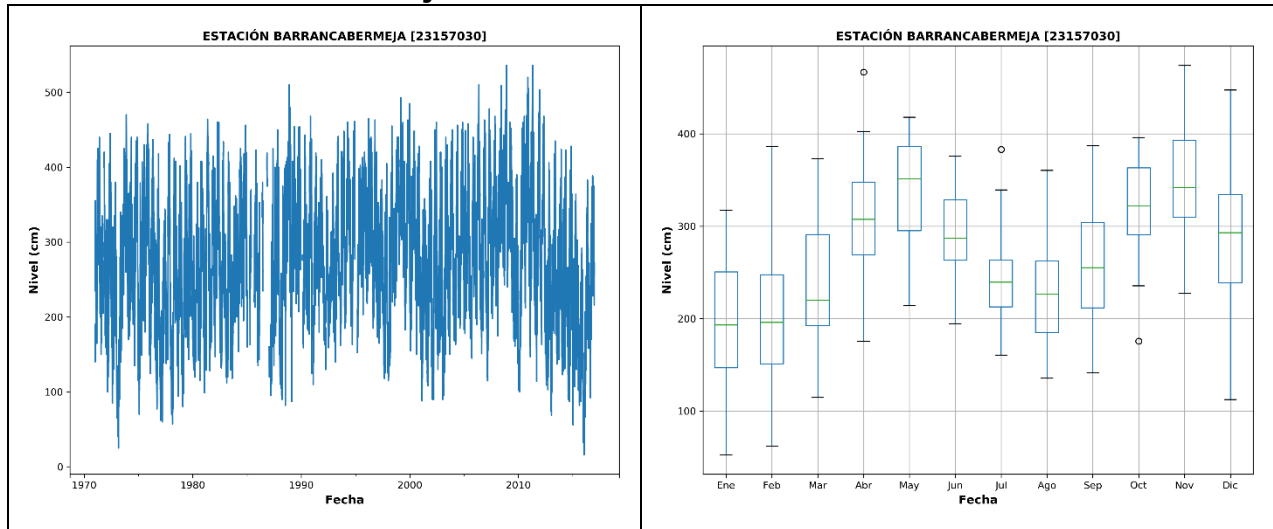
De la Figura 4.12 a la Figura 4.18 se muestran los registros diarios, y los histogramas mensuales de las estaciones de nivel utilizadas en el estudio.

**Figura 4.12 Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Ayacucho**

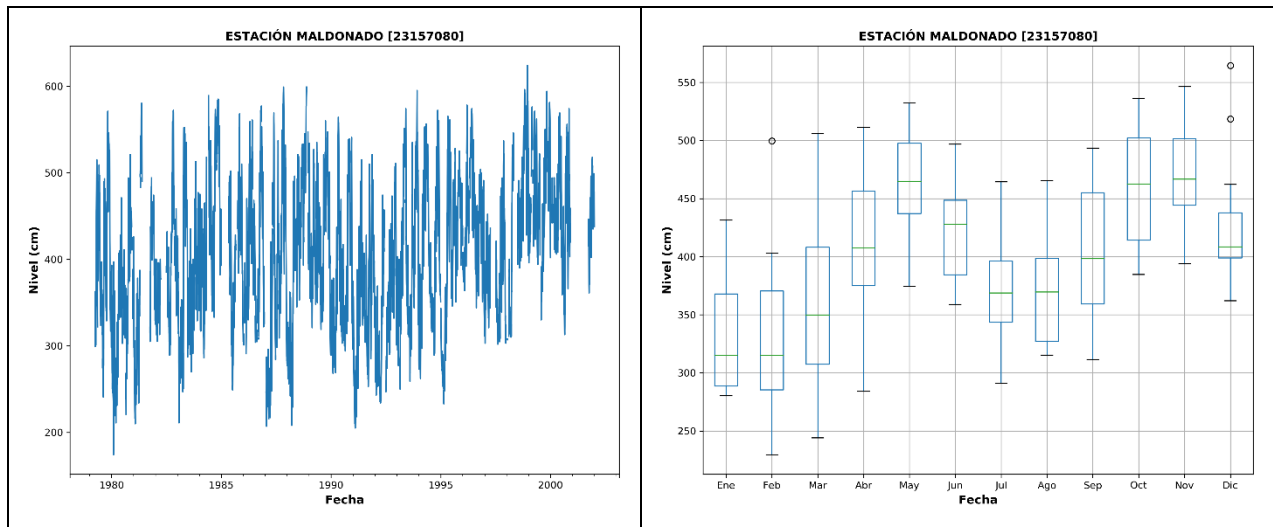




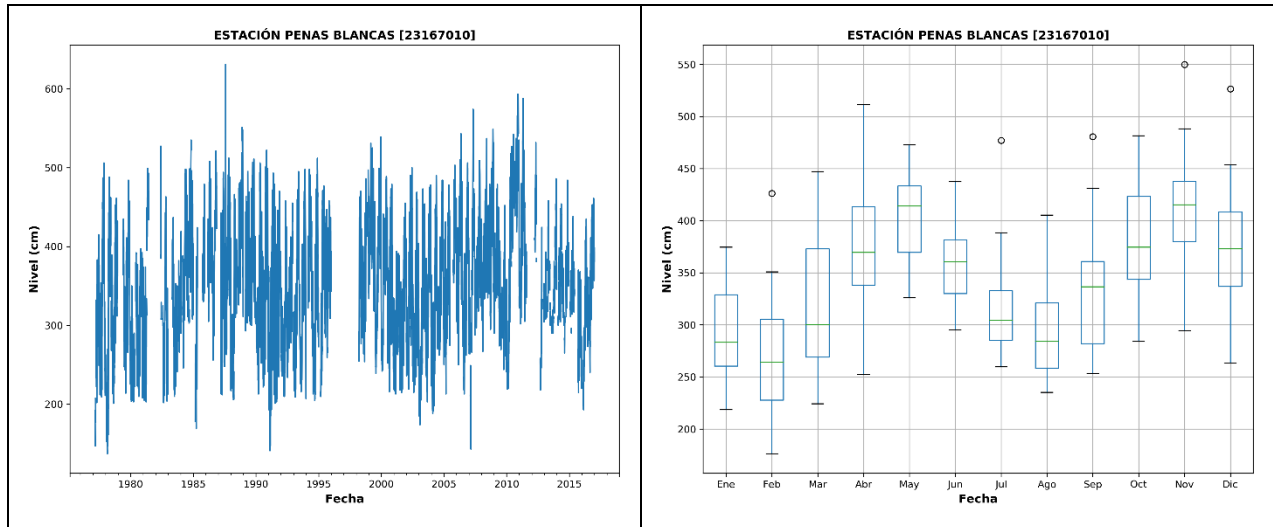
**Figura 4.13 Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Barrancabermeja Automática**



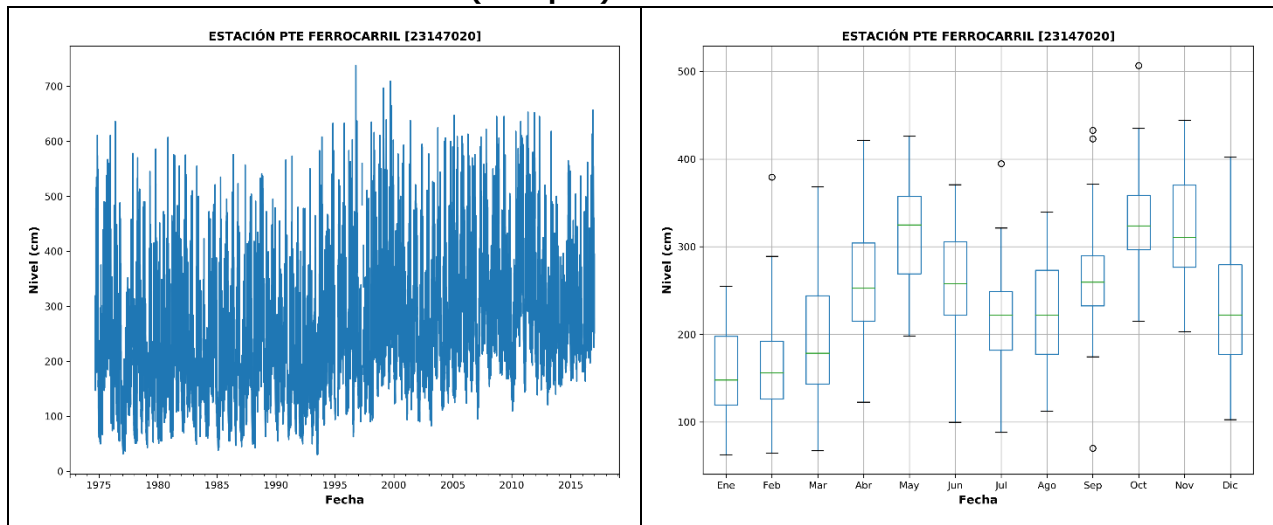
**Figura 4.14 Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Maldonado**



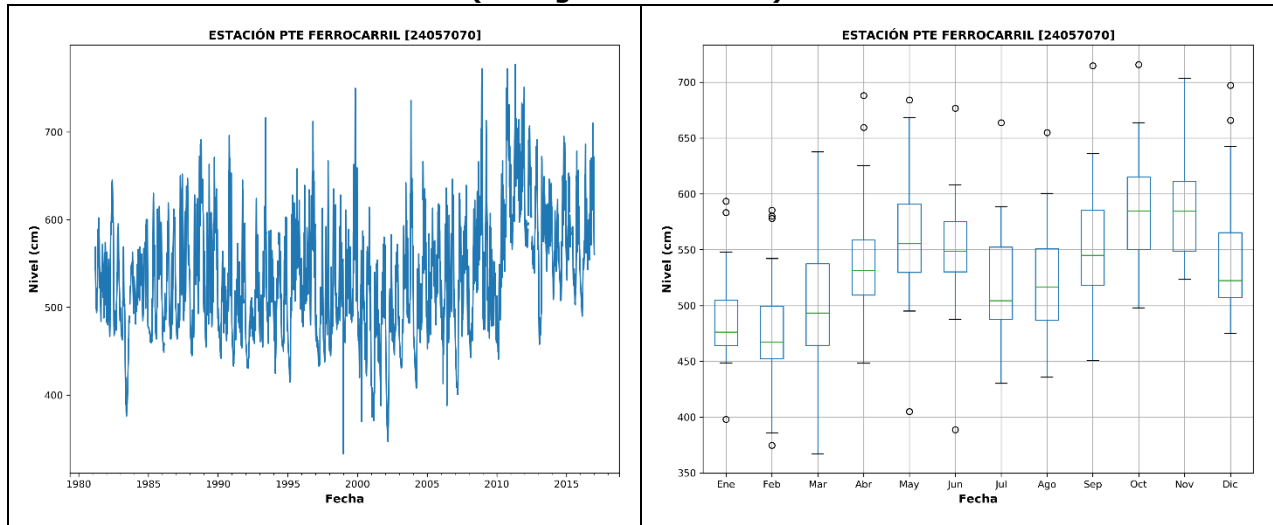
**Figura 4.15 Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Peñas Blancas**



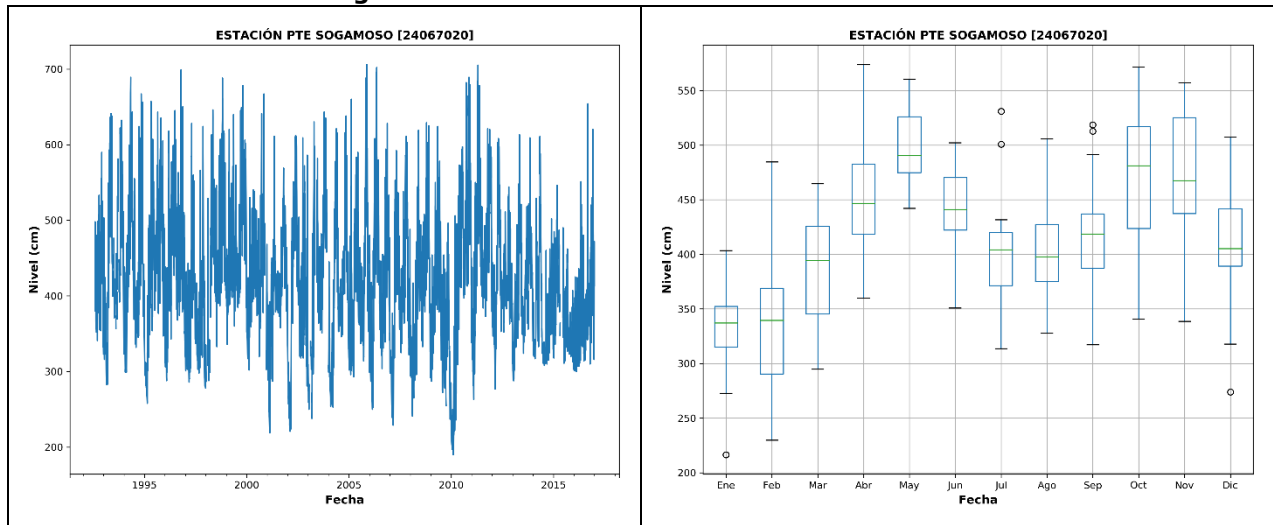
**Figura 4.16 Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Puente Ferrocarril (río Opón)**



**Figura 4.17 Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Puente Ferrocarril (ciénaga San Silvestre)**



**Figura 4.18 Registros diarios (izquierda) e histograma de niveles mensuales registrados en la estación Puente Sogamoso**



En todas las estaciones se marca un ciclo bimodal de los niveles con dos períodos de niveles altos (abril-junio, octubre-noviembre) con intensidades similares; y dos períodos de niveles bajos (diciembre-marzo, julio-agosto), con una mayor intensidad del primer período.

Gráficamente se logra identificar una variación significativa de los registros en la estación Peñas Blancas, en el período 2011-2016, por lo que se decide descartar estos registros de los análisis posteriores.

**Tabla 4.2 Estaciones de nivel utilizadas en el estudio de amenaza por inundación en el municipio de Barrancabermeja**

Código	Nombre	Tipo	Departamento	Municipio	Corriente	Lat	Lon	FechaInst	Fechas Sus	Registros
23147020	PTE FERROCARRIL	LG	SANTANDER	SIMACOTA	OPON	6.774	-73.935	9/30/1975	21/31/2016	43
23147040	AYACUCHO	LM	SANTANDER	BARRANCABERMEJA	LA COLORADA	6.856	-73.769	11/30/1992	21/31/2016	25
24067020	PTE SOGAMOSO	LM	SANTANDER	PUERTO WILCHES	SOGAMOSO	7.244	-73.788	8/15/1992	21/31/2016	25
23157080	MALDONADO	LM	SANTANDER	BARRANCABERMEJA	MAGDALENA	7.205	-73.927	11/15/1975	12/12/2008	42
23167010	PENAS BLANCAS	LM	ANTIOQUIA	YONDÓ	MAGDALENA	6.955	-73.951	2/15/1977	21/31/2016	40
24057070	PTE FERROCARRIL	LM	SANTANDER	BARRANCABERMEJA	CGA. SAN SILVESTRE	7.109	-73.855	5/15/1973	21/31/2016	44
23157030	BARRANCABERMEJA AUTOMATICA	HA	SANTANDER	BARRANCABERMEJA	MAGDALENA	7.060	-73.876	1/31/1971	21/31/2016	46

### 4.3.3 Amarre Geodésico de la Red de Monitoreo del IDEAM

Para proyectar las manchas de inundación asociadas a los niveles máximos se realizó el amarre geodésico de las “cotas cero” de las reglas de medición de las estaciones limnimétricas y limnigráficas.

En la Tabla 4.3 se muestran los niveles de cota cero estimados para cada una de las estaciones utilizadas. Estos fueron obtenidos de dos formas diferentes: primero se identificaron las estaciones reportadas en otros estudios en los cuales hubiesen elaborado un amarre detallado de las regletas de medición, por lo tanto, se asumen los niveles de cero presentados en dichos estudios; segundo para las estaciones de las que no se encontró valores reportados en documentación externa se procedió a realizar el amarre geodésico.

**Tabla 4.3 Estaciones con información de niveles en el área de estudio**

ID	Estación	Cota ceros	Fuente
1	Barrancabermeja	70,480	Estudio Integral/Estudio Impala <sup>1</sup>
2	Peñas Blancas	74,948	Estudio IDEAM <sup>2</sup>
3	Maldonado	64,203	Estudio Impala <sup>3</sup>
4	Puente Ferrocarril [CGA San Silvestre]	67,753	Levantamiento propio
5	Puente Sogamoso	74,035	Levantamiento propio
6	Ayacucho	84,101	Levantamiento propio
7	Puente Ferrocarril [Opón]	90,587	IDEAM

En la Fotografía 4.1 se muestra una parte del registro fotográfico del amarre geodésico realizado para las regletas de medición de las estaciones hidrológicas utilizadas. En el Anexo C se presenta el informe del amarre geodésico a la red del IGAC

<sup>1</sup>Estudio hidrológico para Process Consultants (Sucursal Colombia). Proyecto de Modernización Refinería Barrancabermeja – Ecopetrol S.A. Elaborado por Integral S.A

<sup>2</sup>Informe “Actualización Hidrotopográfica del Río Magdalena, Sector Puerto Berrío – Barrancabermeja”. Elaborado por CORMAGDALENA y UNAL

<sup>3</sup>Diagnóstico Hidrológico en el Área de Concesión Portuaria para el Puerto Impala Barrancabermeja S.A. Elaborado por Ingetec S.A

**Fotografía 4.1 Registro fotográfico del amarre geodésico de las estaciones hidrológicas**



#### **4.4 ÁREA DE ESTUDIO DE INUNDACIONES LENTAS**

Con base en la información de estaciones de nivel disponible, siguiendo la metodología general de trabajo, se define que el área donde es posible aplicar la metodología de inundaciones lentas corresponde a:

- Tramo del río Magdalena entre las estaciones Peñas Blancas, Barrancabermeja, Maldonado
- Tramo del río Sogamoso entre las estaciones Puente Sogamoso y Maldonado
- Tramo del río Opón entre la estación Puente Ferrocarril y su descarga al río Magdalena
- Tramo del río La Colorada entre la estación Ayacucho y su descarga al río Opón
- Tramo entre la Ciénaga de San Silvestre y su desembocadura en el río Sogamoso, a través del caño San Silvestre

## 5 ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO

### 5.1 ANÁLISIS DE SERIES DE NIVEL

Para cada una de las estaciones localizadas sobre la red de drenaje se realizó el procesamiento de las series de nivel para estimar los niveles máximos asociados a diferentes períodos de retorno. El procesamiento consiste en la estimación de los niveles medios mensuales multianuales, detección de valores atípicos ("outliers"), análisis de homogeneidad y tendencia, análisis de bondad y ajuste a las funciones de distribución de probabilidad y finalmente análisis de cuantiles.

#### 5.1.1 Análisis de valores atípicos

problema de valores extremos anómalos es relevante cuando se trata de predecir eventos extremos o estimar valores promedios en series hidrológicas. Estos valores anómalos se pueden presentar debido a errores por mala calibración en los instrumentos de medición, posibles cambios en la ubicación del instrumento, cambios de la geometría de la estructura o sección de medición de la variable u otros factores. En el análisis de homogeneidad de las series hidrológicas a ser utilizadas para la estimación de características estadísticas y/o modelación de variables en recursos hídricos, los "outliers" deben ser identificados y, de ser necesario, removidos de la serie de tal forma que no ocasionen una sobrestimación o subestimación de la variable de interés.

Para la determinación de valores atípicos se utilizaron las metodologías de punto fuera de rango, de rango normalizado (siendo la primera más confiable que la segunda ya que tiene un mayor rigor estadístico), Dixon-Thompson y Grubbs.

##### 5.1.1.1 Prueba de Rango

Son datos por fuera de un intervalo alrededor de la media, para este caso, como la media más o menos 3,5 veces la desviación típica de la serie.

$$\text{Rango} = \mu \pm 3,5 \cdot \sigma \quad \text{Ecuación 5.1}$$

##### 5.1.1.2 Prueba de Rango Normalizado

Consiste en comparar el estadístico  $q$  con un valor de referencia.

$$q = W/S \quad \text{Ecuación 5.2}$$

$$W = x_n - x_1$$

donde:

$n$  es el orden jerárquico de los registros dentro de la serie hidrológica

$S$  es la desviación estándar de la serie

Para un nivel de confianza igual al 95% el estadístico de referencia es igual a 5,01.

### 5.1.1.3 Prueba de Dixon-Thompson

Esta prueba de detección para un solo valor tiene la ventaja de detectar “outliers” en muestras con tamaños de hasta 3; puede ser utilizada como una prueba de 1 o 2 colas. Consiste en comparar el estadístico  $R_\alpha$  con un valor de referencia.

$$R_\alpha = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_2} \quad \text{Ecuación 5.3}$$

Para un nivel de confianza del 95%, en una prueba de 1-cola, analizando los 10 valores mayores en la serie,  $R_{10}$  es igual a 0,47793. Si el estadístico calculado es mayor al estadístico de referencia, el dato es sospechoso de ser un registro anómalo.

### 5.1.1.4 Prueba de Grubbs

Esta prueba comprueba si el valor que muestra la mayor desviación absoluta respecto a la media de la serie es mayor que el estadístico crítico. De ser el caso, este valor puede ser considerado como valor atípico.

$$G = \frac{\max_{i=1,\dots,N} |Y_i - \bar{Y}|}{S} \quad \text{Ecuación 5.4}$$

Donde  $\bar{Y}$  es la media aritmética de los datos y  $S$  es la desviación estándar. El estadístico de referencia, para una prueba de una cola, está dado por:

$$G_{\text{Crítico}} = \frac{(N-1)}{\sqrt{N}} \cdot \sqrt{\frac{(t_{\alpha/N, N-2})^2}{N-2 + (t_{\alpha/N, N-2})^2}} \quad \text{Ecuación 5.5}$$

donde  $t_{\alpha/N, N-2}$  denota el valor crítico para una distribución t con N-2 grados de libertad para un nivel de significancia igual a  $\alpha/N$ .

### 5.1.1.5 Resultados

Aplicando las pruebas mencionadas sobre los registros de nivel de las estaciones hidrológicas se identificaron los siguientes datos anómalos.

**Tabla 5.1 Resultado de las pruebas de detección de datos anómalos**

Código	Estación	Rango	Rango Normalizado	Dixon	Grubbs
23147020	PTE FERROCARRIL	-	-	-	Oct-2015
23147040	AYACUCHO	-	-	-	-
24067020	PTE SOGAMOSO	-	Abr-11, Oct-99, Oct-98, May-94, Nov-10, Nov-05, May-93, May-11 (Rango Normalizado)	-	-
23157080	MALDONADO	-	-	-	-
23167010	PENAS BLANCAS	-	-	-	-
24057070	PTE FERROCARRIL	-	Oct-10, Sep-10, Nov-10, Dec-11, Abr-11, May-11, Jun-11, Nov-11, Nov-16, May-12 (Rango Normalizado)	-	-



Código	Estación	Rango	Rango Normalizado	Dixon	Grubbs
23157030	BARRANCABERMEJA AUTOMATICA	-	Nov-10, Abr-11, Nov-08, Dic-11, Nov-88	-	-

No se detectaron datos anómalos por más de dos pruebas, por lo tanto, no se eliminó ningún registro del análisis de series de nivel.

### 5.1.2 Análisis de Homogeneidad y Tendencia

Una serie hidrológica que ha sido afectada por algún tipo de modificación en sus momentos estadísticos es considerada como no estacionaria. Estos cambios pueden deberse a cambios en la dinámica de la cuenca ya sea por factores antrópicos (cambios en la cobertura, desviaciones, demanda excesiva del recurso, construcción de una presa, entre otros), errores en la metodología de toma de registros (cambio de localización de la estación, cambios en la sección geométrica de la estación sin recalibración de la curva nivel-caudal, falta de mantenimiento de los instrumentos de medición, entre otros) o cambio climático.

Para el presente trabajo se utilizaron las pruebas estadísticas  $t$  simple y Mann-Whitney para la detección de cambios en la media de la distribución, la pruebas  $F$  para la identificar cambios en la varianza y las pruebas  $T$  y Mann-Kendall para la identificación de tendencias y la prueba de Sen para la cuantificación de la tendencia identificada.

#### 5.1.2.1 Cambio en la media

- Prueba  $t$  para dos muestras

$$t = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_p \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2}\right)^{0,5}} \quad \text{Ecuación 5.6}$$

Donde  $\bar{X}_1$  y  $\bar{X}_2$  son las medias muestrales de las series 1 y 2, respectivamente,  $n_1$  y  $n_2$  son los tamaños de las series 1 y 2;  $t$  es el valor de una variable aleatoria que tiene una distribución  $t$  con  $v = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad;  $S_p$  es la varianza combinada dada por:

$$S_p^2 = \frac{(n_1 - 1)S_1^2 + (n_2 - 1)S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \quad \text{Ecuación 5.7}$$

Donde  $S_1$  y  $S_2$  son las varianzas muestrales de las series 1 y 2, respectivamente. En esta prueba se asume que las varianzas son iguales pero desconocidas.

Para las pruebas de cambio en la media la hipótesis nula es:

$$H_0 \rightarrow \mu_1 = \mu_2$$

La región de rechazo de la hipótesis nula es:

Hipótesis alternativas	Rechazar $H_0$ si
$\mu_1 < \mu_2$	$t < -t_\alpha$
$\mu_1 > \mu_2$	$t > t_\alpha$
$\mu_1 \neq \mu_2$	$t < -t_{\alpha/2}$ ó $t > t_{\alpha/2}$

Donde  $t$  es el estadístico  $t$  - student para un nivel de significancia de 5%.

▪ Prueba de Mann-Whitney

Para los casos donde el cambio en la media se puede asociar a un evento episódico, la serie puede ser dividida en dos. La prueba de Mann-Whitney es la alternativa no paramétrica a la prueba  $t$  y puede ser utilizada para dos muestras independientes de una misma población.

Para las pruebas de cambio en la media la hipótesis nula es:

$$H_0 \rightarrow \text{las dos muestras independientes provienen de una misma población}$$

Para determinar el estadístico  $U$  de Mann-Whitney se selecciona el menor de los dos valores entre:

$$U_a = n_a \cdot n_b + 0,5 \cdot n_b(n_b + 1) - S_b \quad \text{Ecuación 5.8}$$

$$U_b = n_a \cdot n_b + 0,5 \cdot n_a(n_a + 1) - S_a \quad \text{Ecuación 5.9}$$

Donde  $n_a$  y  $n_b$  corresponden a tamaño de las muestras de las subseries A y B, respectivamente. Los valores de  $S_a$  y  $S_b$  se calculan como la suma del valor orden de jerarquía ("rank"), dentro de la serie completa, de cada dato para cada subserie. Siempre debe cumplirse que:

$$S_a + S_b = 0,5n(n + 1) \quad \text{Ecuación 5.10}$$

Luego, se calcula el valor  $Z$  para el menor valor de  $U$  de la siguiente manera:

$$Z = \frac{U - 0,5 \cdot n_a n_b}{(n_a n_b (n_a + n_b + 1) / 12)^{0,5}} \quad \text{Ecuación 5.11}$$

Donde  $Z$  corresponde a al valor de una variable aleatoria con una distribución normal standard. El valor crítico corresponde al valor de  $Z_{\alpha/2}$  para un nivel de significancia del 5%.

**5.1.2.2 Cambio en la varianza**

▪ Prueba F para dos muestras

Para esta prueba, la serie a analizar se divide en dos sub-series, después de un punto de cambio propuesto. A cada una de estas sub-series se le determina la media y varianza. El estadístico para la prueba está definido por.

$$F = S_l^2 / S_s^2 \quad \text{Ecuación 5.12}$$

Con  $v_l = n_l - 1$  grados de libertad para el numerador y  $v_s = n_s - 1$  grados de libertad para el denominador, donde  $n_l$  y  $n_s$  corresponden a tamaño de las muestras utilizadas para calcular  $S_l^2$  y  $S_s^2$ . El estadístico crítico corresponde al valor tabulado para  $F$  con los grados de libertad especificados y un nivel de significancia estadística de 2,5%. La hipótesis nula planteada es:

$$H_0 \rightarrow \sigma_l^2 = \sigma_s^2$$

### 5.1.2.3 Análisis de Tendencia

#### 5.1.2.4 Prueba T simple

Si la variable en estudio esta linealmente relacionada con el tiempo, los residuales son normalmente distribuidos, los residuos son independientes, y la varianza de los residuales es constante, se puede decir que una regresión lineal simple es una prueba de tendencia de la variable dependiente Y.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot t + \varepsilon \quad \text{Ecuación 5.13}$$

La hipótesis nula plantea que la pendiente  $\beta_1 = 0$ . Para determinar si  $\beta_1$  es significativamente diferente de cero, se utiliza el estadístico *t-student* (Y) con para:

$$t = \beta_1 / SE \quad \text{Ecuación 5.14}$$

Para una distribución t, con N-2 grados de libertad, para un nivel de significancia del 5%. SE corresponde error estándar de la regresión lineal.

#### 5.1.2.5 Prueba de Mann-Kendall

Esta prueba esta designada a detectar incrementos o decrementos monotónicos y la hipótesis nula e hipótesis alternativa se pueden expresar de la siguiente manera.

$H_0 \rightarrow$  los valores  $(X_i)$  son una muestra de n valores independientes e idénticamente distribuidos variables aleatorias

$H_A \rightarrow$  la distribución de  $X_i$  y  $X_j$  no son idénticos para todos los  $k, j \leq n$  con  $k \leq j$

El teorema que define el estadístico de la prueba es el siguiente.

Si  $X_i$  y  $X_j$  son valores aleatorios idénticamente distribuidos, el estadístico S se define como:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad \text{Ecuación 5.15}$$

donde

$$z = \begin{cases} 1 & \text{si } \theta > 0 \\ 0 & \text{si } \theta = 0 \\ -1 & \text{si } \theta < 0 \end{cases} \quad \text{Ecuación 5.16}$$

El estadístico  $\tau$  (Kendall-Tau) está dado por:

$$\tau = 2S / [n(n-1)] \quad \text{Ecuación 5.17}$$

El valor crítico para  $\tau$ , para un nivel de significancia del 5% corresponde a 0,422.

- Pendiente de Sen

Si una tendencia es identificada mediante la prueba de Mann-Kendall, es posible estimar la magnitud del cambio utilizando el estimador de pendiente de Sen:

$$\beta_1 = \text{median} \left( \frac{x_j - x_k}{t_j - t_k} \right) \quad \text{Ecuación 5.18}$$

para todos los  $k \leq j$  con  $k=1,2, \dots, n-1$  y  $j=2,3, \dots, n$ , es decir para la media de todos los valores de pendiente estimados para cada par de datos.

### 5.1.3 Resultados

Mediante la implementación de las pruebas de cambio en la media se identificó un cambio en el primero momento estadístico de las series para todas las estaciones, exceptuando la estación Ayacucho (río Opón). En la Tabla 5.2 se muestran los años para los cuales se identifica cambio en la media de cada una de las series; para las estaciones Puente Ferrocarril [23147020] y Puente Ferrocarril [24057070], localizadas en el río Opón y Ciénaga de San Silvestre, se identifica un cambio sistemático en la media, lo cual puede ser indicador de una tendencia de los valores medios de la serie (ver Tabla 5.4).

**Tabla 5.2 Resultado de las pruebas de detección de cambio en la media**

Código	Estación	Prueba t	Prueba de Mann-Whitney
23147020	PTE FERROCARRIL	1980-2012	1979-2012
23147040	AYACUCHO	NC	NC
24067020	PTE SOGAMOSO	1999, 2011	1999, 2011
23157080	MALDONADO	1992	1992
23167010	PENAS BLANCAS	2003	2003
24057070	PTE FERROCARRIL	1995-2007	1995-2007
23157030	BARRANCABERMEJA AUTOMATICA	2011	1980-1988, 2011

Mediante la implementación de las pruebas de cambio en la varianza se identificó un cambio en el primero momento estadístico de las series para todas las estaciones, exceptuando las estaciones Maldonado y Peñas Blancas. En la se muestran los años para los cuales se identifica cambio en la media de cada una de las series; para las estaciones Puente Ferrocarril [23147020] y Puente Ferrocarril [24057070], localizadas en la el río Opón y Ciénaga de San Silvestre, se identifica un cambio sistemático en la media, lo cual puede ser indicador de una tendencia de los valores medios de la serie (verTabla 5.4).

**Tabla 5.3 Resultado de las pruebas de detección de cambio en la varianza**

Código	Estación	Cambio en la varianza [Prueba F]
23147020	PTE FERROCARRIL	1984-1993, 2011
23147040	AYACUCHO	1999
24067020	PTE SOGAMOSO	1999, 2011
23157080	MALDONADO	NC
23167010	PENAS BLANCAS	NC
24057070	PTE FERROCARRIL	1982-1999
23157030	BARRANCABERMEJA AUTOMATICA	2005

Utilizando las pruebas de detección de tendencias se determinó que los registros de nivel de las estaciones Puente Ferrocarril [23147020] y Puente Ferrocarril [24057070], exhiben una tendencia creciente.

**Tabla 5.4 Resultado de las pruebas de tendencia**

Código	Estación	Prueba T	Prueba de Mann-Kendall	Pendiente de la tendencia Sen (cms/año)
23147020	PTE FERROCARRIL	Hay Tendencia	Hay Tendencia	2,60
23147040	AYACUCHO	No hay tendencia	No hay tendencia	-
24067020	PTE SOGAMOSO	No hay tendencia	No hay tendencia	-
23157080	MALDONADO	No hay tendencia	No hay tendencia	-
23167010	PENAS BLANCAS	No hay tendencia	No hay tendencia	-
24057070	PTE FERROCARRIL	Hay Tendencia	No hay tendencia	1,36
23157030	BARRANCABERMEJA AUTOMATICA	No hay tendencia	No hay tendencia	-

Con base en los resultados de las pruebas estadísticas y análisis gráfico, se toman las siguientes acciones con respecto a los registros que utilizados en los análisis posteriores.

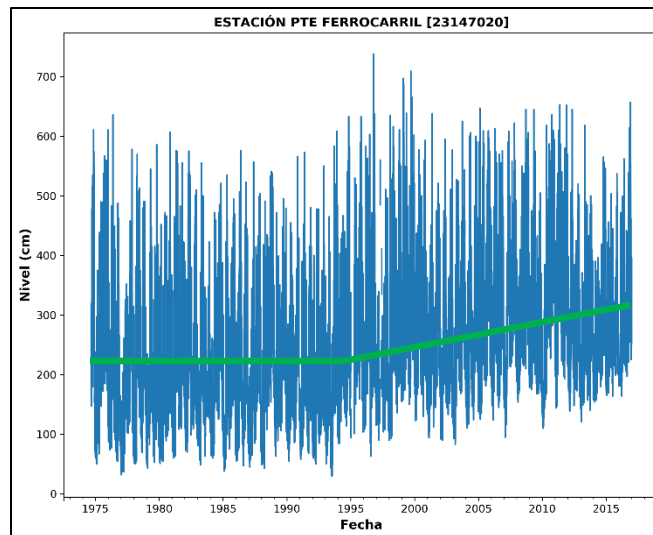
### **5.1.3.1 Estación Puente Ferrocarril [23147020]**

Con respecto a la estación Puente Ferrocarril se tiene que:

- Se identifica una tendencia creciente de aproximadamente 2,6 cm/año.
- Las pruebas estadísticas detectan la tendencia como un cambio sistemático de la media y la varianza
- Se estima que el punto donde inicia la tendencia corresponde al año 1997.

- Con el objetivo de ser conservadores se utilizan los valores de nivel sin modificar en toda la longitud de la serie.

**Figura 5.1 Análisis de la serie de niveles de la estación Puente Ferrocarril (río Opón)**

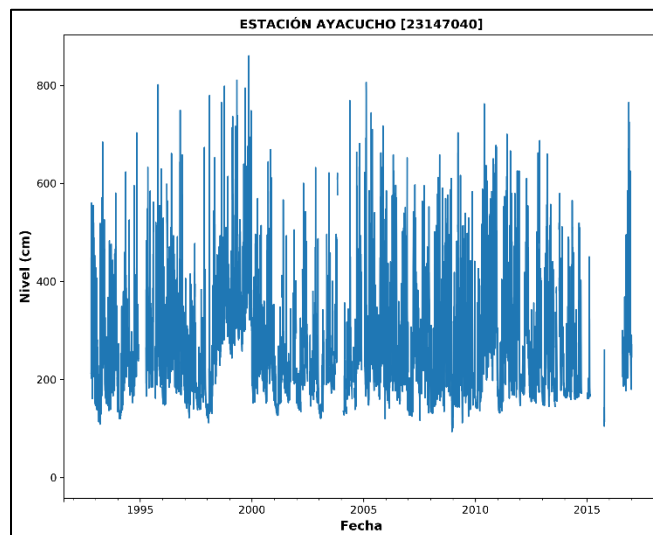


### 5.1.3.2 Estación Puente Ayacucho [23147040]

Con respecto a la estación Ayacucho se tiene que:

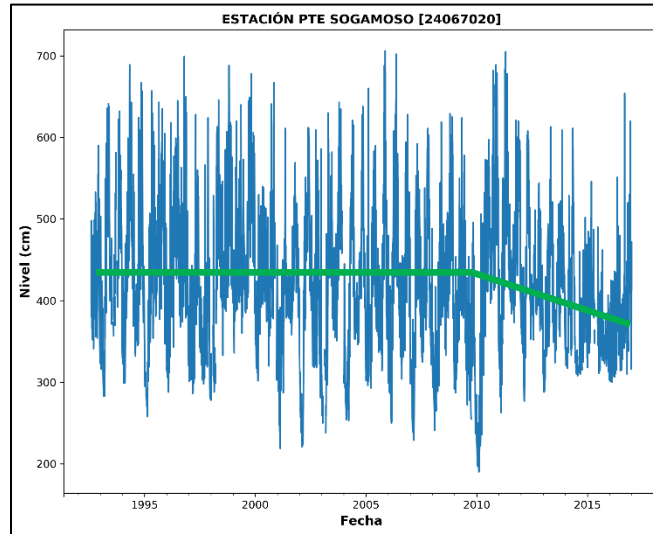
- Se identifica un cambio en la varianza a partir del año de 1996.
- Se utilizan los valores de nivel sin modificar en toda la longitud de la serie.

**Figura 5.2 Análisis de la serie de niveles de la estación Ayacucho**



### 5.1.3.3 Estación Puente Sogamoso [24067020]

**Figura 5.3** Análisis de la serie de niveles de la estación Puente Sogamoso

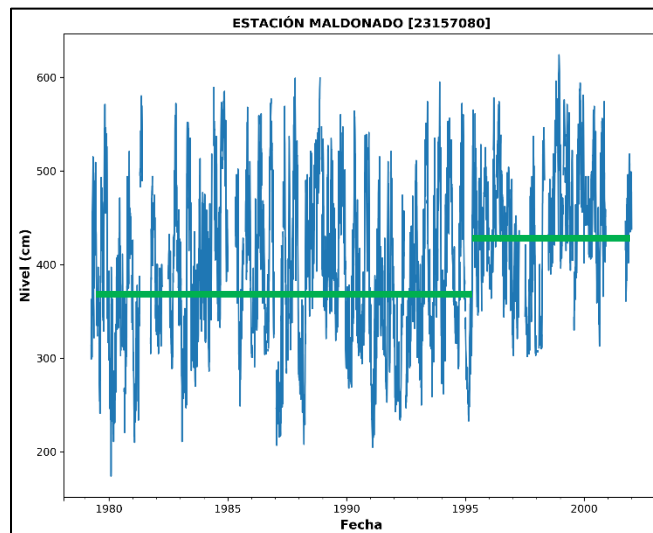


Con respecto a la estación Puente Sogamoso se tiene que:

- Se identifica un cambio en la media y en la varianza a partir del año de 1999 y 2011. Siendo más significativo el cambio encontrado en 2011.
- Se utilizan los valores de nivel sin modificar en toda la longitud de la serie.
- Se recomienda realizar estudios más detallados, que permitan identificar las posibles causas del cambio en el comportamiento de los niveles.

### 5.1.3.4 Estación Maldonado [23157080]

**Figura 5.4** Análisis de la serie de niveles de la estación Maldonado



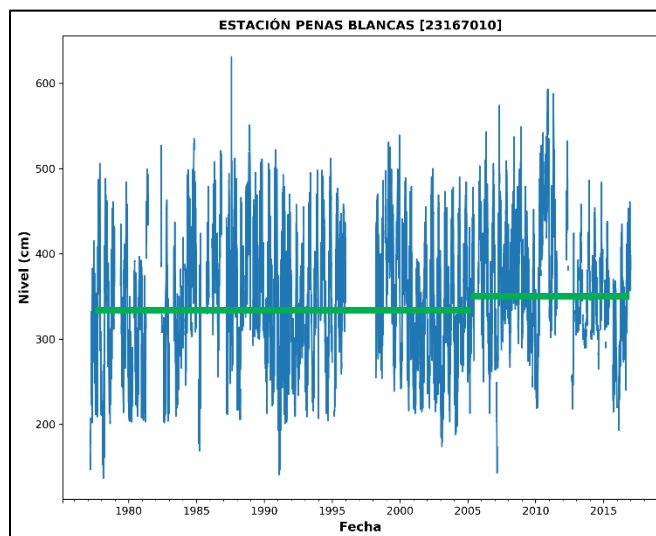
Con respecto a la estación Maldonado se tiene que:

- Se identifica un cambio en la media a partir del año de 1992.

- La media del segundo período es significativamente mayor que la del primero, sin embargo, no se pueden descartar los datos previos a 1992, ya que la longitud de los datos sería insuficiente para la estimación de los parámetros.
- Con el objetivo de ser conservadores se utilizan los valores de nivel sin modificar en toda la longitud de la serie.

### 5.1.3.5 Estación Peñas Blancas [23167010]

Figura 5.5 Análisis de la serie de niveles de la estación Peñas Blancas



Con respecto a la estación Peñas Blancas se tiene que:

- Se identifica un cambio en la media a partir del año de 2003.
- Gráficamente no se observan cambios significativos.
- Se utilizan los valores de nivel sin modificar en toda la longitud de la serie.

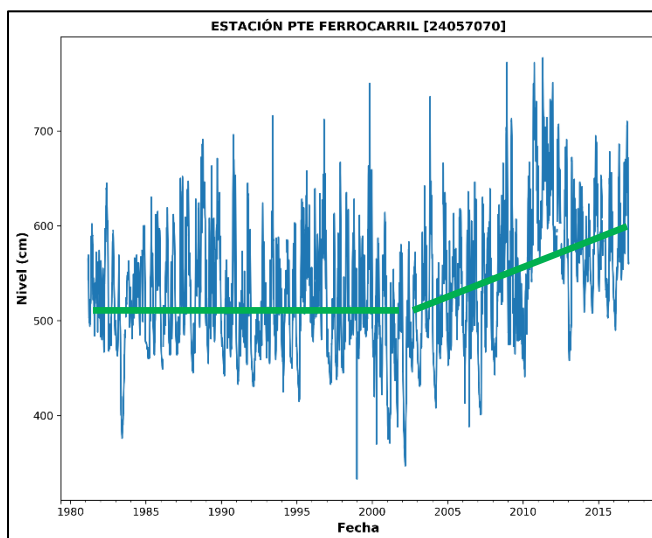
### 5.1.3.6 Estación Puente Ferrocarril [24057070]

Con respecto a la estación Puente Ferrocarril se tiene que:

- Se identifica una tendencia creciente de aproximadamente 1,4 cm/año.
- Las pruebas estadísticas detectan la tendencia como un cambio sistemático de la media y la varianza
- Con el objetivo de ser conservadores se utilizan los valores de nivel sin modificar en toda la longitud de la serie.

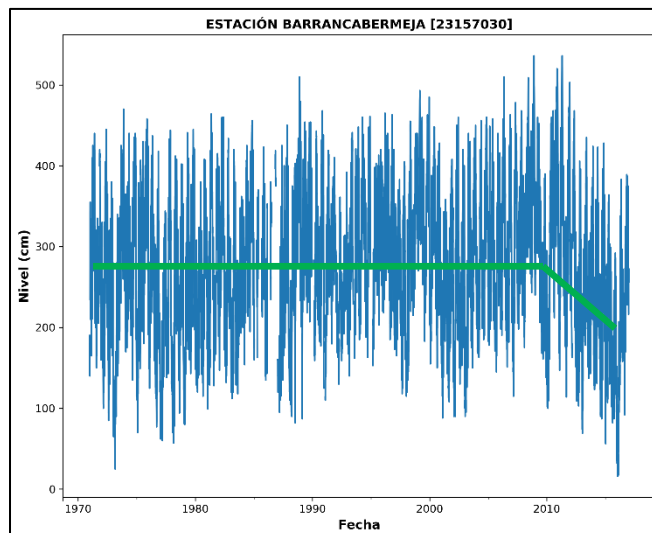


**Figura 5.6** Análisis de la serie de niveles de la estación Puente Ferrocarril (ciénaga San Silvestre)



### 5.1.3.7 Estación Barrancabermeja Automática [23157030]

**Figura 5.7** Análisis de la serie de niveles de la estación Barrancabermeja Automática



Con respecto a la estación Barrancabermeja se tiene que:

- Se identifica un cambio en la media a partir del año de 2010.
- Se utilizan los valores de nivel sin modificar en toda la longitud de la serie.
- En diciembre de 2015 se presentó una sequía de gran magnitud, por lo que no se toman los valores en este período como "outliers".

### 5.1.3.8 Modificación de las series de nivel

Con el análisis de "outliers" y el análisis de homogeneidad y análisis de tendencia se demostró que algunas de las series de niveles presentaban anomalías en los registros, de las cuales se desconoce su origen. Con el objetivo de utilizar la información adecuada para

la estimación de los niveles de crecientes máximas, se realizaron las siguientes modificaciones en las series de nivel.

**Tabla 5.5 Modificación de las series de nivel utilizadas**

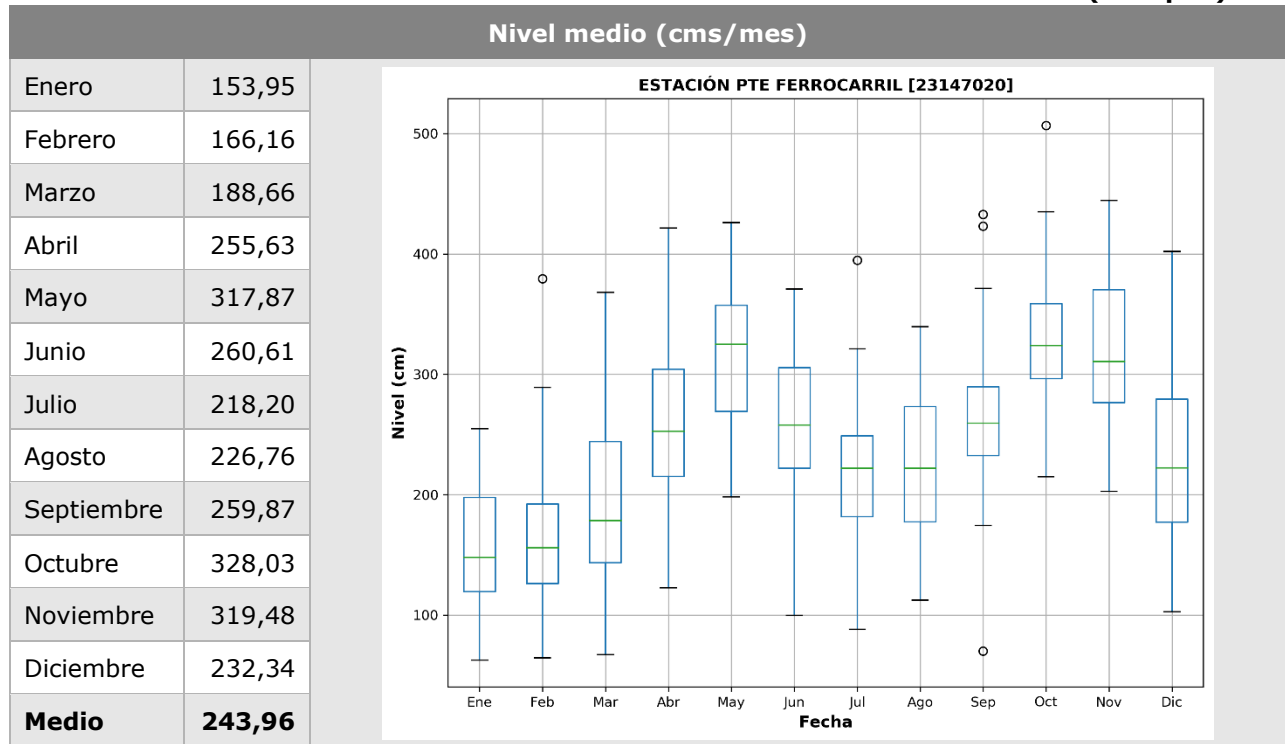
Código	Estación	Eliminación "Outliers"	Corrección de la media	Modificación de la desviación estándar	Ajuste tendencia	Eliminación de tramos de la serie
23147020	PTE FERROCARRIL	No	No	No	No	No
23147040	AYACUCHO	No	No	No	No	No
24067020	PTE SOGAMOSO	No	No	No	No	No
23157080	MALDONADO	No	No	No	No	No
23167010	PENAS BLANCAS	No	No	No	No	No
24057070	PTE FERROCARRIL	No	No	No	No	No
23157030	BARRANCABERMEJA AUTOMATICA	No	No	No	No	No

En el presente estudio no se realizaron alteraciones sobre las series de nivel entregadas por el IDEAM, sin embargo, se propone como trabajo futuro, investigar el origen de dichos cambios en el comportamiento temporal de las series, ya sea de tipo antrópico, por manejo de los registros o que estén asociados al cambio ambiental global.

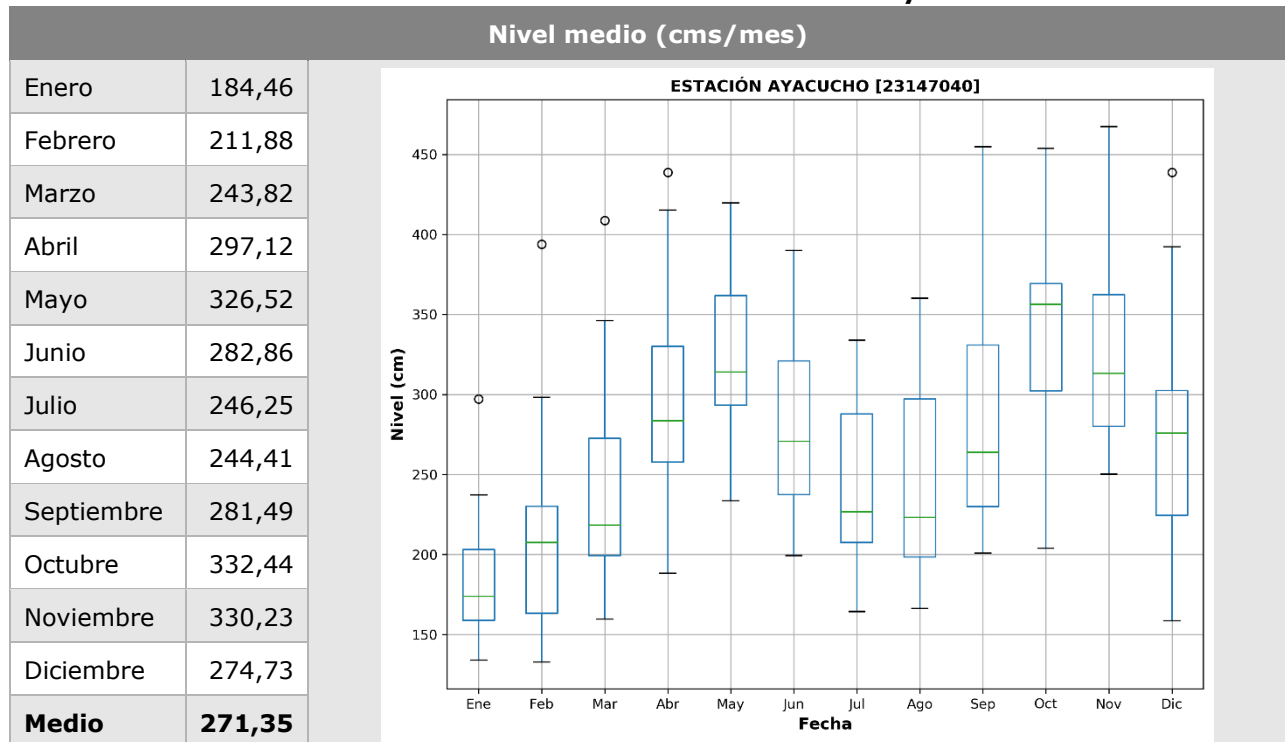
#### **5.1.4 Caracterización Hidrológica de Valores Medios**

A continuación, se presentan las gráficas y tablas del comportamiento mensual multianual de los niveles registrados en cada una de las estaciones utilizadas.

**Tabla 5.6 Niveles medios mensuales multianuales estación Pte Ferrocarril (río Opón)**



**Tabla 5.7 Niveles medios mensuales multianuales estación Ayacucho**



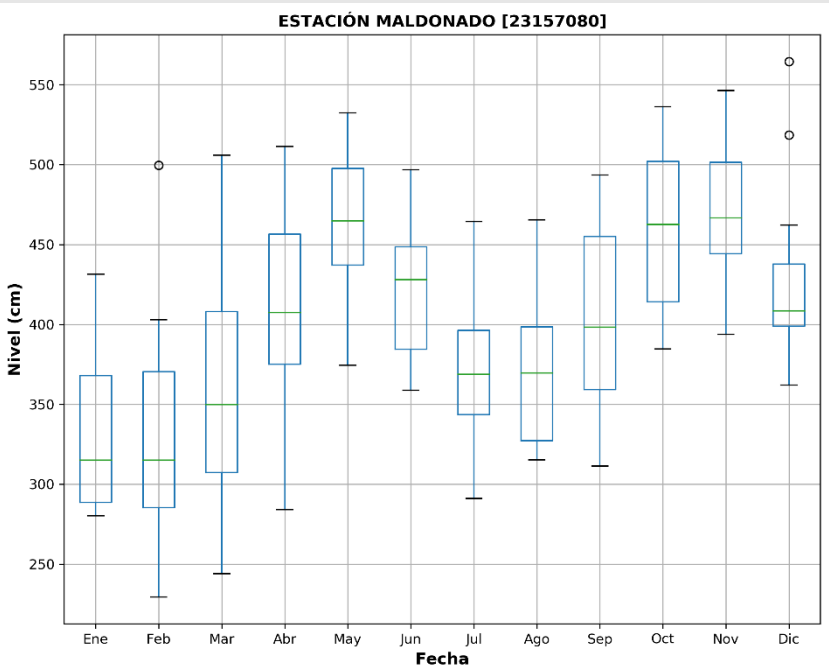
**Tabla 5.8 Niveles medios mensuales multianuales estación Pte Sogamoso**



Nivel medio (cms/mes)	
Febrero	328,76
Marzo	376,37
Abril	454,64
Mayo	497,25
Junio	453,85
Julio	413,25
Agosto	402,59
Septiembre	425,55
Octubre	487,32
Noviembre	490,90
Diciembre	407,36
<b>Medio</b>	<b>421,97</b>

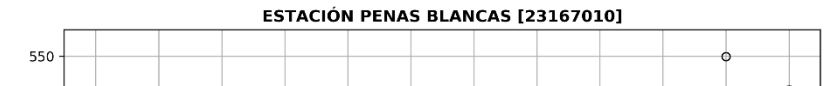
**Tabla 5.9 Niveles medios mensuales multianuales estación Maldonado**

Nivel medio (cms/mes)	
Enero	331,35
Febrero	330,06
Marzo	359,29
Abril	412,50
Mayo	464,26
Junio	422,56
Julio	377,66
Agosto	370,56
Septiembre	404,66
Octubre	460,42
Noviembre	469,97
Diciembre	424,89
<b>Medio</b>	<b>402,35</b>



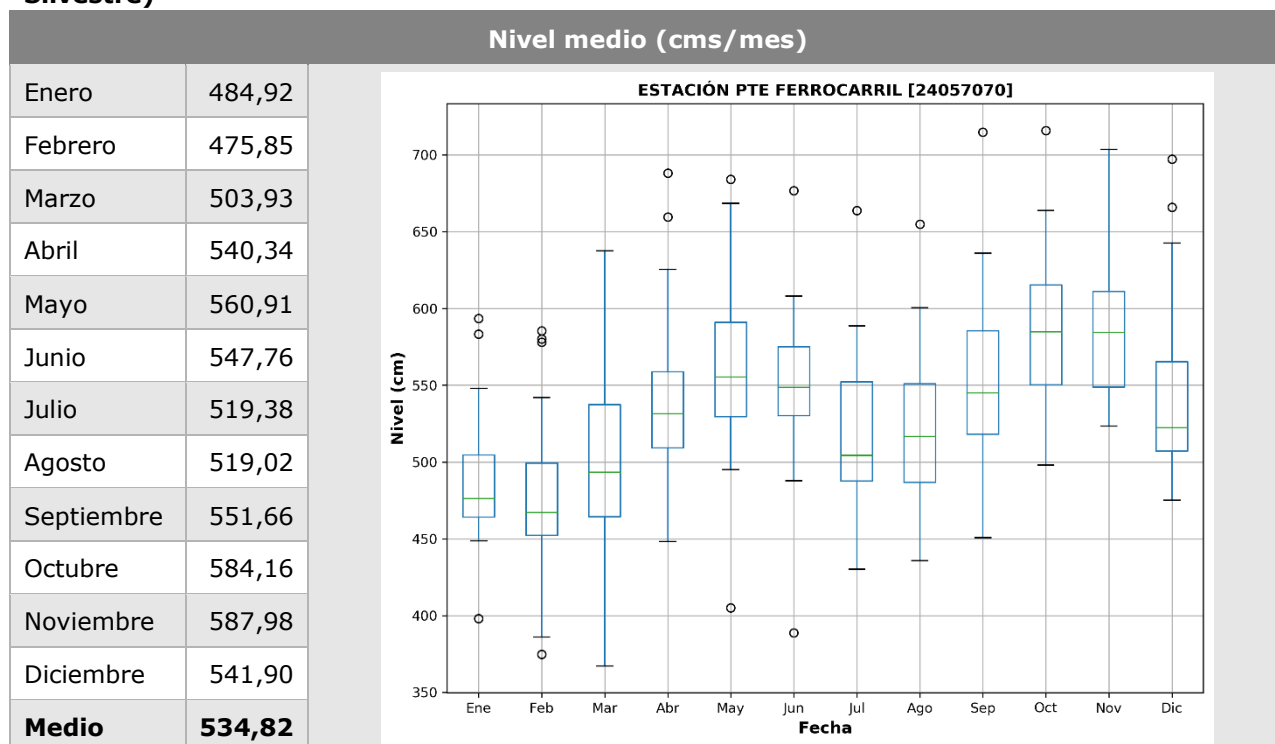
**Tabla 5.10 Niveles medios mensuales multianuales estación Peñas Blancas**

Nivel medio (cms/mes)	
Enero	288,82
Febrero	271,27



Nivel medio (cms/mes)	
Marzo	313,31
Abril	373,25
Mayo	405,53
Junio	359,42
Julio	315,14
Agosto	297,28
Septiembre	334,54
Octubre	382,40
Noviembre	410,37
Diciembre	369,16
<b>Medio</b>	<b>343,37</b>

**Tabla 5.11 Niveles medios mensuales multianuales estación Pte Ferrocarril (Ciénaga San Silvestre)**



**Tabla 5.12 Niveles medios mensuales multianuales estación Barrancabermeja Automática**



Nivel medio (cms/mes)	
Marzo	236.21
Abril	303.92
Mayo	343.85
Junio	299.17
Julio	253.99
Agosto	232.90
Septiembre	268.78
Octubre	330.84
Noviembre	356.80
Diciembre	288.82
<b>Medio</b>	<b>276.65</b>

### 5.1.5 Caracterización Hidrológica de Valores Máximos

Para estimar los niveles máximos asociados a diferentes períodos de retorno, primero se realizaron pruebas de bondad y ajuste, para determinar a cuál función de distribución de probabilidad (FDP), entre las FDP Normal, Log-Normal y Gumbel, se ajustan los niveles máximos instantáneos. Posteriormente, mediante el método de cuantiles de Chow (1984) se estiman los niveles máximos asociados a los períodos de retorno de 2, 5, 10, 25, 50, 100 y 500 años, para la FDP seleccionada.

### 5.1.6 Pruebas de Bondad y Ajuste

Para caracterizar el comportamiento estadístico de los niveles máximos se realizaron las pruebas no paramétricas de Anderson-Darling (A-D), Kolmogórov-Smirnov (K-S) y Chi-Cuadrado (C-S), mediante las cuales se puede definir que tan bien se ajustan a un modelo estadístico, en este caso a las FDP Normal, Log-Normal y Gumbel.

Adicionalmente, se realizó el análisis gráfico de los ajustes, el cual consiste en comparar de manera visual las curvas de probabilidad acumulada de los máximos anuales de la serie contra las curvas de probabilidad acumuladas obtenidas para cada una de las funciones de probabilidad a evaluadas. En este caso se determina de manera subjetiva si el comportamiento de ambas curvas es similar o no, y por ende si la función de distribución seleccionada hace una buena representación del comportamiento de los valores máximos analizados.

En la Tabla 5.13 se presenta el resultado de las pruebas de bondad y ajuste, donde se rechaza (R) o no (NR), la hipótesis de que los niveles máximos estudiados provenga de una variable aleatoria con un FDP definida.

**Tabla 5.13 Resultados de la prueba de bondad y ajuste para las estaciones de nivel**  
**R: Se rechaza la hipótesis NR: No se puede rechazar la hipótesis**

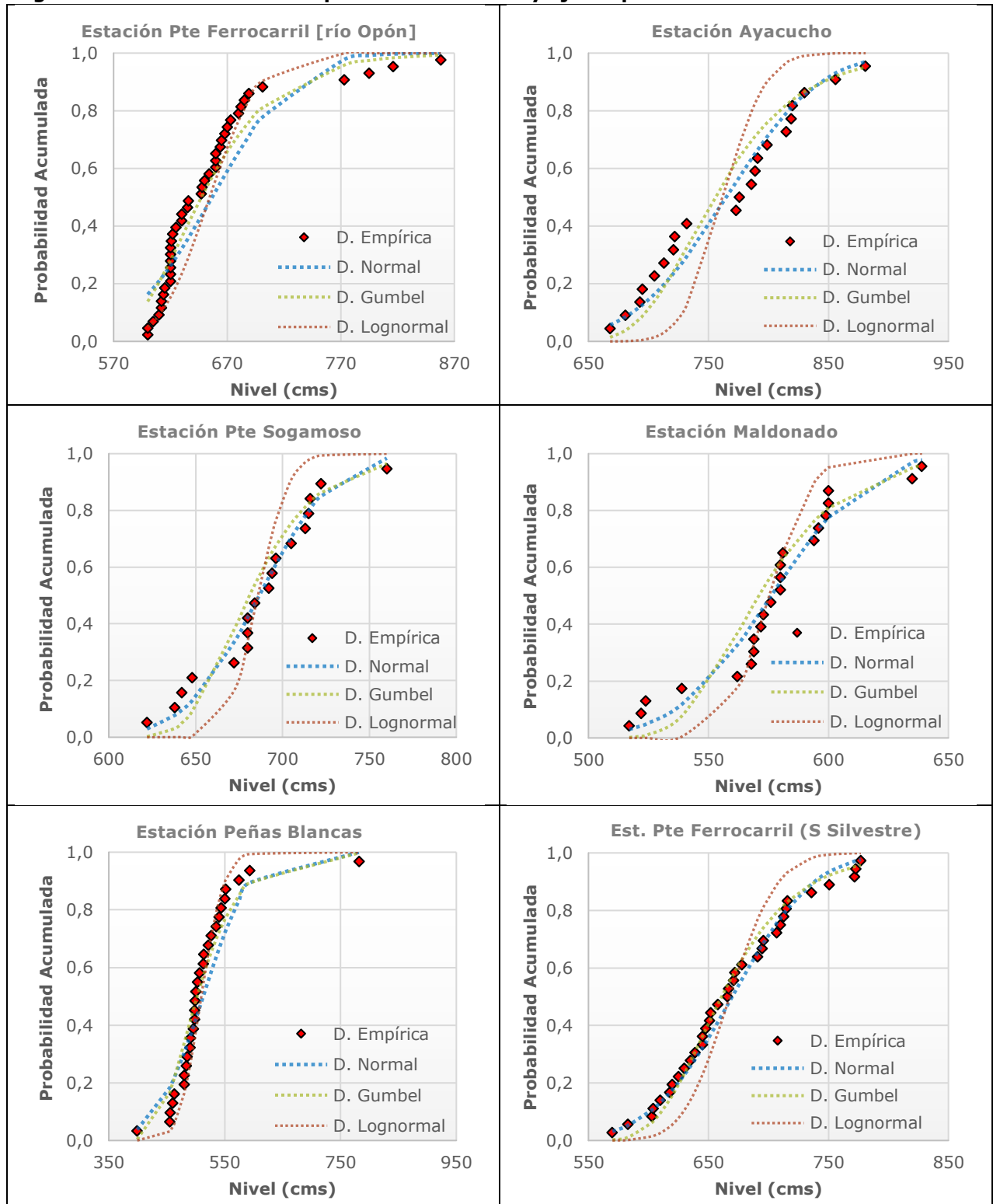
Estación	FDP	A-D	K-S	C-S	Ajuste
PUENTE FERROCARRIL	Normal	R	R	R	Gumbel

Estación	FDP	A-D	K-S	C-S	Ajuste
[23147020]	Log-Normal	R	R	R	
	Gumbel	R	NR	R	
AYACUCHO [23147040]	Normal	NR	NR	NR	Gumbel/Normal
	Log-Normal	R	R	R	
	Gumbel	R	NR	R	
PUENTE SOGAMOSO [24067020]	Normal	NR	NR	R	Normal/Gumbel
	Log-Normal	R	R	R	
	Gumbel	R	NR	R	
MALDONADO [23157080]	Normal	NR	NR	R	Gumbel/Normal
	Log-Normal	R	R	R	
	Gumbel	R	NR	NR	
PEÑAS BLANCAS [23167010]	Normal	R	R	NR	Gumbel/Log-Normal
	Log-Normal	R	NR	NR	
	Gumbel	R	NR	NR	
PUENTE FERROCARRIL [24057070]	Normal	NR	NR	NR	Gumbel/Normal
	Log-Normal	R	R	R	
	Gumbel	NR	NR	R	
BARRANCABERMEJA AUTOMÁTICA [23157030]	Normal	NR	NR	NR	Gumbel/Normal
	Log-Normal	R	NR	NR	
	Gumbel	NR	NR	NR	

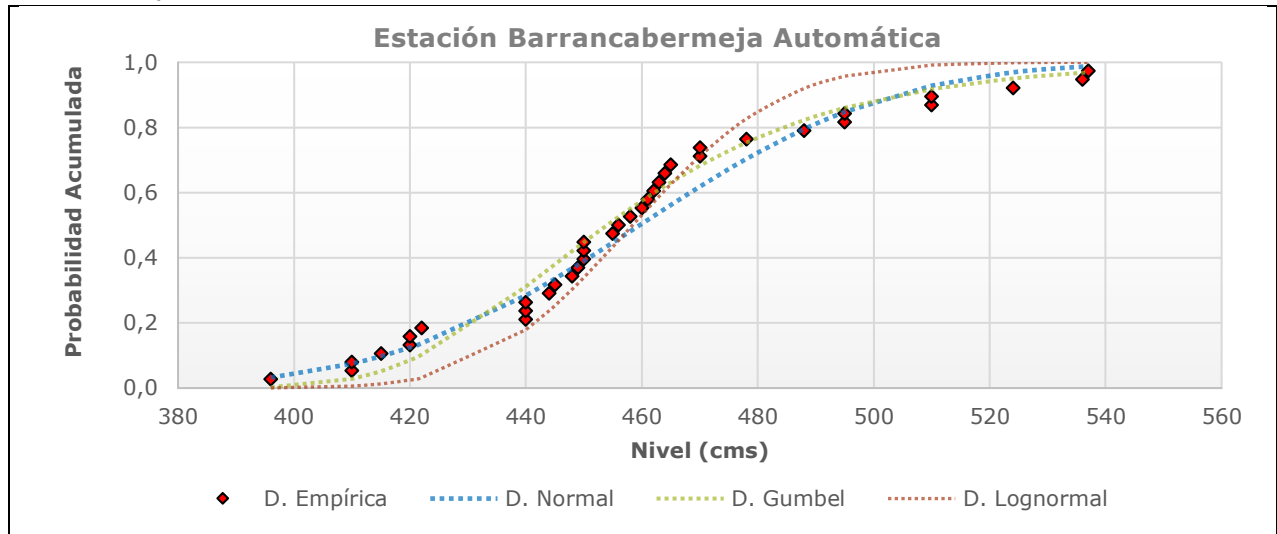
Se concluye que, dada la naturaleza de los datos (extremos), estos se ajustan de manera general a una FDP de colas pesadas como la Gumbel. Por lo tanto, se determinó que, la estimación de niveles máximos mediante ajuste probabilístico se realizará con base en la FDP Gumbel.

En la Figura 5.8 se muestra gráficamente el ajuste de los datos a cada una de las FDP analizadas, con lo cual se soporta la hipótesis de que los datos se ajustan a una FDP Gumbel.

**Figura 5.8 Gráficos de las pruebas de bondad y ajuste para las estaciones de nivel**







### 5.1.6.1 Estimación de Niveles Máximos

Con el modelo estadístico definido se procede a utilizar la metodología de cuantiles propuesta por Chow (1984):

$$N_{MAX(TR)} = \mu_{MAX} + K_{TR} \cdot \sigma_{MAX} \quad \text{Ecuación 5.19}$$

donde:

$N_{MAX(TR)}$  es el nivel asociado a un período de retorno  $TR$

$\mu_{MAX}$  es la media de los niveles máximos instantáneos anuales

$\sigma_{MAX}$  es la desviación estándar de los niveles máximos instantáneos anuales

$K_{TR}$  es el factor de frecuencia que depende del modelo estadístico y el  $TR$

Para la distribución Gumbel el factor de frecuencia ( $K_{TR}$ ) está definido por:

$$K_{TR} = -\frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \left( 0,5772 + \ln \left[ \ln \left( \frac{TR}{TR - 1} \right) \right] \right) \quad \text{Ecuación 5.20}$$

En la Tabla 5.14 se muestran media y la desviación estándar de los niveles máximos instantáneos anuales estimada para cada estación, así como los valores de nivel máximo de crecientes. Mientras que en la Tabla 5.15 se muestran las elevaciones de la lámina de agua para el evento, las cuales se obtienen de sumar el nivel de la creciente a la cota de ceros de las regletas de medición.

**Tabla 5.14 Niveles máximos de las crecientes asociados a diferentes períodos de retorno en las estaciones hidrológicas en centímetros**

Estación	$\mu_{MAX}$	$K_{TR}$	$T_R = 2,33$	$T_R = 5$	$T_R = 10$	$T_R = 25$	$T_R = 50$	$T_R = 100$	$T_R = 500$
			$K_{TR} = 0,00$	$K_{TR} = 0,72$	$K_{TR} = 1,30$	$K_{TR} = 2,04$	$K_{TR} = 2,59$	$K_{TR} = 3,14$	$K_{TR} = 4,39$
PUENTE FERROCARRIL[23147020]	656,79	57,85	656,85	698,41	732,26	775,03	806,75	838,25	911,03
AYACUCHO[23147040]	765,00	61,30	765,07	809,11	844,98	890,30	923,92	957,29	1034,41
PUENTE SOGAMOSO [24067020]	679,92	47,60	679,97	714,16	742,01	777,20	803,31	829,22	889,10
MALDONADO[23157080]	576,14	31,64	576,17	598,77	617,17	640,43	657,68	674,81	714,38
PEÑAS BLANCAS[23167010]	513,03	64,04	513,10	559,11	596,57	643,91	679,04	713,90	794,46
PUENTE FERROCARRIL[24057070]	669,77	53,62	669,83	708,35	739,73	779,37	808,78	837,97	905,43
BARRANCABERMEJA AUTOMÁTICA[23157030]	460,56	42,93	460,60	491,44	516,56	548,29	571,83	595,20	649,20

**Tabla 5.15 Elevaciones máximas de las crecientes asociados a diferentes períodos de retorno en las estaciones hidrológicas en msnm**

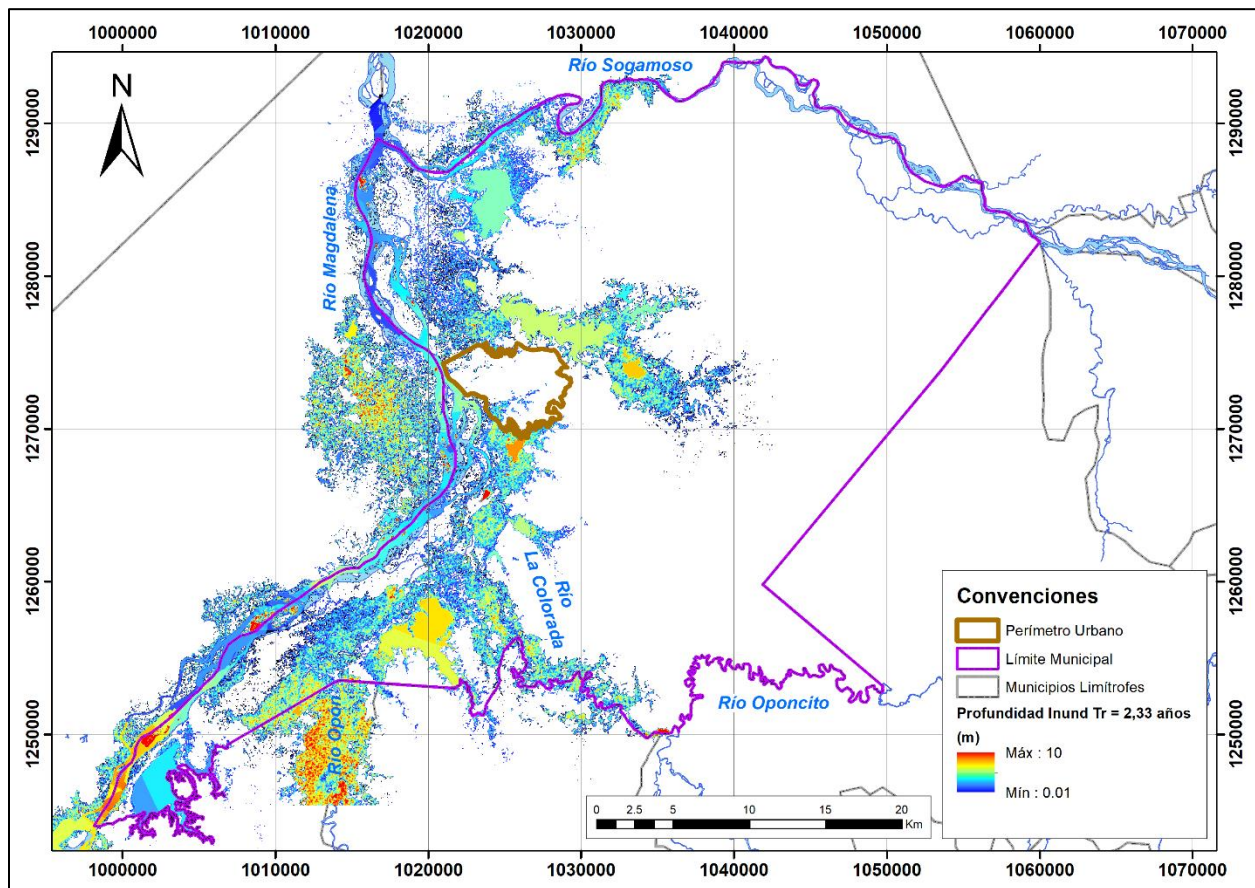
Estación	Cota Ceros	$T_R = 2,33$	$T_R = 5$	$T_R = 10$	$T_R = 25$	$T_R = 50$	$T_R = 100$	$T_R = 500$
		$K_{TR} = 0,00$	$K_{TR} = 0,72$	$K_{TR} = 1,30$	$K_{TR} = 2,04$	$K_{TR} = 2,59$	$K_{TR} = 3,14$	$K_{TR} = 4,39$
PUENTE FERROCARRIL [23147020]	90,587	97,16	97,57	97,91	98,34	98,65	98,97	97,16
AYACUCHO [23147040]	84,101	91,75	92,19	92,55	93,00	93,34	93,67	91,75
PUENTE SOGAMOSO [24067020]	74,035	80,83	81,18	81,46	81,81	82,07	82,33	80,83
MALDONADO [23157080]	64,203	69,96	70,19	70,37	70,61	70,78	70,95	69,96
PEÑAS BLANCAS [23167010]	74,948	80,08	80,54	80,91	81,39	81,74	82,09	80,08
PUENTE FERROCARRIL [24057070]	67,753	74,45	74,84	75,15	75,55	75,84	76,13	74,45
BARRANCABERMEJA AUTOMÁTICA [23157030]	70,480	75,09	75,39	75,65	75,96	76,20	76,43	75,09

## 5.2 ESTIMACIÓN DE LAS ZONAS INUNDADAS ASOCIADAS A LOS EVENTOS DE NIVELES MÁXIMOS

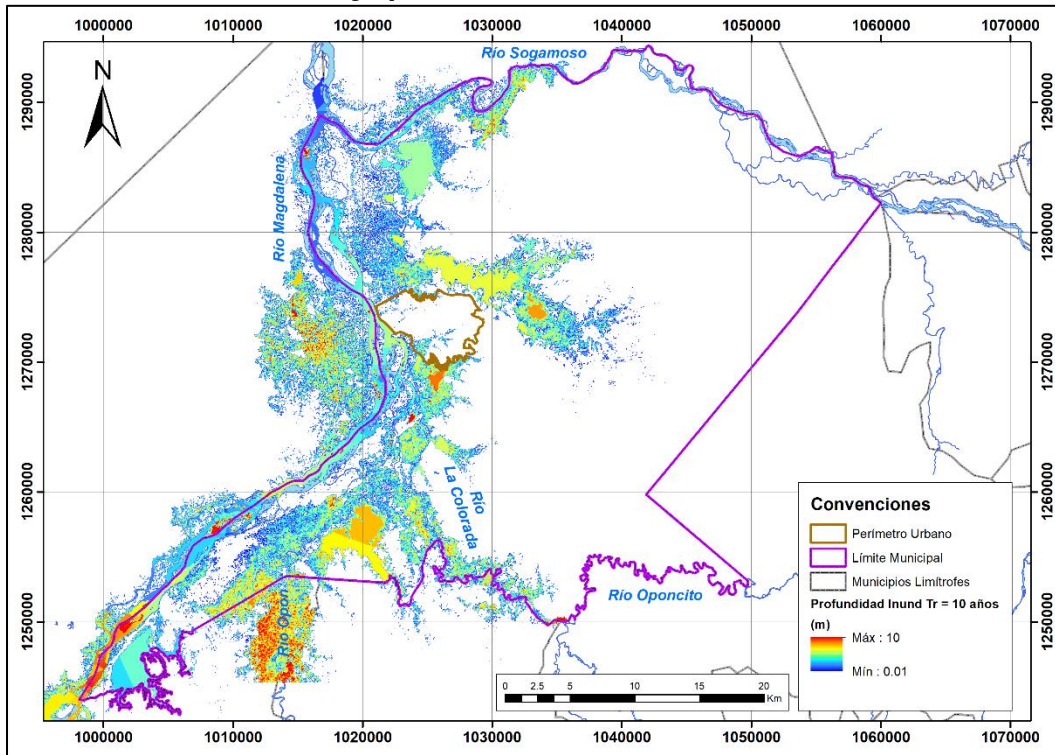
### 5.2.1 Manchas de Inundación

Con base en las elevaciones de las crecientes estimadas para cada estación, mediante la implementación de la metodología descrita en la sección 4.1, se estimaron las manchas de inundación asociadas a los diferentes períodos de retorno. La metodología utilizada permite obtener información sobre profundidad de la inundación y elevación de la lámina de agua de la inundación en cada uno de los píxeles del modelo de elevación utilizado.

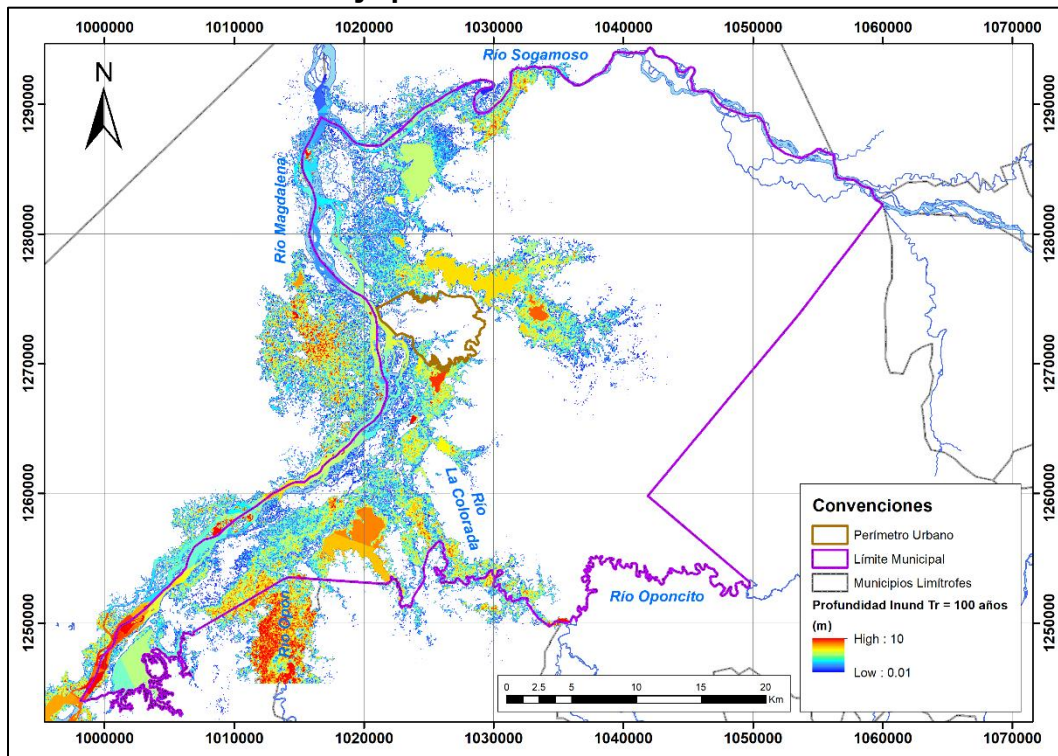
**Figura 5.9 Profundidad de flujo para una creciente asociada a un  $T_r = 2,33$  años**



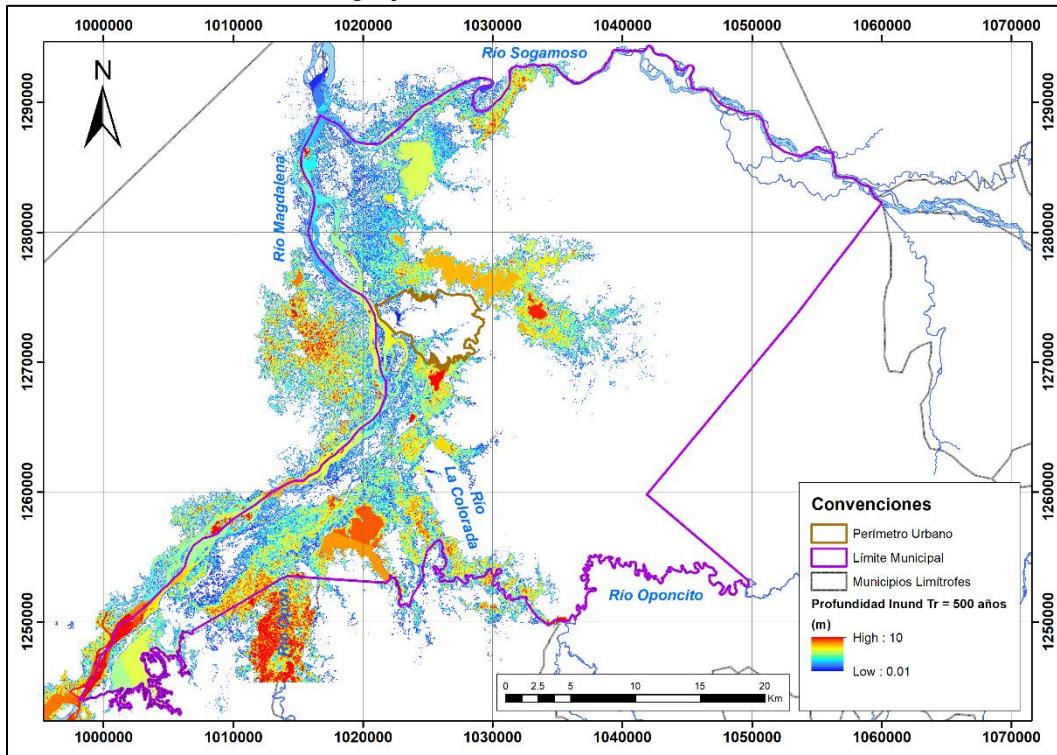
**Figura 5.10 Profundidad de flujo para una creciente asociada a un  $Tr = 10$  años**



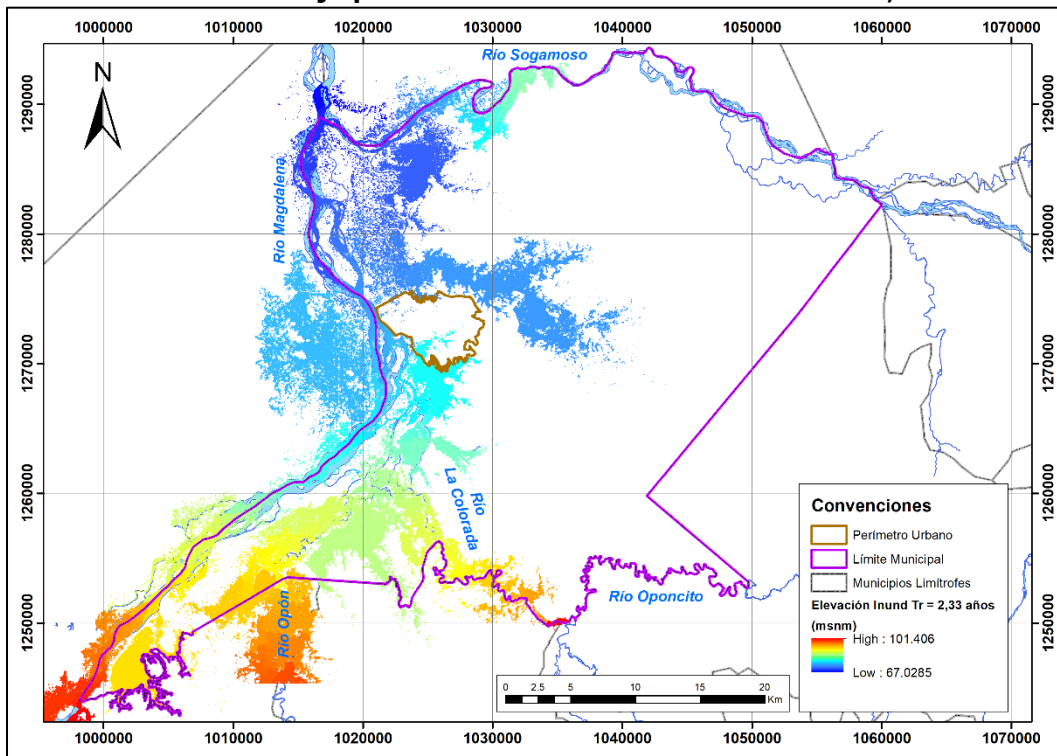
**Figura 5.11 Profundidad de flujo para una creciente asociada a un  $Tr = 100$  años**



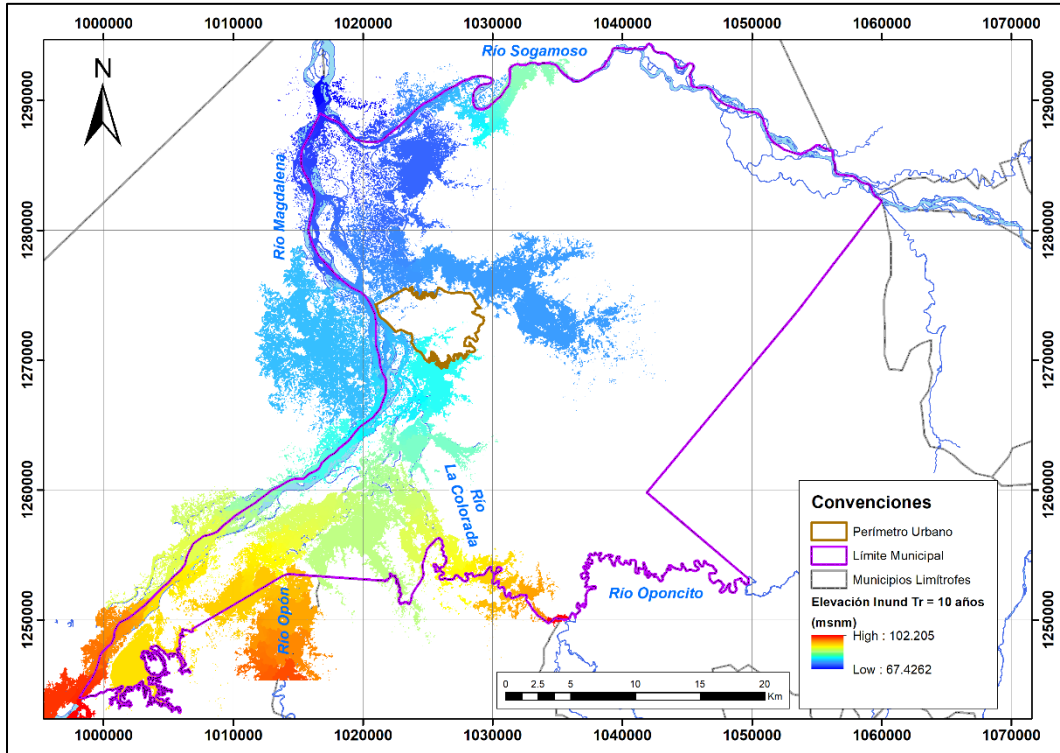
**Figura 5.12 Profundidad de flujo para una creciente asociada a un Tr = 500 años**



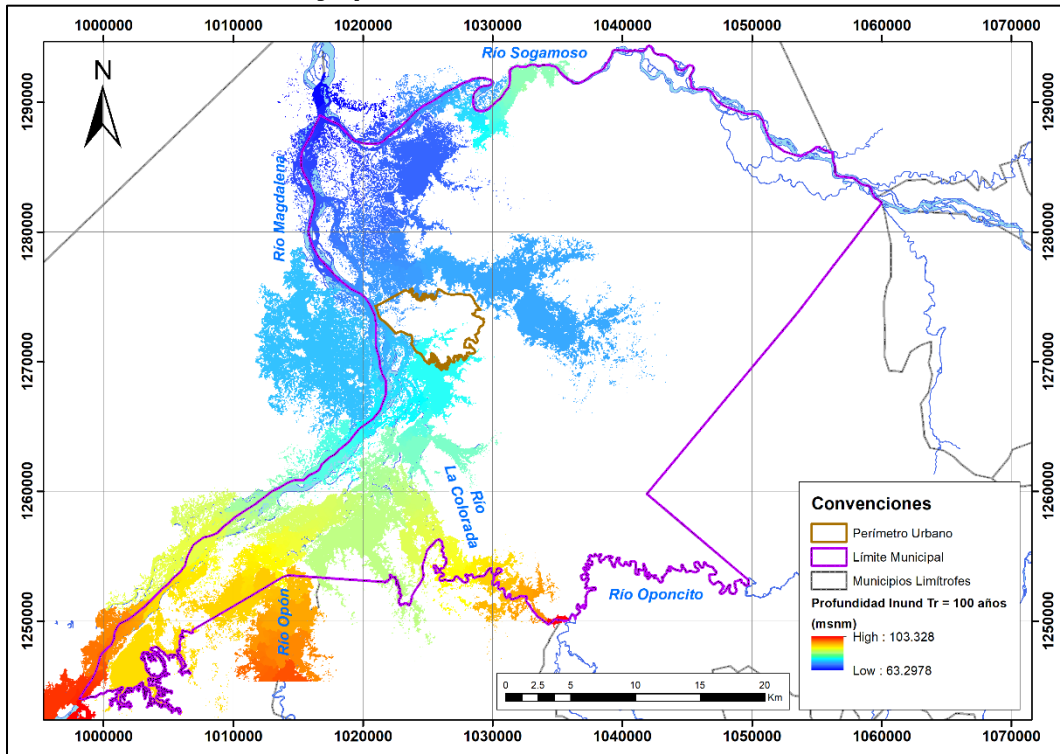
**Figura 5.13 Elevación de flujo para una creciente asociada a un Tr = 2,33 años**



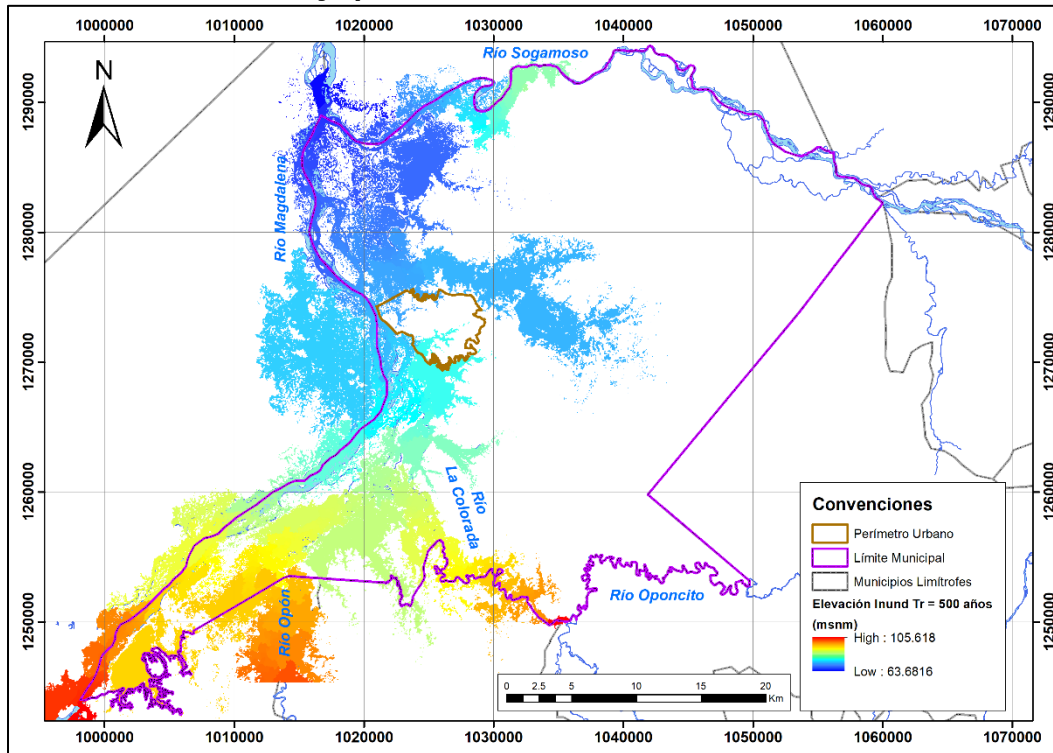
**Figura 5.14 Elevación de flujo para una creciente asociada a un  $T_r = 10$  años**



**Figura 5.15 Elevación de flujo para una creciente asociada a un  $T_r = 100$  años**



**Figura 5.16 Elevación de flujo para una creciente asociada a un  $T_r = 500$  años**



### 5.2.2 Análisis de Resultados

El alcance de la metodología solo se extiende hasta donde llega la influencia de las crecientes de las corrientes incluidas en el estudio:

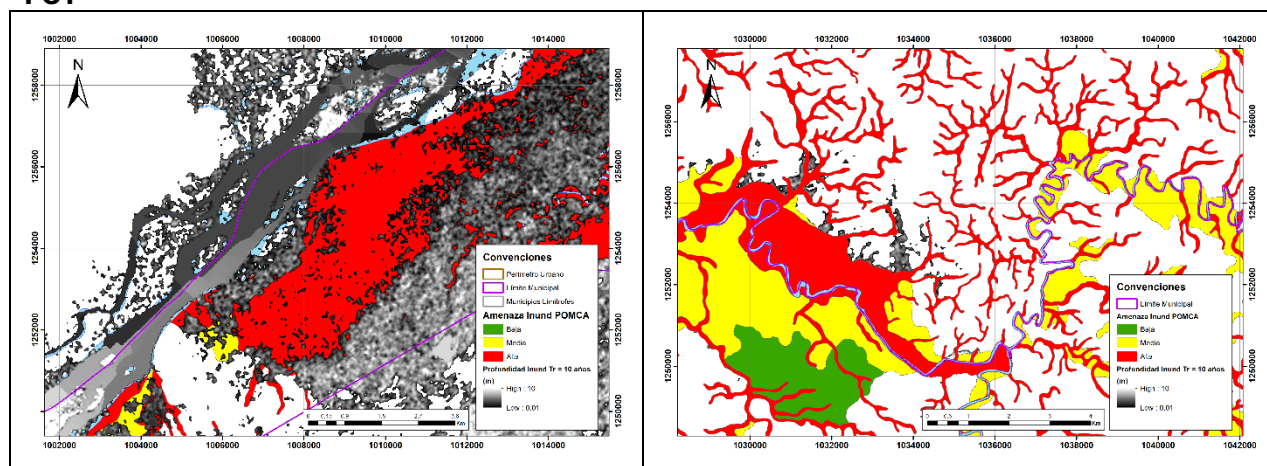
- Tramo del río Magdalena entre las estaciones Peñas Blancas, Barrancabermeja, Maldonado
- Tramo del río Sogamoso entre las estaciones Puente Sogamoso y Maldonado
- Tramo del río Opón entre la estación Puente Ferrocarril y su descarga al río Magdalena
- Tramo del río La Colorada entre la estación Ayacucho y su descarga al río Opón
- Tramo entre la Ciénaga de San Silvestre y su desembocadura en el río Sogamoso, a través del caño San Silvestre

Los resultados del modelo pueden utilizarse en aplicaciones tales como:

- Condiciones de borde de modelaciones más detalladas en caños y quebradas afluentes a las corrientes de estudio
- Las manchas de inundación pueden extenderse mediante aplicaciones simples de SIG a modelos de elevación con escalas más detalladas (e.g. estudio de amenaza por inundación y avenidas torrenciales en el área urbana)

Existen zonas donde, para ningunas de las crecientes evaluadas se presenta inundaciones, mientras que en la caracterización de amenaza planteada en los POMCA de los ríos Opón y Sogamoso se identifican como áreas de amenaza media o alta.

**Figura 5.17 Diferencias entre los resultados de la zonificación POMCA y la zonificación POT**



Esta situación se debe a diferencias entre la información base utilizada y la metodología hidrológica e hidráulica implementadas en ambos estudios.

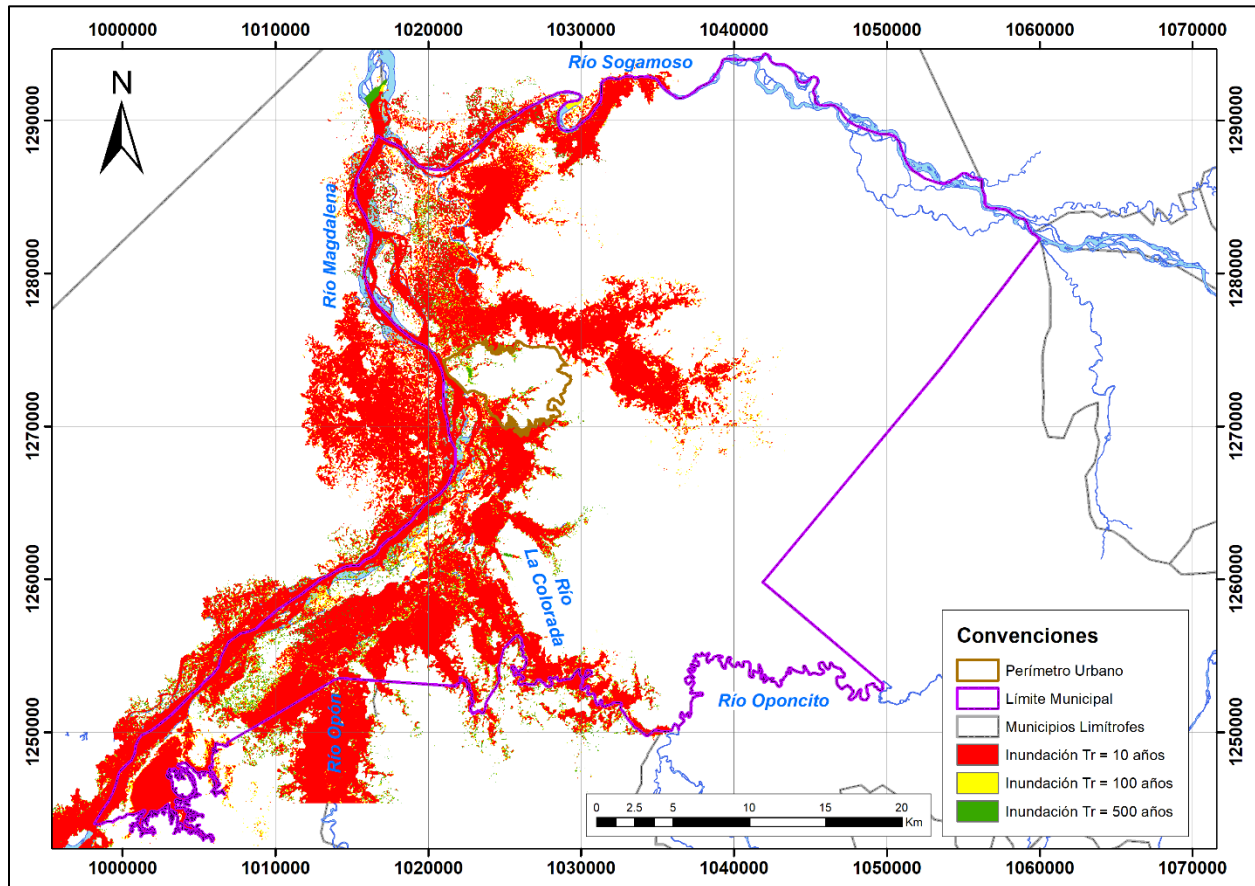
A pesar de las diferencias en las elevaciones estimadas para las crecientes de 2,33 y 500 años de período de retorno, la extensión espacial de las manchas no es significativa. Esto se debe a las geoformas del terreno, ya que las llanuras de inundación se encuentran rodeadas por terrazas disectadas con altas pendientes de los taludes.

**Tabla 5.16 Diferencia de elevaciones entre las crecientes asociadas asociada a un período de retorno de 2,33 y 500 años**

Estación	$T_R = 2,33$ $K_{TR} = 0,00$	$T_R = 500$ $K_{TR} = 4,39$	Diferencia máxima de elevaciones
PUENTE FERROCARRIL [23147020]	97,16	99,70	2,54
AYACUCHO [23147040]	98,24	100,93	2,69
PUENTE SOGAMOSO [24067020]	97,39	99,48	2,09
MALDONADO [23157080]	96,35	97,73	1,38
PEÑAS BLANCAS [23167010]	95,72	98,53	2,81
PUENTE FERROCARRIL [24057070]	97,29	99,64	2,35
BARRANCABERMEJA AUTOMÁTICA [23157030]	95,19	97,08	1,89



**Figura 5.18 Extensión espacial de las zonas inundadas asociadas a las crecientes con período de retorno de 10, 100 y 500 años**



Para unificar los resultados de ambos estudios se propone:

- Superponer espacialmente los resultados de ambos estudios
- Seleccionar el resultado más conservador entre ambos estudios para zonas que coinciden espacialmente. Por ejemplo, en una zona donde el resultado POMCA muestra amenaza media, baja o nula, pero en el resultado de zonificación desarrollado muestre amenaza alta, esa unidad cartográfica se clasificará como amenaza alta. Por el contrario, se observa que en el presente estudio la amenaza es clasificada como baja o nula, pero en el estudio POMCA se clasifica como de amenaza media, esa unidad será clasificada como de amenaza media.

## 6 ZONIFICACIÓN DE LA AMENAZA

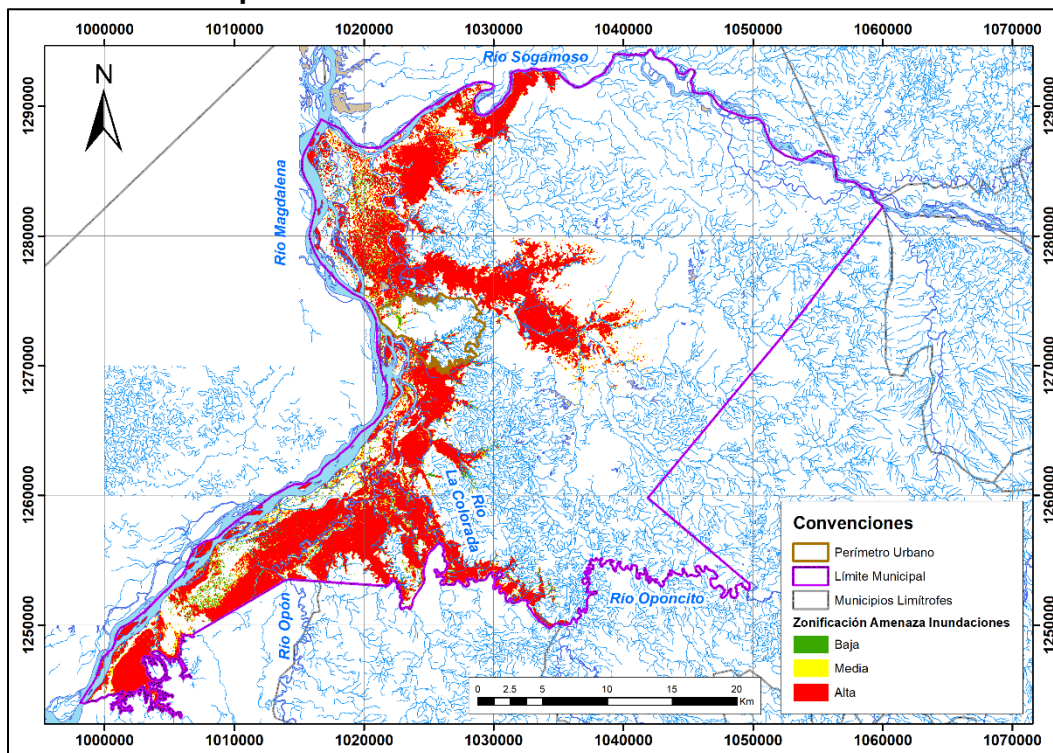
Con base en los criterios de definidos para la zonificación de la amenaza definidos en la sección 4.2, y resumidos en la siguiente tabla.

**Tabla 6.1 Categorización de amenaza por inundación**

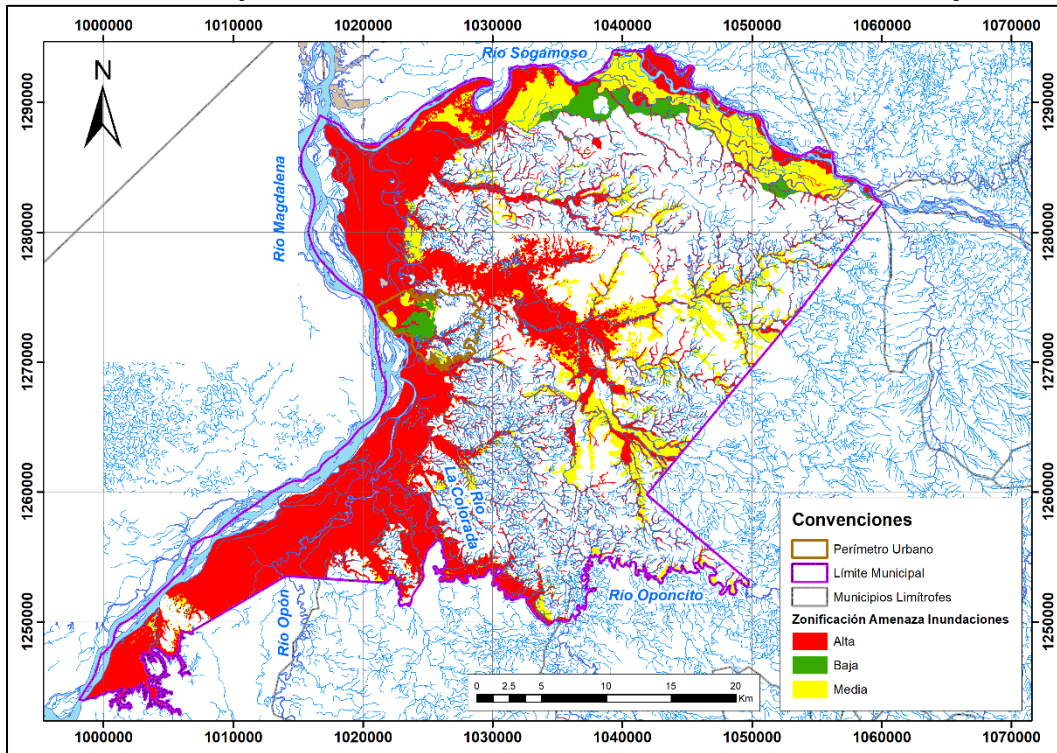
Categoría de Amenaza	Descripción de la inundación
Alta	Probabilidad de ocurrencia alta. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno menor que 10 años.
Media	Probabilidad de ocurrencia media. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 10 y 100 años.
Baja	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno entre 100 y 500 años.
Nula	Probabilidad de ocurrencia baja. Inundaciones generadas por los niveles máximos asociados a un período de retorno mayor que 500 años.

En la Figura 6.1 se muestra el mapa de amenaza por inundación calculado en el presente estudio, mientras que en la Figura 6.2 se presenta el mapa de amenazas unificado con los resultados de los proyectos de POMCA de las cuencas de los ríos Opón y Sogamoso.

**Figura 6.1 Amenaza por inundación estimadas en el estudio**

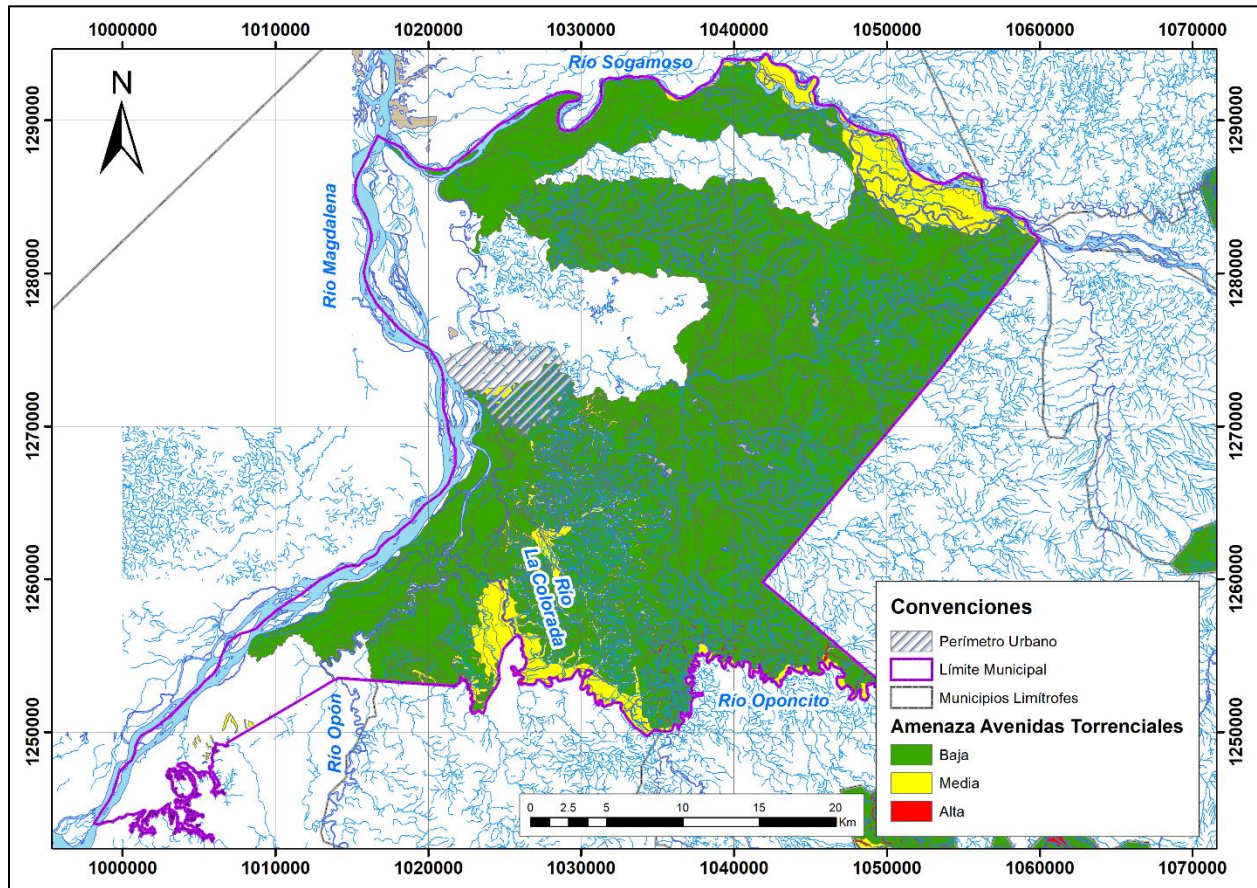


**Figura 6.2 Amenaza por inundación unificando los resultados del estudio y el POMCA**



El mapa de amenaza por avenidas torrenciales corresponde al mapa estimado en el proyecto de POMCA de los ríos Opón y Sogamoso, ya que con la información disponible no es posible mejorar los resultados obtenidos en dicho estudio. Como se mencionó anteriormente, la zonificación presentada en estos estudios cumple con la normativa estipulada en el decreto 1077 de 2015.

**Figura 6.3 Amenaza por avenidas torrenciales en el área rural del municipio de Barrancabermeja**



## 7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se caracterizaron los eventos históricos de inundación en el área rural con base en los registros disponibles en información documental del municipio y del UNGRD; encontrando un total de 72 eventos registrados y las veredas que más ocurrencias de eventos de inundación reportan son:

- **Corregimiento El Llanito:** Nueva Venecia (6), La Hortensia (5) y El Porvenir
- **Corregimiento Ciénaga del Opón:** La Unión (5), Caño Rasquiña (4), El Playón (4), Ciénaga del Opón (3), Come Si Llevas (3), La Colorada (3), La Florida (3) y Los Ñeques (3) del corregimiento Ciénaga del Opón
- **Corregimiento El Centro:** vereda Tenerife
- **Vereda La Candelaria (Campo Galán):** actual zona de expansión del área urbana.

El estudio de amenaza desarrollado en los proyectos de POMCA de los ríos Opón y Sogamoso cumplen los alcances definidos en el decreto 1077 de 2015, por lo que sus resultados pudiesen ser incorporados al POT como parte del componente de gestión del riesgo rural.

Sin embargo, dada la existencia de varias estaciones de nivel en la red de drenaje del municipio de Barrancabermeja, se propone la implantación del modelo hidrológico-hidráulico HAND, mediante el cual se puede obtener un mayor detalle de la extensión de las inundaciones.

Se define que el área donde es posible aplicar la metodología de inundaciones lentas corresponde a:

- Tramo del río Magdalena entre las estaciones Peñas Blancas, Barrancabermeja, Maldonado
- Tramo del río Sogamoso entre las estaciones Puente Sogamoso y Maldonado
- Tramo del río Opón entre la estación Puente Ferrocarril y su descarga al río Magdalena
- Tramo del río La Colorada entre la estación Ayacucho y su descarga al río Opón
- Tramo entre la Ciénaga de San Silvestre y su desembocadura en el río Sogamoso, a través del caño San Silvestre

Se realizó el análisis estadístico de los registros de nivel (pruebas de homogeneidad, pruebas de tendencia, pruebas de bondad y ajuste), con base en el cual se definieron los niveles asociados a diferentes períodos de retorno en diferentes puntos de la red de drenaje.

Se construyeron las líneas de energía asociadas a los niveles de creciente, y se propagó la inundación en el MDE mediante el método HAND.

La zonificación de la amenaza por eventos de inundación se realizó con base en un criterio probabilístico, según el cual se define una amenaza alta para las zonas que se inundan debido a la ocurrencia de eventos con una recurrencia menor que 10 años, amenaza media para zonas que se inundan debido a eventos de inundación con un período de retorno entre 10 y 100 años y las zonas de amenaza alta son aquellas que se inundan durante las crecientes con una recurrencia de entre 100 y 500 años.

Con el ánimo de compatibilizar los resultados de este estudio y la caracterización de la amenaza realizada en los proyectos de POMCA de los ríos Opón y Sogamoso, se supusieron los mapas de amenaza y, aplicando un criterio conservador, se selecciona la mayor amenaza en las zonas que se interceptaban. Para las zonas que no se interceptan se define la amenaza según el resultado de cada estudio.



Dado que con la información disponible no es posible mejorar el detalle del estudio de amenaza por avenidas torrenciales, se utilizan los mapas de amenaza por avenidas torrenciales propuestos por los POMCA.

## 8 BIBLIOGRAFÍA

ALCALDÍA BARRANCABERMEJA. (2002). Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Barrancabermeja.

ALCALDÍA BARRANCABERMEJA. (2014). Estudios básicos de amenaza por fenómenos de remoción en masa e inundación para el área de expansión urbana sur este del municipio de Barrancabermeja.

ALCALDÍA BARRANCABERMEJA. (2015). Metodología y proceso de incorporación de la gestión del riesgo en la revisión excepcional de POT, según lineamientos del decreto 1077 de 2015, con base en estudios básicos de amenaza por inundación y movimientos en masa en la zona urbana y de expansión de la ciudad de Barrancabermeja.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER. (2017). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Opón.

CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER. (2017). Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca Hidrográfica del río Sogamoso.

CHOW, Ven Te. (1994). Hidráulica de canales abiertos. Santafé de Bogotá: McGraw Hill.

INGETEC S.A. (2013). Diagnóstico Área de Concesión Portuaria para el Puerto Impala Barrancabermeja S.A.

INTEGRAL S.A. (2012). Estudio Hidrológico para Process Consultants - Proyecto de Modernización Refinería Barrancabermeja.

INTEGRAL S.A. (2013). Diseño conceptual de un dique para evitar inundaciones en los barrios Coviba, 20 de Enero y campo hermoso en el municipio de Barrancabermeja.

Nobre AD, Cuartas LA, Hodnett M, Rennó C, Rodrigues GO, Silveira A, Waterloo M, Saleska S. (2011). Height above the nearest drainage—a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology* 404:13–29. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2011.03.051 HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent (PDF Download Available). Available from: [https://www.researchgate.net/publication/280972221\\_HAND\\_contour\\_A\\_new\\_proxy\\_predictor\\_of\\_inundation\\_extent](https://www.researchgate.net/publication/280972221_HAND_contour_A_new_proxy_predictor_of_inundation_extent) [accessed Mar 15 2018].

Nobre, Antonio & Cuartas, Luz & Momo, Marcos & Severo, Dirceu Luis & Pinheiro, Adilson & Nobre, Carlos. (2015). HAND contour: A new proxy predictor of inundation extent. *Hydrological Processes*. 30. 10.1002/hyp.10581.

UNAL & IDEAM. (2013). Zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2.000 y 1:5.000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano.