

Capítulo 5

Caracterización, Diagnóstico y Análisis de Vulnerabilidades y Amenazas en el Departamento del Magdalena

Inundaciones



Corporación Autónoma Regional del Magdalena
Universidad del Atlántico

CORPAMAG – UNIVERSIDAD DEL ATLÁNTICO

Carlos F. Diazgranados Martínez

Director

Victoria Vos Obeso

Rectora (e)

Paul Laguna Panetta

Secretario General

Luis Carlos Gutiérrez

Vicerrector de Investigación y Extensión

Alfredo Martínez Gutiérrez

Subdirección de Gestión Ambiental

Autores

Luis Carlos Gutiérrez Moreno

Yeison Gutiérrez Rojas

Orangel de Jesús Noriega

Yuri Hurtado García

Jefe Oficina de Planeación

Nelson Rangel Buitrago

Carlos Fonseca Gamba

Ena Lobo Ropain

Subdirección de Educación Ambiental

Elyzabeth Ortega Cuan

Héctor García Quiñonez

Karen Forero Bula

Subdirección Técnica

Colaboradores

Duvan Pérez Peluffo

Cindy Guzmán Gutiérrez

Semiranis Sosa Tapias

Jefe Oficina Jurídica

Ana Jaimes Contreras

Oscar Angarita Medrano

Luis Francisco Báez

Profesional Especializado

(Oficina Planeación)

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	180
INTRODUCCIÓN.....	181
ZONAS PRIORIZADAS	182
INFORMACIÓN REQUERIDA.....	184
RÍO PIEDRAS.....	184
Generalidades y Morfométrica	184
Características Climáticas.....	189
Selección del Tramo del Río a Modelar	191
Hidrología.....	193
Análisis de calidad de la serie	194
Análisis de Frecuencias Caudales Máximos Anuales	197
Modelación hidráulica	199
Aforo líquido y calibración del modelo.....	200
Resultados.....	202
RÍO MANZANARES	206
Generalidades y Morfométrica	206
Características climáticas	209
Selección del Tramo del Río a Modelar	210
Hidrología.....	211
Análisis de calidad de la serie	213
Tiempo de concentración.....	216
Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)	217
Tormentas de diseño – Histogramas de precipitación	218
Precipitación efectiva – Numero de Curva (CN).....	220
Modelo hidrológico – Caudales pico.....	221
Modelación hidráulica	223
Topografía	223
Aforo líquido y calibración del modelo.....	224

Resultados.....	226
RÍO GAIRA.....	230
Generalidades y Morfométrica	230
Características climáticas	233
Selección del Tramo del Río a Modelar	234
Hidrología.....	235
Tiempo de concentración.....	236
Precipitación efectiva – Numero de Curva (CN).....	237
Modelo hidrológico – Caudales pico.....	237
Modelación hidráulica	239
Topografía	239
Resultados.....	240
RÍO FUNDACIÓN.....	244
Generalidades y Morfométrica	244
Características climáticas	247
Localización del tramo analizado	248
Metodología Empleada.....	249
Topografía	249
Información adicional.....	250
Hidrología.....	250
Análisis de Frecuencias	251
Modelación hidráulica	253
Rugosidad	254
Resultados.....	254
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	257

LISTA DE FIGURAS

Figura 42. Cuencas seleccionadas para análisis de riesgo por inundación.....	183
Figura 43. Localización de la cuenca del río Piedras.	185
Figura 44. Curva hipsométrica de la cuenca del río Piedras.	187
Figura 15. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Piedras	188
Figura 46. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del río Piedras.	190
Figura 47. Valores medios anuales de Temperatura media y humedad relativa para la cuenca del río Piedras.	191
Figura 48. Selección del tramo del río Piedras para modelación hidráulica.	192
Figura 49. Localización de las estaciones hidrológicas disponibles en la zona de estudio.	193
Figura 50. Serie anual de caudales máximos para la estación LA REVUELTA	194
Figura 51. Diagrama de caja y serie de caudales máximos de la estación LA REVUELTA.	195
Figura 52. Valores históricos del Índice ONI.....	196
Figura 53. Curva de Masa Simple para caudales máximos anuales, estación LA REVUELTA.	197
Figura 54. Histograma y distribuciones de probabilidad ajustadas	198
Figura 25. Generación de la geometría del modelo hidráulico en HEC-RAS.....	200
Figura 36. Localización de los puntos donde se tomaron aforos líquidos.....	201
Figura 57. Manchas de inundación obtenidas en HEC-RAS.....	202
Figura 58. Láminas de agua obtenidas en algunas de las secciones modeladas.....	203
Figura 59. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Piedras, para periodos de retorno de 5,20 y 50 años.	205
Figura 60. Localización de la cuenca del río Manzanares.....	206
Figura 61. Curva hipsométrica de la cuenca del río Manzanares	208
Figura 62. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Manzanares.	208
Figura 63. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del río Manzanares.	210
Figura 64. Valores medios anuales de Temperatura media y humedad relativa para la cuenca del río Manzanares.....	210

Figura 65. Selección del tramo del río Piedras para modelación hidráulica	211
Figura 66. Localización de las estaciones hidrológicas disponibles en la zona de estudio	212
Figura 67. Serie anual de precipitación máxima en 24 horas para la estación MINCA.....	213
Figura 68. Identificación de outliers o valores atípicos en la serie de precipitación máxima en 24 horas.	214
Figura 69. Valores históricos del Índice ONI.....	215
Figura 70. Curvas de Masa Simple para precipitación máxima en 24 horas de la estación MINCA.....	216
Figura 71. Curvas IDF para la estación MINCA.....	218
Figura 72. Hietogramas de tormenta para diferentes periodos de retorno.....	220
Figura 73. Resultados del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 50 años.	222
Figura 74. Topografía levantada en la parte baja del río Manzanares.....	223
Figura 75. Geometría del río Manzanares para el modelo hidráulico en HEC-RAS	224
Figura 76. Localización de los puntos donde se tomaron aforos líquidos.....	225
Figura 77. Manchas de inundación obtenidas en HEC-RAS para el río Manzanares.	226
Figura 78. Láminas de agua obtenidas en algunas de las secciones modeladas del río Manzanares.	227
Figura 79. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Manzanares, para periodos de retorno de 5, 20 y 50 años.	229
Figura 80. Localización de la cuenca del rio Gaira.	230
Figura 81. Curva hipsométrica de la cuenca del río Gaira	231
Figura 82. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Gaira.	232
Figura 83. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del rio Gaira.	233
Figura 84. Valores medios anuales de Temperatura media y humedad relativa para la cuenca del rio Gaira.	234
Figura 85. Selección del tramo del río Gaira para modelación hidráulica.	235
Figura 86. Localización de las estaciones hidrológicas cercanas a la zona de estudio.	236
Figura 87. Resultados del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 5 años.	238
Figura 88. Topografía levantada en la parte baja del río Gaira	239
Figura 89. Generación de la geometría del modelo hidráulico en HEC-RAS.....	240
Figura 90. Manchas de inundación obtenidas en HEC-RAS.....	241

Figura 91. Láminas de agua obtenidas en algunas de las secciones modeladas del río Gaira.	242
Figura 92. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Gaira, para periodos de retorno de 5,20 y 50 años.....	243
Figura 93. Localización de la cuenca del rio Fundación	244
Figura 94. Curva hipsométrica de la cuenca del río Fundación	246
Figura 95. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Fundación	246
Figura 96. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del río Fundación.	248
Figura 97. Valores medios anuales de humedad relativa y temperatura media para la cuenca del río Fundación.	248
Figura 98. Tramo analizado del río Fundación en el centro poblado.	249
Figura 99. Outliers detectados en las serie de caudales de las estaciones FUNDACIÓN (Izquierda) y PTO RICO HDA (Derecha).....	251
Figura 100. Curvas de caudales máximos obtenidos en las estaciones FUNDACIÓN (Izquierda) y PTO RICO HDA (Derecha).....	252
Figura 101. Geometría del tramo del río Fundación en HEC-RAS.....	253
Figura 102. Perfil longitudinal de flujo en el tramo analizado.....	254
Figura 103. Lámina de agua obtenida para diferentes periodos de retorno.....	255
Figura 104. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Fundación, para periodos de retorno de 2.33 y 20 años.	256

LISTA DE TABLAS

Tabla 23. Clasificación del riesgo por subregiones en el departamento del Magdalena.....	182
Tabla 24. Parámetros morfométricos de la cuenca del rio Piedras.....	186
Tabla 25. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Piedras.	188
Tabla 26. Descripción de la serie de caudales máximos anuales	194
Tabla 27. Caudales obtenidos para diferentes periodos de retorno.	199
Tabla 28. Resultados obtenidos del aforo liquido	201
Tabla 29. Rugosidad estimada del rio Piedras.....	201
Tabla 30. Valores de rugosidad (n) recomendados por la literatura.....	202
Tabla 31. Área inundable para diferentes periodos de retorno.	203
Tabla 32. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Manzanares.	207
Tabla 33. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Manzanares.....	209
Tabla 34. Descripción de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación MINCA.	212
Tabla 35. Tiempo de concentración según diferentes metodologías.....	216
Tabla 36. Tiempo de concentración para la cuenca del río Manzanares.....	217
Tabla 37. Valores de los coeficientes a,b,c y d para el cálculo de las curvas IDF.	218
Tabla 38. CN de escorrentía con condiciones de humedad antecedente AMC II.	220
Tabla 39. Numero de Curva y área impermeable para la cuenca del río Manzanares.	221
Tabla 40. Caudales obtenidos para diferentes periodos de retorno en el rio Manzanares..	222
Tabla 41. Resultados obtenidos del aforo liquido en la cuenca del río Manzanares	225
Tabla 42. Rugosidad estimada del rio Manzanares	226
Tabla 43. Zonas y Área inundable en la cuenca baja del río Manzanares para diferentes periodos de retorno.	228
Tabla 44. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Gaira.....	231
Tabla 45. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Gaira.	232
Tabla 46. Tiempo de concentración para la cuenca del río Gaira.	237
Tabla 47. Numero de Curva y área impermeable para la cuenca del río Gaira.....	237
Tabla 48. Caudales obtenidos para diferentes periodos de retorno en el rio Gaira.	238
Tabla 49. Rugosidad estimada del rio Gaira.....	240

Tabla 50. Área inundable para diferentes periodos de retorno.....	242
Tabla 51. Parámetros morfométricos de la cuenca del rio Fundación.....	245
Tabla 52. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Fundación.	246
Tabla 53. Detección de outilers en las estaciones FUNDACIÓN y PTO RICO HDA.	250
Tabla 54. Caudales máximos estimados para las estaciones FUNDACIÓN Y PTO RICO HDA.	252
Tabla 55. Rugosidad estimada para el río Fundación.....	254
Tabla 56. Área inundable para diferentes periodos de retorno.....	255

RESUMEN

En el presente documento se describe el procesamiento y análisis de información necesaria para el desarrollo de una metodología de modelación hidráulica, con el fin de estimar manchas de inundación de tipo súbita en las cuencas bajas de los ríos Piedras, Manzanares y Gaira. Adicionalmente, para el río Fundación, se realizó una recopilación y complemento de los estudios de zonificación de amenaza por inundación en el área urbana del municipio de Fundación, los cuales fueron desarrollados por el IDEAM y La Universidad Nacional de Colombia.

Como parte de los resultados obtenidos se presentan mapas de inundación para periodos de retorno de 5, 20 y 50 años en los ríos Piedras, Manzanares y Gaira. Lo anterior como insumo fundamental en la generación de planes de gestión del riesgo para los municipios y regiones priorizados en el Plan Departamental de Gestión del Riesgo del Departamento del Magdalena. Para el caso del río Fundación se presentan los mapas de amenaza por inundación para periodos de retorno de 2.33 y 20 años a partir de la información recopilada del documento original correspondiente a la “ZONIFICACIÓN DE AMENAZAS POR INUNDACIONES A ESCALA 1:2.000 y 1:5.000 EN ÁREAS URBANAS PARA DIEZ MUNICIPIOS DEL TERRITORIO COLOMBIANO”, en el cual se seleccionó el municipio de Fundación en el departamento del Magdalena debido a su alta susceptibilidad frente a eventos de inundación por crecientes súbitas, lo cual afecta considerablemente a la población urbana.

Para el desarrollo de este proyecto se utilizó información hidrológica del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Modelo de Elevación Digital (MED) de la zona con resolución espacial de 30m y cartografía básica suministrada por el IGAC a escala 1:25000. Adicionalmente el estudio se complementó con aforos líquidos en algunas de las corriente modeladas. Para el caso de Fundación la metodología utilizada consistió en la estimación de la extensión de las inundaciones junto con el cálculo de la profundidad y velocidad asociadas, así como su representación en mapas de amenaza para diferentes períodos de retorno. Estos períodos de retorno se evaluaron a partir de las series de datos hidrológicos disponibles en los registros históricos de IDEAM. Finalmente se caracteriza la amenaza de inundación en tres categorías baja, media y alta, las cuales están dadas por una función que relaciona velocidad y la profundidad del agua para el evento de inundación bajo análisis.

INTRODUCCIÓN

Una inundación está definida como el desbordamiento de agua fuera de los confines normales de un río o cualquier masa de agua, también como la acumulación de agua procedente de drenajes en zonas que normalmente no se encuentran anegadas (WMO, 2012). Existen muchos factores que pueden inducir una inundación, desde los naturales hidroclimatológicos como el exceso de lluvias, pasando por factores antrópicos como el cambio en el uso del suelo y la deforestación, hasta eventos aislados como subducciones terrestres, sismos, fallas en presas y diques, etc.

Los efectos adversos de una inundación pueden ser innumerables, sin embargo, cabe resaltar los relacionados con la afectación de los ecosistemas terrestres, la pérdida de vidas humanas y animales, además del perjuicio económico y social que sufren miles de personas ante un evento como este.

En términos generales, las inundaciones se clasifican en dos subgrupos, las lentas o progresivas que son de tipo aluvial y las rápidas o súbitas que son de tipo torrencial. Las inundaciones lentas se presentan principalmente en zonas con topografías planas de bajas pendientes, tienen bajo poder erosivo y se desarrollan en periodos de tiempo relativamente largos; las inundaciones rápidas en cambio, tienen lugar en cuencas de montaña donde la topografía es accidentada y de altas pendientes, tienen un gran poder erosivo y se desarrollan en cortos periodos de tiempo (menos de 5 horas).

Una de las actividades más importantes en la elaboración de planes de gestión del riesgo, es la producción de mapas de inundación a diferentes escalas según la necesidad y el detalle requerido. Estos mapas permiten evaluar la vulnerabilidad, amenaza y riesgo de las poblaciones, ecosistemas y actividades productivas que se asientan en las zonas aledañas a un cuerpo de agua.

Durante los años 2010 y 2011, Colombia experimentó una de las mayores temporadas invernales gracias al desarrollo de un fenómeno de La Niña, lo cual generó graves condiciones de inundación en todo el territorio nacional. Esta situación representó una catástrofe para el país dejando miles de personas damnificadas y pérdidas millonarias para la nación. Sin embargo, paradójicamente el evento se constituyó como una generosa oportunidad para tomar acciones orientadas a atender la situación de calamidad de miles de familias colombianas y a planificar de una mejor manera la gestión del riesgo minimizando los impactos que puedan causar emergencias de este tipo.

ZONAS PRIORIZADAS

Partiendo de la información consignada en el Plan Departamental de Gestión del Riesgo del Departamento del Magdalena, se priorizaron algunas de las cuencas de la Subregión Norte que sufren inundaciones rápidas por avenidas torrenciales (Tabla 23), las cuales fueron clasificadas como de alto riesgo. Entre las cuencas más importantes de la Subregión Norte se tienen las de los ríos Palomino, Don Diego, Mendihuaca, Buritaca, Guachaca, Piedras, Manzanares, Gaira, Frio, Córdoba, Toribio, Sevilla, Tucurinca, Aracataca y Fundación. De este conjunto de cuencas, se seleccionaron a su vez, aquellas de mayor importancia y mayor vulnerabilidad a ser impactadas económica, social y ambientalmente ante un evento de inundación para la generación de los mapas, obteniendo las cuencas los ríos Piedras, Manzanares, Gaira y Fundación (Figura 42).

Tabla 23. Clasificación del riesgo por subregiones en el departamento del Magdalena

Amenazas	Subregión Norte	Subregión Río	Subregión Centro	Subregión Sur
	Nivel del Riesgo			
Huracanes	----	----	----	----
Vendavales	Alto	Medio	Medio	Alto
Tormentas eléctricas	Medio	Medio	Medio	Medio
Sequias y desertificación	Medio	Medio	Alto	Alto
Inundaciones	Alto	Alto	Alto	Alto
Avenidas torrenciales	Alto	----	Medio	----
Erosión costera	Medio	Bajo	----	----
Erosión fluvial	Alto	Alto	Alto	Alto
Sismo	----	----	----	----
Remoción en masa	Medio	----	----	----
Tsunamis	----	----	----	----
Degradación recursos naturales	Alto	Medio	Alto	Alto
Incendios forestales	Alto	Bajo	----	----
Tecnológicas	Medio	----	----	----

Fuente. Plan de Gestión del Riesgo del Departamento del Magdalena

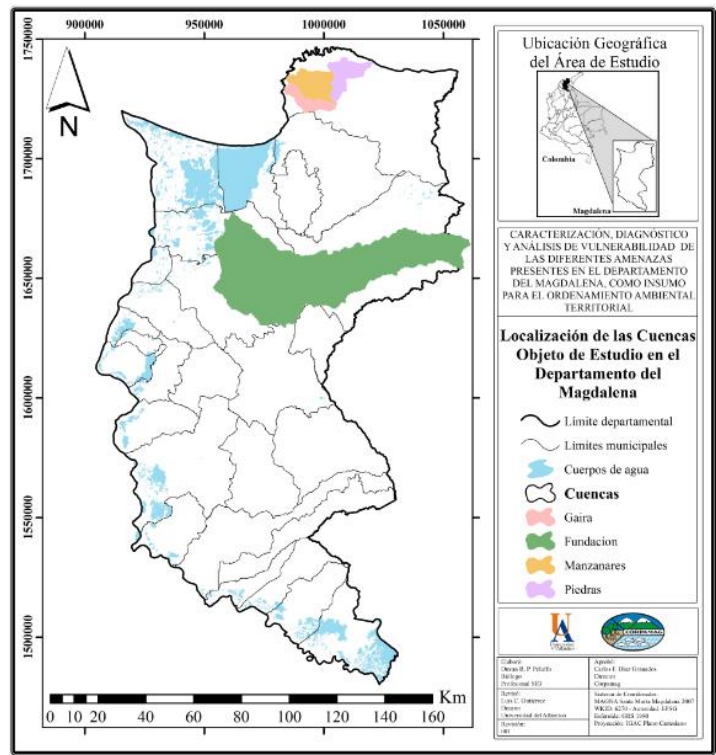


Figura 42. Cuencas seleccionadas para análisis de riesgo por inundación.

INFORMACIÓN REQUERIDA

Para la elaboración de los mapas de inundación se requieren los siguientes insumos:

- Cartografía de la zona a escala 1:25.000, suministrada por el IGAC.
- Modelos de Elevación Digital (DEM, por sus siglas en inglés) de la zona, obtenido de la misión ASTER GDEM¹ (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer – Global Digital Elevation Model), con resolución espacial de 30m.
- Red de drenaje de las cuencas a escala 1:25.000, suministrada por el IGAC.
- Información hidrológica de la zona, suministrada por el IDEAM.
- Aforos liquidados a lo largo de las corrientes estudiadas.
- Para el caso de Fundación, el documento de zonificación de amenazas por inundaciones a escala 1:2.000 y 1:5.000 en áreas urbanas para diez municipios del territorio colombiano.

RÍO PIEDRAS

Generalidades y Morfométrica

La cuenca del río Piedras se encuentra ubicada en la vertiente norte de la Sierra Nevada de Santa Marta, aproximadamente entre las coordenadas: 11°08'N y 11°18'N de latitud, y 74°04'W y 73°53'W de longitud. El río nace en los límites de la cuchilla de San Lorenzo, áreas de la finca Tolima, a una altura aproximada de 2000 msnm y desemboca en el mar Caribe en el sitio conocido como Los Naranjos. Al este limita con la cuenca hidrográfica del río Mendihuaca, al oeste con la cuenca hidrográfica del río Manzanares, al norte con el Parque Tayrona y al sur con la cuenca alta de los ríos Gaira y Guachaca (Figura 43).

¹ Sensor remoto operado por la NASA

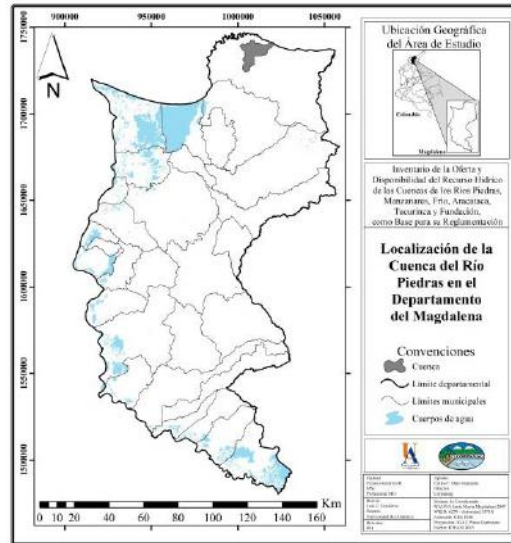


Figura 43. Localización de la cuenca del río Piedras.

La cuenca cuenta con aproximadamente 16.000 hectáreas. La longitud del río Piedras es de 38 kilómetros y presenta un caudal promedio de 4.5 m³/s a la altura de la estación limnimétrica de La Revuelta, ubicada en la parte baja de la cuenca.

Según el estudio de Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas del IDEAM, la codificación para la cuenca del río Piedras es:

Área	Zona	Subzona	Nivel I
Caribe	Caribe-Guajira	Piedras-Manzanares y otros directos Caribe	Piedras
1̂	5̂	01̂	01̂

La caracterización morfométrica es un insumo fundamental para comprender la geometría de la cuenca y su comportamiento hidrológico en relación a la generación de caudales a partir de eventos de precipitación. Los parámetros morfométricos se obtuvieron a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM) y la cartografía base a escala 1:25.000.

En la Tabla 24 se presentan los parámetros morfométricos más importantes de la cuenca del río Piedras.

Tabla 14. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Piedras

Parámetro	Valor
Área (km ²)	159.72
Perímetro (km)	73.14
Cota mayor cuenca (msnm)	2447
Cota menor cuenca (msnm)	0
Cota mayor cauce principal (msnm)	2000
Cota menor cauce principal (msnm)	0
Longitud del cauce principal (km)	38.04
Pendiente del cauce principal (m/m)	0.05
Pendiente media de la cuenca (%)	36.35
Altura media cuenca (msnm)	597.32
Índice de Gravelius (Kc)	1.61
Factor de forma de Horton (Hf)	0.11
Densidad de drenaje (Dd) (Km/Km ²)	1.98

La curva hipsométrica representa el relieve de la cuenca en términos de área acumulada y altura sobre el nivel del mar, en otras palabras es el porcentaje de área de la cuenca que existe por encima de una cota determinada. La curva hipsométrica sirve como un indicador de la edad de la cuenca.

La curva hipsométrica de la cuenca del río Piedras (Figura 44), indica una cuenca en fase intermedia de madurez y vejez, donde ya se ha presentado una erosión importante, lo cual indica que está pasando de ser una cuenca en equilibrio a ser una cuenca sedimentaria.

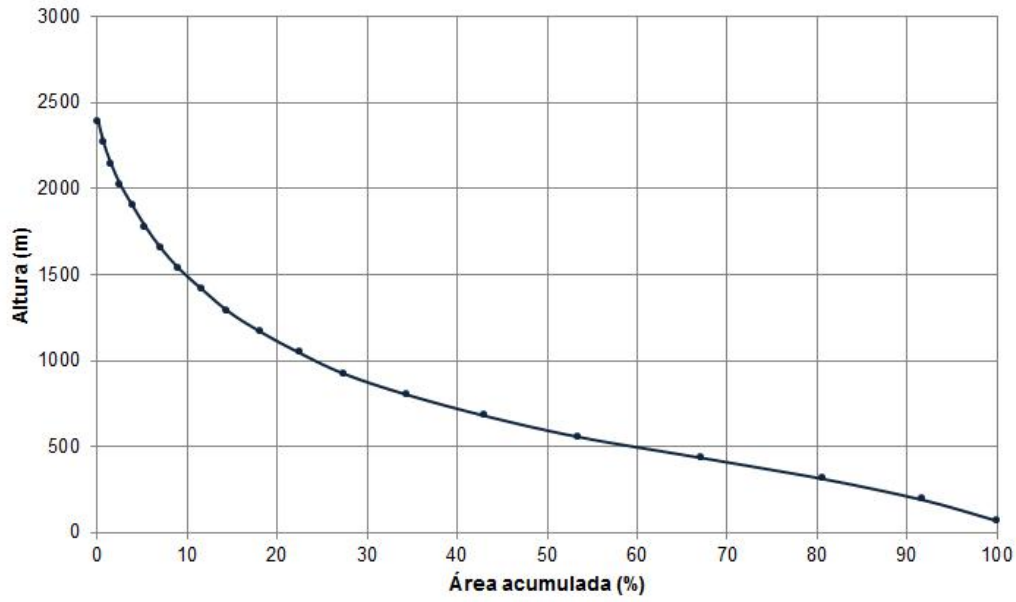


Figura 44. Curva hipsométrica de la cuenca del río Piedras.

La red de drenaje se obtuvo directamente del DEM, alcanzando hasta 6 órdenes de corriente en la cuenca según la clasificación de Strahler, tal como se muestra en la Figura 15. Para analizar la red de drenaje se calcularon los órdenes de las corrientes con su respectiva longitud y frecuencia, además de las leyes de Horton de bifurcación y longitud.

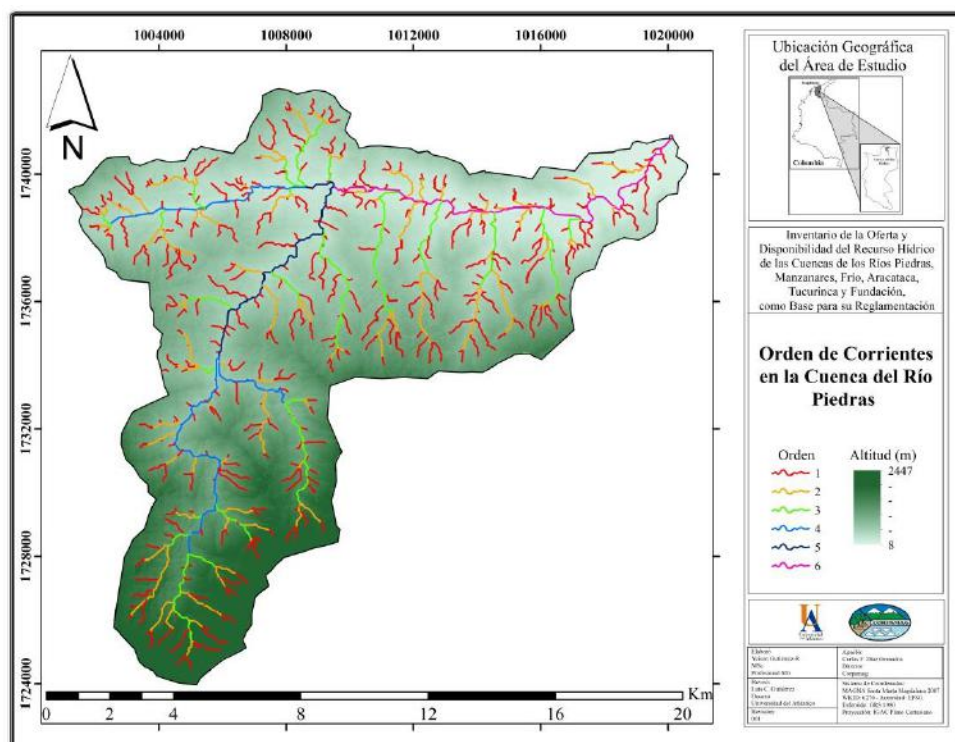


Figura 15. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Piedras
 El análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Piedras, se resume en la Tabla 25.

Tabla 25. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Piedras.

Orden	Cantidad de corrientes	Longitud total (Km)	Frecuencia (%)	Relación de bifurcación	Relación de longitud
1	676	158.60	50	2.21	0.45
2	306	70.71	22	1.74	0.62
3	176	43.73	14	1.56	0.46
4	113	20.20	6	2.76	0.47
5	41	9.40	3	0.48	1.61
6	85	15.17	5		
TOTAL / MEDIA	1397	318	100	1.75	0.72

Teniendo en cuenta el análisis realizado anteriormente, se concluye que la cuenca del río Piedras es relativamente pequeña, con características de relieve que la clasifican como cuenca de montaña, poco alargada y con capacidad de concentrar grandes volúmenes de agua, tiene una red de drenaje intermedia a buena lo cual repercute directamente en mayores crecidas ante eventos de precipitación.

Características Climáticas

La precipitación media sobre la cuenca varía entre 1400 mm/año en la cuenca baja y 2800 mm/año en la cuenca alta. La temperatura media anual esta entre los 14.5°C en la parte más alta de la cuenca donde nace el rio Piedras y los 26.4°C en la parte baja ocupando la mayor área de la cuenca. Los valores de evaporación se encuentran entre 585 y 1160 mm/año, mientras que la humedad relativa varía entre 87% y 92%. Como se observa, el comportamiento de cada una de las variables está estrechamente relacionado con el relieve de la cuenca, ya que las condiciones en la parte alta son completamente diferentes a las establecidas en la cuenca baja, lo cual obedece al comportamiento del clima según la teoría de pisos térmicos que se presenta sobre todo en regiones tropicales donde la influencia del relieve es determinante. En la Figura 46-47 se presentan los mapas con valores promedio anual de cada una de las variables analizadas.

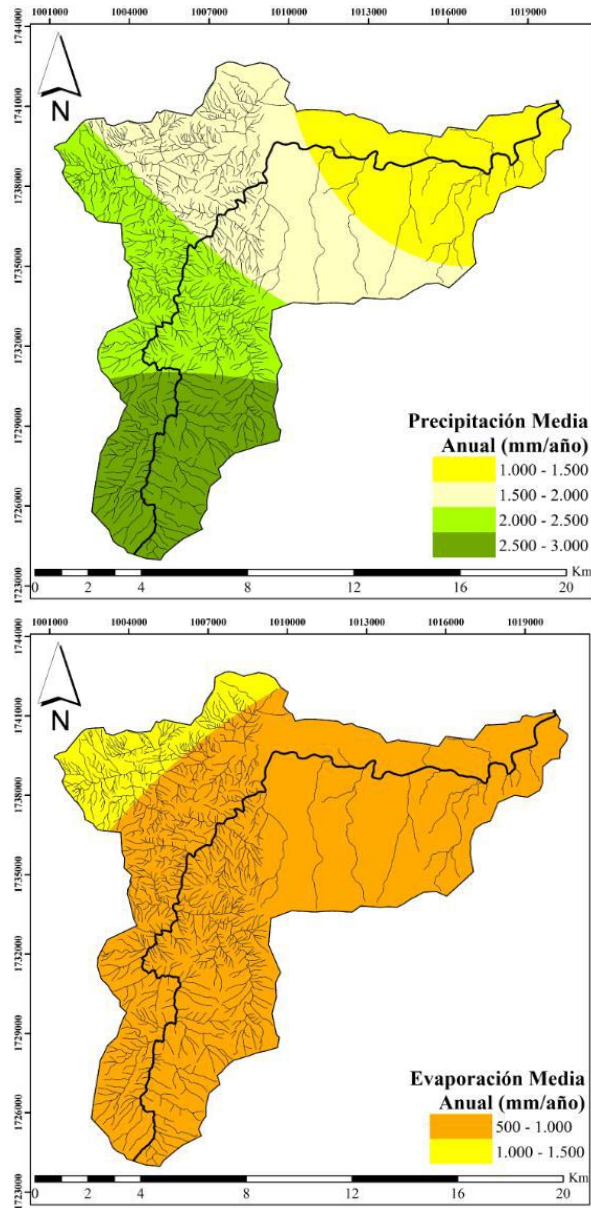


Figura 46. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del río Piedras.

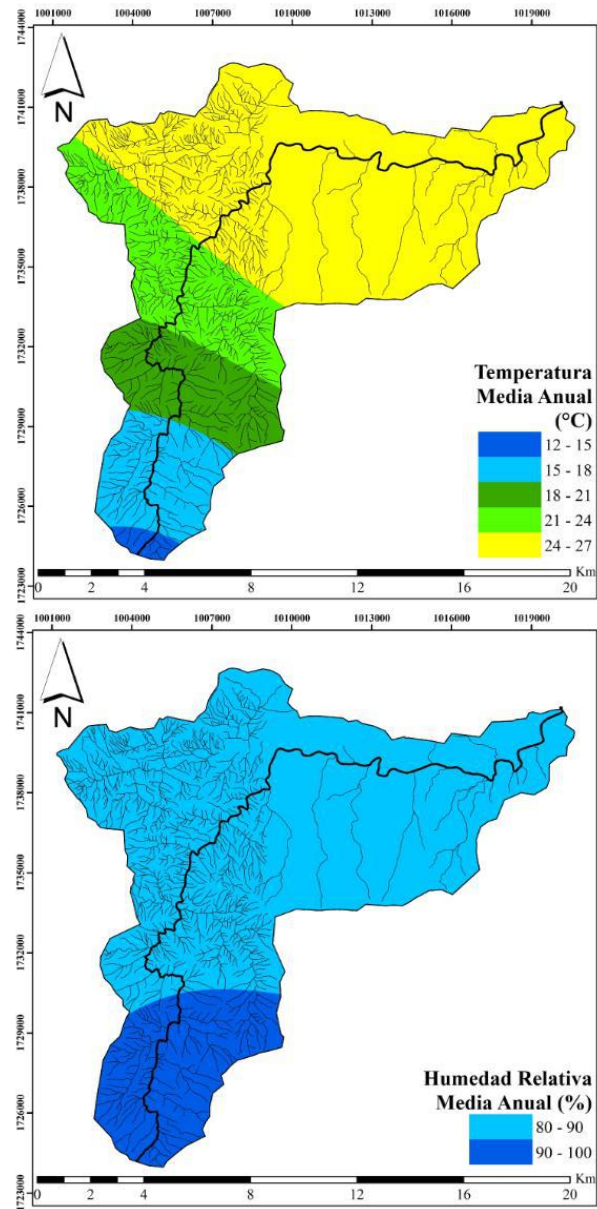


Figura 47. Valores medios anuales de Temperatura media y humedad relativa para la cuenca del rio Piedras.

Selección del Tramo del Río a Modelar

Teniendo como base la idea de que, en ríos de montaña, la cuenca baja es más susceptible a sufrir inundaciones importantes, se utilizó el siguiente criterio para la selección del tramo del río con el que se desarrolló el modelo hidráulico. Este tramo corresponde a la cuenca baja del río Piedras.

A partir del perfil longitudinal del río, se identificó el punto de cambio de pendientes que marca la transición entre la cuenca media y la cuenca baja. Para ello se trazaron dos rectas paralelas al perfil longitudinal del río, una en la parte baja y otra en la parte media, el punto de intersección entre las dos rectas marca el fin de la cuenca media y el inicio de la cuenca baja, tal como se muestra en la Figura 48. El tramo obtenido aguas abajo del punto A, que se ubica en la cota 120 msnm, tiene una longitud aproximada de 13 Km y una pendiente promedio de 0.008 m/m.

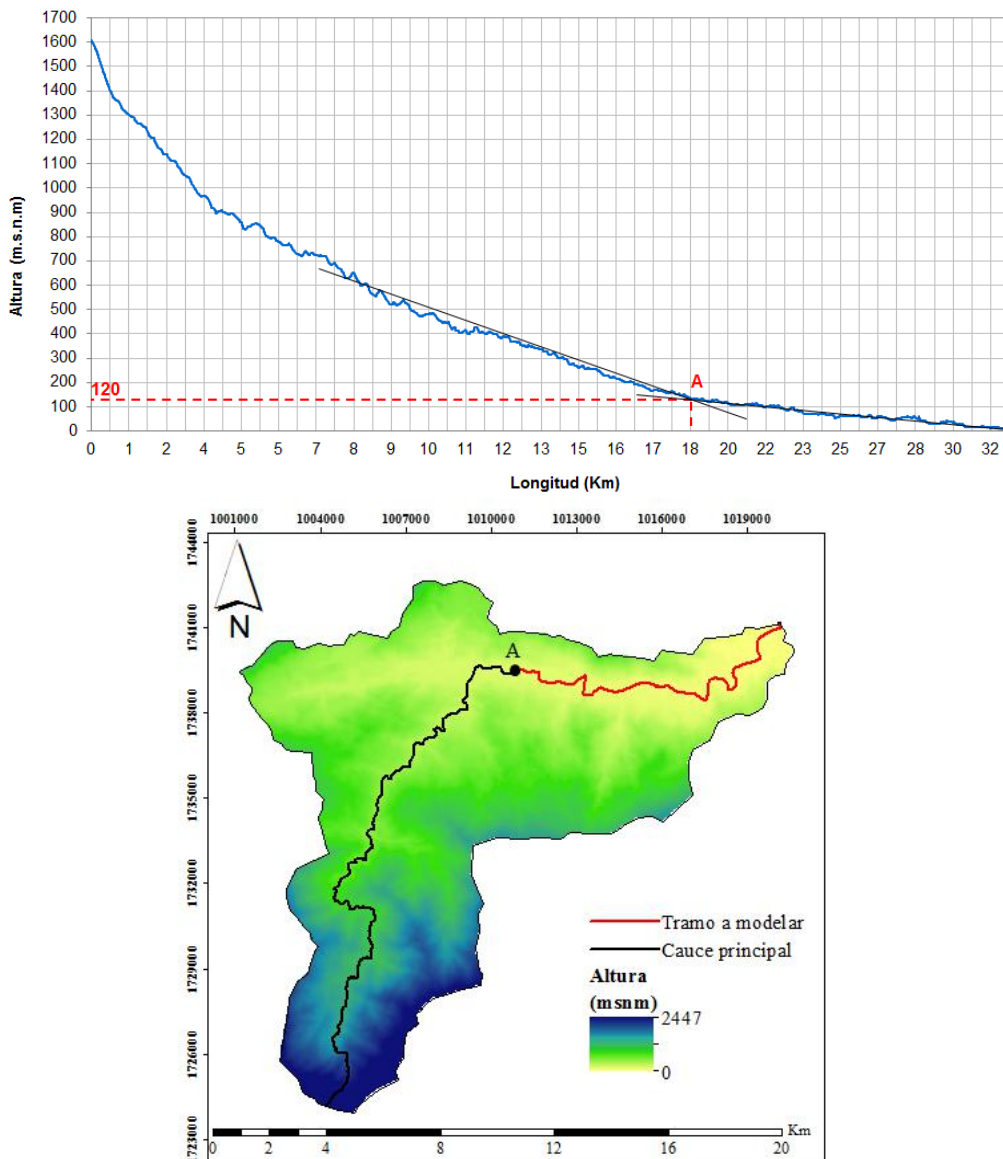


Figura 48. Selección del tramo del río Piedras para modelación hidráulica.

Hidrología

De la información hidrológica solicitada al IDEAM, se localizaron las estaciones de precipitación y caudal más cercanas a la zona de estudio (Figura 49). Con la información disponible se obtuvieron los caudales máximos para diferentes periodos de retorno, lo cual se describe a continuación.

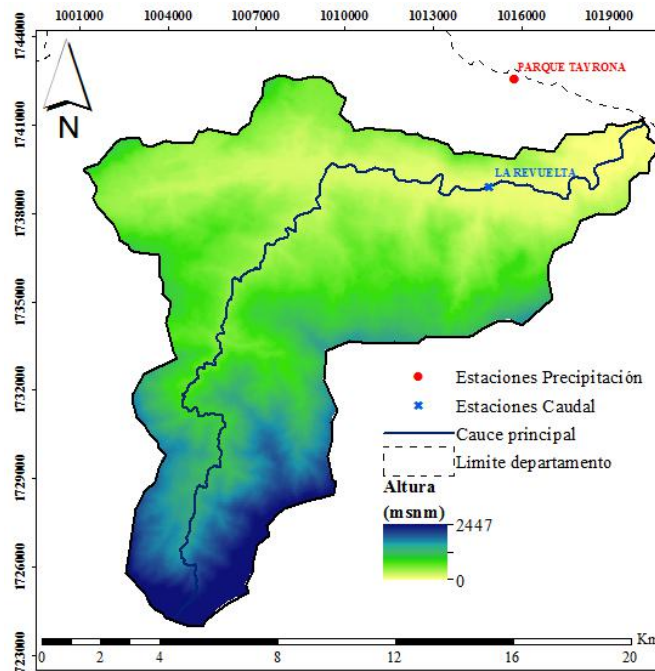


Figura 49. Localización de las estaciones hidrológicas disponibles en la zona de estudio.

Para el caso del río Piedras se contó con la fortuna de tener una estación de caudales en la cuenca baja (LA REVUELTA), la cual cuenta con registros históricos de caudales medios, mínimos y máximos para más de 30 años. La estación se encuentra ubicada en la parte baja de la cuenca, exactamente en las coordenadas: 11.277 de Latitud Norte y 73.941 de Longitud Oeste. Por encontrarse en la parte baja de la cuenca, la estación LA REVUELTA ofrece información mucho más confiable de los caudales que se utilizarán en el modelo hidráulico.

Como la información de caudales es una medida directa del comportamiento hidrológico de la cuenca, no es necesario trabajar con series de precipitación. Para este caso interesa la información de caudales máximos anuales, cuya descripción y grafica de la serie se muestra en la Tabla 26 y Figura 50 respectivamente.

Tabla 26. Descripción de la serie de caudales máximos anuales

Estación	Año inicial	Año Final	Long. Registro (años)	Datos Faltantes (años)	Datos Existentes (años)	Promedio anual (m ³ /s)	Desv. Estándar (m ³ /s)
LA REVUELTA	1974	2013	39	5	34	135.05	98.73

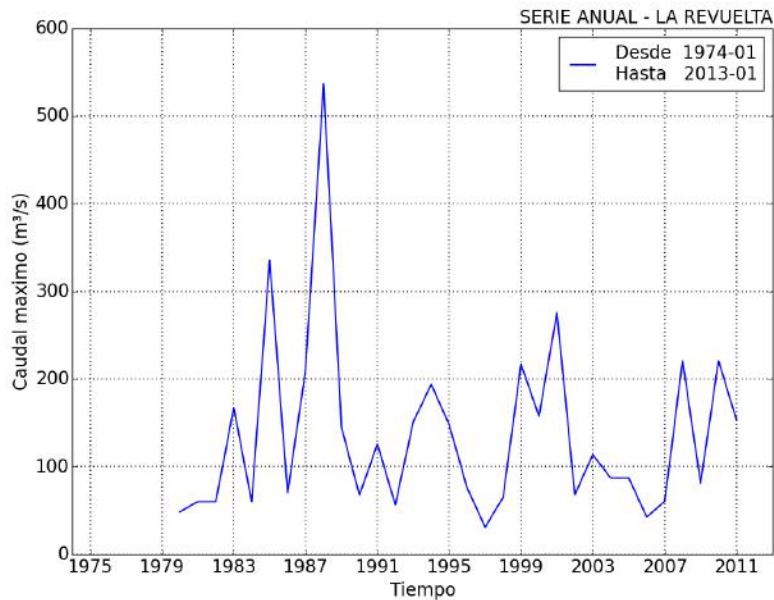


Figura 50. Serie anual de caudales máximos para la estación LA REVUELTA

Análisis de calidad de la serie

Lo primero que se debe hacer con la serie de caudales máximos anuales, es verificar su calidad a través un análisis exploratorio de datos. Lo primero es verificar si existen valores atípicos u “outliers”, que son datos que se salen del rango normal de valores de la serie, de existir estos valores, se debe verificar si efectivamente son reales o si por el contrario obedecen a errores en la toma del dato. Posteriormente se verifica la calidad de la serie a través de la curva de masa simple, la cual es el resultado de la suma acumulada de la variable analizada en todo el periodo de registro. Para que la información consignada en los registros sea consistente es necesario que la curva tenga una pendiente constante y creciente a lo largo del tiempo. Cabe anotar que la ausencia de datos en una serie no representa falta de consistencia.

Para la identificación de valores atípicos se usó el diagrama de caja o “*box plot*” el cual se basa en los cuartiles y permite observar gráficamente el conjunto de datos de la serie. Este gráfico suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2

o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución. En la Figura 51 se presenta el diagrama de caja para la serie de caudales máximos de la estación LA REVUELTA junto con la identificación de los valores atípicos en la serie. Allí se identifica un valor atípico para el año 1988, cuyo valor es 536.8 m³/s.

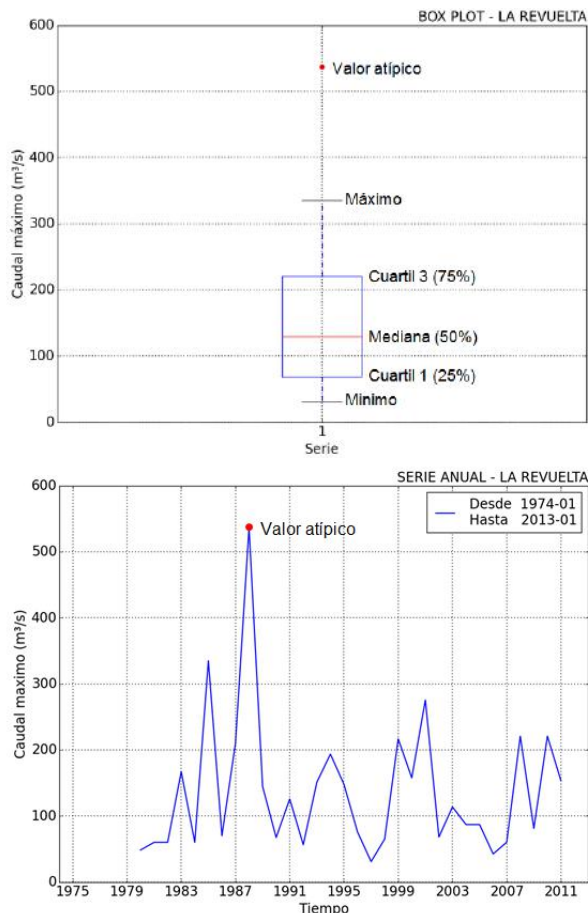


Figura 51. Diagrama de caja y serie de caudales máximos de la estación LA REVUELTA.

El siguiente paso es verificar si el valor atípico encontrado obedece a un valor real o a un error en la toma del dato. Para ello se compara la serie de caudales con los años donde se presentó un evento “La Niña”, ya que como se sabe, en Colombia “La Niña” provoca lluvias más intensas y frecuentes provocando un aumento considerable en los caudales de los ríos. Para verificar los años donde sucedió un fenómeno de La Niña, se usa el índice ONI, el cual da una medida de la temperatura superficial del Océano Pacífico en la Región Niño 3.4.

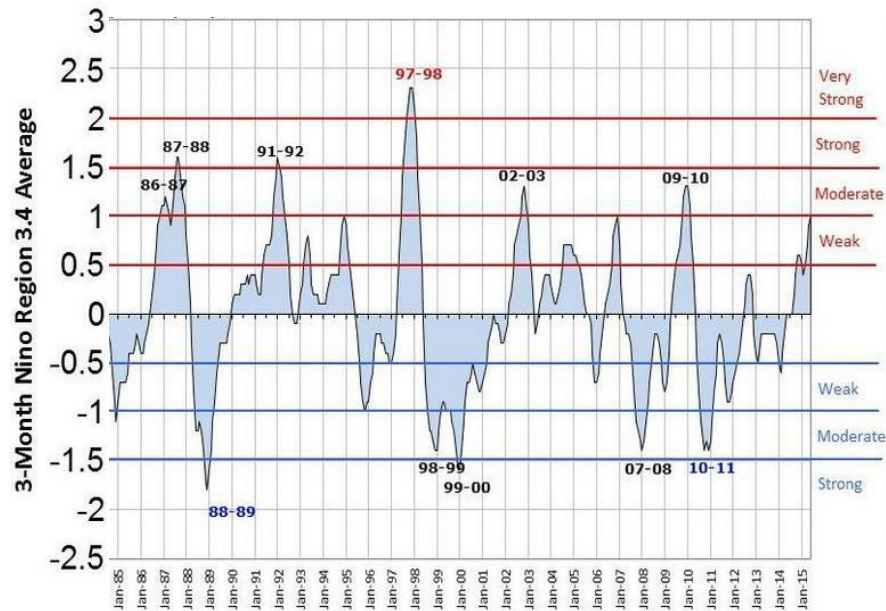


Figura 52. Valores históricos del Índice ONI.

En la Figura 52 se muestran los valores históricos del índice ONI. Los valores se obtienen del promedio trimestral de las anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4. Cuando el valor del ONI se mantiene por encima de $+0.5^{\circ}\text{C}$ en por lo menos 5 meses se considera la ocurrencia de Un Niño, mientras que si está por debajo de -0.5°C se considera la ocurrencia de Una Niña, en otro caso se considera un comportamiento normal. En la Figura se ve que en los años de 1988 y 1989 ocurrió un fenómeno de la niña muy fuerte, lo cual quiere decir que el dato identificado como atípico, puede corresponder perfectamente a un valor real, por lo tanto, no se elimina de la serie.

A continuación, se verifica la calidad de los datos a través de la curva de masa simple, lo cual se muestra en la Figura 53.

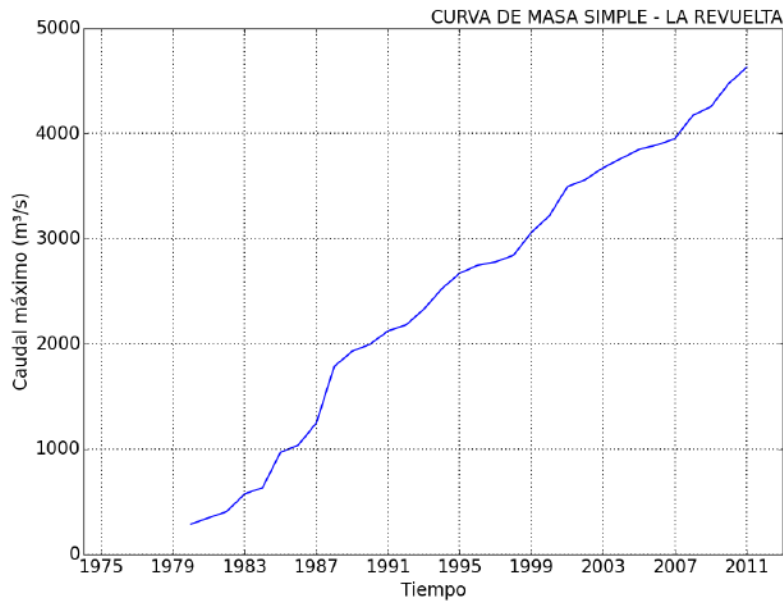


Figura 53. Curva de Masa Simple para caudales máximos anuales, estación LA REVUELTA.

Como se observa en la Figura 54Figura , la curva de masa simple tiene una pendiente promedio relativamente constante y siempre ascendente, por lo tanto se puede decir que la calidad del registro es buena y adecuada para el estudio hidrológico.

Análisis de Frecuencias Caudales Máximos Anuales

El análisis de frecuencias es una metodología estadística utilizada para predecir el comportamiento de los caudales en un sitio de interés, a partir de registros históricos, por lo tanto, su confiabilidad depende de la longitud y calidad de la serie, además de la incertidumbre propia de la distribución de probabilidad ajustada. Es un método basado en procedimientos estadísticos que permiten calcular la magnitud de un caudal asociado a un período de retorno determinado.

Para la aplicación de la metodología se asume que la distribución de probabilidades de caudal es homogénea, es decir que es estacionaria en el tiempo, lo cual no siempre se cumple debido a factores climáticos de gran envergadura como el Fenómeno ENSO o el cambio climático.

El procedimiento consiste en hacer un histograma con los valores de caudal máximo registrados. A continuación, se ajustan diferentes funciones de probabilidad teóricas a partir de los datos registrados y se selecciona la que mejor se ajusta a la serie original (Figura 54). Lo anterior con el fin de generar una función continua para los valores de caudal y así poder tener valores en cualquier punto del dominio.

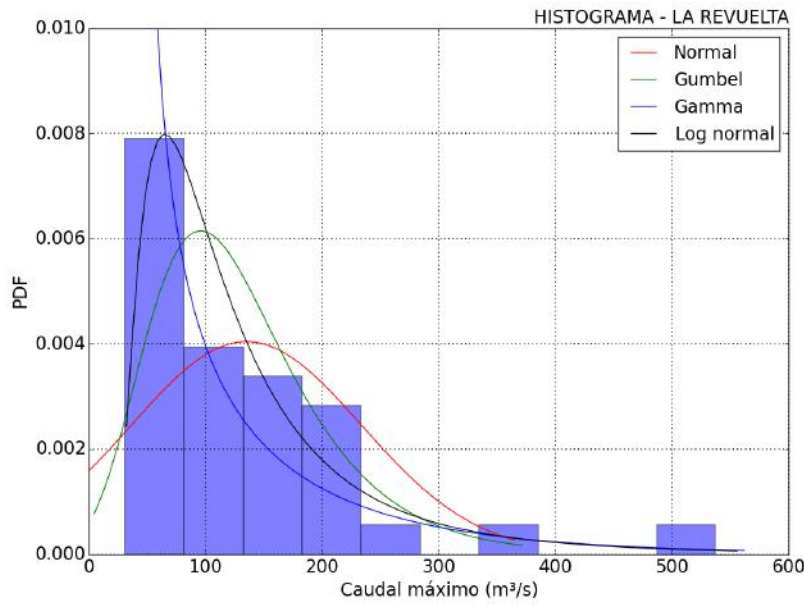


Figura 54. Histograma y distribuciones de probabilidad ajustadas

Según la Figura 54, visualmente las distribuciones de probabilidad que mejor se ajustan a la serie de caudales máximos anuales son la Gumbel y Log normal. Sin embargo, se debe realizar un Test de bondad de ajuste para determinar cuál de ellas representa mejor al conjunto de datos. Para este caso se utilizó la prueba de Smirnov-Kolmogorov, la cual compara la curva de probabilidad acumulada de la serie de caudales máximos anuales, contra la curva de probabilidad acumulada obtenida mediante alguna de las funciones de probabilidad teóricas ajustadas, empleando los parámetros provenientes del comportamiento estadístico de la serie de máximos. La prueba consiste en encontrar la distancia máxima entre ambas curvas y compararla con el estadístico K obtenido a partir de los grados de libertad dados por la cantidad de datos y la confiabilidad establecida para la prueba (95%). La hipótesis nula del test asume que los valores de la serie de máximos se ajustan a cierta función de probabilidad teórica.

El resultado de aplicar la prueba de Smirnov-Kolmogorov, determinó que la función de probabilidad que mejor se ajusta a la serie de datos es la Log Normal, por lo tanto no se puede rechazar la hipótesis nula, es decir se acepta que la serie de caudales máximos anuales sigue una distribución de tipo Log Normal.

La probabilidad de excedencia para un evento de caudal máximo está dado por:

$$P = 1 - \frac{1}{TR}$$

Donde P es la probabilidad de excedencia y TR es el periodo de retorno. Por lo tanto, la probabilidad de excedencia para periodos de retorno de 5, 20 y 50 años es:

$$P = 1 - \frac{1}{5} = 0.8 \quad , \quad P = 1 - \frac{1}{20} = 0.95 \quad , \quad P = 1 - \frac{1}{50} = 0.98$$

Según lo anterior, se calculan los percentiles 0.8, 0.95 y 0.98 de la distribución Log Normal para obtener el valor de caudal en función de los periodos de retorno dados, tal como se muestra en la Tabla 27.

Tabla 27. Caudales obtenidos para diferentes periodos de retorno.

TR	Log Normal Qmax (m³/s)
5	185
20	332
50	452

Los caudales obtenidos serán uno de los insumos de entrada para la modelación hidráulica, la cual se explica en el siguiente capítulo.

Modelación hidráulica

La modelación hidráulica consiste en la determinación de láminas de agua en la corriente para diferentes periodos de retorno, con lo cual se pueden crear mapas de inundación. Para ello se utilizó el software hidráulico HEC-RAS², y un software de tipo SIG.

La topografía del modelo se obtuvo a partir de la topografía oficial del departamento a escala 1:25.000, la cual se comparó y complemento con el DEM del ASTER GDEM. A partir de allí se generó el MDT (Modelo Digital del Terreno) y se crearon secciones transversales cada 200m a lo largo del río, tal como se muestra en la Figura 55.

Cabe aclarar que en la modelación hidráulica se trabajó con flujo permanente y uniforme en todo el tramo analizado, es decir que se usó el mismo caudal para todas las secciones transversales. Lo anterior, evidentemente, no es del todo cierto ya que como se verá más adelante en los aforos realizados, el caudal varía a lo largo de la corriente debido a ingresos de agua en diferentes puntos del tramo, captaciones, desviaciones de flujo, pérdidas hidráulicas por infiltración, entre otros factores. Las condiciones de borde establecidas fueron profundidad normal aguas abajo y régimen de flujo subcrítico.

² Software libre de modelamiento hidráulico desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos

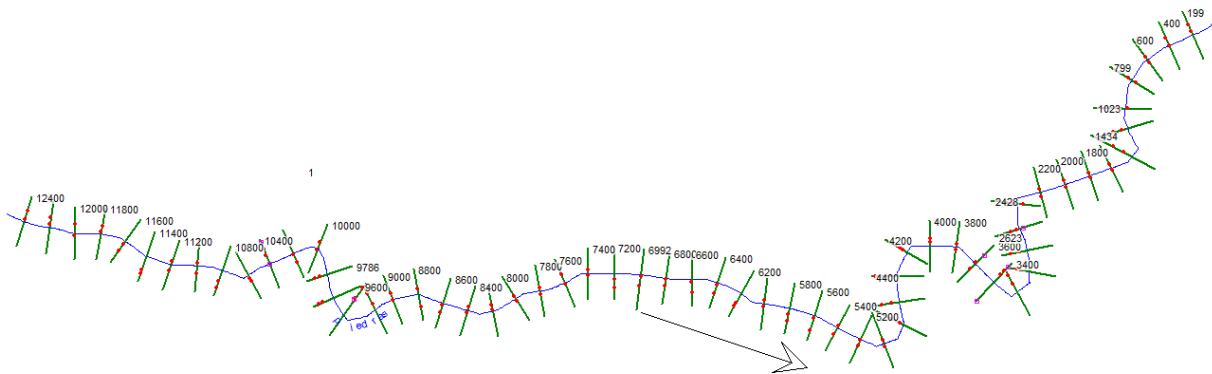


Figura 25. Generación de la geometría del modelo hidráulico en HEC-RAS

Aforo líquido y calibración del modelo

Con el objetivo de calibrar el modelo hidráulico y tener una idea del caudal que fluye por el río en época de verano, se realizó una visita de campo a la cuenca del río Piedras, donde se realizó un aforo líquido en diferentes secciones a lo largo del cauce. La Figura 56 muestra los puntos donde se realizaron los aforos de caudal en la corriente modelada.

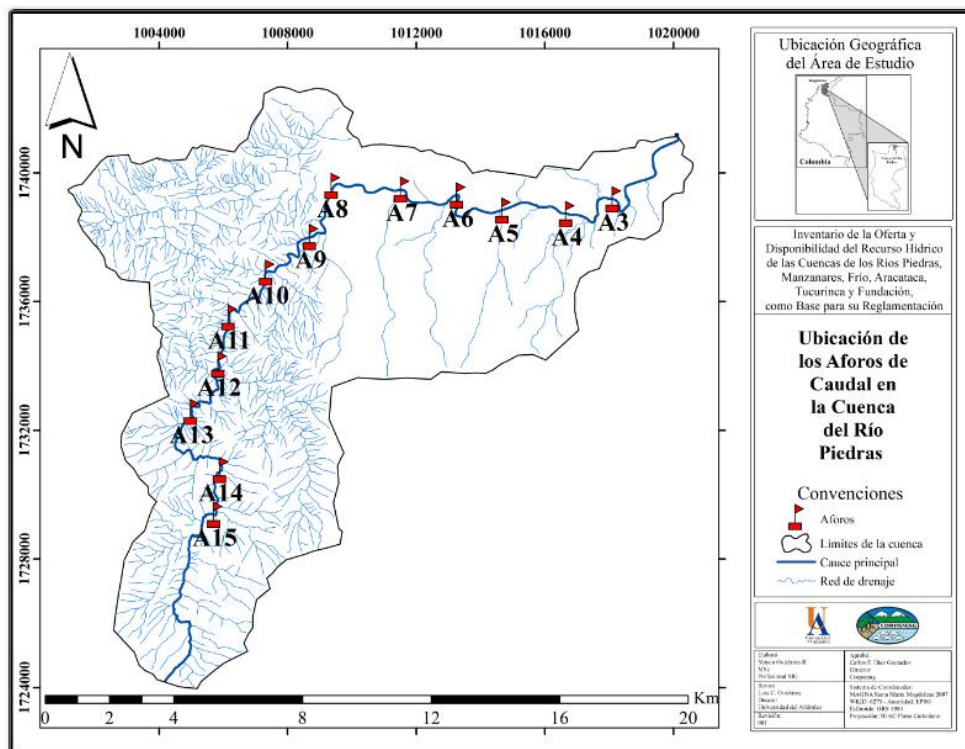


Figura 36. Localización de los puntos donde se tomaron aforos líquidos.

Una vez procesada la información tomada en campo, se obtuvieron los parámetros mostrados en la Tabla 28, donde se observa el comportamiento de la velocidad a lo largo de la corriente.

Tabla 28. Resultados obtenidos del aforo líquido

Sección	Ancho lamina agua (m)	Profundidad media (m)	Área Mojada (m²)	Vel. media (m/s)	Caudal (m³/s)
15	6.80	0.36	2.21	0.14	0.37
14	8.00	0.22	1.66	0.38	0.58
13	6.58	0.20	1.23	0.27	0.41
12	6.54	0.15	0.89	0.20	0.16
11	11.73	0.17	1.87	0.13	0.25
10	6.50	0.26	1.54	0.10	0.21
9	8.50	0.17	1.37	0.12	0.21
8	11.70	0.40	4.51	0.08	0.38
7	10.20	0.22	2.15	0.16	0.38
6	10.50	0.40	4.01	0.23	1.24
5	10.45	0.56	5.64	0.24	0.4
4	16.12	0.45	7.25	0.07	0.37
3	13.40	0.53	7.10	0.27	1.96

La calibración del modelo consiste en determinar la rugosidad promedio del río, tanto en el lecho como en las bancas y llanuras de inundación, basados en las recomendaciones hechas en la literatura y en los aforos realizados. A partir de los aforos realizados se verifica que los caudales estimados correspondan con las velocidades medidas en campo. Los coeficientes de rugosidad de Manning obtenidos, se muestran en la Tabla 29, los cuales coinciden con los recomendados en la literatura (Tabla 30).

Tabla 29. Rugosidad estimada del río Piedras

Sitio	Rugosidad (n-Manning)
Lecho	0.05 (Lecho rocoso en río de montaña)
Banca y llanura derecha	0.07 (Arboles y matorrales)
Banca y llanura izquierda	0.07 (Arboles y matorrales)

Tabla 30. Valores de rugosidad (n) recomendados por la literatura

Tipo de canal y descripción	Mínimo	Normal	Máximo
<i>b. Corrientes montañosas, sin vegetación en el canal, bancas usualmente empinadas, árboles y matorrales a lo largo de las bancas sumergidas en niveles altos</i>			
1. Fondo: gravas, cantos rodados y algunas rocas	0.030	0.040	0.050
2. Fondo: cantos rodados con rocas grandes	0.040	0.050	0.070
D-2. Planicies de inundación			
<i>a. Pastizales, sin matorrales</i>			
1. Pasto corto	0.025	0.030	0.035
2. Pasto alto	0.030	0.035	0.050
<i>b. Áreas cultivadas</i>			
1. Sin cultivo	0.020	0.030	0.040
2. Cultivos en línea maduros	0.025	0.035	0.045
3. Campos de cultivo maduros	0.030	0.040	0.050
<i>c. Matorrales</i>			
1. Matorrales dispersos, mucha maleza	0.035	0.050	0.070
2. Pocos matorrales y árboles, en invierno	0.035	0.050	0.060
3. Pocos matorrales y árboles, en verano	0.040	0.060	0.080
4. Matorrales medios a densos, en invierno	0.045	0.070	0.110
5. Matorrales medios a densos, en verano	0.070	0.100	0.160

Fuente. Hidráulica de canales abiertos. Ven te Chow

Resultados

Como resultado de la modelación hidráulica, se obtuvieron láminas de agua para diferentes periodos de retorno en cada una de las secciones analizadas. Posteriormente y con ayuda del software tipo SIG, estas láminas de agua fueron transformadas a manchas de inundación en mapas. La Figura 57-58 muestra un ejemplo de las láminas de agua obtenidas para 5, 20 y 50 años en dos de las secciones analizadas.

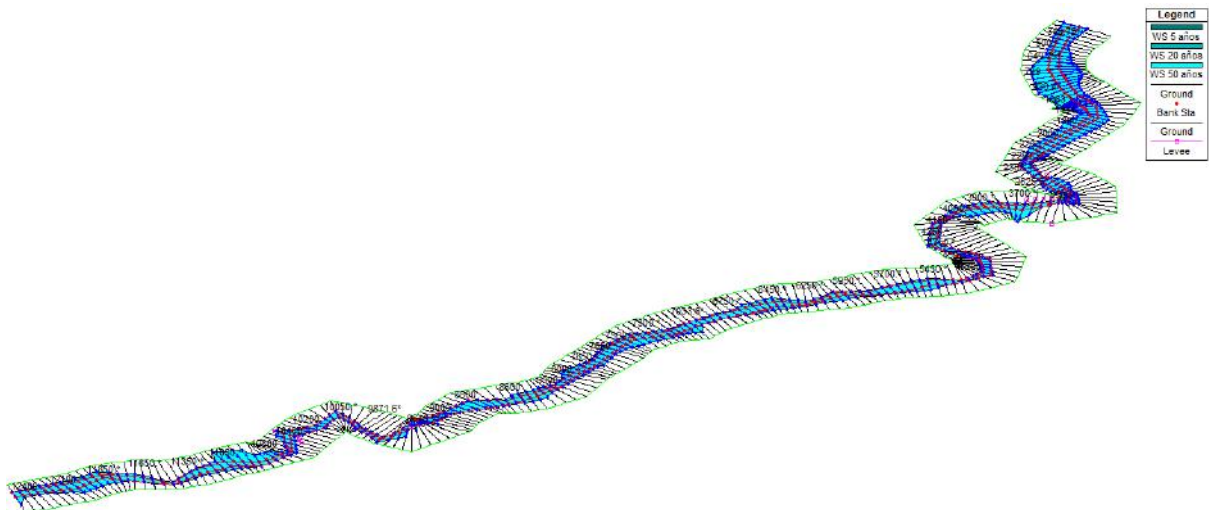


Figura 57. Manchas de inundación obtenidas en HEC-RAS

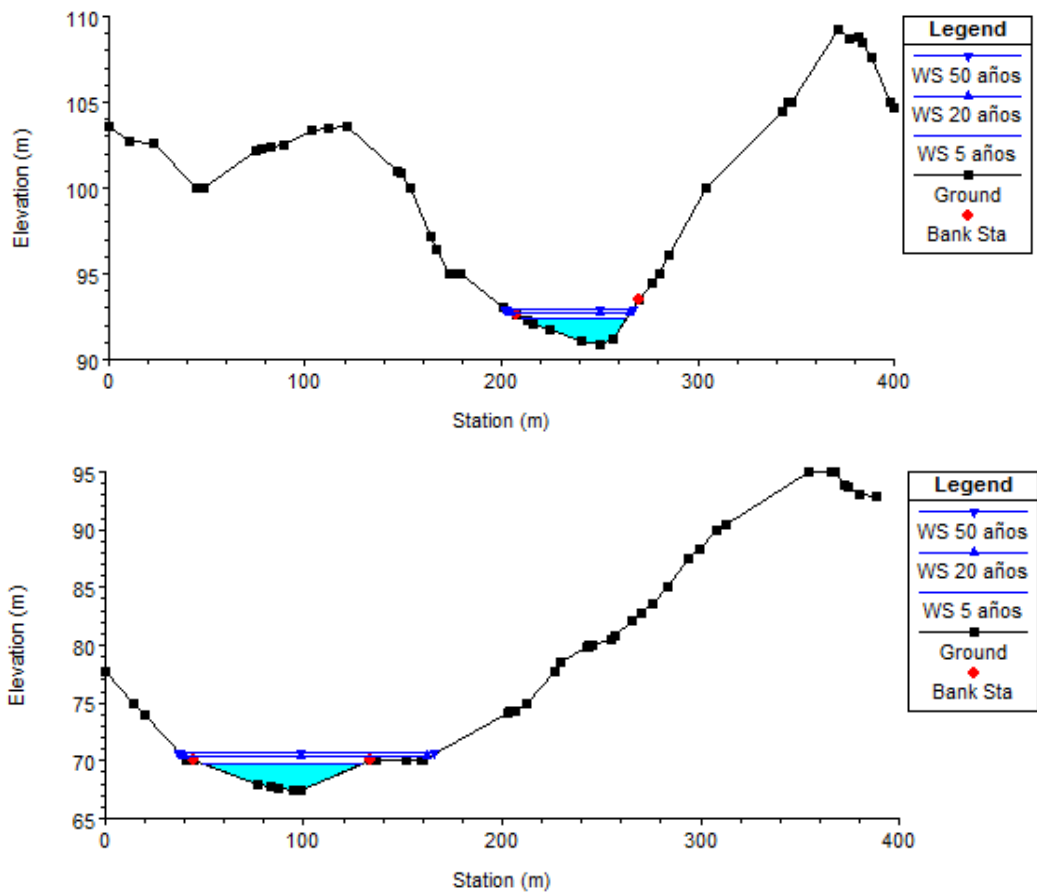


Figura 58. Láminas de agua obtenidas en algunas de las secciones modeladas

La modelación muestra que las mayores láminas de agua se encuentran alrededor de los 8 m de profundidad con respecto al lecho del río. Las velocidades máximas del flujo se encuentran entre 4 y 5 m/s, lo cual podría eventualmente, socavar las márgenes y el lecho del río modificando su alineamiento.

Los mapas de inundación ofrecen información de las áreas que resultan afectadas ante un evento de esta naturaleza (Figura 59), lo cual se muestra en la Tabla 31.

Tabla 31. Área inundable para diferentes periodos de retorno.

TR	Area (Km ²)	Area (Ha)	Descripción zona inundable
5	0.97	97.1	Pequeñas Llanuras de inundación del río Piedras en su parte baja, en su mayoría ocupadas por árboles y algunas viviendas aisladas con áreas de cultivo. En general no se sufren grandes afectaciones ya que en la zona
20	1.14	114.5	
50	1.29	129.7	

			no existen grandes centros poblados ni ecosistemas susceptibles.
--	--	--	--

A continuación, se presentan los mapas de inundación obtenidos para los periodos de retorno seleccionados, junto con los respectivos resultados numéricos de la modelación.





Figura 59. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Piedras, para periodos de retorno de 5,20 y 50 años.

RÍO MANZANARES

Generalidades y Morfométrica

La cuenca del río Manzanares se encuentra ubicada en la vertiente noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, aproximadamente entre las coordenadas: 11°08'N y 11°16'N de latitud, y 74°13'W y 74°02'W de longitud. El río nace en la cuchilla de San Lorenzo, a una altura aproximada de 2000 msnm y desemboca en el mar Caribe en la playa conocida como Los Cocos junto a la bahía de Santa Marta. Al este limita con la cuenca hidrográfica del río Piedras, al oeste con el Mar Caribe, al norte con el Parque Tayrona y al sur con la cuenca hidrográfica del río Gaira (Figura 60).



Figura 60. Localización de la cuenca del río Manzanares

La cuenca cuenta con aproximadamente 18.472 hectáreas. La longitud del río Manzanares es de 34.22 kilómetros y presenta un caudal promedio anual de 2.7 m³/s (CORPAMAG, 2005).

Según el estudio de Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas del IDEAM, la codificación para la cuenca del río Manzanares es:

Área *Caribe* Zona *Caribe-Guajira* Subzona *Piedras-Manzanares y otros directos Caribe* Nivel I *Manzanares*
 1 5 01 02

En la Tabla 32 se presentan los parámetros morfométricos más importantes de la cuenca del río Manzanares.

Tabla 32. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Manzanares.

Parámetro	Valor
Área (km ²)	184.72
Perímetro (km)	73.87
Cota mayor cuenca (msnm)	2440
Cota menor cuenca (msnm)	0
Cota mayor cauce principal (msnm)	2000
Cota menor cauce principal (msnm)	0
Longitud del cauce principal (km)	34.22
Pendiente del cauce principal (m/m)	0.06
Pendiente media de la cuenca (%)	25.77
Altura media cuenca (msnm)	325.34
Índice de Gravelius (Kc)	1.52
Factor de forma de Horton (Hf)	0.15
Densidad de drenaje (Dd) (Km/Km ²)	1.85

La curva hipsométrica de la cuenca del río Manzanares hace referencia a una cuenca de tipo sedimentario que ya ha pasado por un proceso importante de erosión y por lo tanto se encuentra en una etapa de vejez. En la parte alta de la cuenca se tiene un relieve muy pronunciado, mientras que es su parte baja domina la topografía plana generando llanuras de inundación a lado y lado del río Manzanares (Figura 61).

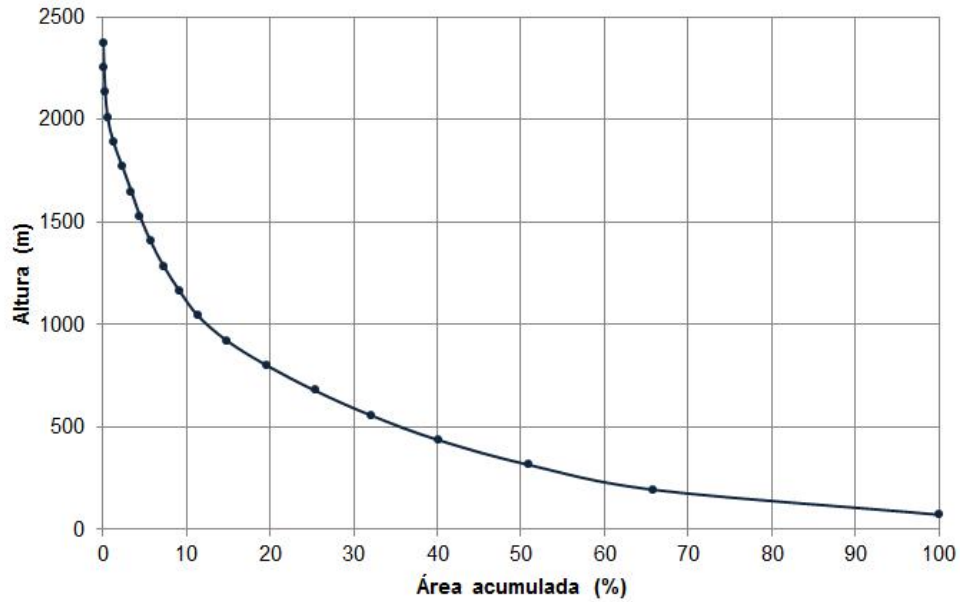


Figura 61. Curva hipsométrica de la cuenca del río Manzanares

La red de drenaje se obtuvo directamente del DEM, comparando los resultados con la cartografía oficial. Con la escala trabajada se alcanzaron hasta 5 órdenes de corriente en la cuenca según la clasificación de Strahler, tal como se muestra en la Figura 62.

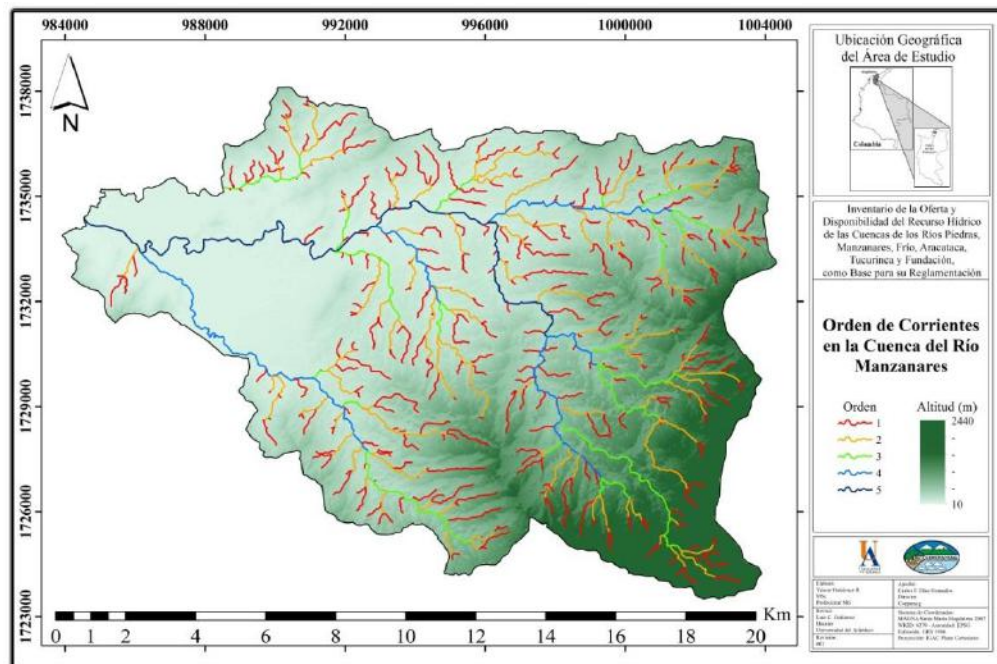


Figura 62. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Manzanares.

El análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Manzanares, se resume en la Tabla 33.

Tabla 33. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Manzanares.

Orden	Cantidad de corrientes	Longitud total (Km)	Frecuencia (%)	Relación de bifurcación	Relación de longitud
1	626	158.65	46	1.78	0.64
2	351	101.75	30	3.00	0.40
3	117	40.59	12	1.13	0.72
4	104	29.35	9	2.67	0.43
5	39	12.74	4		
TOTAL / MEDIA	1237	343	100	2.14	0.55

Teniendo en cuenta los parámetros morfométricos y la red de drenaje de la cuenca del río Manzanares, se concluye que es una cuenca pequeña con características de montaña, con tendencia de forma circular, lo que favorece la concentración de volúmenes de agua considerables en su interior, Tiene una muy buena red de drenaje, lo que favorece las crecientes súbitas debido al rápido drenaje de las aguas lluvias.

Características climáticas

La precipitación media sobre la cuenca del río Manzanares varía entre 985 mm/año en la cuenca baja y 2645 mm/año en la cuenca alta. La temperatura media anual esta entre los 14°C en la parte más alta de la cuenca donde nace el río y los 28°C en la parte baja, haciendo la transición a medida que se desciende hacia el mar. Los valores de evaporación se encuentran entre 588 y 1787 mm/año, mientras que la humedad relativa varía entre 76% y 92%. Como se observa, el comportamiento de cada una de las variables está estrechamente relacionado con el relieve de la cuenca, ya que las condiciones en la parte alta son completamente diferentes a las establecidas en la cuenca baja, lo cual obedece al comportamiento del clima según la teoría de pisos térmicos que se presenta sobre todo en regiones tropicales donde la influencia del relieve es determinante. En la Figura 63-64 se presentan los mapas con valores promedio anual de cada una de las variables analizadas.

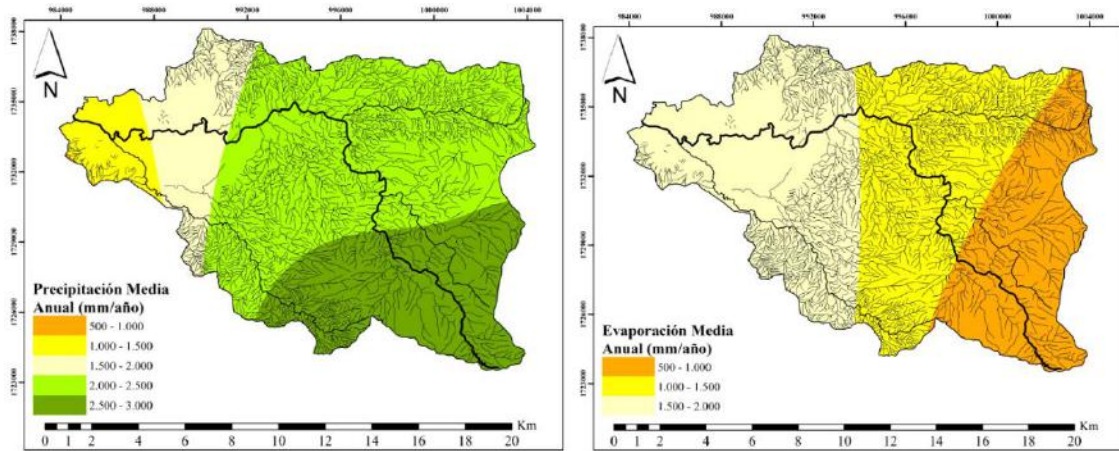


Figura 63. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del río Manzanares.

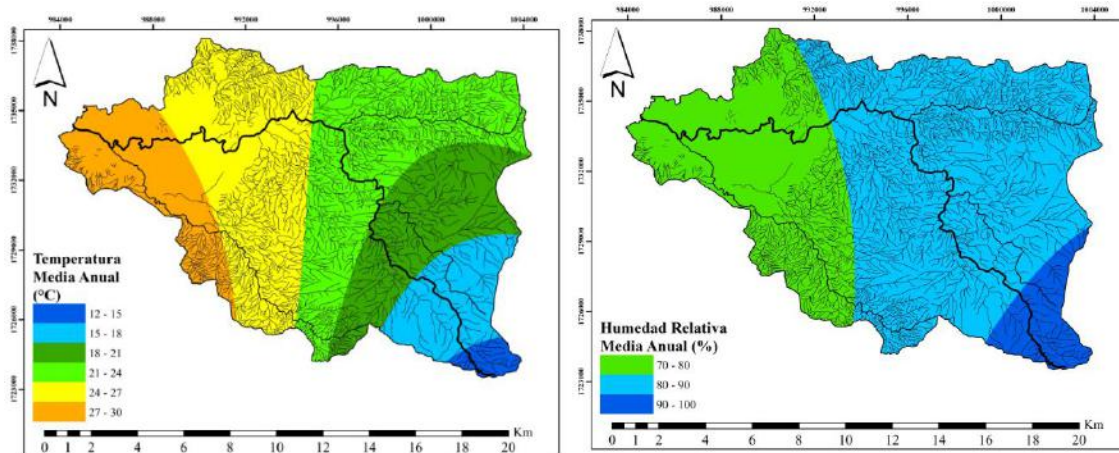


Figura 64. Valores medios anuales de Temperatura media y humedad relativa para la cuenca del río Manzanares

Selección del Tramo del Río a Modelar

A partir del perfil longitudinal del río, se identificó el punto de cambio de pendientes que marca la transición entre la cuenca media y la cuenca baja. Para ello se trazaron dos rectas paralelas al perfil longitudinal del río, una en la parte baja y otra en la parte media, el punto de intersección entre las dos rectas marca el fin de la cuenca media y el inicio de la cuenca baja, tal como se muestra en la Figura 65. El tramo obtenido aguas abajo del punto A, que se ubica en la cota 90 msnm, tiene una longitud aproximada de 15 Km y una pendiente promedio de 0.005 m/m.

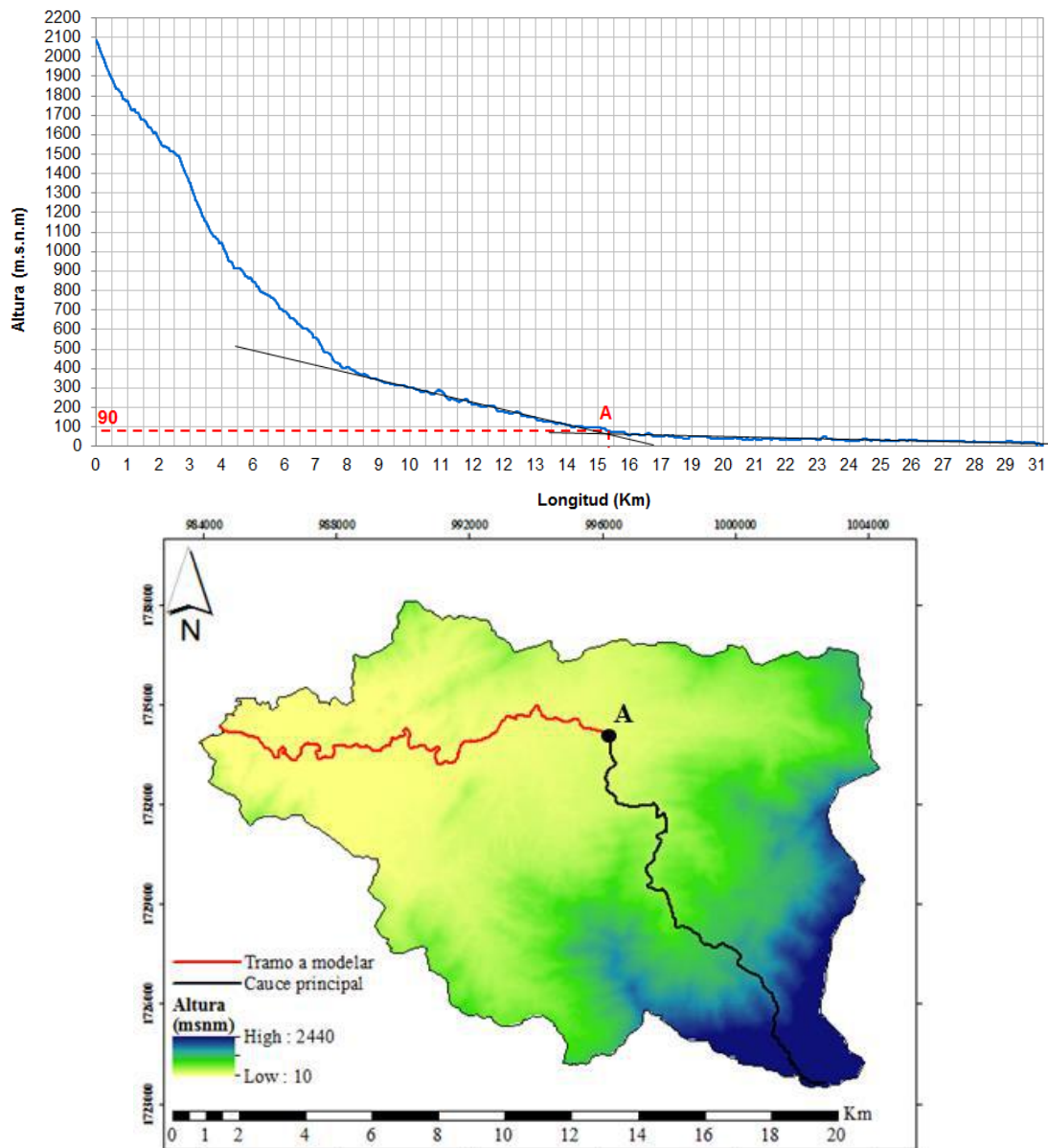


Figura 65. Selección del tramo del río Piedras para modelación hidráulica

Hidrología

A partir de la información hidrológica suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), se localizaron las estaciones de precipitación y caudal más cercanas a la zona de estudio.

Como se observa en la Figura 66, la cuenca del río Manzanares no cuenta con estaciones de caudal, por lo tanto se hace necesario trabajar con un modelo lluvia-escorrentía para predecir

caudales máximos en diferentes periodos de retorno. Sin embargo tampoco se cuenta con una estación pluviométrica dentro de la cuenca, por lo que se deben usar las estaciones más cercanas, que en este caso es la estación de precipitación MINCA.

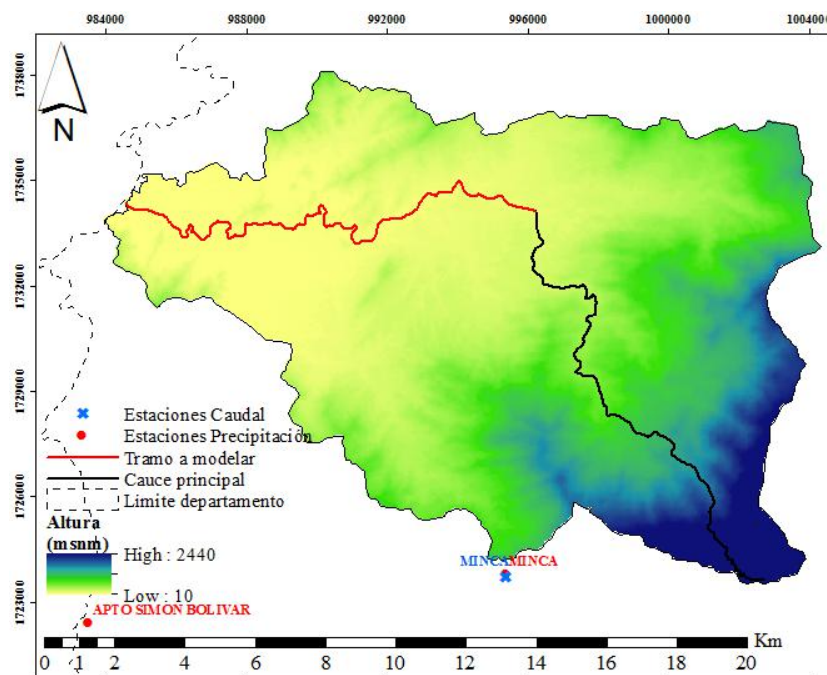


Figura 66. Localización de las estaciones hidrológicas disponibles en la zona de estudio

La estación pluviométrica MINCA se ubica en la cuenca alta, con coordenadas $11^{\circ}8'27''N$ y $74^{\circ}7'12''W$, cuenta con información histórica de precipitación a resolución diaria para 45 años de registro empezando en enero de 1969 y terminando en mayo de 2014. La estación se encuentra ubicada en la cuenca media-alta del río Gaira, exactamente en las coordenadas: 11.140° de Latitud Norte, 74.12° de Longitud Oeste y a una cota de 640 msnm, junto a la cuchilla que divide las cuencas de los ríos Gaira y Manzanares.

Como primera medida se presenta una descripción general de la información de la precipitación máxima en 24 horas (Tabla 34), la cual será útil para determinar los caudales pico como insumo del modelo hidráulico. Adicionalmente se muestra la gráfica histórica de la serie en la Figura 67.

Tabla 34. Descripción de la serie de precipitación máxima en 24 horas de la estación MINCA.

Estación	Variable	Año inicial	Año Final	Long. Registro (años)	Datos Faltantes (%)	Promedio anual
MINCA	Precipitación max 24 h	1969	2013	45	0.04 (2 años)	93.07 mm

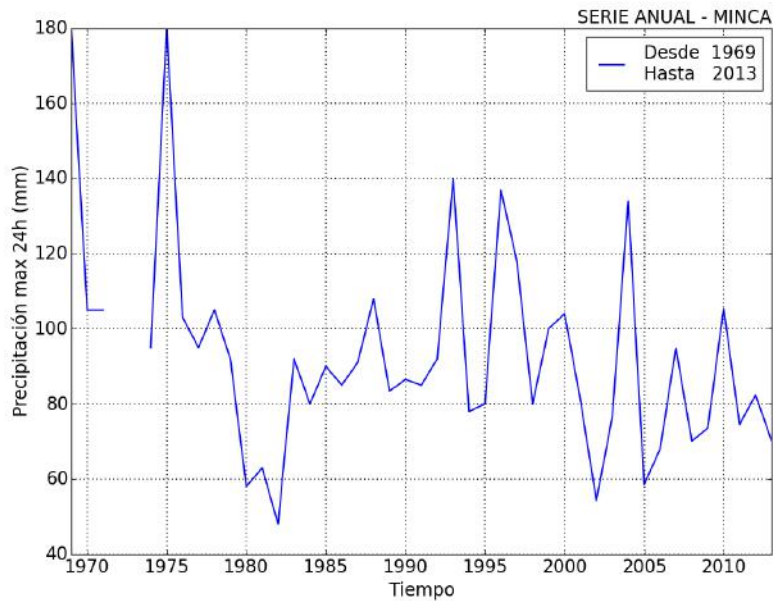


Figura 67. Serie anual de precipitación máxima en 24 horas para la estación MINCA.

Análisis de calidad de la serie

Es importante verificar la calidad de la serie para tener confianza en los resultados, lo cual se logra a través un análisis exploratorio de datos. Lo primero es verificar si existen valores atípicos u “outliers”, que son datos que se salen del rango normal de valores de la serie, de existir estos valores, se debe verificar si efectivamente son reales o si por el contrario obedecen a errores en la toma del dato. Posteriormente se verifica la calidad con la curva de masa simple, la cual es el resultado de la suma acumulada de la variable analizada en todo el periodo de registro. Para que la información consignada en los registros sea consistente es necesario que la curva tenga una pendiente constante y creciente a lo largo del tiempo. Cabe anotar que la ausencia de datos en una serie no representa falta de consistencia.

Para la identificación de valores atípicos se usó el diagrama de caja o “box plot” el cual se basa en los cuartiles y permite observar gráficamente el conjunto de datos de la serie. Este grafico suministra información sobre los valores mínimo y máximo, los cuartiles Q1, Q2 o mediana y Q3, y sobre la existencia de valores atípicos y la simetría de la distribución (Figura 68)

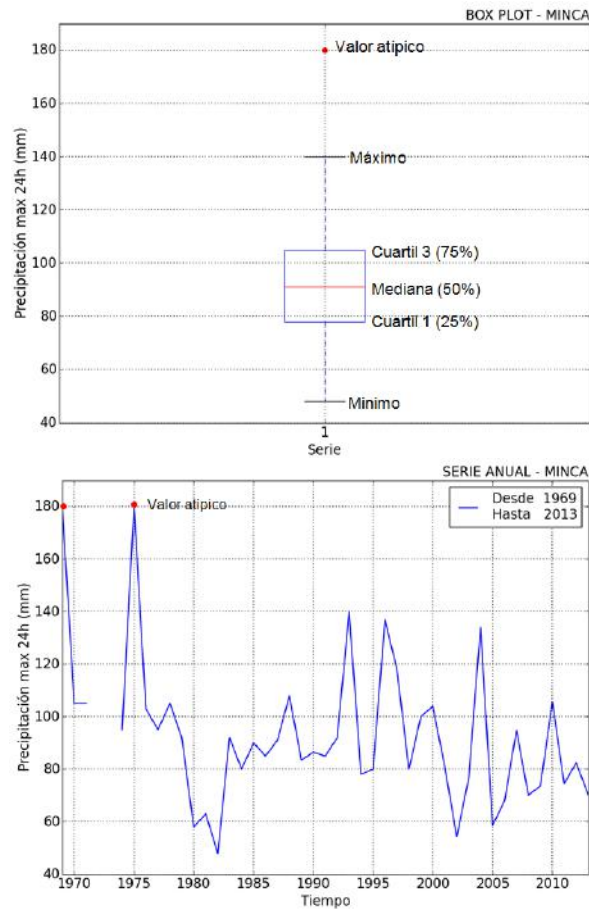


Figura 68. Identificación de outliers o valores atípicos en la serie de precipitación máxima en 24 horas.

Como se observa en las gráficas anteriores, se identificaron dos valores atípicos en la serie con una magnitud de 180 mm para los años 1969 y 1975.

El siguiente paso es verificar si los valores atípicos encontrados en la serie de precipitación, obedecen a valores reales o a errores en la toma de los datos. Para ello se compara la serie con los años donde se presentó un evento “La Niña”, ya que como se sabe, en Colombia “La Niña” provoca lluvias más intensas y frecuentes. Para verificar los años donde sucedió un fenómeno de La Niña, se usa el índice ONI, el cual da una medida de la temperatura superficial del Océano Pacífico en la Región Niño 3.4. (Figura 69).

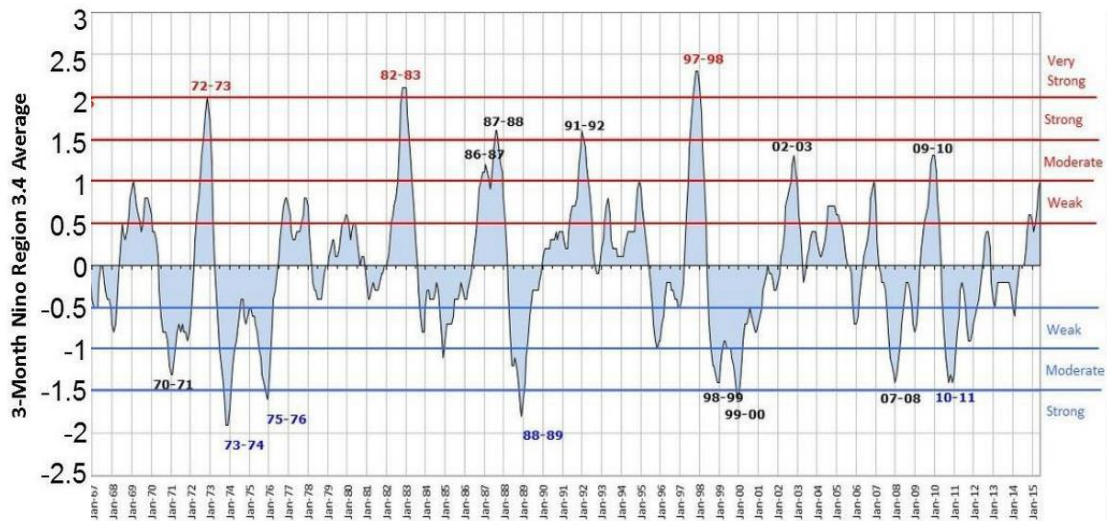


Figura 69. Valores históricos del Índice ONI

En la Figura anterior se muestran los valores históricos del índice ONI. Los valores se obtienen del promedio trimestral de las anomalías de temperatura superficial del mar en la región Niño 3.4. Cuando el valor del ONI se mantiene por encima de $+0.5^{\circ}\text{C}$ en por lo menos 5 meses se considera la ocurrencia de Un Niño, mientras que si está por debajo de -0.5°C se considera la ocurrencia de Una Niña, en otro caso se considera un comportamiento normal.

En la Figura 5 se ve que en la temporada 1970-1971 y 1975-1976 ocurrieron dos fenómenos La Niña, siendo el segundo el de mayor intensidad. Lo anterior quiere decir que los valores identificados como atípicos corresponden a valores reales y por lo tanto se mantienen para el estudio hidrológico.

Posteriormente se procede a calcular la curva de masa simple para la serie de precipitación, lo cual se observa en la Figura 70.

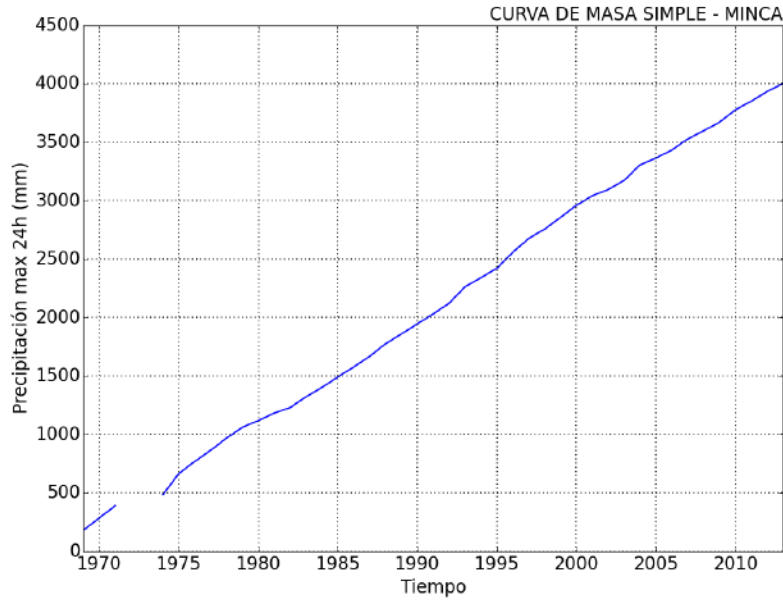


Figura 70. Curvas de Masa Simple para precipitación máxima en 24 horas de la estación MINCA.

Como se observa en la Figura , la curva de masa simple para la serie de precipitación tiene una pendiente constante y siempre ascendente, por lo tanto se considera que la serie tiene muy buena calidad.

Tiempo de concentración

Uno de los parámetros más importantes de la cuenca es el tiempo de concentración (T_c), el cual se define como el tiempo que tarda una gota de agua en recorrer la cuenca desde el punto más alejado hasta la salida. Existen diferentes fórmulas para el cálculo de T_c , algunas de ellas se presentan en la Tabla 35.

Tabla 25. Tiempo de concentración según diferentes metodologías

Témez	Kirpich	California Culvert Practice	Pérez
$T_c = 0,3 \cdot \left[\frac{L}{S^{0,25}} \right]^{0,76}$	$t_c = 0.0078 \cdot L_p^{0,77} \cdot S^{-0,385}$	$t_c = 60 \cdot \left[\frac{0,87075 \cdot L^3}{H} \right]^{0,385}$	$T_c = \frac{L}{72 \cdot \left(\frac{H}{L} \right)^{0,6}}$

Donde T_c es el tiempo de concentración en horas, t_c es el tiempo de concentración en minutos, L es la longitud del cauce principal en Km, L_p es la longitud del cauce principal en pies, S es la pendiente del cauce principal en m/m y H es la diferencia de cotas en metros entre la divisoria y la salida.

Usando los parámetros morfométricos de la cuenca del río Manzanares, se obtuvo el tiempo de concentración para la cuenca por diferentes metodologías de cálculo, cuyos resultados se presentan en la Tabla 36.

Tabla 36. Tiempo de concentración para la cuenca del río Manzanares.

Método	Tc (min)
Kirpich	178.32
Témez	187.71
Giandiotti	174.93
California Culvers Practice	167.09
Pérez	139.07
PROMEDIO	169.42

El valor promedio del tiempo de concentración será igual a la duración de la lluvia de diseño, parámetro base para la obtención de caudales.

Curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF)

Las curvas de Intensidad-Duración-Frecuencia (IDF) son necesarias para conocer la intensidad de la lluvia de diseño para diferentes periodos de retorno. Para la estimación de eventos hidrológicos de determinada magnitud en una cuenca, se asume que la ocurrencia del caudal de diseño tiene una frecuencia igual a la de la tormenta de diseño. Para la duración de la lluvia de diseño y un período de retorno dado es posible asociar un valor para la intensidad de la precipitación en una estación, gracias a las curvas IDF.

El período de retorno corresponde al nivel de riesgo asociado a un evento hidrológico y que es asimilado en función de la probabilidad de ocurrencia de tal evento que puede generar pérdida de vidas humanas, daños materiales, entre otros aspectos.

Las Curvas IDF de la estación MINCA, se obtuvieron por método simplificado referenciado en el manual de drenaje del INVIAS, a partir de registros de precipitación máxima anual en 24 horas de la estación MINCA. Los valores de intensidad se calculan a partir de la siguiente expresión:

$$i = \frac{a \times T^b \times M^d}{(t/60)^c}$$

Donde *i* es la Intensidad de la precipitación en milímetros por hora (mm/h), *T* es el periodo de retorno en años, *M* es la Precipitación máxima promedio anual multianual en 24 horas en milímetros (mm), *t* es Duración de la lluvia en minutos (min) y *a,b,c,d* son parámetros de ajuste según la región donde se encuentra la estación, tal como lo muestra en la Tabla 37.

Tabla 37. Valores de los coeficientes a,b,c y d para el cálculo de las curvas IDF.

REGIÓN	a	b	c	d
Andina (R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe (R2)	24.85	0.22	0.50	0.10
Pacífico (R3)	13.92	0.19	0.58	0.20
Orinoquía (R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Fuente. Manual de drenaje de carreteras, INVIAS.

Según la tabla anterior, para la región Caribe corresponden los siguientes valores:

$$a = 24.85, \quad b = 0.22, \quad c = 0.50, \quad d = 0.10$$

Las curvas IDF resultantes, se muestran en la Figura 71.

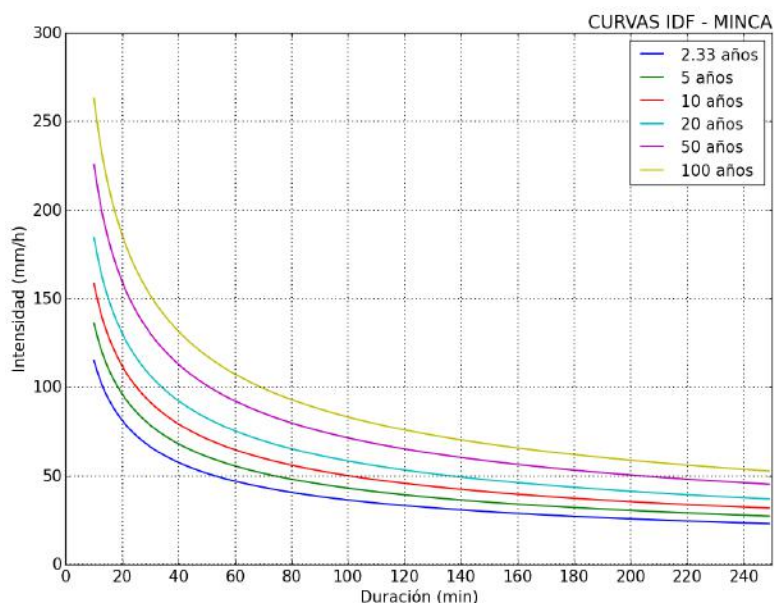


Figura 71. Curvas IDF para la estación MINCA

Tormentas de diseño – Histogramas de precipitación

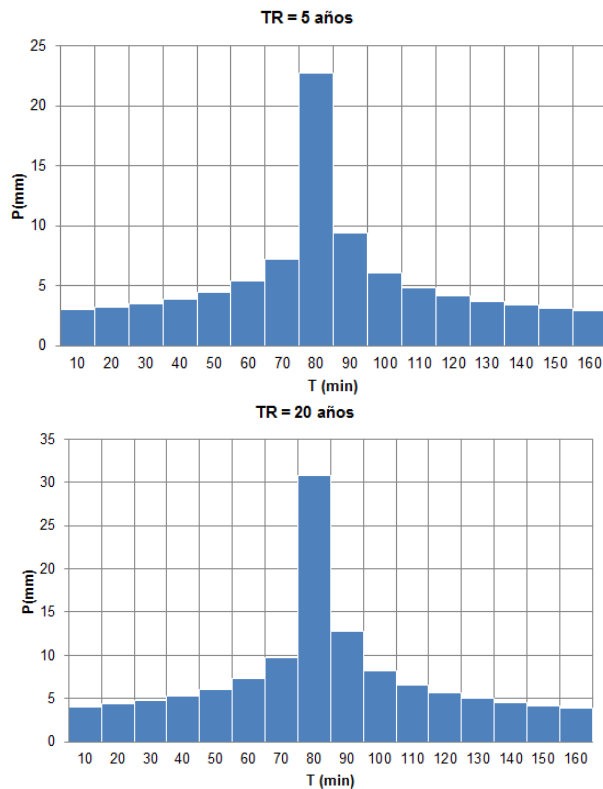
En este punto se pretende conocer los histogramas de precipitación o tormentas de diseño para cada uno de los periodos de retorno requeridos, es decir para 5, 20 y 50 años. Lo anterior se logra a partir de las Curvas IDF y el Tiempo de Concentración tal como se muestra a continuación.

Para la elaboración de los histogramas se usará la metodología de los bloques alternos (Chow et al. 1994), donde se escoge la curva IDF correspondiente al periodo de retorno deseado,

encontrando las intensidades de lluvia según la duración de tormenta (T_c) y el intervalo deseado.

Para nuestro caso, se tiene una duración de tormenta igual al tiempo de concentración, es decir 159.50 min (2.66 horas), lo cual se aproximará a 2.7 horas (160 min) para facilitar los cálculos. Para escoger el intervalo de tiempo (ΔT en el hietograma), se debe tener en cuenta que la longitud del intervalo sea un número entero, por lo tanto si la duración de tormenta son 160 min, dividimos esa duración en 16 intervalos de 10 minutos cada uno.

Una vez definido el intervalo (ΔT), se obtienen las intensidades para cada intervalo de tiempo y para cada periodo de retorno con ayuda de las curvas IDF. Posteriormente se calculan los valores de precipitación para cada hietograma, lo cual se muestra en la Figura 72.



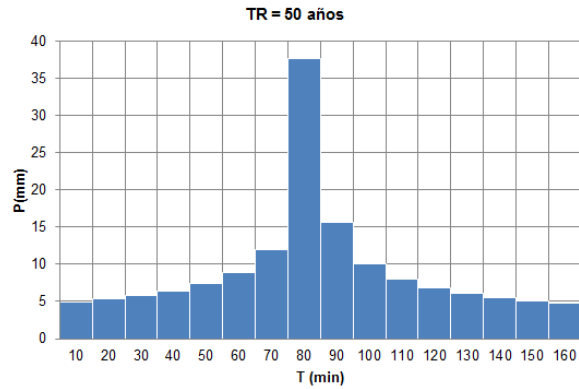


Figura 72. Hietogramas de tormenta para diferentes periodos de retorno.

Precipitación efectiva – Numero de Curva (CN)

Para la estimación de los caudales máximos, es necesario obtener la precipitación efectiva, la cual produce la escorrentía superficial directa, es decir sin considerar la infiltración y la retención superficial. Para su cálculo existen varios métodos como el del índice Φ o el método del Soil Conservation Service (S.C.S.). Para este caso se utilizó el método del S.C.S. por ser el más utilizado y de fácil aplicación, el cual se denomina Número de Curva (CN).

La metodología del Soil Conservation Service (SCS) permite determinar las pérdidas hidrológicas en la cuenca de estudio mediante la asignación de un coeficiente (previamente calibrado) según el tipo de suelo y el uso del mismo (Chow et al. 1994). Para la determinación del coeficiente (CN) se realizó un análisis de la cuenca según las áreas y los usos del suelo o coberturas, asignando un valor de CN a cada tipo de cobertura y ponderando el valor por áreas para obtener un único valor de CN, (Tabla 38).

Tabla 38. CN de escorrentía con condiciones de humedad antecedente AMC II.

Descripción del uso de la tierra	Grupo hidrológico del suelo			
	A	B	C	D
Tierra cultivada ¹ : sin tratamientos de conservación	72	81	88	91
con tratamientos de conservación	62	71	78	81
Pastizales: condiciones pobres	68	79	86	89
condiciones óptimas	39	61	74	80
Vegas de ríos: condiciones óptimas	30	58	71	78
Bosques: troncos delgados, cubierta pobre, sin hierbas,	45	66	77	83
cubierta buena ²	25	55	70	77
Áreas abiertas, césped, parques, campos de golf, cementerios, etc. óptimas condiciones: cubierta de pasto en el 75% o más	39	61	74	80
	condiciones aceptables: cubierta de pasto en el 50 al 75%	49	69	79
Áreas comerciales de negocios (85% impermeables)	89	92	94	95
Districtos industriales (72% impermeables)	81	88	91	93
Residencial ³ :				
Tamaño promedio del lote Porcentaje promedio impermeable ⁴				
1/8 acre o menos 65	77	85	90	92
1/4 acre 38	61	75	83	87
1/3 acre 30	57	72	81	86
1/2 acre 25	54	70	80	85
1 acre 20	51	68	79	84
Parqueaderos pavimentados, techos, accesos, etc. ⁵	98	98	98	98
Calles y carreteras:				
Pavimentados con cunetas y alcantarillados ⁵	98	98	98	98
grava	76	85	89	91
tierra	72	82	87	89

Fuente. Chow et al. (1994).

El procesamiento de la información se realizó en ArcGIS a partir del mapa de coberturas de la cuenca, asignando a cada tipo de suelo un valor de número de curva según la Tabla 38 y ponderando para obtener un valor final de CN. Los resultados se muestran en la Tabla 39.

Tabla 39. Número de Curva y área impermeable para la cuenca del río Manzanares.

SUMA CN*ÁREA (m2)	12169790848	ÁREA URBANO (m2)	17834161
ÁREA TOTAL (m2)	184692038	ÁREA TOTAL (m2)	184692038
CN PONDERADO	66	ÁREA IMPERMEABLE (%)	9.7

Modelo hidrológico – Caudales pico

Una vez se tienen los parámetros de la cuenca, el tiempo de concentración, las tormentas de diseño para cada periodo de retorno y el CN ponderado, se desarrolla un modelo hidrológico

en el programa HEC-HMS³, el cual utiliza un modelo de lluvia escurrentía a partir de hidrogramas unitarios para estimar caudales pico con la respectiva hidrógrafa de respuesta de la precipitación efectiva. A manera de ejemplo, en la Figura 73 se presentan los resultados obtenidos para un periodo de retorno de 50 años.

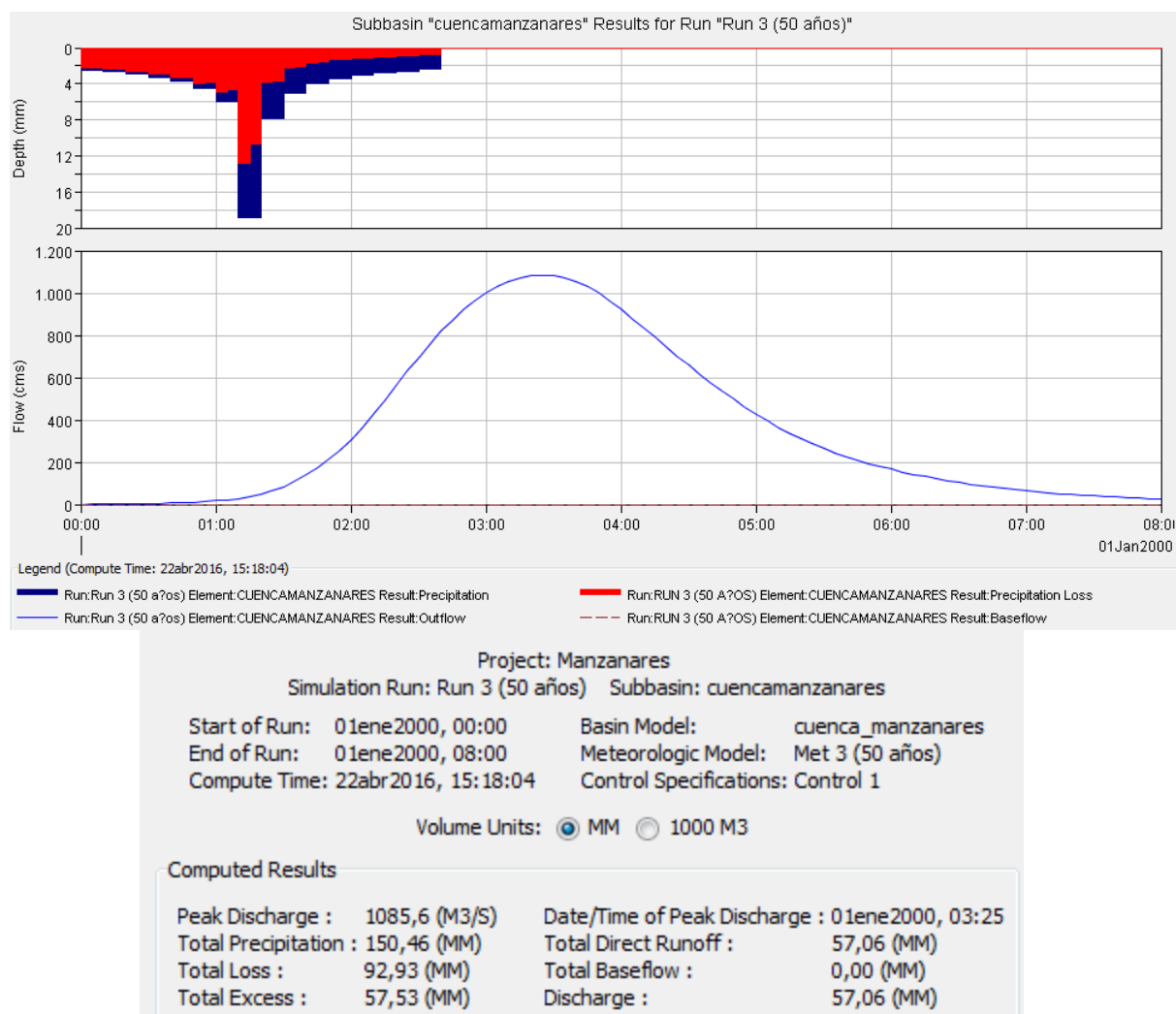


Figura 73. Resultados del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 50 años.

Como se observa en la Figura anterior, a partir del hietograma de precipitación (parte superior de la Figura) se obtiene la hidrógrafa de respuesta de la precipitación efectiva en la cuenca.

Los caudales estimados para cada periodo de retorno se muestran en la Tabla 40.

Tabla 40. Caudales obtenidos para diferentes periodos de retorno en el rio Manzanares.

³ Software libre de modelamiento hidrológico desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos

TR	Q pico (m ³ /s)
5	401.0
20	744.6
50	1085.6

Los caudales obtenidos serán uno de los insumos de entrada para la modelación hidráulica, la cual se explica en el siguiente capítulo.

Modelación hidráulica

Para la modelación hidráulica se utilizó el software hidráulico HEC-RAS, y un software de tipo SIG.

Cabe aclarar que en la modelación hidráulica se trabajó con flujo permanente y uniforme en todo el tramo analizado, es decir que se usó el mismo caudal para todas las secciones transversales. Las condiciones de borde establecidas fueron profundidad normal aguas abajo y régimen de flujo subcrítico.

Topografía

Para el desarrollo del modelo hidráulico se realizó una topografía detallada en la parte baja del río, con curvas de nivel cada 50 cm, tal como se muestra en la Figura 74.

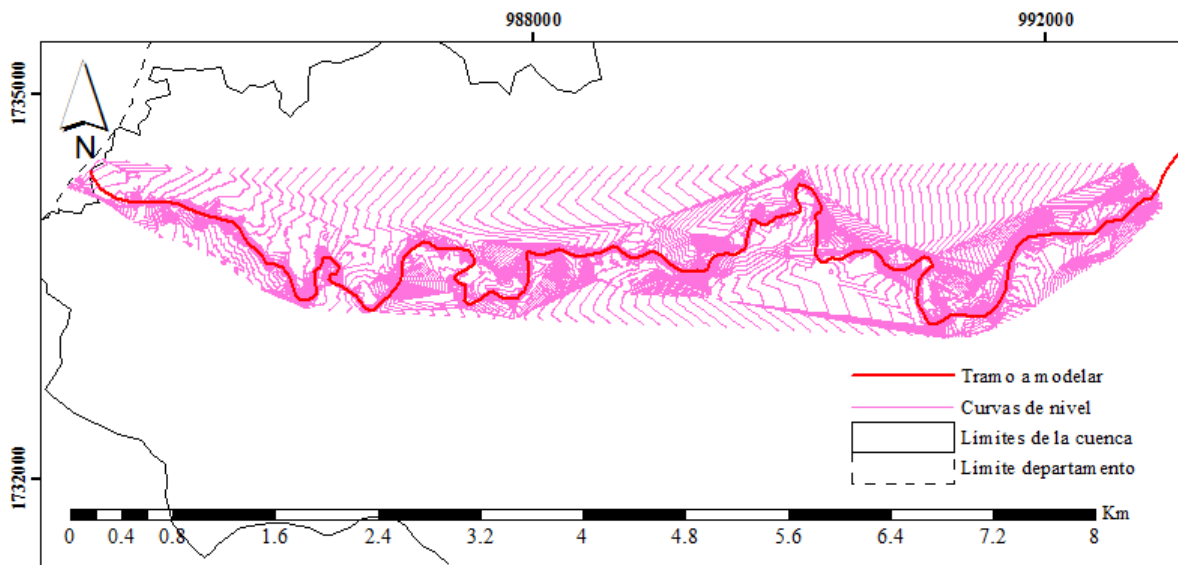


Figura 74. Topografía levantada en la parte baja del río Manzanares.

A partir de la topografía se generaron secciones transversales cada 100 metros aproximadamente, de 200 metros y hasta de 600 metros de ancho con el fin de generar la geometría del modelo hidráulico, tal como se muestra en la Figura 75.

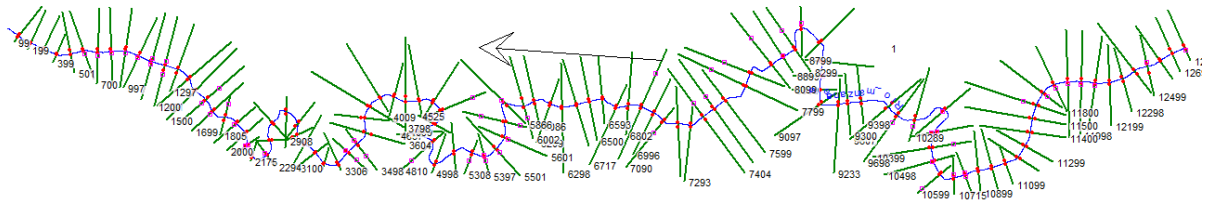


Figura 75. Geometría del río Manzanares para el modelo hidráulico en HEC-RAS

Aforo líquido y calibración del modelo

Con el objetivo de calibrar el modelo hidráulico y tener una idea del caudal que fluye por el río en época de verano, se realizó una visita de campo a la cuenca del río Manzanares, donde se realizó un aforo líquido en diferentes secciones a lo largo del cauce. La Figura 76 muestra los puntos donde se realizaron los aforos de caudal en la corriente modelada.

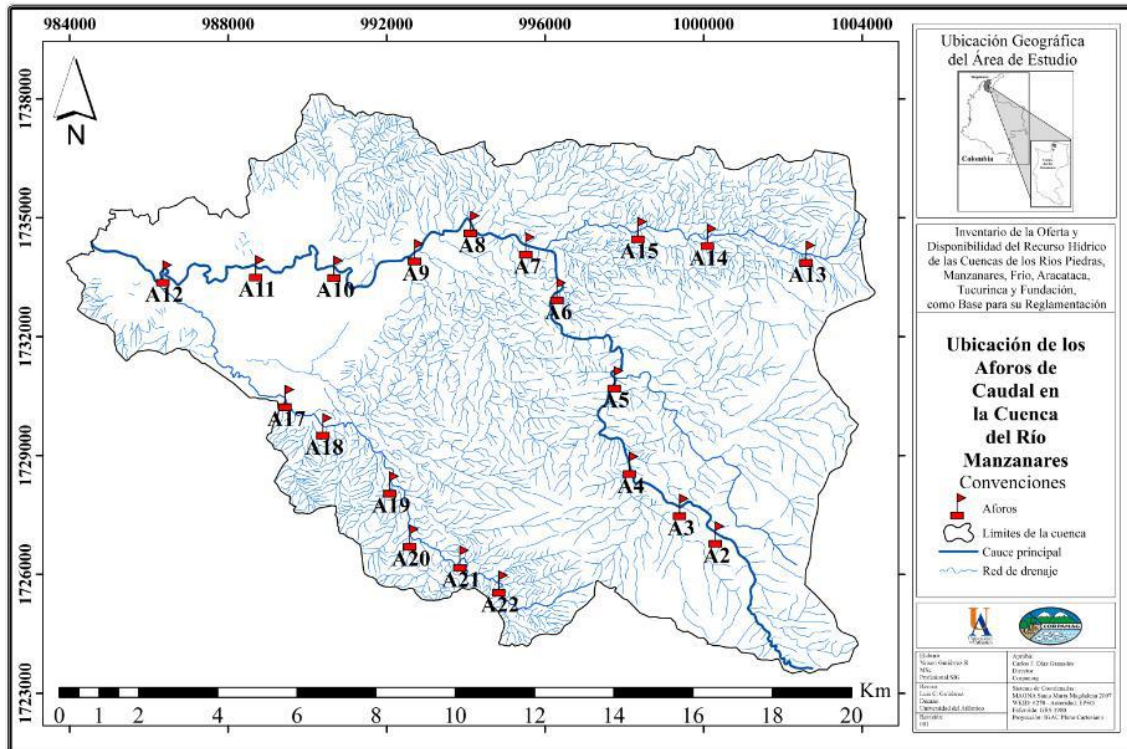


Figura 76. Localización de los puntos donde se tomaron aforos líquidos

A continuación, se presentan los resultados del aforo en el río Manzanares en la Tabla 41.

Tabla 41. Resultados obtenidos del aforo liquido en la cuenca del río Manzanares

Sección	Ancho lamina agua (m)	Profundidad media (m)	Área Mojada (m ²)	Vel media (m/s)	Caudal (m ³ /s)
12	2.59	0.13	0.33	0.16	0.05
11	6.90	0.08	0.55	0.46	0.26
10	4.70	0.16	0.7	0.13	0.09
9	4.20	0.21	0.87	0.13	0.11
8	4.42	0.14	0.62	0.19	0.12
7	2.83	0.13	0.34	0.44	0.15
6	7.10	0.22	1.6	0.46	0.73
5	13.18	0.3	3.9	0.33	1.30
4	6.72	0.18	1.2	0.28	0.34
3	6.10	0.19	1.21	0.22	0.26
2	4.90	0.14	0.62	0.28	0.17

La calibración del modelo consiste en determinar la rugosidad promedio del río, tanto en el lecho como en las bancas y llanuras de inundación, basados en las recomendaciones hechas en la literatura y en los aforos realizados. A partir de los aforos realizados se verifica que los caudales estimados correspondan con las velocidades medidas en campo. Los coeficientes de rugosidad de Manning obtenidos, se muestran en la Tabla 42, los cuales coinciden con los recomendados en la literatura.

Tabla 42. Rugosidad estimada del río Manzanares

Sitio	Rugosidad (n-Manning)
Lecho	0.04 (Lecho arenoso con gravas y rocas)
Banca y llanura derecha	0.06 (Arboles y matorrales)
Banca y llanura izquierda	0.06 (Arboles y matorrales)

Resultados

Como resultado de la modelación hidráulica, se obtuvieron láminas de agua para diferentes periodos de retorno en cada una de las secciones analizadas. Posteriormente y con ayuda del software tipo SIG, estas láminas de agua fueron transformadas a manchas de inundación en mapas. La Figura 77-78 muestra un ejemplo de la mancha de inundación en todo el tramo analizado y láminas de agua para 5, 20 y 50 años en dos de las secciones analizadas.

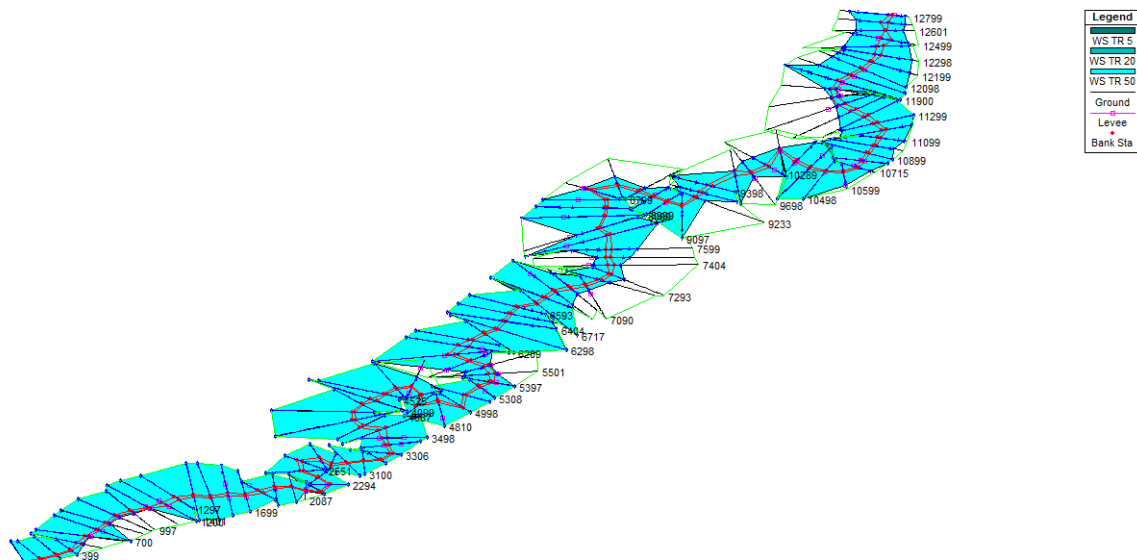


Figura 77. Manchas de inundación obtenidas en HEC-RAS para el río Manzanares.

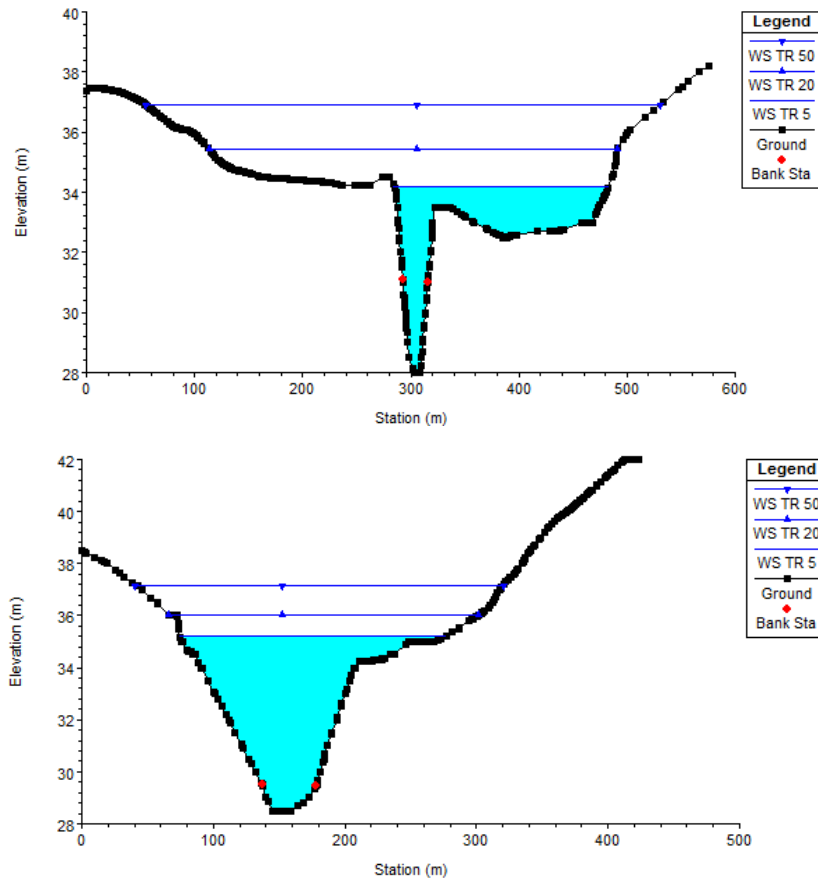


Figura 78. Láminas de agua obtenidas en algunas de las secciones modeladas del río Manzanares.

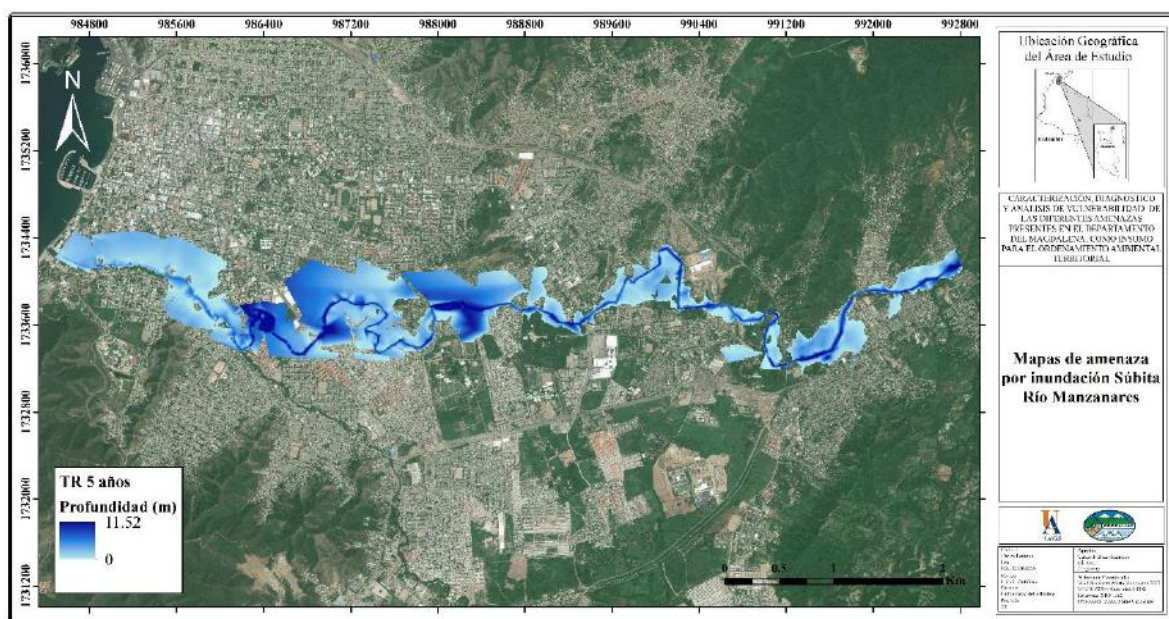
Según los resultados del modelo, se obtuvieron láminas de agua de hasta 12 m de profundidad con respecto al lecho del río y más de 600 metros de ancho para un periodo de retorno de 50 años. Las velocidades máximas del flujo están cercanas a los 6 m/s en algunas secciones, lo cual podría, eventualmente, socavar las márgenes y el lecho del río modificando su alineamiento, y afectar de una manera más directa, los barrios y urbanizaciones que se encuentran en su ronda hidráulica.

A partir de los mapas de inundación es posible obtener las zonas que son afectadas con sus respectivas áreas, lo cual se resume en la Tabla 43.

Tabla 43. Zonas y Área inundable en la cuenca baja del río Manzanares para diferentes periodos de retorno.

TR	Area (Km ²)	Area (Ha)	Descripción zona inundable
5	3.13	313.4	Los mapas de inundación muestran una gran afectación a la zona urbana cercana al río Manzanares para los tres periodos de retorno escogidos. En general todos los barrios asentados en la ronda hidráulica del río (hasta 500 m de cada lado) sufren graves consecuencias de inundación, sin embargo los más afectados son: Riomar, Santa Cecilia, La Teneria, El Prado, Los Ángeles, La esperanza, Minuto de Dios, Villa del Carmen, Santa Catalina, Los Naranjos, Porvenir, Los Cerros, Pereguetano, Simon Bolivar, Las Malvinas, Villa del río, El Bosque, Bolivar del río, La esmeralda, Cantilito, Colinas del río, entre otros.
20	4.11	410.87	
50	4.66	465.98	

A continuación, en la figura 79, se presentan los mapas de inundación obtenidos para los periodos de retorno seleccionados, junto con los respectivos resultados numéricos de la modelación.



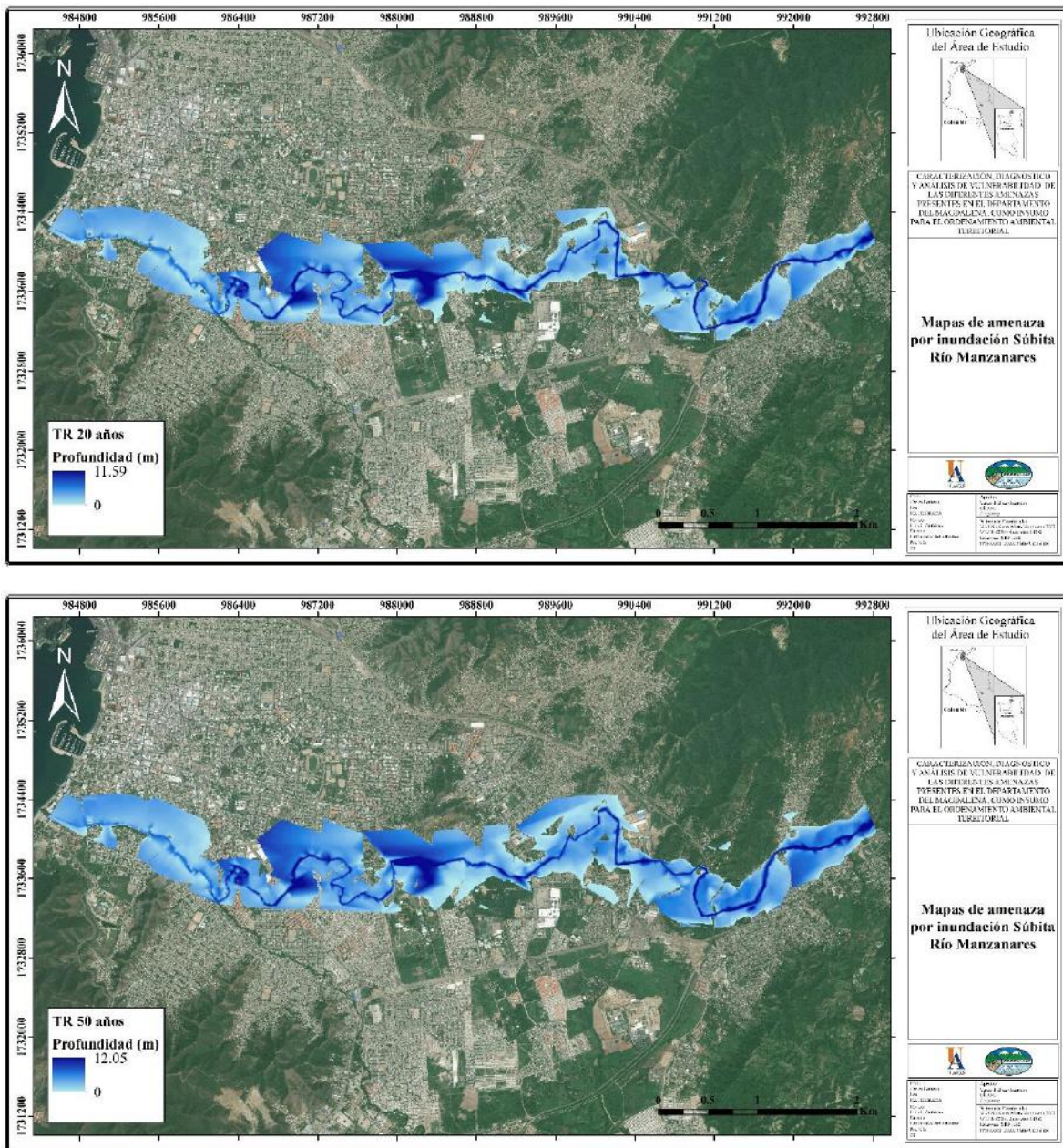


Figura 79. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Manzanares, para periodos de retorno de 5, 20 y 50 años.

RÍO GAIRA

Generalidades y Morfométrica

La cuenca del río Gaira se encuentra ubicada en la vertiente noroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, aproximadamente entre las coordenadas: 11°05'N y 11°13'N de latitud, y 74°14'W y 74°01'W de longitud. El río nace en la estrella hídrica de San Lorenzo, a una altura aproximada de 2150 m.s.n.m. y desemboca en el mar Caribe en el sector del Rodadero en Santa Marta. Al este limita con la cuenca hidrográfica del río Guachaca, al oeste con el mar Caribe, al norte con la cuenca hidrográfica del río Manzanares y la ciudad de Santa Marta, al sur con la cuenca hidrográfica del río Toribio (Figura 80).



Figura 80. Localización de la cuenca del río Gaira.

La cuenca cuenta con aproximadamente 10.861 hectáreas. La longitud del río Gaira es de 33.95 kilómetros y tiene un caudal promedio anual de 2.7 m³/s a la altura de la estación MINCA ubicada en el centro poblado del mismo nombre.

Según el estudio de Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas del IDEAM, la codificación para la cuenca del río Gaira es:

Área	Zona	Subzona	Nivel I
Caribe	Caribe-Guajira	Piedras-Manzanares y otros directos Caribe	Gaira
1	5	01	03

En la Tabla 44 se presentan los parámetros morfométricos más importantes de la cuenca del río Gaira.

Tabla 44. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Gaira

Parámetro	Valor
Área (km ²)	108.61
Perímetro (km)	67.51
Cota mayor cuenca (msnm)	2866
Cota menor cuenca (msnm)	0
Cota mayor cauce principal (msnm)	2150
Cota menor cauce principal (msnm)	0
Longitud del cauce principal (km)	33.95
Pendiente del cauce principal (m/m)	0.06
Pendiente media de la cuenca (%)	33.74
Altura media cuenca (msnm)	778.68
Índice de Gravelius (Kc)	1.85
Factor de forma de Horton (Hf)	0.09
Densidad de drenaje (Dd) (Km/Km ²)	1.95

La curva hipsométrica de la cuenca del río Gaira (Figura 81), representa una cuenca en fase de madurez en la cual se han presentado procesos erosivos sobre todo en las partes media y baja de la cuenca, mientras que en su parte alta existe un gran potencial de erosión.

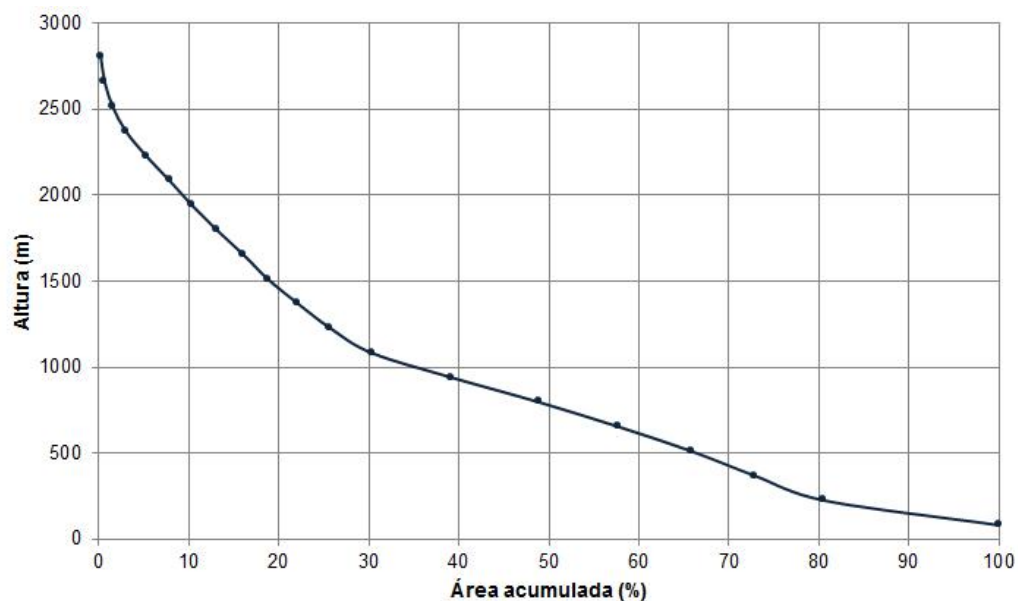


Figura 81. Curva hipsométrica de la cuenca del río Gaira

La red de drenaje se obtuvo directamente del DEM, comparando los resultados con la cartografía oficial. Con la escala trabajada se alcanzaron hasta 5 órdenes de corriente en la cuenca según la clasificación de Strahler, tal como se muestra en la Figura 82.

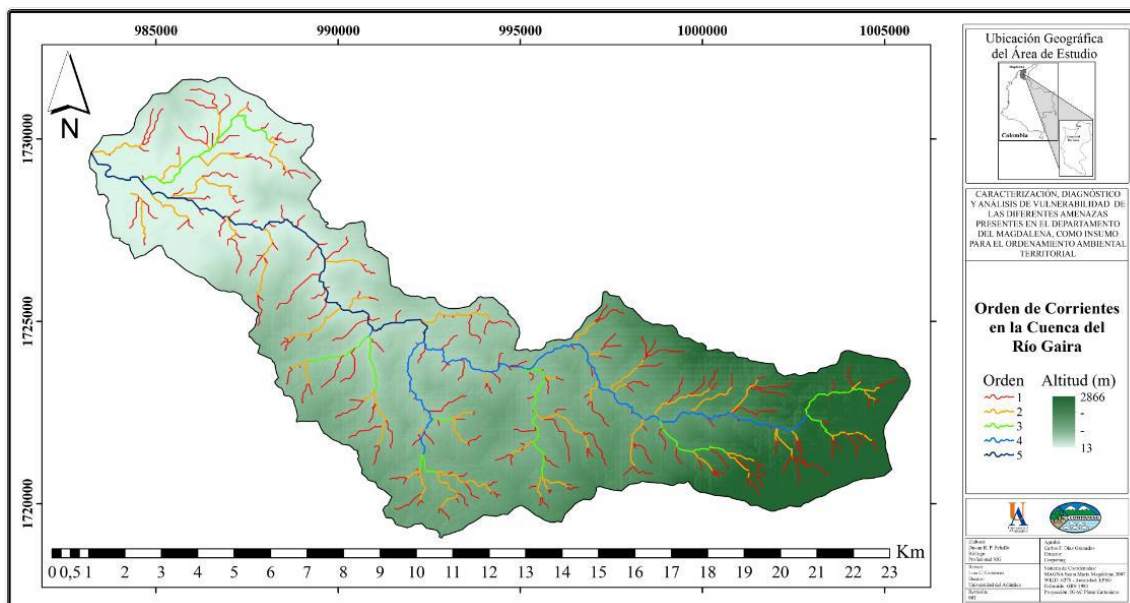


Figura 82. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Gaira.

El análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Gaira, se resume en la Tabla 45.

Tabla 45. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Gaira.

Orden	Cantidad de corrientes	Longitud total (Km)	Frecuencia (%)	Relación de bifurcación	Relación de longitud
1	473	104.13	49	2.13	0.53
2	222	54.81	26	2.96	0.38
3	75	20.76	10	0.95	0.90
4	79	18.69	9	1.55	0.77
5	51	14.37	7		
TOTAL / MEDIA	900	213	100	1.90	0.64

Teniendo en cuenta los parámetros morfométricos analizados anteriormente, se concluye que la cuenca del río Gaira es pequeña y de tipo alargado, lo cual favorece su respuesta ante eventos fuertes de precipitación, presenta una red de drenaje regular disminuyendo el riesgo a presentar crecidas súbitas.

Características climáticas

La precipitación media sobre la cuenca del río Gaira varía entre 533.91 mm/año en la cuenca baja y 2691.40 mm/año en la cuenca alta. La temperatura media anual esta entre los 13.6°C en la parte más alta de la cuenca donde nace el río y los 28.3°C en la parte baja. Los valores de evaporación se encuentran entre 566.4 y 1809.15 mm/año, mientras que la humedad relativa varía entre 75.6% y 91.9%. Como se observa, el comportamiento de cada una de las variables está estrechamente relacionado con la altitud sobre el nivel del mar, ya que las condiciones en la parte alta son completamente diferentes a las establecidas en la cuenca baja, lo cual obedece al comportamiento del clima según la teoría de pisos térmicos que se presenta sobre todo en regiones tropicales donde la influencia del relieve es determinante. En la Figura83-84 se presentan los mapas con valores promedio anual de cada una de las variables analizadas.

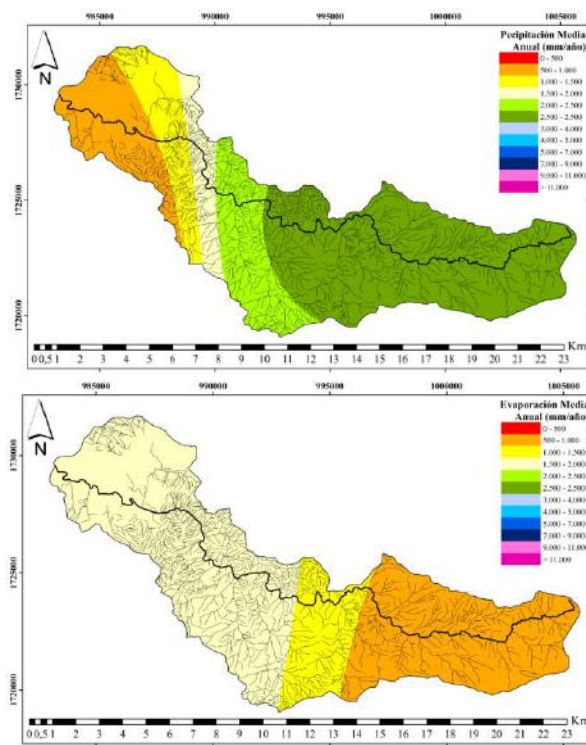


Figura 83. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del río Gaira.

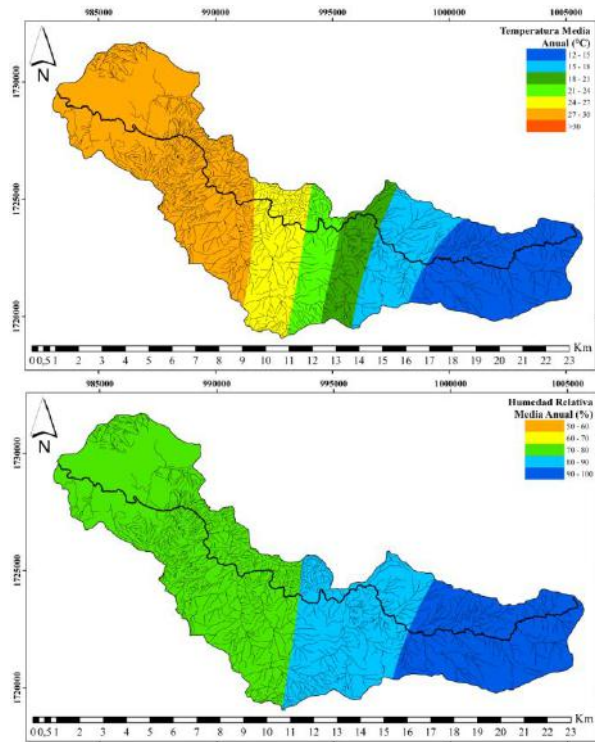


Figura 84. Valores medios anuales de Temperatura media y humedad relativa para la cuenca del río Gaira.

Selección del Tramo del Río a Modelar

A partir del perfil longitudinal del río Gaira, se identificó el punto de cambio de pendientes que marca la transición entre la cuenca de montaña (alta y media) y la cuenca baja donde se encuentra la parte urbana. Para ello se trazaron dos rectas paralelas al perfil longitudinal del río, el punto de intersección entre las dos rectas marca el origen del tramo que se requiere modelar, tal como se muestra en la Figura 85. El tramo obtenido aguas abajo del punto A, que se ubica aproximadamente a 50 msnm, tiene una longitud cercana a los 8 Km y una pendiente media de 0.006 m/m.

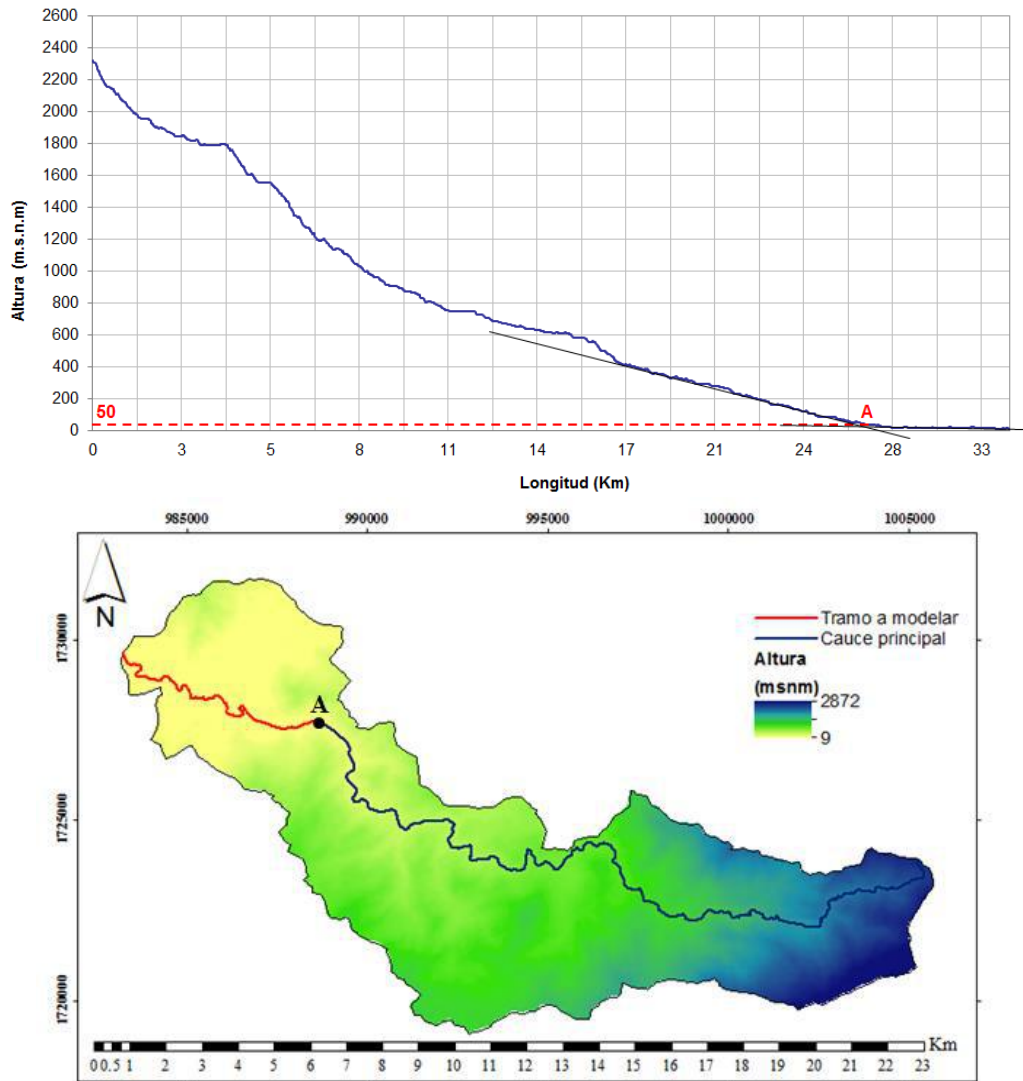


Figura 85. Selección del tramo del río Gaira para modelación hidráulica.

Hidrología

A partir de la información hidrológica suministrada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), se localizaron las estaciones de precipitación y caudal más cercanas a la zona de estudio (Figura 86). Allí se observa que dentro de la cuenca del río Gaira, se encuentran dos estaciones hidrológicas, una de ellas es pluviométrica y contiene datos de precipitación, la otra es limnigráfica y posee datos de caudal, las dos comparten el nombre de MINCA.

La estación pluviométrica MINCA se ubica en la cuenca alta, con coordenadas $11^{\circ}8'27''N$ y $74^{\circ}7'12''W$, cuenta con información histórica de precipitación a resolución diaria para 45 años de registro empezando en enero de 1969 y terminando en mayo de 2014. La estación

limnigráfica se ubica en las coordenadas 11°8'25''N y 74°7'11''W, cuenta con información de caudales medios diarios, máximos y mínimos mensuales y anuales para 35 años de registro, empezando en enero de 1978 y hasta septiembre de 2013. Las estaciones se localizan a una altura aproximada de 640 m.s.n.m. junto a la cuchilla que divide las cuencas de los ríos Gaira y Manzanares.

A pesar de que se cuenta con datos de caudal en la estación MINCA, esta se encuentra en la parte media-alta de la cuenca, mientras que la modelación se hará en la cuenca baja, por lo tanto, se debe implementar un modelo de lluvia-escorrentía, que relacione la precipitación máxima en 24 horas con los caudales máximos, a través de parámetros morfométricos de la cuenca.

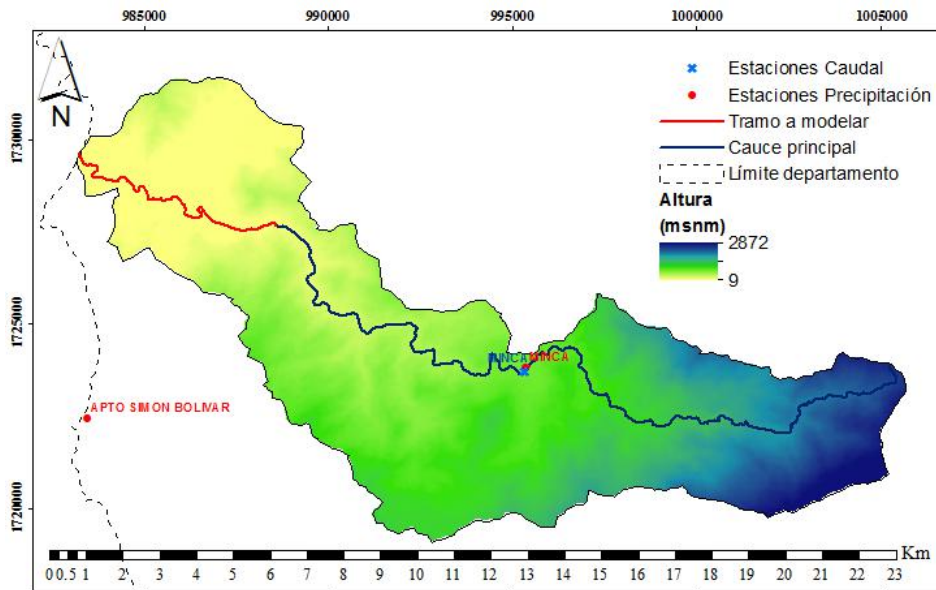


Figura 86. Localización de las estaciones hidrológicas cercanas a la zona de estudio.

El análisis de calidad de la serie de precipitación de la estación MINCA se presentó en el capítulo anterior para la cuenca del río Manzanares, al igual que el cálculo de las curvas IDF y los hietogramas de tormenta, por lo tanto, dichos cálculos se omiten en este capítulo.

Tiempo de concentración

Usando los parámetros morfométricos de la cuenca del río Gaira se obtuvo el tiempo de concentración para la cuenca por diferentes metodologías de cálculo, cuyos resultados se presentan en la Tabla 46.

Tabla 46. Tiempo de concentración para la cuenca del río Gaira.

Método	Tc (min)
Kirpich	177.24
Témez	186.58
Giandiotti	153.67
California Culvers Practice	155.50
Pérez	124.52
PROMEDIO	159.50

El valor promedio del tiempo de concentración será igual a la duración de la lluvia de diseño, parámetro base para la obtención de caudales.

Precipitación efectiva – Numero de Curva (CN)

El procesamiento de la información se realizó en ArcGIS a partir del mapa de coberturas de la cuenca, asignando a cada tipo de suelo un valor de número de curva según la figura anterior y ponderando para obtener un valor final de CN. Los resultados se muestran en la tabla 47.

Tabla 47. Numero de Curva y área impermeable para la cuenca del río Gaira.

SUMA CN*ÁREA (m2)	6901795380	ÁREA URBANO (m2)	3860475
ÁREA TOTAL (m2)	107909843	ÁREA TOTAL (m2)	107909843
CN PONDERADO	64	ÁREA IMPERMEABLE (%)	3.6

Modelo hidrológico – Caudales pico

Una vez se tienen los parámetros de la cuenca, el tiempo de concentración, las tormentas de diseño para cada periodo de retorno y el CN ponderado, se desarrolla un modelo hidrológico en el programa HEC-HMS⁴, el cual utiliza un modelo de lluvia escorrentía a partir de hidrogramas unitarios para estimar caudales pico con la respectiva hidrógrafa de respuesta de la precipitación efectiva. A manera de ejemplo, en la Figura 87 se presentan los resultados obtenidos para un periodo de retorno de 5 años.

⁴ Software libre de modelamiento hidrológico desarrollado por el Departamento de Defensa de los Estados Unidos

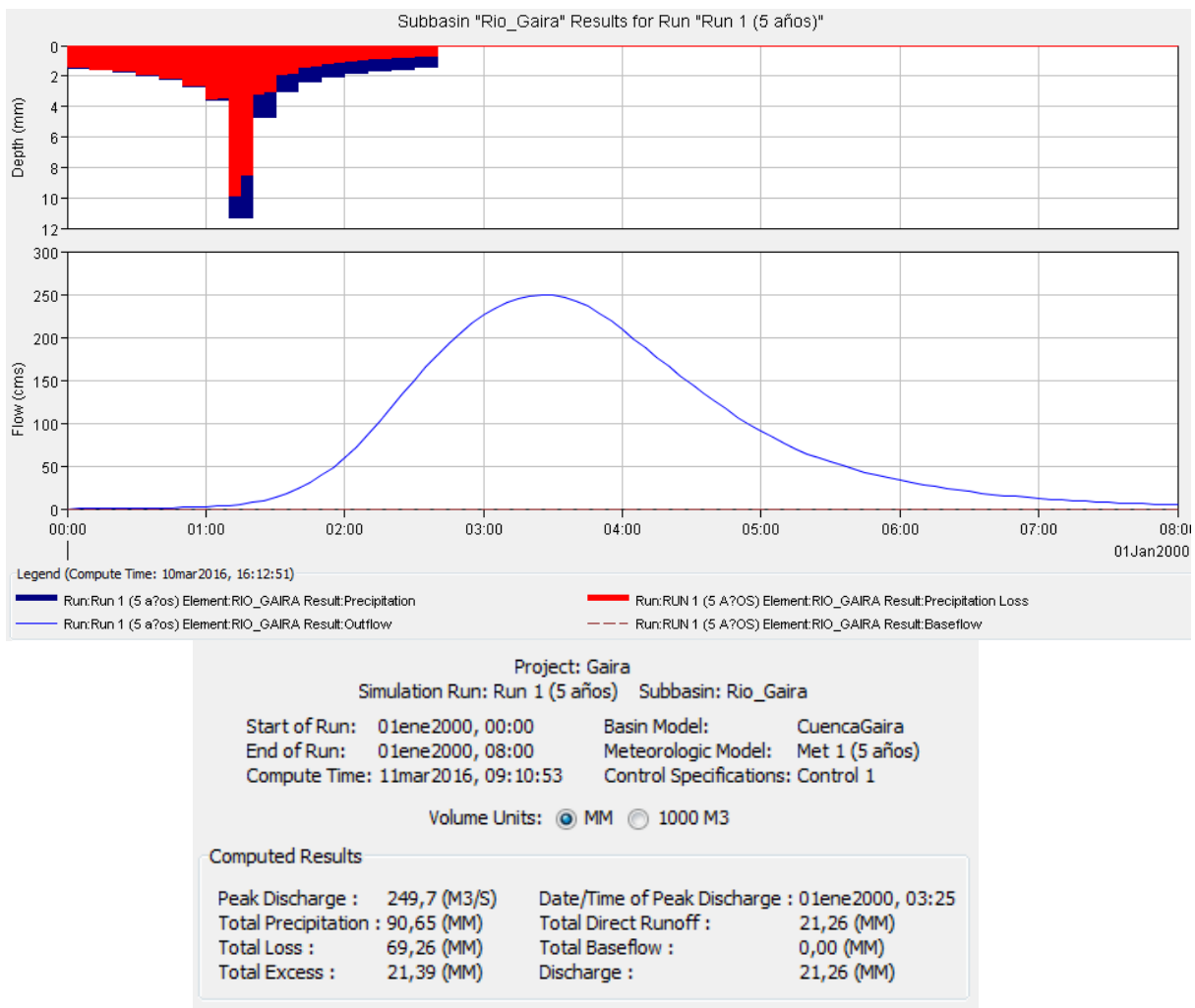


Figura 87. Resultados del modelo hidrológico para un periodo de retorno de 5 años.

Como se observa en la Figura anterior, a partir del hietograma de precipitación (parte superior de la gráfica) se obtiene la hidrógrafa de respuesta de la precipitación efectiva en la cuenca.

Los caudales estimados para cada periodo de retorno se muestran en la Tabla 48.

Tabla 48. Caudales obtenidos para diferentes periodos de retorno en el rio Gaira.

TR	Q pico (m ³ /s)
5	249.7
20	474.9
50	695.7

Los caudales obtenidos serán uno de los insumos de entrada para la modelación hidráulica, la cual se explica en el siguiente capítulo.

Modelación hidráulica

La modelación hidráulica consiste en la determinación de láminas de agua en la corriente para diferentes periodos de retorno, con lo cual se pueden crear mapas de inundación. Para ello se utilizó el software hidráulico HEC-RAS, y un software de tipo SIG.

Cabe aclarar que en la modelación hidráulica se trabajó con flujo permanente y uniforme en todo el tramo analizado, es decir que se usó el mismo caudal para todas las secciones transversales. Las condiciones de borde establecidas fueron profundidad normal aguas abajo y régimen de flujo subcrítico.

Topografía

Para el desarrollo del modelo hidráulico se realizó una topografía detallada en la parte baja del río, con curvas de nivel cada 50 cm, tal como se muestra en la Figura 88.

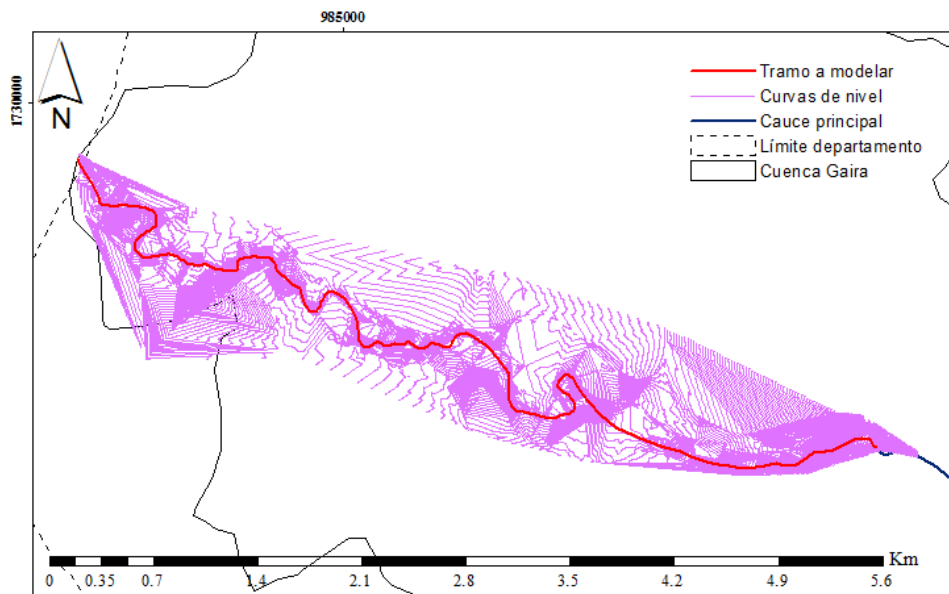


Figura 88. Topografía levantada en la parte baja del río Gaira

A partir de la topografía se generaron secciones transversales cada 100 metros aproximadamente, de 200 metros y hasta de 500 metros de ancho con el fin de generar la geometría del modelo hidráulico (Figura 89).

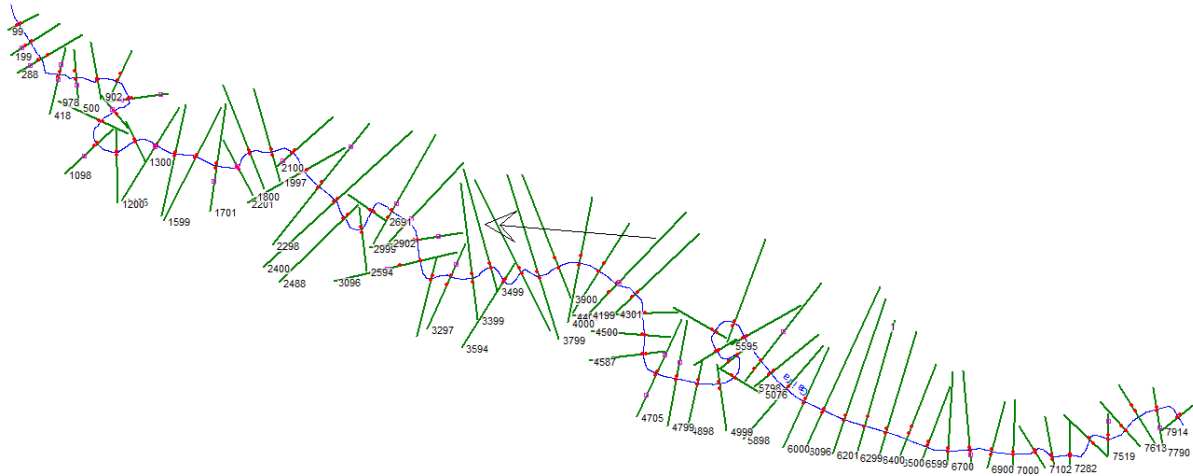


Figura 89. Generación de la geometría del modelo hidráulico en HEC-RAS.

La rugosidad promedio del río, tanto en el lecho como en las banquetas y llanuras de inundación, se determinó a partir de recomendaciones hechas en la literatura.

Los coeficientes de rugosidad de Manning seleccionados se muestran en la Tabla 49.

Tabla 49. Rugosidad estimada del río Gaira.

Sitio	Rugosidad (n-Manning)
Lecho	0.04 (Lecho arenoso con gravas y rocas)
Banca y llanura derecha	0.06 (Arboles y matorrales)
Banca y llanura izquierda	0.06 (Arboles y matorrales)

Resultados

Como resultado de la modelación hidráulica, se obtuvieron láminas de agua para diferentes periodos de retorno en cada una de las secciones analizadas. Posteriormente y con ayuda del software tipo SIG, estas láminas de agua fueron transformadas a manchas de inundación en mapas. La Figura90-91 muestra un ejemplo de la mancha de inundación en todo el tramo analizado y láminas de agua para 5, 20 y 50 años en dos de las secciones analizadas.

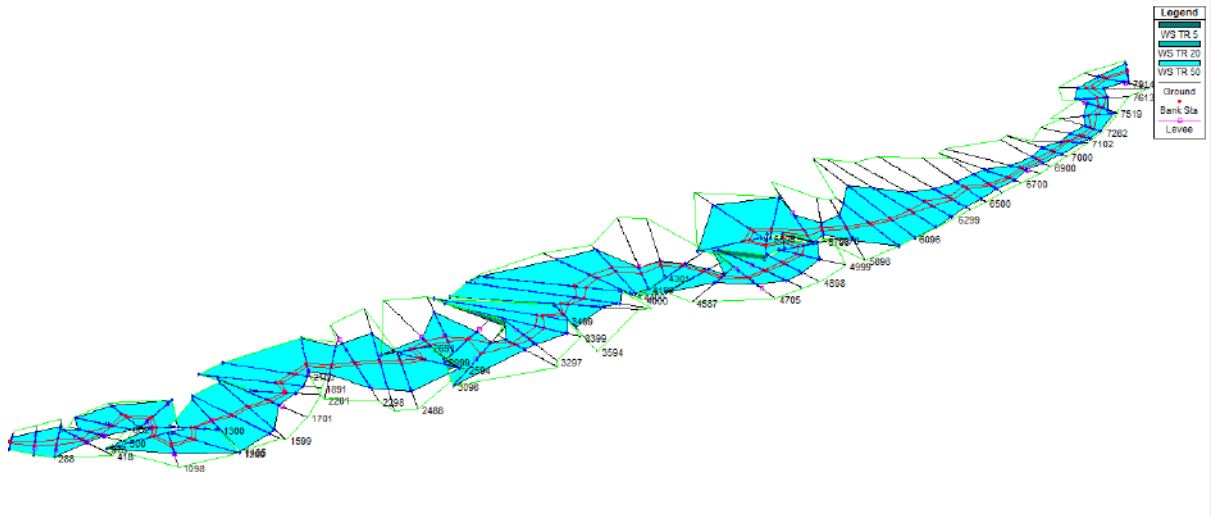


Figura 90. Manchas de inundación obtenidas en HEC-RAS.

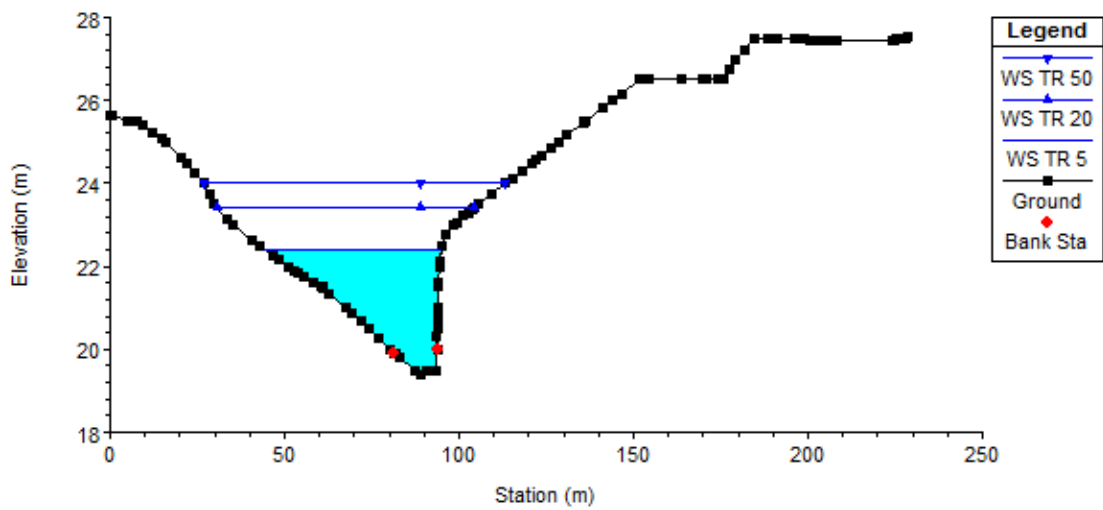
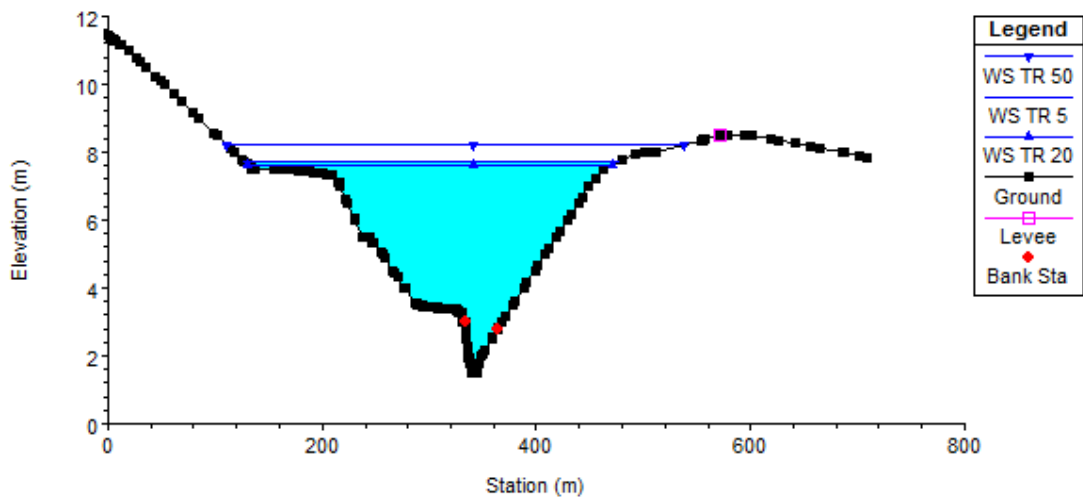


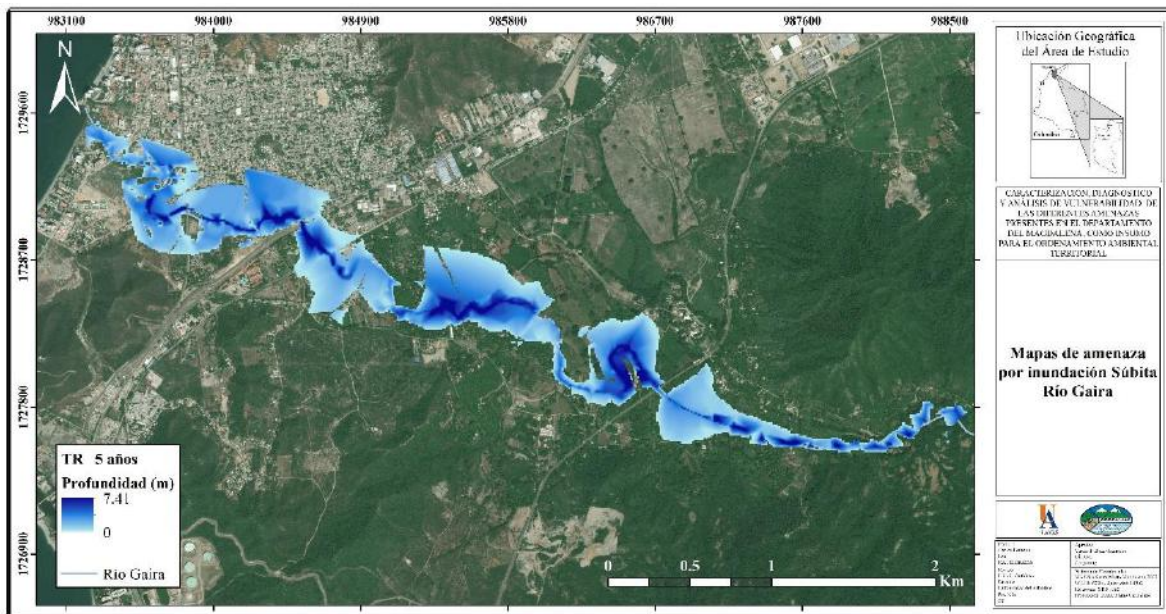
Figura 91. Láminas de agua obtenidas en algunas de las secciones modeladas del río Gaira. Según los resultados del modelo, se obtuvieron láminas de agua de hasta 8.6 m de profundidad y más de 500 metros de ancho para un periodo de retorno de 50 años. Las velocidades máximas del flujo están cercanas a los 6 m/s en un par de secciones, lo cual podría eventualmente, socavar las márgenes y el lecho del río modificando su alineamiento y afectar a las urbanizaciones y construcciones que se encuentran muy cerca de sus riberas.

Los mapas de inundación ofrecen información de las áreas que resultan afectadas ante un evento de esta naturaleza, lo cual se muestra en la Tabla 50.

Tabla 50. Área inundable para diferentes periodos de retorno.

TR	Area (Km ²)	Area (Ha)	Descripción zona inundable
5	1.56	156.51	La inundación producida para los diferentes periodos de retorno afecta a gran parte de los barrios aledaños al cauce del río Gaira, Entre los que presentan mayor afectación están Villa Rosmeri, Paraiso, Centro, Villa Berlín y Barrio Arriba.
20	1.80	180.87	
50	2.09	209.33	

En la figura 92 se presentan los mapas de inundación obtenidos para los periodos de retorno seleccionados, junto con los respectivos resultados numéricos de la modelación.



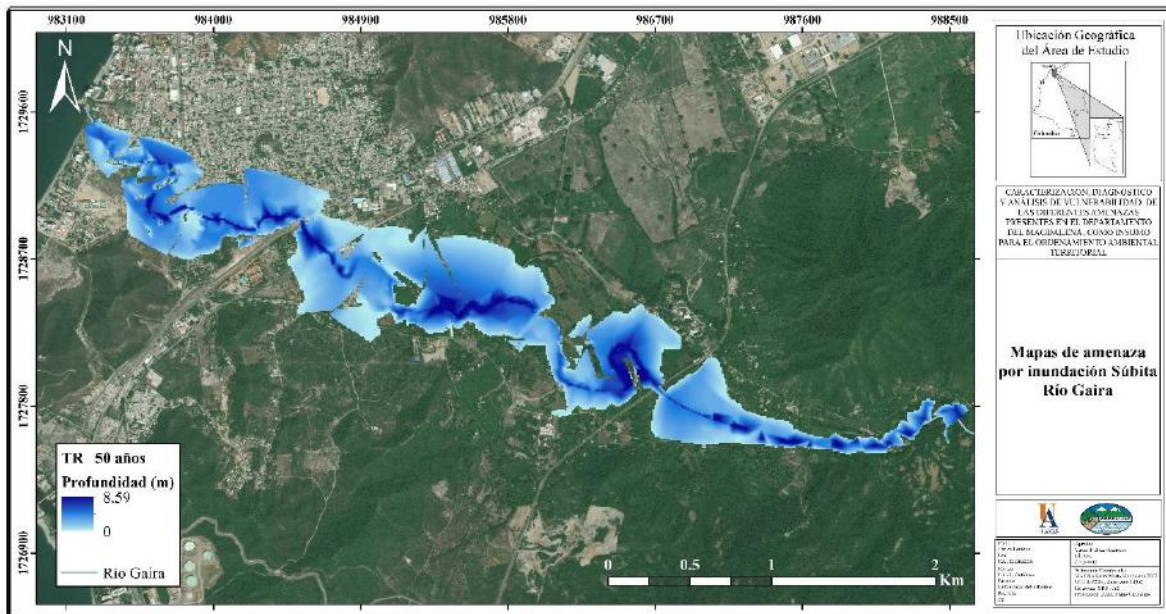
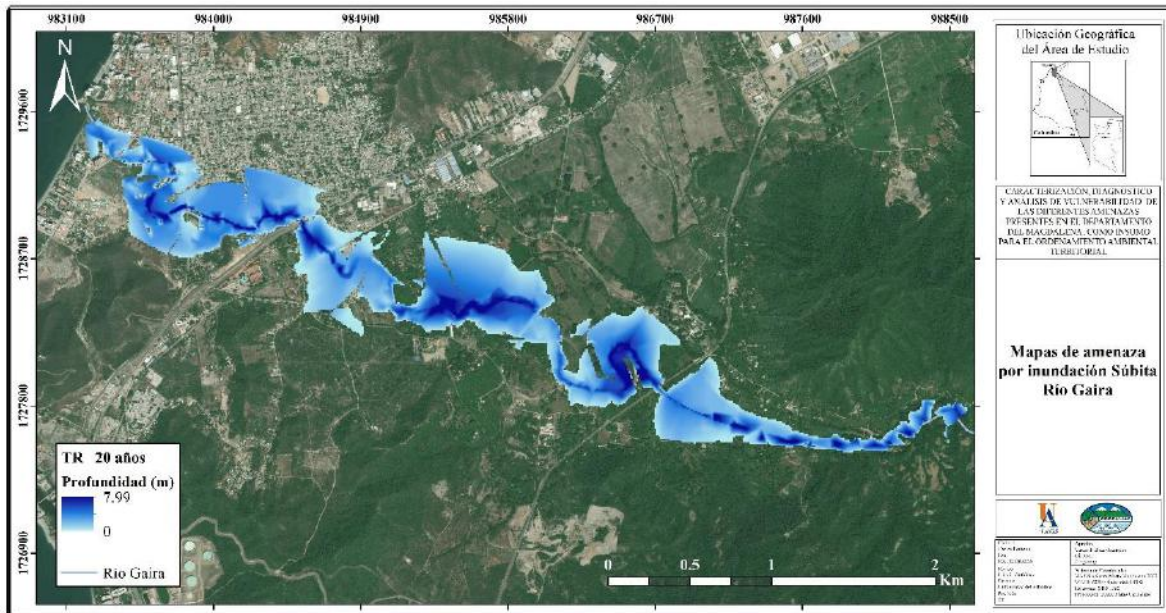


Figura 92. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Gaira, para periodos de retorno de 5,20 y 50 años.

RÍO FUNDACIÓN

Generalidades y Morfométrica

La cuenca del río Fundación se encuentra ubicada en la vertiente suroccidental de la Sierra Nevada de Santa Marta, aproximadamente entre las coordenadas: 10°17'N y 10°44'N de latitud, y 74°29'W y 73°31'W de longitud. El río nace en la parte sur de la Sierra Nevada de Santa Marta a una altura aproximada de 2400 msnm y desemboca en el costado sur de la Ciénaga Grande de Santa Marta a una altura de 3 msnm. Al este limita con el departamento del Cesar y la cuenca del río Guatapurí, al oeste con el complejo de humedales y ciénagas adjuntas a la Ciénaga Grande de Santa Marta, al norte con la cuenca hidrográfica del río Aracataca y al sur con la cuenca hidrográfica del río Ariguaní (Figura 93).



Figura 93. Localización de la cuenca del río Fundación

La cuenca cuenta con aproximadamente 236.969 hectáreas. La longitud aproximada del río Fundación es de 168.42 kilómetros y presenta un caudal promedio anual de 27.41 m³/s a la altura de la estación limnimétrica FUNDACIÓN ubicada en el centro poblado de Fundación.

Según el estudio de Zonificación y Codificación de Cuencas Hidrográficas del IDEAM, la codificación para la cuenca del río Fundación es:

Área	Zona	Subzona	Nivel I
Caribe	Caribe-Guajira	Piedras-Manzanares y otros directos Caribe	Gaira
1̄	5̄	01̄	03̄

En la

Tabla 51 se presentan los parámetros morfométricos más importantes de la cuenca del río Fundación.

Tabla 51. Parámetros morfométricos de la cuenca del río Fundación

Parámetro	Valor
Área (km ²)	2369.69
Perímetro (km)	348.01
Cota mayor cuenca (msnm)	3917
Cota menor cuenca (msnm)	3
Cota mayor cauce principal (msnm)	2400
Cota menor cauce principal (msnm)	4
Longitud del cauce principal (km)	168.42
Pendiente del cauce principal (m/m)	0.01
Pendiente media de la cuenca (%)	20.29
Altura media cuenca (msnm)	257.61
Índice de Gravelius (Kc)	2.00
Factor de forma de Horton (Hf)	0.08
Densidad de drenaje (Dd) (Km/Km ²)	1.80

La curva hipsométrica del río fundación muestra una cuenca de tipo sedimentario, que ha pasado por procesos de erosión muy marcados en su parte baja, donde se aprecias un valle plano en casi el 60% de su área, lo cual genera amplias llanuras de inundación para amortiguar las crecidas del río. La cuenca media y alta, por su parte, tienes pendientes muy pronunciadas y representan menos del 40% del área total de la cuenca (Figura 94).

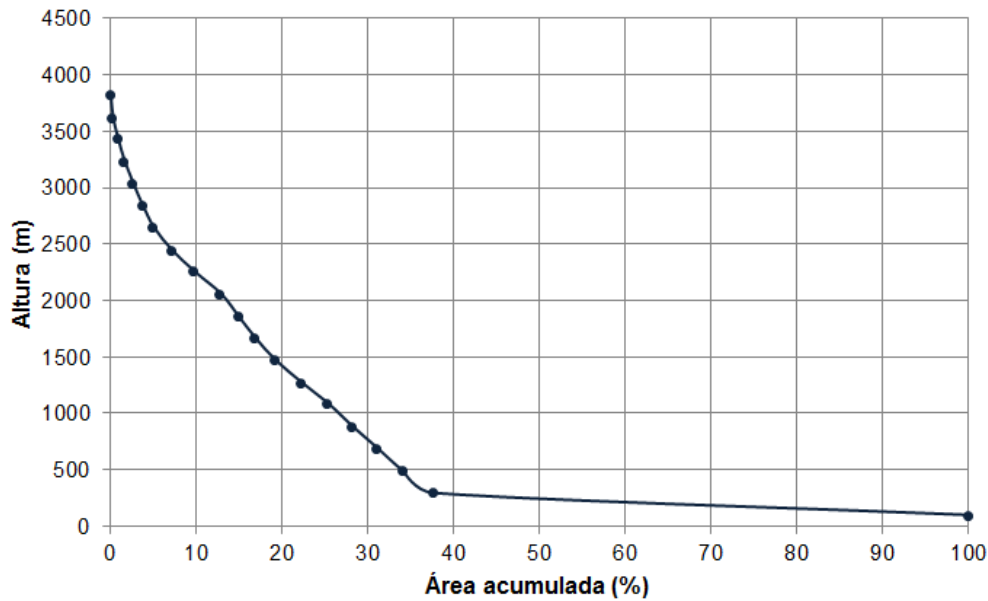


Figura 94. Curva hipsométrica de la cuenca del río Fundación

La red de drenaje se obtuvo directamente del DEM, comparando los resultados con la cartografía oficial. Con la escala trabajada se alcanzaron hasta 7 órdenes de corriente en la cuenca según la clasificación de Strahler, tal como se muestra en la Figura 95.

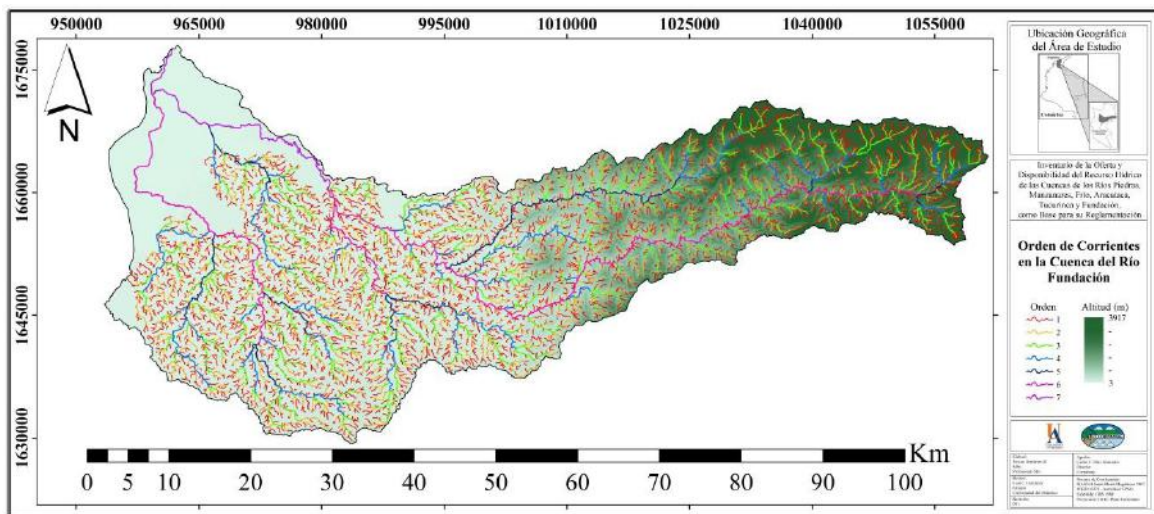


Figura 95. Red de drenaje y órdenes de corriente en la cuenca del río Fundación

El análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Fundación, se resume en la Tabla 52.

Tabla 52. Resumen del análisis de la red de drenaje de la cuenca del río Fundación.

Orden	Cantidad de corrientes	Longitud total (Km)	Frecuencia (%)	Relación de bifurcación	Relación de longitud
1	8835	2081.79	48.7	2.12	0.51
2	4171	1054.16	24.7	1.94	0.58
3	2148	607.21	14.2	2.11	0.43
4	1019	259.76	6.1	2.12	0.45
5	481	117.85	2.8	0.77	1.26
6	624	148.11	3.5	23.11	0.02
7	27	2.77	0.1		
TOTAL / MEDIA	17305	4272	100	5.36	0.54

Del análisis morfométrico y de la red de drenaje del río Fundación y su cuenca, se puede concluir que la cuenca es relativamente grande con respecto a las demás cuencas analizadas, posee un relieve muy variado desde llanuras planas en su cuenca baja hasta topografías accidentadas en su parte media-alta, abarcando un rango variado de alturas sobre el nivel del mar. Es una cuenca alargada con una red de drenaje medianamente buena, lo cual indica tiempos de concentración menores y menor susceptibilidad a sufrir inundaciones repentinas.

Características climáticas

La precipitación media sobre la cuenca del río Fundación varía entre 1019.4 mm/año y 2206.4 mm/año. La temperatura media anual está entre los 25.6°C y los 28.4°C. Los valores de evaporación se encuentran entre 1551.6 y 2175.2 mm/año, mientras que la humedad relativa varía entre 71.1% y 81.2% (Figura 96-97).

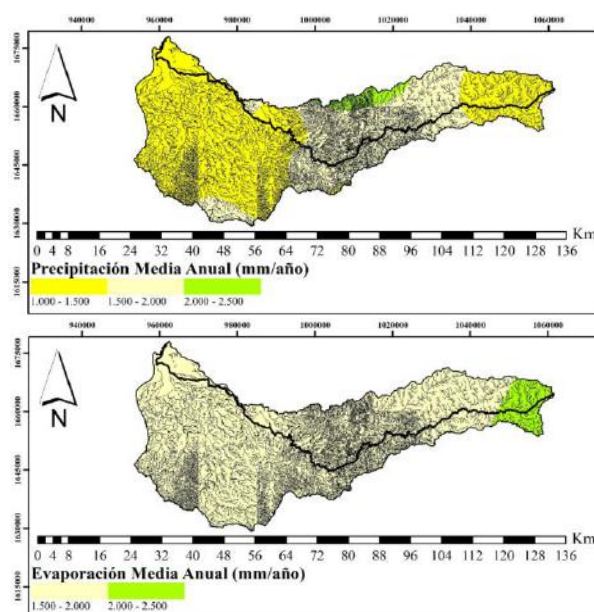


Figura 96. Valores medios anuales de precipitación y evaporación para la cuenca del río Fundación.

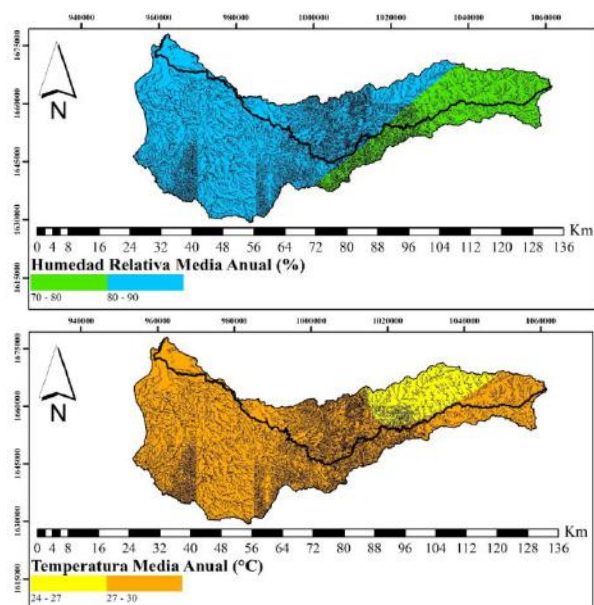


Figura 97. Valores medios anuales de humedad relativa y temperatura media para la cuenca del río Fundación.

Localización del tramo analizado

Como se dijo anteriormente, para el caso del río Fundación, se realizó una recopilación y complemento del estudio ejecutado por el IDEAM y la Universidad Nacional de Colombia, en donde se presenta la amenaza por inundaciones de tipo súbita en el municipio.

El tramo de análisis escogido en dicho estudio se sitúa en la zona urbana del municipio, tal como se muestra en la Figura 98.

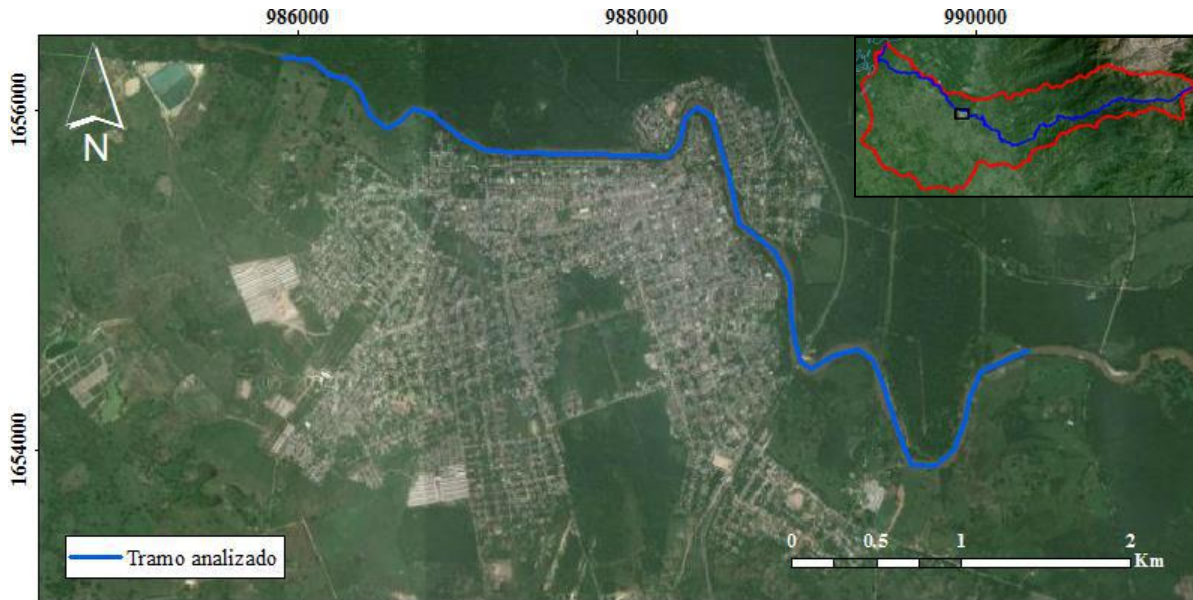


Figura 98. Tramo analizado del río Fundación en el centro poblado.

Metodología Empleada

Cómo estrategia general, se definieron sobre el terreno los niveles máximos del agua y la dirección de flujo durante eventos de inundación asociados a cada período de recurrencia.

Una vez se obtenidos los niveles de flujo durante el evento, se superpusieron con la topografía del terreno y se obtuvo la estimación de la extensión de la inundación para el período de retorno considerado. Para la estimación de los niveles máximos de flujo y para la definición de la mancha de inundación se requiere una topografía muy detallada del cauce y de las zonas aledañas susceptibles de ser inundadas. A partir de la topografía y de las series hidrológicas se desarrolló un modelo hidráulico en el programa HEC-RAS para la generación de las manchas de inundación.

Topografía

La topografía de la zona fue levantada mediante el sistema LIDAR (Light Detection and Ranging), el cual combina un sistema de escaneo aerotransportado sobre el terreno con un sistema de posicionamiento global (GPS), y la Unidad de Medida Inercial (IMU) de una aeronave. El procedimiento para el levantamiento de la topografía se describe a continuación:

- Toma de fotografías aéreas sobre el bloque de interés especificado para obtener un tamaño de píxel de 15 cm mediante sensor fotogramétrico digital.
- Procesamiento de fotografía aérea a color (RGB).
- Captura de información por medio de LIDAR sobre el área de interés especificada garantizando en promedio un punto a piso por metro cuadrado.

- Posicionamiento de bases en tierra al momento del vuelo fotogramétrico para incrementar la precisión de los datos cinemáticos obtenidos en vuelo.
- Generación Ortofoto-mosaico a color del área de estudio, con resolución promedio GSD de 15 cm.
- Extracción de curvas de nivel con intervalo de 0.25 metros.

Información adicional

Además de la topografía, se utilizaron los siguientes insumos para el desarrollo del proyecto:

- Imágenes satelitales de alta resolución: se dispuso de todas las imágenes de sensores remotos de distintas fechas adquiridas por el IDEAM, las cuales incluyen los sensores IKONOS, RAPIDEYE, ADS80, además se consideró como información de contexto la proveniente de sensores de libre acceso como: GOOGLE EARTH y LANDSAT.
- Cartografía base de la zona a escala 1:25.000 suministrada por el IGAC.
- Información hidrometeorológica de la zona suministrada por el IDEAM, que incluye series de nivel y caudal de estaciones con cotas amarradas, estaciones de nivel y caudal sin cotas amarradas.
- Modelo Digital del Terreno (MDT) de la zona obtenido de la misión ASTER GDEM V2, con resolución de 30m x 30m.

Hidrología

Para obtener los caudales de diseño en el sitio de interés, en primer lugar, se hizo la recopilación de información cartográfica e hidrometeorológica, para obtener los parámetros morfométricos de la cuenca y conformar una base de datos de los registros de las estaciones limnimétricas y limnigráficas, con miras a reconstruir los eventos históricos más importantes de caudales máximos dentro del cauce analizado y estimar los caudales máximos de diseño para los diferentes periodos de retorno. La metodología empleada para la estimación de los caudales máximos corresponde al análisis de frecuencia.

A las series hidrometeorológicas se les realizó análisis de homogeneidad y consistencia con el fin de verificar su calidad para el estudio. Este análisis incluyó detección de “outliers”, y test de cambio en la media y en la varianza. En la Tabla 53 y Figura 99 se presentan los outliers detectados en las estaciones de caudales FUNDACIÓN y PTO RICO HDA, las cuales pertenecen al río Fundación.

Tabla 53. Detección de outliers en las estaciones FUNDACIÓN y PTO RICO HDA.

Estación	Año	Valor detectado (m³/s)	Método empleado
-----------------	------------	--	------------------------

FUNDACIÓN	1986	616	Prueba de rangos normales
	1993	872.5	
	1999	803	
PTO RICO HDA	1975	516	Prueba de rangos normales y Prueba de rango normalizado
	1992	387.1	
	1998	414.6	

Fuente. IDEAM, Universidad Nacional.

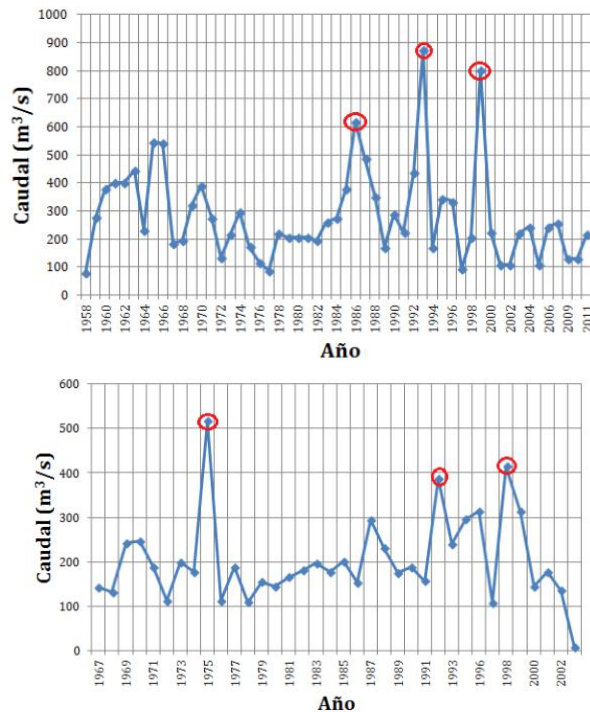


Figura 99. Outliers detectados en las serie de caudales de las estaciones FUNDACIÓN (Izquierda) y PTO RICO HDA (Derecha)

Fuente. IDEAM, Universidad Nacional.

Análisis de Frecuencias

Para el análisis de frecuencia se realizaron las pruebas de bondad de ajuste de Smirnov-Kolmogorov y Cramer Von Mises. Las series fueron ajustadas con diferentes funciones de distribución de probabilidad: Gumbel, Log Gumbel, Pearson, Log Pearson, Normal y Log Normal. En todas las pruebas, se utilizó un nivel de significancia del 95% y los parámetros de las distribuciones se evaluaron por máxima verosimilitud. Se realizó el análisis de frecuencia para los periodos de retorno de 2.33, 20 y 100 años.

Usando la prueba de bondad de ajuste de Cramer-Von Mises para evaluar cuál de todas las funciones de distribución se ajusta mejor a las series de datos de cada una de las estaciones, se encontró que el mejor ajuste lo proporciona la función Gumbel.

La Tabla 54 muestra los caudales estimados en cada estación y para diferentes periodos de retorno.

Tabla 54. Caudales máximos estimados para las estaciones FUNDACIÓN Y PTO RICO HDA.

Estación	TR (años)	Caudal máximo anual (m ³ /s)				
		Normal	Log Normal	Gumbel	Pearson Tipo III	Log Pearson Tipo III
FUNDACIÓN	2.33	303.86	278.12	281.94	294.06	288.56
	20	485.18	514.58	512.51	500.54	516.89
	100	569.45	684.93	669.65	612.51	640.90
PTO RICO HDA	2.33	198.59	190.24	188.55	191.43	189.39
	20	281.65	292.78	294.17	292.09	295.70
	100	320.25	357.74	366.15	351.06	366.81

Fuente. IDEAM, Universidad Nacional.

Las curvas de caudales máximos obtenidos usando las distintas funciones de distribución y para diferentes periodos de retorno se presentan en la Figura 100.

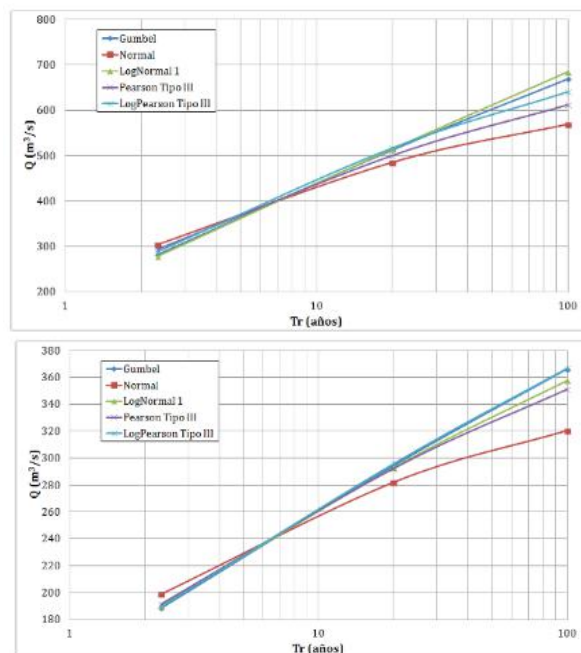


Figura 100. Curvas de caudales máximos obtenidos en las estaciones FUNDACIÓN (Izquierda) y PTO RICO HDA (Derecha).

Fuente. IDEAM, Universidad Nacional.

Modelación hidráulica

Se modeló hidráulicamente el río, con el programa HEC-RAS. Con la simulación hidráulica se evaluaron los parámetros hidráulicos de mayor interés como niveles de creciente, velocidades de flujo, esfuerzos cortantes y se verificó la capacidad hidráulica de las obras existentes.

La modelación se hizo considerando régimen de flujo permanente. Para el modelo se requiere disponer de información de la geometría del tramo a modelar, la resistencia al flujo y condiciones de borde. Para la modelación hidráulica de los cauces se utilizaron las condiciones de borde de profundidad normal aguas abajo, considerando un régimen de flujo subcrítico. Asimismo, para determinar en campo el nivel de la sección a banca llena, se utilizaron algunos indicadores propuestos por Posada en 1994, como son el cambio de pendiente y la vegetación presente en la sección hidráulica

A partir de la topografía se obtuvo la geometría para el modelo hidráulico, la cual se muestra en la Figura 101. La longitud del tramo modelado es de 5.4 Km y tiene una pendiente promedio de 0.12%.

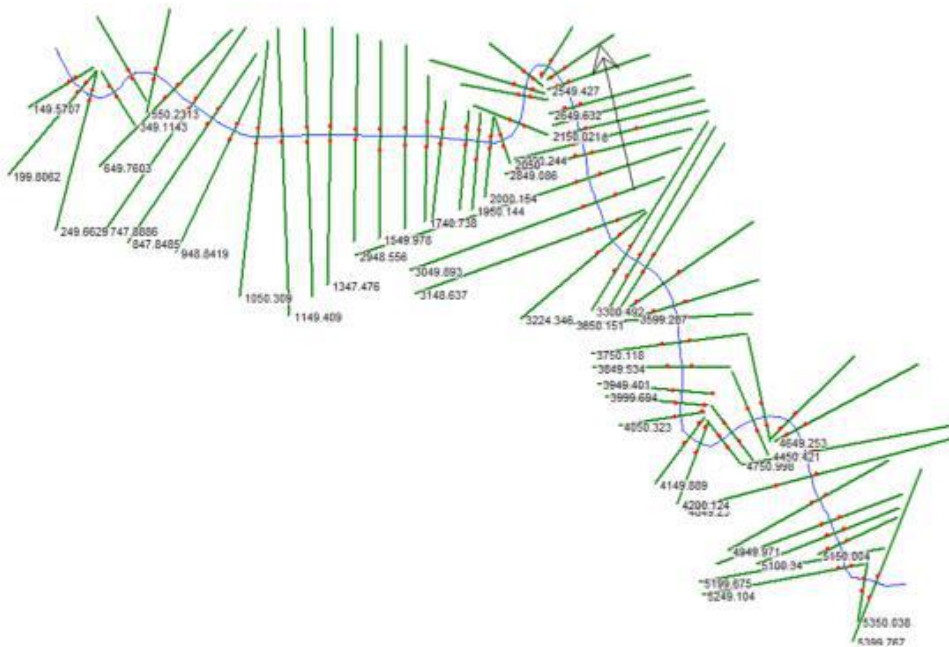


Figura 101. Geometría del tramo del río Fundación en HEC-RAS
Fuente. IDEAM, Universidad Nacional.

Rugosidad

Para estimar el coeficiente de rugosidad (n de Manning) en el tramo analizado, se realizaron comparaciones visuales del material evidenciado en las márgenes del río y los referenciados en la literatura (Chow, 1994). En tramo analizado se caracteriza por contar con un canal natural con buena presencia de vegetación y algunas piedras de menor tamaño dentro del lecho (Tabla 55).

Tabla 55. Rugosidad estimada para el río Fundación.

Sitio	Rugosidad (n-Manning)
Lecho	0.025 (Lecho arenoso con algunas gravas)
Margen derecha	0.03 (pastos)
Margen izquierda	0.03 (pastos)

Resultados

Como parte de los resultados de la modelación hidráulica, se presenta el perfil de flujo longitudinal para el tramo analizado (Figura 102) y la lámina de agua para algunas de las secciones analizadas (Figura 103). Los niveles máximos de profundidad están cercanos a los 4 metros.

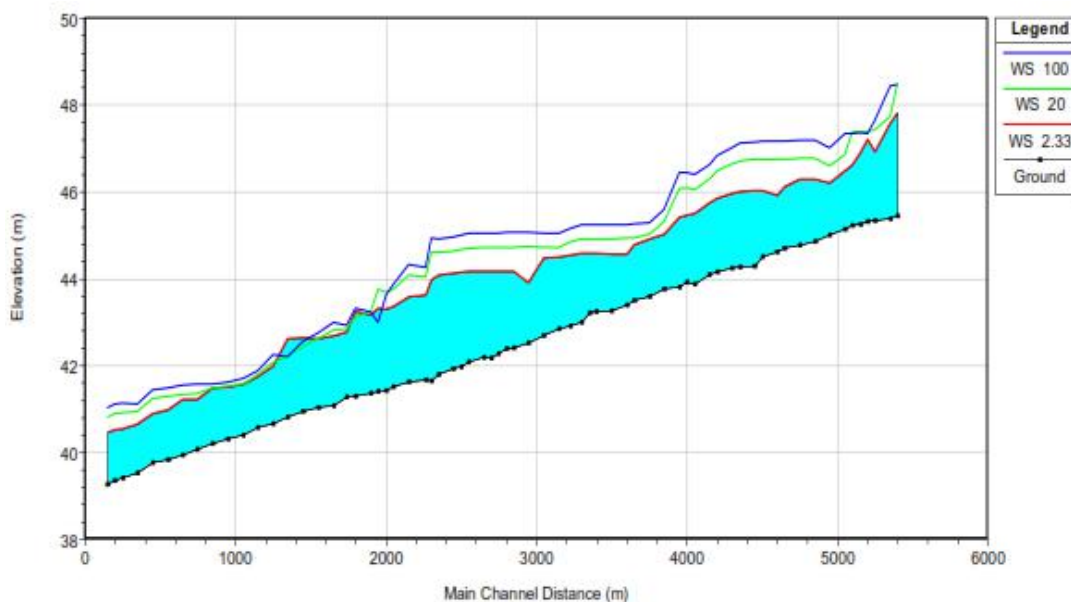


Figura 102. Perfil longitudinal de flujo en el tramo analizado
Fuente. IDEAM, Universidad Nacional.

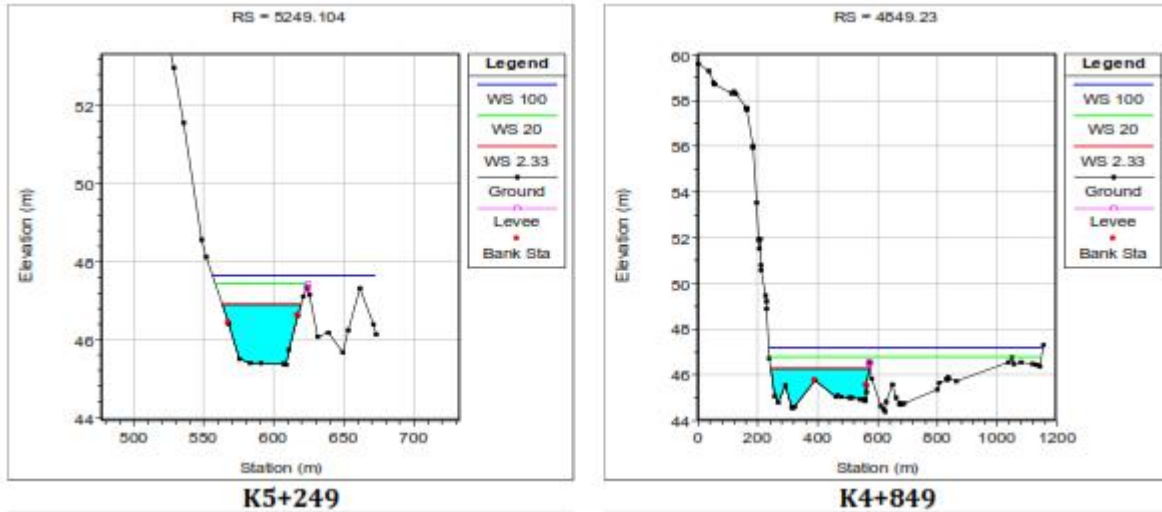


Figura 103. Lámina de agua obtenida para diferentes periodos de retorno
Fuente. IDEAM, Universidad Nacional.

Las velocidades máximas en algunas de las secciones están cercanas a los 5m/s, lo cual puede afectar el alineamiento del río modificando su cauce principal y generar eventos de socavación en el lecho y las márgenes.

Los mapas de inundación ofrecen información de las áreas que resultan afectadas ante un evento de esta naturaleza, lo cual se muestra en la Tabla 56.

Tabla 56. Área inundable para diferentes periodos de retorno.

TR	Area (Km ²)	Area (Ha)	Descripción zona inundable
2.33	0.61	61.1	Zona urbana del municipio de Fundación. Para un periodo de retorno de 2.33 años no se aprecian afectaciones considerables, mientras que para un periodo de retorno de 20 años gran parte de los barrios de la zona norte y oriental resultan afectados.
20	5.22	521.9	

A continuación, en la figura 104 se presentan los mapas de amenaza por inundación para periodos de retorno de 2.33 y 20 años.



Figura 104. Mapas de las manchas de Inundación en la cuenca baja del río Fundación, para periodos de retorno de 2.33 y 20 años.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- El detalle de los mapas de inundación generados para el río Piedras, está sujeto a la topografía disponible, la cual se encuentra a escala 1:25.000. Lo anterior no permitió tener un detalle suficiente del lecho del río ni de sus llanuras de inundación. Adicionalmente los errores topográficos asociados al DEM utilizado, alteran las condiciones en el flujo modelado. Se recomienda entonces, levantar una topografía más detallada de la zona de estudio, con el fin de afinar el modelo hidráulico, para obtener resultados muchos más confiables y acordes con la realidad.
- Debido a la temporada de verano que atraviesa el país como efecto del Fenómeno del Niño, en algunos casos hubo dificultad para realizar los aforos, ya que la profundidad de la lámina de agua no permitía la medición de velocidad. Sin embargo, los caudales estimados se encuentran acordes con las condiciones históricas del río en temporada seca. Cabe anotar, que lo anterior no interfiere con la calidad del modelo hidráulico, ya que los caudales obtenidos para la modelación provienen de un análisis estadístico de frecuencias de la serie de caudales máximos históricos.
- Los mapas de inundación generados son un insumo básico para la formulación de planes de gestión de riesgo en los municipios donde se ubican estas cuencas en el departamento del Magdalena. Se recomienda la socialización de los resultados con las comunidades involucradas y con las autoridades encargadas de planeación y atención de emergencias, para de esta manera minimizar los daños y las pérdidas que en el futuro se puedan presentar por catástrofes de magnitudes similares a las vividas en la ola invernal del 2010-2011.
- En términos generales, y con base a la información obtenida de los mapas de inundación para el río Piedras, son pocas las zonas afectadas ante eventos de inundación ya que no es una cuenca que tenga zonas urbanas importantes. Además, la topografía y geomorfología de la zona disminuyen el riesgo, ya que el río Piedras se encuentra encañonado en la mayoría de su recorrido hasta la desembocadura, es decir que no existen llanuras de inundación considerables principalmente porque se trata de un río de montaña. Por otro lado, la cuenca del río Piedras no es lo suficientemente grande para generar caudales de gran magnitud, lo cual contribuye a la minimización de daños ante eventos invernales de gran envergadura, sin embargo es de resaltar que a esta cuenca en su parte baja, la bordea una importante vía interdepartamental, que al momento de presentar una inundación súbita como las ya

registradas en este estudio, esta vía será la infraestructura que resista todo el impacto de la inundación, afectando de manera negativa todo el comercio que en ella se moviliza.

- Tal como lo muestran los mapas de amenaza por inundación, Las zonas urbanas de los ríos Manzanares, Gaira y Fundación, son aquellas que presentan mayor amenaza ante estos eventos, ya que se encuentran en zonas de alto riesgo muy cercanas al cauce principal de los ríos.
- Los caudales estimados para las cuencas de los ríos Manzanares y Gaira, pueden estar sobredimensionados en relación a los caudales históricos reales en cada uno de los cauces, debido a que se calcularon a través de un modelo lluvia escorrentía, el cual no tiene en cuenta la infiltración y los usos reales de agua en las cuencas.