

Apoyo a las actividades del plan maestro Apartadó de cara al río, y actualización del modelo hidráulico del río Apartadó como estrategia para la disminución del riesgo a desastres por inundación.

**Carlos Daniel Suárez Díaz**

Trabajo de investigación o informe de práctica académica presentado como requisito parcial para optar al título de:

**Ingeniero Oceanográfico**

Asesores (a):

Carlos Alberto Palacio Tobón, Doctor en Ingeniería

Línea de Investigación:

Modelación Hidráulica

Universidad de Antioquia  
Facultad de Ingeniería, Escuela Ambiental  
Turbo, Colombia  
2022

---

**Cita**

(Suárez Díaz, C. D.2022)

**Referencia**

Suárez Díaz, C. D. (2022). *Apoyo a las actividades del plan maestro Apartadó de cara al río, y actualización del modelo hidráulico del río Apartadó como estrategia para la disminución del riesgo a desastres por inundación.* [Presencial] Universidad de Antioquia, Turbo, Colombia.

**Estilo APA 7 (2020)**



Ingeniería Oceanográfica



Biblioteca Carlos Gaviria Díaz

**Repositorio Institucional:** <http://bibliotecadigital.udea.edu.co>

Universidad de Antioquia - [www.udea.edu.co](http://www.udea.edu.co)

**Rector:** John Jairo Arboleda Céspedes.

**Decano/Director:** Jesús Francisco Vargas Bonilla.

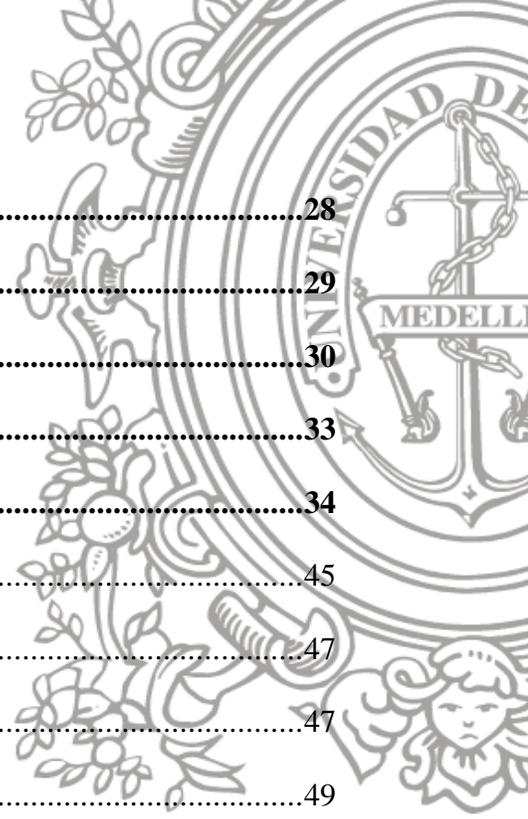
**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loiza

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexo

## TABLA DE CONTENIDO

Contenido	
1	Resumen.....5
2	Introducción .....6
3	Objetivo general .....7
3.1	Objetivos específicos .....7
4	Marco teórico. ....8
4.1	Cuenca hidrográfica. ....8
4.2	Cuenca rio Apartadó. ....9
4.3	Plan maestro Apartadó de cara al rio. ....10
4.4	Modelo hidrodinámico IBER. ....11
	<b>4.4.1 Condiciones internas Iber .....13</b>
	<b>4.4.2 Aplicaciones de Iber. ....15</b>
5	Metodología .....16
5.1	Descripción de la zona de estudio.....16
5.2	Apoyo a las actividades del plan maestro Apartadó de cara al rio .....17
5.3	Recopilación de información.....18
5.4	Trabajo de campo.....18
5.5	Actualización del modelo hidrodinámico.....22
	<b>5.5.1 Método del número de curva SCS. ....24</b>
6	Resultados y análisis.....26
6.1	Resultados salida de campo.....26
	<b>6.1.1 Esquema puentes. ....27</b>
6.2	Actualización modelo hidrodinámico. ....28

6.2.1	Imagen de fondo. ....	28
	Actualización de rugosidad del modelo. ....	29
6.2.2	Puentes en Iber. ....	30
6.2.3	Método de la curva ....	33
6.2.4	Resultados del modelo actualizado. ....	34
7	Conclusiones ....	45
8	Recomendaciones ....	47
9	Bibliografía ....	47
10	Anexos ....	49



## **1 Resumen**

El asentamiento a la orilla de los ríos siempre fue pretendido por nuestros ancestros, debido a la facilidad para la obtención del recurso hídrico, lo cual facilita tanto nuestra vida, sin embargo, es una de las grandes problemáticas que se presentan actualmente en el mundo.

Asentamientos en la orilla del río Apartadó, que se convirtieron posteriormente en grandes comunas y barrios, se ven afectados periódicamente por el desbordamiento del mismo, causando grandes pérdidas materiales y afectando un sin número de familias. Estos sectores son particularmente afectados debido a su ubicación dentro de la llanura de inundación del río, a esto se le suma la incorrecta gestión del cauce principal y las fuertes lluvias que se vienen presentando a causa del cambio climático.

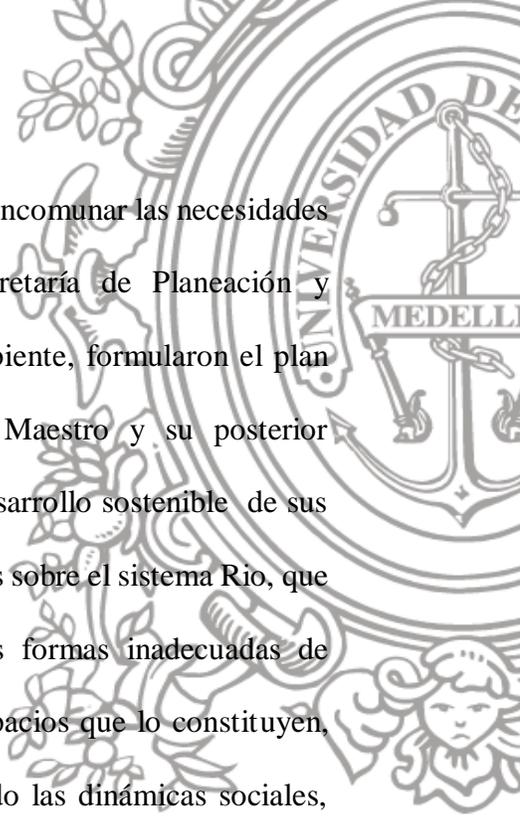
Apartadó, mediante la formulación del Plan maestro: Apartadó de cara al río, busca vincular al río Apartadó con los procesos urbanos que se vienen para el municipio, además de definir las políticas e intervenciones sobre el sistema del río.

En el desarrollo de esta práctica académica se apoyó la ejecución del plan maestro mediante actividades pedagógicas de charlas educativas sobre la importancia del río y el correcto uso del suelo, también se realizaron jornadas de siembra de árboles en las laderas del río en compañía de la comunidad y entidades públicas como Corpouraba, Futuraseo, Aguas Regionales etc. Por otro lado, se actualizó el modelo hidráulico existente del río a la versión más actual del software IBER, además se ajustaron parámetros como el uso del suelo y la rugosidad, también se ingresó la geometría de 3 puentes y diferentes descargas laterales significativas que se encuentran a lo largo del área de influencia del modelo, y por último se capacitó a 2 contratistas vinculados a la SAMA sobre el uso del modelo para garantizar el aprovechamiento del trabajo realizado.

## 2 Introducción

Colombia se enfrenta, periódicamente, a problemas de inundación con pérdidas humanas y detrimentos económicos incalculables. El municipio de Apartado no ha sido la excepción, en un periodo de 3 años, aproximadamente, ha tenido tres episodios de crecimiento y desbordamiento de su afluente principal, con afectación directa en barrios como San Fernando, Primero de Mayo, López, Laureles, entre otros. La situación de estos barrios reseñan los problemas que se generan en las áreas urbanas como resultado de una mala planificación del territorio y la ubicación de asentamientos humanos en lugares vulnerables de ocupación, como es el caso de las planicies de inundación, propias de corrientes y riachuelos, que son ocupadas en época de sequía, pero que, posteriormente, al darse el ciclo de las lluvias, las corrientes tratan de acomodarse a su cauce natural, ocasionando situaciones como las anteriormente mencionadas (Cardona, 2007).

Los ríos meándricos no son estáticos, ellos se mueven a lo ancho de su llanura de inundación, esto es conocido como migración del cauce y es la respuesta del mismo a las crecientes, las avenidas torrenciales e inundaciones, de esta manera el río regula la energía del flujo. La intervención antrópica de las cuencas, como es el caso de los ríos Apartadó y Vijagual, genera diversas situaciones que pueden favorecer dichos eventos, los cambios en el uso del suelo pueden disminuir los tiempos de concentración de la lluvia, esto se ve reflejado en un aumento súbito del nivel de las aguas, los canales de riego pueden cambiar la dirección de los flujos de agua y por tanto aumento o disminución en los niveles de las aguas, la conducción de aguas de alcantarillado puede generar problemas de estabilidad de las laderas, y producir taponamientos o socavaciones laterales o del cauce propiamente (E. Mejía, W. Balcázar, et al.2018).



Con el fin de buscar soluciones óptimas a esta problemática y mancomunar las necesidades actuales, la administración municipal, desde la unión de la Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial y la Secretaría de Agricultura y Medio Ambiente, formularon el plan maestro Apartado de cara al río. Con la formulación del Plan Maestro y su posterior implementación, se busca llevar al Municipio de Apartadó, hacia el desarrollo sostenible de sus territorios urbano y rural, con un conjunto de intervenciones estratégicas sobre el sistema Río, que logren impactar de manera positiva en el territorio, cambiando las formas inadecuadas de ocupación, generando e incrementando la calidad ecológica de los espacios que lo constituyen, con influencia en la calidad ambiental del suelo urbano, y recuperando las dinámicas sociales, económicas y culturales en torno al Río Apartadó.

### **3 Objetivo general**

Apoyar la ejecución del plan maestro Apartadó de cara al río y actualizar el modelo hidráulico existente del río Apartado para reflejar con mayor precisión el comportamiento y la dinámica del río y poder disminuir el tiempo de acción ante episodios de desastres por inundación.

#### **3.1 Objetivos específicos**

- Apoyar las actividades de siembra en las laderas del río de especies como Pichindé y Guadua, y demás actividades que realice la Administración Municipal en el marco del plan maestro Apartadó de cara al río.
- Realizar la revisión de los estudios hidrológicos del río Apartadó realizados a lo largo de los años.
- Realizar salidas de campo de inspección y recopilación de información relevante para el ajuste del modelo.

- Ajustar los parámetros del modelo existente y actualizarlo a la nueva versión disponible del software IBER.
- Ajustar la geometría del modelo con la introducción de puentes y datos de lluvia.
- Capacitar a funcionarios de la SAMA sobre el uso del software IBER.

#### **4 Marco teórico.**

##### **4.1 Cuenca hidrográfica.**

Según en UICN (Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza) una cuenca hidrográfica es un sistema, una unidad geográfica e hidrológica, formada por un río principal y todos sus territorios asociados entre el origen del río y su desembocadura.

Además, la cuenca hidrográfica incluye el área y los ecosistemas (territorios y ríos menores, aguas subterráneas o acuíferos, zonas costeras y su influencia en el mar), y sus interacciones que inciden en el curso del agua, tanto en su cantidad como en su calidad.

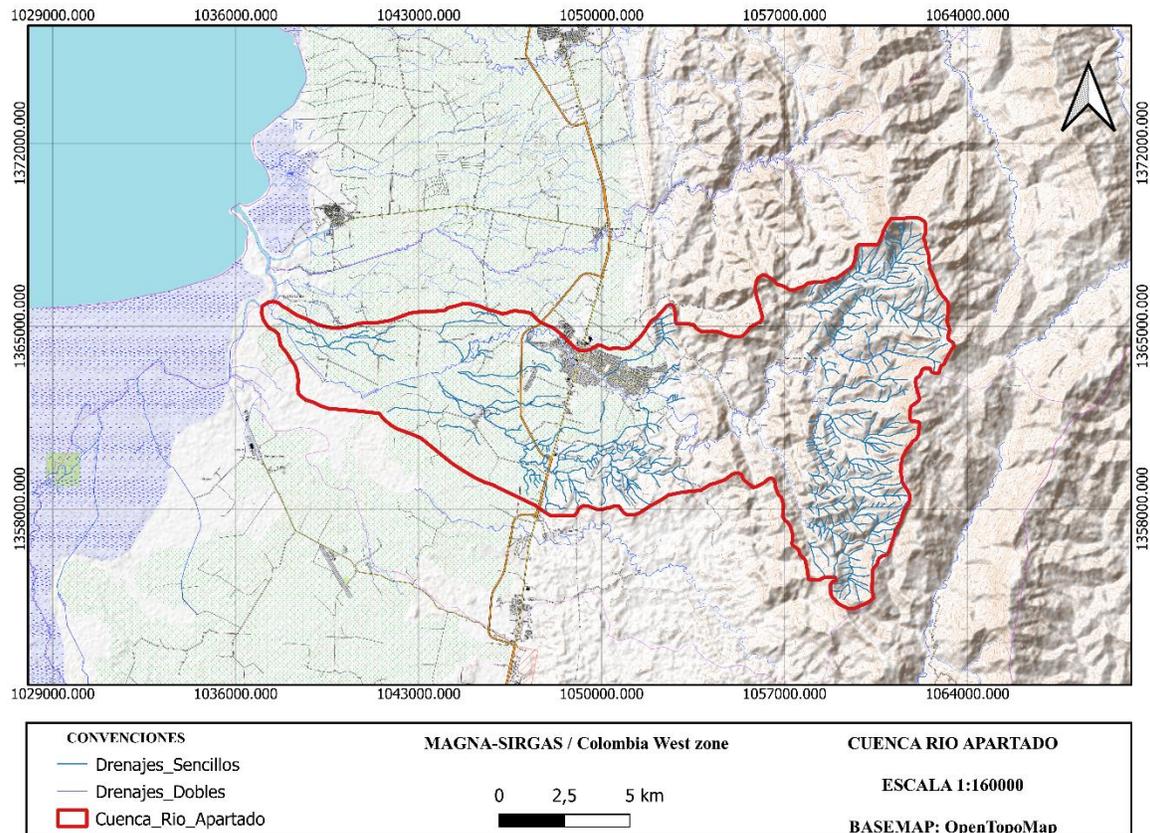
Para estudiar la cuenca, desde el ámbito dinámico y físico, es necesario involucrar diversas variables que también ayudan a la descripción morfológica de la cuenca, tales como, longitud, área, perímetro, ancho de la cuenca, factor de forma de Horton, pendiente, coeficiente de compacidad, elevación, hipsometría, orden del cauce, caudal, granulometría, batimetría, velocidad y rapidez de la corriente y rugosidad. Teniendo en cuenta la amplia cantidad de variables que afectan la dinámica fluvial, es necesario la implementación de modelos hidráulicos computacionales para predecir el comportamiento del río ante diferentes escenarios de intervención del cauce (García, 2020).

## 4.2 Cuenca río Apartadó.

El río Apartadó tiene su nacimiento en el alto de Carepa, en la serranía de Abibe, aproximadamente a 1089 msnm y desemboca en el río León, a 3 msnm. El área total de la cuenca hasta su desembocadura es de 163.53 km<sup>2</sup>. El Alto de Carepa es una zona de gran importancia hídrica en la región de Urabá, toda vez que en ella nacen además del Río Apartadó, los ríos, Carepa y Currulao (E. Mejía, W. Balcázar, et al.2018).

### Figura 1

*Mapa de la cuenca del río Apartadó.*



*Nota:* Elaboración propia.

El río Apartado inicia su recorrido en el alto de Carepa, descendiendo hasta cerca de San José de Apartado (a 120 msnm) por una zona montañosa con un cauce relativamente profundo y

en medio de altas pendientes. En sus cabeceras confluyen arroyos y quebradas donde se destacan, de sur a norte, el Mariano, la Linda, la Sucia, la Cristalina, el Cuchillo, la Victoria y el Muerto (hacia el occidente). Entre San José de Apartadó y la cabecera municipal el río tiene un régimen meándrico, con la formación de algunas terrazas aluviales y la incisión de un valle relativamente menos estrecho. Hasta la cabecera municipal el río Apartadó recorre aproximadamente 23 km y tiene un descenso de nivel desde la cota 1089 msnm. hasta 25 msnm (E. Mejía, W. Balcázar, et al.2018).

#### **4.3 Plan maestro Apartadó de cara al río.**

El río Apartadó conforma un sistema que está siendo ocupado de manera inadecuada por la población, generando conflictos de uso por la apropiación indebida, y, en consecuencia, el deterioro de sus componentes naturales y ecológicos desencadena problemáticas asociadas a: la amenaza y el riesgo por inundación, movimientos en masa y avenidas torrenciales; pérdida de biodiversidad de fauna y flora; déficit de espacios para la apropiación adecuada de los retiros de protección y de espacios para el esparcimiento y el disfrute del río como elemento fundamental estructurante del paisaje; alteración del paisaje asociado al río; deterioro de espacios para el desarrollo de actividades económicas, culturales y sociales; disminución de la calidad de vida de la población urbana que depende de la oferta de bienes y servicios ecosistémicos, principalmente asociados al sistema del río. Dada la identificación de la problemática anterior, la Alcaldía del municipio de Apartadó, en asocio con la Gobernación de Antioquia, reconoce la necesidad de un Plan Maestro rector que defina las políticas y las intervenciones sobre el sistema del Río Apartadó, el cual, para fines de su ordenamiento, se debe zonificar a partir del reconocimiento de tramos que

poseen atributos variables que los identifican y dan las pautas para su intervención. (2020, Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial de Apartadó, p.3)

Como estrategia para vincular el sistema del río Apartadó a las dinámicas y procesos urbano rurales del municipio, y articularlo con los proyectos estratégicos de la Gobernación de Antioquia, la Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial del municipio de Apartadó en alianza con la Secretaría de Infraestructura Gobernación de Antioquia, conformó un equipo de trabajo interdisciplinario para formular el *Plan Maestro: Apartadó de Cara al Río*, en el período comprendido entre los meses de diciembre de 2020 y agosto de 2021.

“El plan maestro será un instrumento que buscará poner en relación las distintas acciones de intervención sobre el territorio para la creación de condiciones ideales que regulen y promuevan, el desarrollo urbano - rural y/o, la actuación en las áreas de directa del río Apartadó” (2020, Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial de Apartadó, p.3).

#### **4.4 Modelo hidrodinámico IBER.**

Según ELSEVIER (Revista Internacional de Métodos Numéricos para Cálculo y Diseño de Ingeniería), Iber es un modelo matemático desarrollado por el grupo de Ingeniería del Agua y Medio Ambiente GEAMA (Universidad de a Coruña) y el Instituto Flumen (Universidad Politécnica de Cataluña, UPC y Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, CIMNE). Iber es un modelo numérico de simulación de flujo turbulento en lámina libre en régimen no permanente, y de procesos ambientales en hidráulica fluvial. Cuenta con tres módulos de cálculo principales, un módulo hidrodinámico, un módulo de turbulencia y un módulo de transporte de sedimentos.

Algunos de los campos de aplicación de la versión actual de Iber son:

- Simulación del flujo en lámina libre en cauces naturales.
- Evaluación de zonas inundables. Cálculo de las zonas de flujo preferente.
- Cálculo hidráulico de encauzamientos.
- Cálculo hidráulico de redes de canales en lámina libre.
- Cálculo de corrientes de marea en estuarios.
- Estabilidad de los sedimentos del lecho.
- Procesos de erosión y sedimentación por transporte de material granular.

En el módulo hidrodinámico, el cual constituye la base del IBER, se resuelven las ecuaciones de aguas someras bidimensionales promediadas en profundidad o ecuaciones de St. Venant bidimensionales, incorporando los efectos de la turbulencia y rozamiento superficial por viento:

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hU_x}{\partial x} + \frac{\partial hU_y}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_x) + \frac{\partial}{\partial x}\left(hU_x^2 + g\frac{h^2}{2}\right) + \frac{\partial}{\partial y}(hU_xU_y)$$

$$= -gh\frac{\partial z_b}{\partial x} + \frac{\tau_{s,x}}{\rho} - \frac{\tau_{b,x}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_x}{\partial y}\right)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(hU_y) + \frac{\partial}{\partial x}(hU_xU_y) + \frac{\partial}{\partial y}\left(hU_y^2 + g\frac{h^2}{2}\right)$$

$$= -gh\frac{\partial z_b}{\partial y} + \frac{\tau_{s,y}}{\rho} - \frac{\tau_{b,y}}{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(v_t h \frac{\partial U_y}{\partial y}\right)$$

en donde  $h$  es el calado,  $U_x$ ,  $U_y$  son las velocidades horizontales promediadas en profundidad,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho$  es la densidad del agua,  $z_b$  es la cota del fondo,  $\tau_s$  es la fricción en la superficie libre debida al rozamiento producido por el viento,  $\tau_b$  es la fricción debida al rozamiento del fondo y  $\nu_t$  es la viscosidad turbulenta. La fricción de fondo se evalúa mediante la fórmula de Manning como:

$$\tau_{b,x} = \rho g h \frac{n^2 U_x |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}}, \quad \tau_{b,y} = \rho g h \frac{n^2 U_y |U|^2}{h^{\frac{4}{3}}}$$

#### 4.4.1 Condiciones internas Iber

Las condiciones internas se utilizan para modelar estructuras hidráulicas tipo compuertas, vertederos o puentes que entran en carga. En estos casos las ecuaciones de St. Venant dejan de ser válidas por incumplirse las hipótesis de presión hidrostática y velocidad uniforme en profundidad, y por lo tanto es más adecuado calcular la relación entre el caudal y la pérdida de carga a través de dichas estructuras mediante ecuaciones de descarga específicas. En Iber se consideran condiciones internas de flujo bajo compuerta y de flujo sobre vertedero en lámina libre. El flujo a través de tableros de puentes anegados se puede calcular como la combinación de las 2 condiciones anteriores. En este caso el caudal total desaguado se obtiene como la suma del caudal bajo compuerta y del caudal sobre el vertedero. Las ecuaciones de desagüe y variables utilizadas en cada caso se especifican a continuación:

**Tabla 1**

*Ecuaciones utilizadas en las condiciones internas, siempre y cuando se cumpla  $Z_U - Z_B > h$*

Compuerta-Libre	$(Z_D - Z_B)/(Z_U - Z_B) < 0,67$	$Q = C_{dg} B h \sqrt{2g(Z_U - Z_B)}$
Compuerta-Transición	$0,67 < (Z_D - Z_V)/(Z_U - Z_B) < 0,80$	$Q = C_{dg} B h \sqrt{6g(Z_U - Z_D)}$
Compuerta-Anegada	$(Z_D - Z_B)/(Z_U - Z_B) > 0,80$	$Q = C_{dg}' B h \sqrt{2g(Z_U - Z_D)}$
Vertedero-Libre	$(Z_D - Z_B)/(Z_U - Z_B) < 0,67$	$Q = C_{dw} B (Z_U - Z_w)^{1,5}$
Vertedero-Anegado	$(Z_D - Z_B)/(Z_U - Z_B) < 0,67$	$Q = 2,6 C_{dw} B (Z_U - Z_w)^{0,5} (Z_D - Z_w)$

**Nota:** Tabla tomada de Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, por E. Bladé, 2012.

donde  $C_{dg}$  es el coeficiente de desagüe para compuerta libre,  $C_{dg}'$  es el coeficiente de desagüe para compuerta sumergida,  $C_{dw}$  es el coeficiente de desagüe del vertedero y  $B$  es el ancho de paso de la estructura (E. Bladé, 2012).

Para el tratamiento de los frentes seco-mojado se define una tolerancia seco-mojado, de forma que, si el calado en un volumen finito es menor a dicha tolerancia, el elemento se considera seco y no se incluye en el cálculo. La altura de agua nunca se fuerza a cero, con el fin de evitar pérdidas de masa en el interior del dominio de cálculo. De esta manera se define el frente de inundación como el límite entre las zonas con calado inferior a la tolerancia seco-mojado y las zonas con calado superior a dicho límite. En el frente de inundación se impone una condición de reflexión, que consiste en imponer a cero tanto la velocidad perpendicular al frente como el gradiente de la lámina de agua en dicha dirección (E. Bladé, 2012).

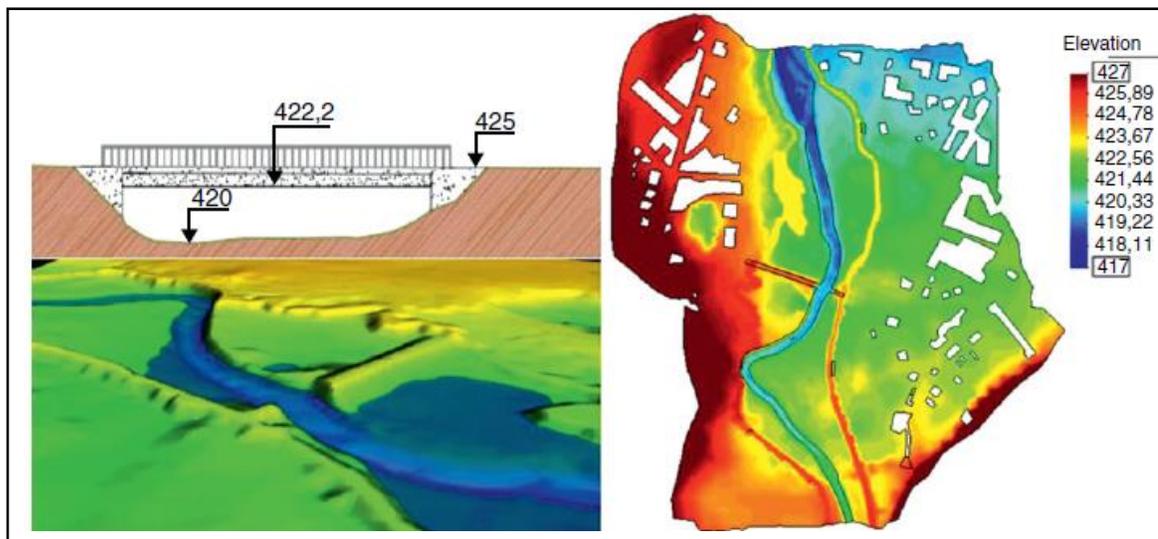
#### 4.4.2 Aplicaciones de Iber.

##### Calculo de zonas inundables en un tramo de río con un puente anegado

La resistencia al flujo que generan estructuras transversales al cauce de un río como vertederos, compuertas o tableros de puentes es de gran importancia en el cálculo de zonas inundables.

#### Figura 2

*Ejemplo de sección transversal con vista 3D del talud de un puente (izquierda), y ejemplo de MDT con altimetría de cauce y geometrías existentes(derecha).*



**Nota:** Figura tomada de Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos, por E. Bladé,2012.

Para modelizar los efectos del puente se introducen los taludes transversales y estribos como una sobreelevación del MDT utilizado en el modelo. El tablero se introduce mediante una condición interna tipo combinación compuerta-vertedero, de forma que en caso de que la lámina de agua toque la parte inferior del tablero, el caudal que pasa bajo el tablero se calcula mediante una ecuación de descarga tipo compuerta, y si el agua supera la cota superior del tablero, el caudal

que pasa sobre el tablero se calcula mediante una ecuación de descarga tipo vertedero. Respecto a las motas longitudinales de encauzamiento (jarillones), en el caso de que puedan ser rebasadas por el agua debido a que su cota de coronación no es lo suficientemente elevada, es necesario introducirlas como parte del MDT. En este caso es necesario que los elementos de la malla en torno a la mota sean lo suficientemente finos como para definir en detalle la coronación de la mota; en caso contrario, el error en los resultados puede ser importante. En caso de que las motas no vayan a ser superadas por el agua pueden modelizarse como contornos tipo pared, en cuyo caso la malla de cálculo únicamente se extiende en la zona comprendida entre motas (E. Bladéa, 2012).

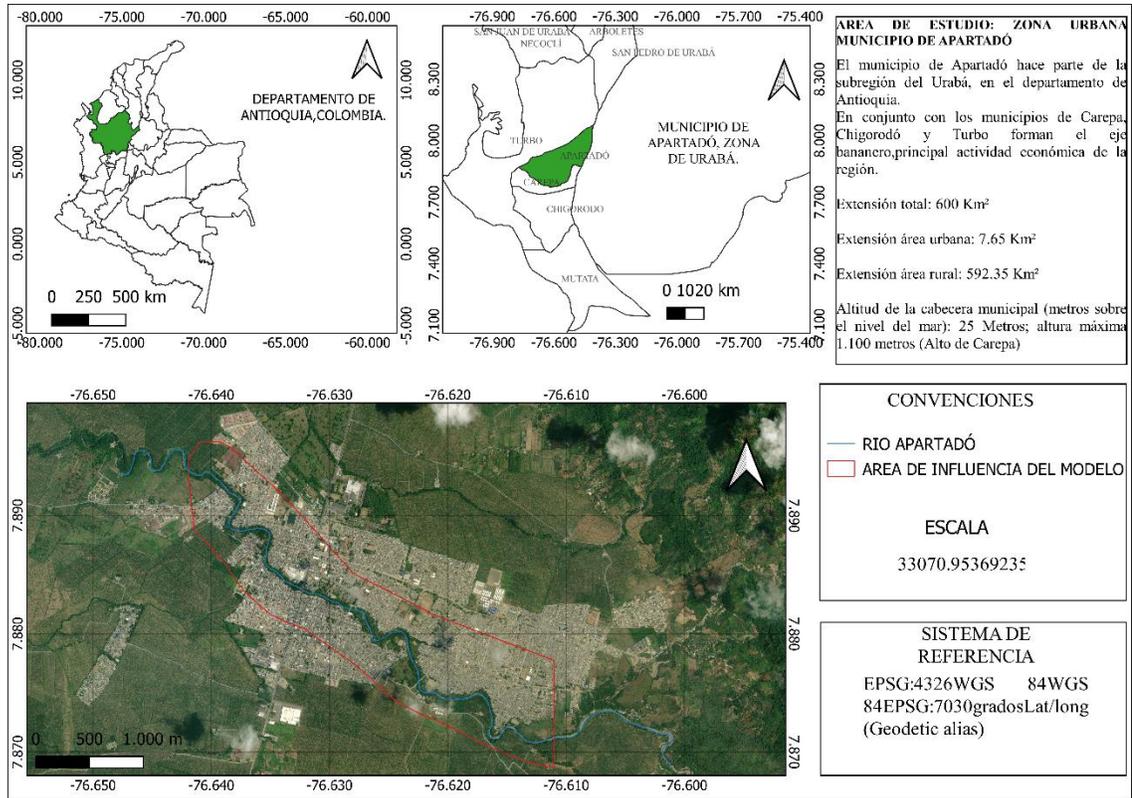
## **5 Metodología**

### **5.1 Descripción de la zona de estudio**

En lengua Katía, Urabá significa 'La tierra prometida'. Es la salida de Antioquia al mar, y la región bananera y platanera más importante del país. En ella se combinan la cultura paisa, chocoana, costeña e indígena y su principal fuente económica es la agroindustria y el turismo. El municipio más desarrollado es Apartadó, en donde se ubican las empresas comerciales más importantes (COLOMBIA, 2018). El municipio de Apartadó se encuentra ubicado en la zona noroeste del Departamento de Antioquia en las coordenadas  $7^{\circ}52'40''$  de latitud norte y  $76^{\circ}37'44''$  de longitud oeste, en la Subregión del Urabá Antioqueño integrada con los municipios de Arboletes, Turbo, Necoclí, San Juan de Urabá, San Pedro de Urabá, Chigorodó, Carepa, Mutatá, Vigía del Fuerte y Murindó (Apartadó, 2022).

### **Figura 3**

Mapa de ubicación de la zona de estudio.



**Nota:** Elaboración propia, ubicación de la zona de estudio con generalidades geográficas.

## 5.2 Apoyo a las actividades del plan maestro Apartadó de cara al río

En el marco del plan maestro Apartadó de cara el río, se llevó a cabo una estrategia llamada “Río Vivo”, esta actividad se realizó en los barrios que se ven más afectados por las inundaciones en el municipio, como lo son el barrio Primero de Mayo, San Fernando, El Concejo y López, teniendo como objetivo integrar a la comunidad en los procesos de mitigación a la erosión del afluente principal, mediante siembra de árboles como Pechindé y recuperación de fauna con especies frutales. También se realizaron campañas de capacitación a la comunidad sobre la dinámica propia del río, la influencia de las obras de protección artificiales y el cuidado del mismo.

### **5.3 Recopilación de información.**

Durante la recopilación de información en las bases de datos de la Alcaldía de Apartadó y la Universidad de Antioquia, se encontraron diferentes trabajos realizados en la cuenca del río Apartadó desde el año 2018 y otros más actuales entre los cuales se destacan “ESTUDIOS HIDROLOGICOS, HIDRAULICOS, GEOLOGICOS Y GEOTECNICOS EN SECTORES CRITICOS DEL RIO APARTADÓ Y EL RIO VIJAGUAL COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DE EMERGENCIAS Y DESASTRES POR INUNDACIONES EN EL MUNICIPIO DE APARTADÓ-DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA”, realizado por un equipo de consultoría representado por los Ingenieros Mejía Álvarez Elizabeth y Balcázar Botero William en el año 2018, también se destaca el trabajo del Ingeniero Álvarez Rengifo Andrés Mauricio titulado “USO DE LA MODELACIÓN HIDRÁULICA DE CRECIENTES COMO HERRAMIENTA DE GESTIÓN PARA LA ELABORACIÓN DE PLANES Y ESTRATEGIAS PARA REDUCIR EL PELIGRO DE INUNDACIONES”, realizado en el presente año y el trabajo del Ingeniero García Berrio Luis Alberto “INFORME FINAL DE PRACTICA ACADÉMICA EN LA SECRETARÍA MUNICIPAL DE AGRICULTURA Y MEDIO AMBIENTE DEL MUNICIPIO DE APARTADÓ (SAMA)”, también realizado en el presente año. Los trabajos anteriormente mencionados contienen información relacionada a la hidrodinámica, geología, hidrología, flora, fauna y demás procesos asociados a la cuenca del río Apartadó.

### **5.4 Trabajo de campo.**

El día 20 de marzo del presente año se realizó una salida de campo para la identificación y medición de variables necesarias para la actualización del modelo, con ayuda de un GPS de mano marca Garmin, captamos los puntos de inicio y fin de los puentes, con ayuda de una cinta métrica,

una cuerda de 20 m marcada cada metro y un pesa de 2 kg, se midieron variables como largo del puente, ancho de placa, altura del puente desde la cota más baja y demás dimensiones de las estructuras que soportaban los puentes de interés las cuales son necesarias para el ingreso de estas geometrías a IBER.

### Ilustración 1

Puente principal de Apartadó.



**Nota:** El puente principal de Apartadó ha presentado diferentes reformas a lo largo de los años por parte de las administraciones de turno, durante los episodios de crecienta del río este puente no ha presentado inconvenientes con el flujo del agua en los caudales registrados.

## Ilustración 2

### Puente de la Libertad



**Nota:** El puente de la libertad es una importante obra encargada de comunicar los barrios, Serranía, Vélez, Laureles y los Pinos con la zona rosa del municipio. Durante los últimos episodios

de crecimiento del caudal ha presentado obstrucción de material vegetal, lo cual ha ocasionado inundaciones leves en los sectores aledaños al mismo.

### Ilustración 3.

Puente de San Fernando.



*Nota:* Este puente se encuentra en el barrio San Fernando, este barrio es por mucho uno de los más afectados en los episodios de desbordamiento del cauce, ya que está ubicado en la llanura de inundación del río.

### 5.5 Actualización del modelo hidrodinámico.

En base al trabajo realizado por (García Berrio, 2022) en la Secretaría Municipal de Agricultura y Medio Ambiente e información adicional proporcionada por entidades gubernamentales como Corpouraba, Aguas Regionales de Urabá y la Secretaría de Planeación y Ordenamiento Territorial del municipio de Apartadó, se llevó a cabo la actualización del modelo hidrodinámico. Se actualizó el modelo a la última versión de software IBER (V3.1), además se identificaron, con ayuda de imágenes satelitales, los usos del suelo más relevantes sobre el área de influencia y se agregaron con sus respectivos valores de rugosidad, también se ingresaron al modelo 3 puentes ubicados en los barrios la Libertad, San Fernando y sobre la carrera 100, finalmente, mediante el método del número de curva se ingresó al modelo valores de precipitación, con el fin de calcular la esorrentía directa, la cual hace referencia al aporte realizado por los alcantarillados al caudal total. Por otro lado, se ejecutó el modelo con los mismos periodos de retorno utilizados por Berrio (García Berrio, 2022 con el fin de comparar resultados.

**Tabla 2**

<b>Comparativa de Área Superficial Cubierta Para Diferentes Periodos de Retorno (TR)</b>				
<b>(TR) en años</b>	4	50	100	500
<b>Caudal (m3/s)</b>	100.8	199.82	226.87	289.90
<b>Área (m2)</b>	243702.247	380570.846	432073.352	597596.474

*Nota:* Tabla tomada de (García Berrio, 2022).

Usando la base de datos de IBER se asignaron valores de rugosidad (n de Manning) a los diferentes usos de suelo identificados.

**Tabla 3**

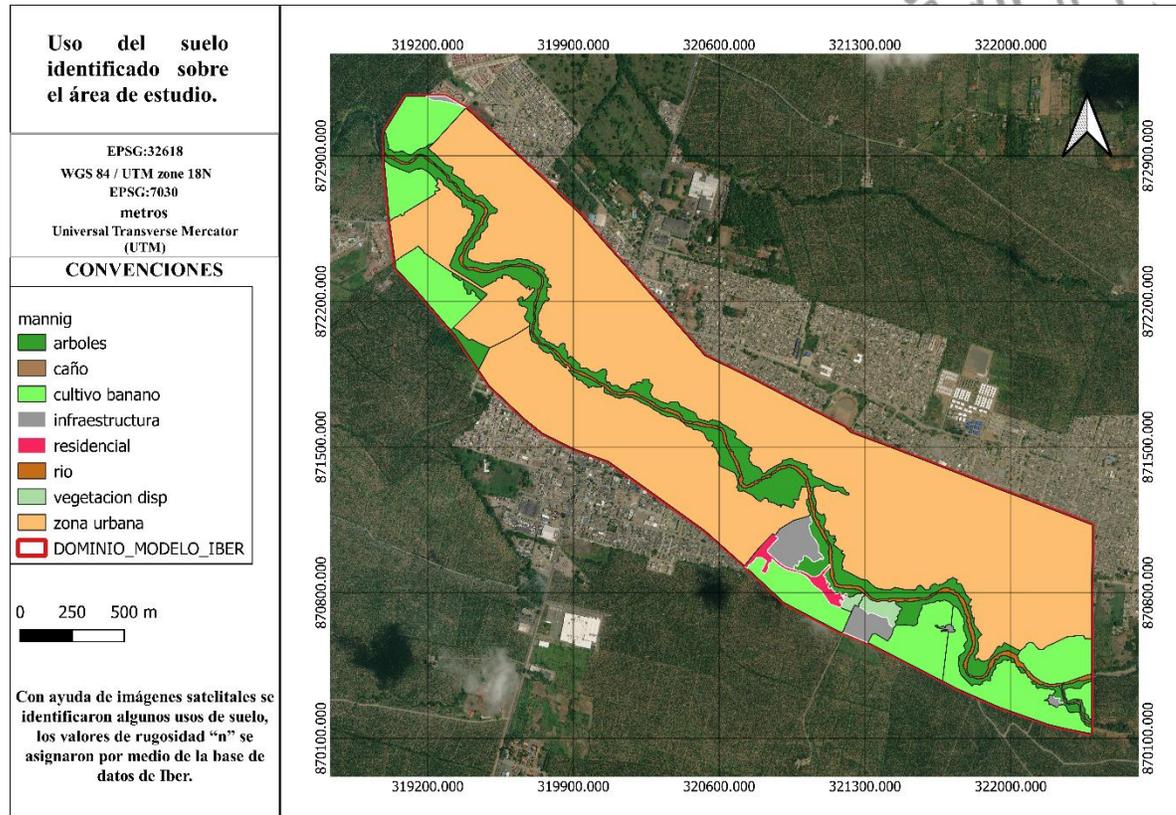
Uso del suelo	Rugosidad (n)
Arboles	0,12
Caño	0,025
Cultivo de banano	0,018
Infraestructura	0,02
Residencial	0,15
Rio	0,025
Vegetación dispersa	0,08
Zona urbana	0,1

**Nota:** Elaboración propia, datos obtenidos de (IBER,2022).

Con ayuda del software libre QGIS, el cual sirve para el tratamiento de información geográfica, se realizó un mapa de rugosidad el cual fue posteriormente exportado a IBER para la asignación automática del uso del suelo al modelo, también se extrajo mediante este software una imagen georreferenciada con el cauce principal enmarcado para sobreponer en el modelo e identificar con mayor facilidad las áreas afectadas durante las inundaciones.

**Figura 4**

*Mapa de usos de suelo identificados usando imágenes satelitales en el área de influencia del modelo.*



*Nota:* Elaboración propia.

Por último, con los datos recopilados en la salida de campo realizada el 20 de marzo e información proporcionada por las entidades gubernamentales mencionadas anteriormente se ingresó la geometría de los puentes La libertad, San Fernando y el puente principal de Apartadó.

### 5.5.1 Método del número de curva SCS.

Es un método empírico utilizado para calcular la escorrentía directa ( $p_e$ ). Fue desarrollado por el Servicio de Recursos Naturales de USDA (United States Department of Agriculture en

1972 (anteriormente llamada Servicio de Conservación de Suelos o SCS, por lo que el número aún se conoce en la literatura como “número de curva de escorrentía SCS”).

El método se desarrolló a partir de un análisis empírico de la escorrentía de pequeñas cuencas y parcelas de ladera monitoreadas por el USDA, con base al grupo de suelo hidrológico del área, el uso del suelo, el tratamiento y la condición hidrológica (USDA-SCS,1985).

La suposición básica del método es que para una tormenta la escorrentía directa ( $P_e$ ) es siempre menor o igual que la precipitación (P), y una vez la escorrentía inicie, la cantidad de agua retenida en la cuenca ( $f_a$ ) es menor o igual a la retención potencial máxima (S). Existe una cierta cantidad de precipitación ( $I_a$ ). (Abstracción inicial antes del lleno de encharcamiento) para la cual no ocurrirá escorrentía. Luego, la escorrentía potencial es  $P-I_a$  (USDA-SCS, 1985).

La hipótesis del método SCS consiste en suponer que son iguales las relaciones de las dos cantidades reales y las dos cantidades potenciales, es decir:

$$\frac{F_a}{S} = \frac{P_e}{P-I_a} \quad \text{Por continuidad} \quad P = P_e + I_a + F_a \Rightarrow \frac{P-P_e-I_a}{S} = \frac{P_e}{P-I_a} \Rightarrow P_e = \frac{(P-I_a)^2}{P-I_a-S}$$

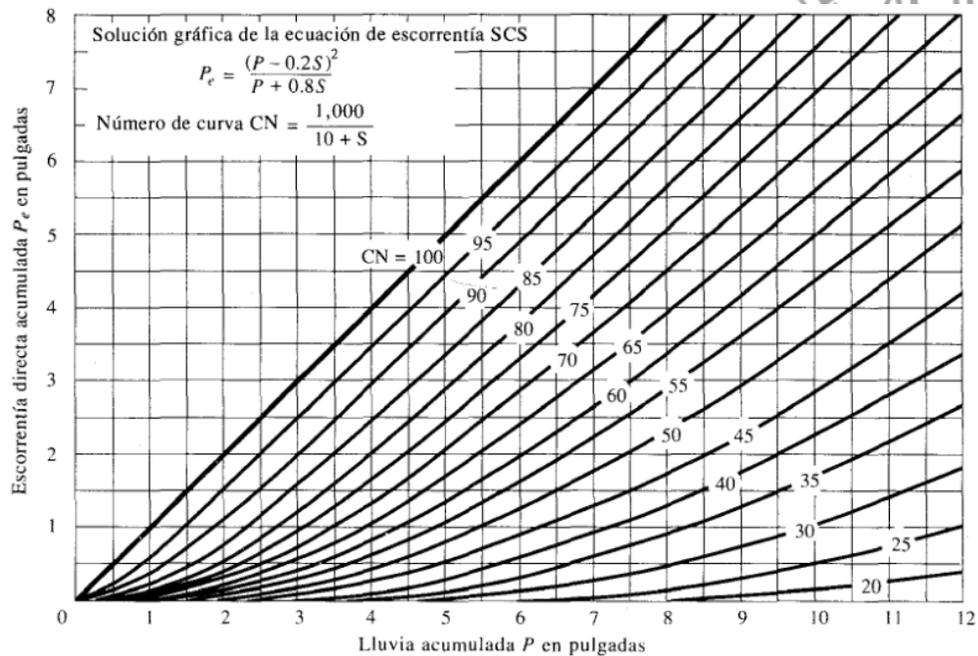
Lo cual deriva en la ecuación básica para el cálculo de la escorrentía directa de la tormenta.

Al estudiar los resultados obtenidos para muchas cuencas experimentales pequeñas, se desarrolló una relación empírica  $I_a = 0,2S$  con base en  $P_e = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S}$

EL SCS realizó curvas para representar de forma gráfica la información de **P** y **P<sub>e</sub>** para muchas cuencas, y utilizó, para estandarizar las curvas, un número adimensional que nombré el NÚMERO DE CURVA, NC, tal que  $0 \leq NC \leq 100$  (NC=100 para superficies impermeables y láminas de agua, y  $NC < 100$  para superficies naturales).

**Figura 5**

Solución gráfica de la ecuación de escorrentía aplicada en el método.



*Nota:* Tomado de USDA-SCS. 1985. National Engineering Handbook, Section 4 - Hydrology. Washington, D.C.: USDA-SCS.

## 6 Resultados y análisis

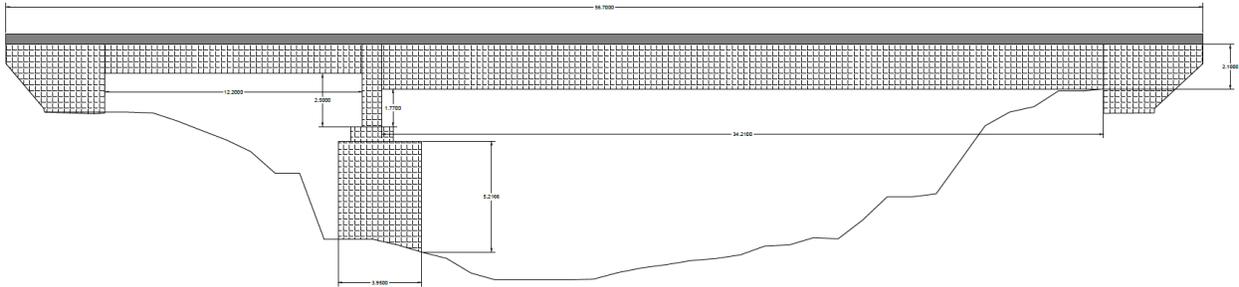
### 6.1 Resultados salida de campo.

Durante la salida de campo que se llevó a cabo con el fin de recopilar información de suma importancia para actualizar el modelo, se visitaron 3 importantes puentes vehiculares ubicados en los barrios La libertad, Vélez y San Fernando respectivamente, los cuales se cree que tienen una gran influencia en la dinámica del río en episodios de desbordamiento del mismo. En la salida se realizaron mediciones como el ancho del puente, espesor del tablero y altura del puente respecto a la cota más baja del cauce.

### 6.1.1 Esquema puentes.

**Figura 6**

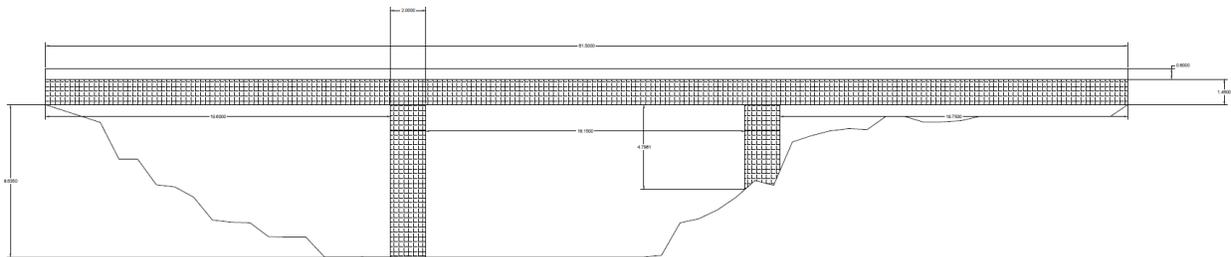
Vista frontal puente La libertad.



*Nota:* Elaboración propia, hecho con Autodesk AutoCAD 2020.

**Figura 7**

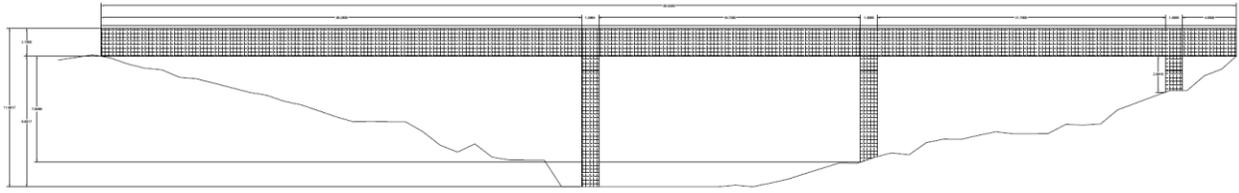
Vista frontal puente principal de Apartadó (crr 100).



*Nota:* Elaboración propia, hecho con Autodesk AutoCAD 2020.

**Figura 8**

Vista frontal puente San Fernando.



*Nota:* Elaboración propia, hecho con Autodesk AutoCAD 2020.

## **6.2 Actualización modelo hidrodinámico.**

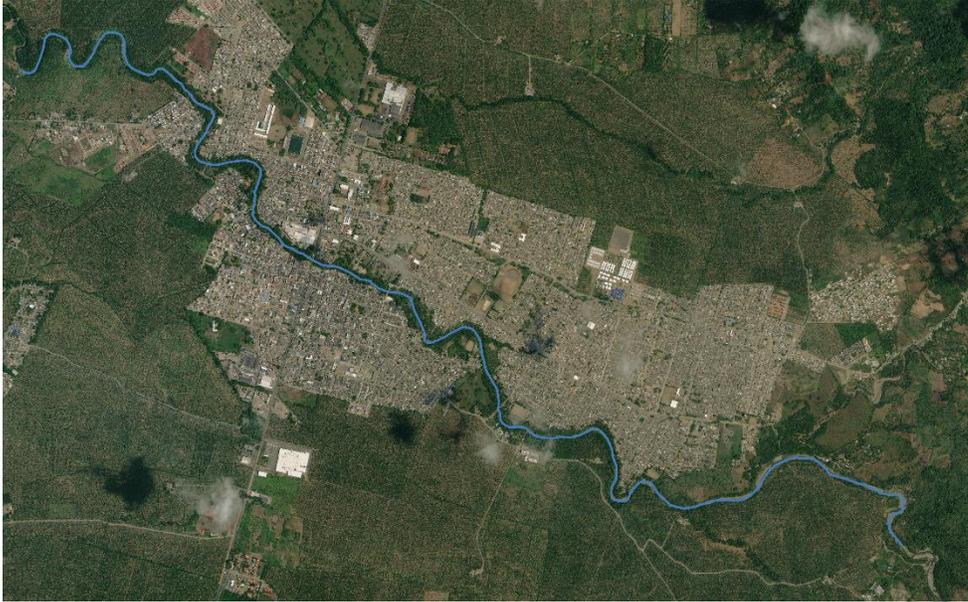
En base al trabajo realizado por (García, 2020), se realizó la actualización del modelo, ingresando una imagen de fondo del casco urbano del municipio de Apartadó, se identificó, con ayuda de la imagen satelital, los usos del suelo más relevantes dentro del área de influencia del modelo para posteriormente ingresarlos a Iber en el apartado de rugosidad, la cual tienen una gran influencia en el comportamiento del agua en episodios lluviosos y por tanto en la dinámica del río; por otro lado se ingresaron al modelo 3 puentes los cuales tienen un impacto importante en el flujo del agua y los aportes por escorrentía.

### **6.2.1 Imagen de fondo.**

Para importar la imagen de fondo al modelo, se realizó la corrección de las coordenadas en el software Qgis de la topografía (DEM) con el fin de que coincidieran con la imagen satelital extraída de SAS PLANET, el cual es un software que se encuentra enlazado con diferentes satélites en todo el mundo y permite obtener productos cartográficos de cualquier parte del mundo.

### **Figura 9**

Imagen de fondo utilizada para actualizar el modelo hidrodinámico.



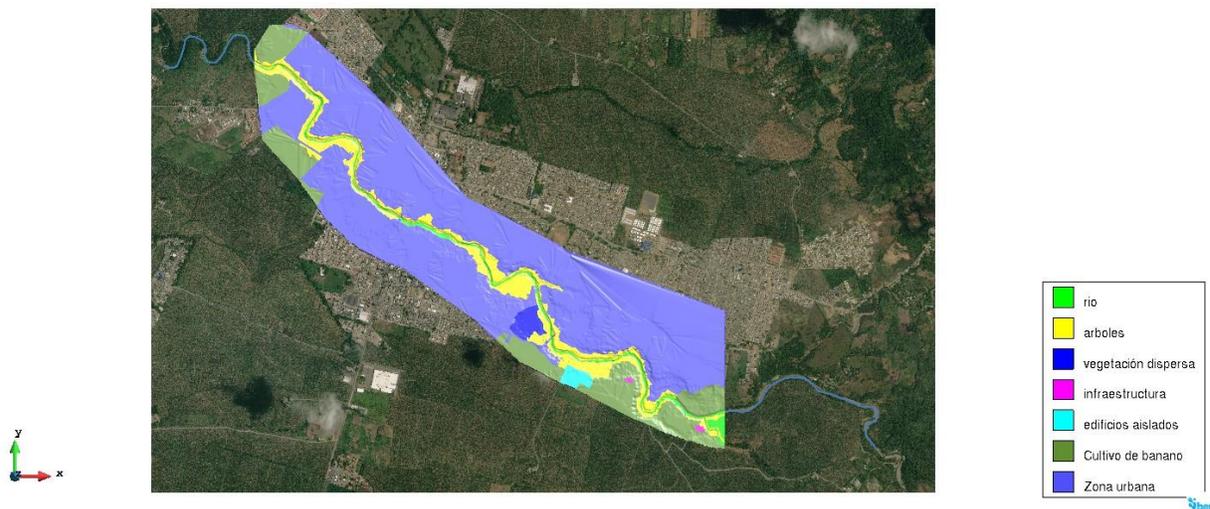
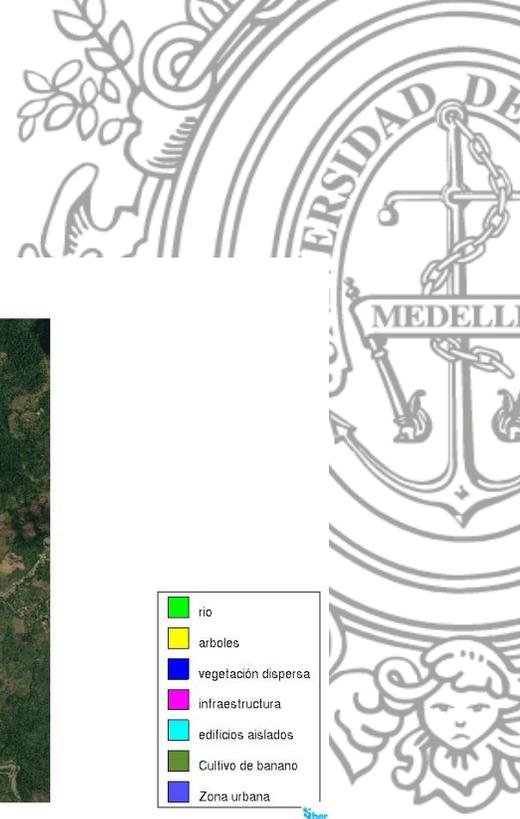
*Nota:* Imagen satelital del casco urbano del municipio de Apartadó y cauce del río enmarcado con polilínea color azul. Extraída de SAS PLANET 200606.

### **Actualización de rugosidad del modelo.**

Con los usos de suelo identificados y clasificados en Qgis, se importan al Iber mediante el apartado de rugosidad, la cual definimos con la ayuda de la (Tabla 3).

### **Figura 10**

Clasificación de usos del suelo con su respectivo número de Manning en Iber.



**Nota:** Visualización de la rugosidad en el modelo Iber.

### 6.2.2 Puentes en Iber.

Con los resultados obtenidos en el apartado (5.1.1) se realizaron tablas en Excel para cada puente con los siguientes datos:

**Tabla 4**

**Puente la libertad**

Distancia relativa	Tablero superior (m)	Tablero inferior (m)
0.0	28.8700	27.0000
0.0001	30.7400	28.8700
0.1900	30.7400	28.8700
0.1901	28.8700	20.4500
0.2600	28.1400	20.4500

0.2601	30.7400	28.1400
1	30.7400	27.0000

**Nota: Distancia relativa:** Es el porcentaje de apertura del puente entre pilotes; **Tablero superior:** Hace referencia a la cota de la parte más alta del tablero de cada puente; **Tablero inferior:** Hace referencia a la cota de la parte más baja de cada puente. Cabe resaltar que para cada valor de estas variables se toma como referencia el punto de partida del puente.

**Tabla 5**

**Puente principal de Apartadó**

Distancia relativa	Tablero superior (m)	Tablero inferior (m)
0.0	30.7110	28.6610
0.3200	30.7110	28.6610
0.3201	28.6610	20.0260
0.3500	28.6610	20.0260
0.3501	30.7110	28.6610
0.6500	30.7110	28.6610
0.6501	28.6610	23.8629
0.6800	28.6610	23.8629
0.6801	30.7110	28.6610
1	30.7400	27.0000

**Nota: Distancia relativa:** Es el porcentaje de apertura del puente entre pilotes; **Tablero superior:** Hace referencia a la cota de la parte más alta del tablero de cada puente; **Tablero inferior:** Hace

referencia a la cota de la parte más baja de cada puente. Cabe resaltar que para cada valor de estas variables se toma como referencia el punto de partida del puente.

**Tabla 6**

**Puente de San Fernando**

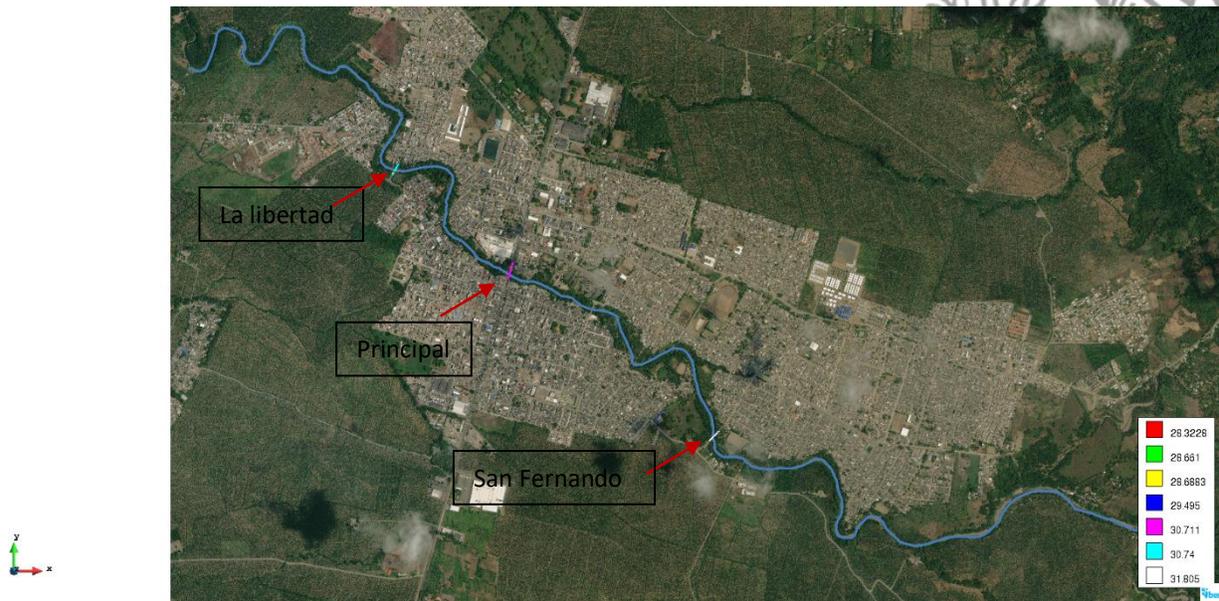
Distancia relativa	Tablero superior (m)	Tablero inferior (m)
0.0	31.8050	29.4950
0.4200	31.8050	29.4950
0.4201	29.4950	19.6933
0.4400	29.4950	19.6933
0.4401	31.8050	29.4950
0.6700	31.8050	29.4950
0.6701	29.4950	21.5461
0.6800	29.4950	21.5461
0.6801	31.8050	29.4950
0.9400	31.8050	29.4950
0.9401	29.4950	26.8032
0.9500	29.4950	26.8032
0.9501	31.8050	29.4950
1	31.8050	29.4950

**Nota: Distancia relativa:** Es el porcentaje de apertura del puente entre pilotes; **Tablero superior:** Hace referencia a la cota de la parte más alta del tablero de cada puente; **Tablero inferior:** Hace

referencia a la cota de la parte más baja de cada puente. Cabe resaltar que para cada valor de estas variables se toma como referencia el punto de partida del puente.

**Figura 11**

Visualización puentes en el software Iber.



**Nota:** Visualización de los puentes en el software Iber. En la imagen se pueden observar los puentes La libertad, principal y San Fernando en colores magenta, rosa y blanco respectivamente.

### 6.2.3 Método de curva

Para la implementación del método de curva, se define un hietograma, el cual es básicamente es una representación gráfica de la distribución de la intensidad de la lluvia en un periodo de tiempo determinado, posterior a esto se le asigna este hietograma a las áreas donde se

pretende modelar dicha lluvia dentro del área de influencia del modelo. Por último, se define las pérdidas por infiltración de cada área, la cual va depender directamente de su rugosidad.

#### 6.2.4 Resultados del modelo actualizado.

Con los datos del modelo actualizados, se realizó la modelación con los mismos valores utilizados por (Garcia,2022), los cuales podemos encontrar en (Tabla 2), teniendo como resultado los calados, números de Froude y cota del agua para los respectivos periodos de retorno.

**Figura 12**

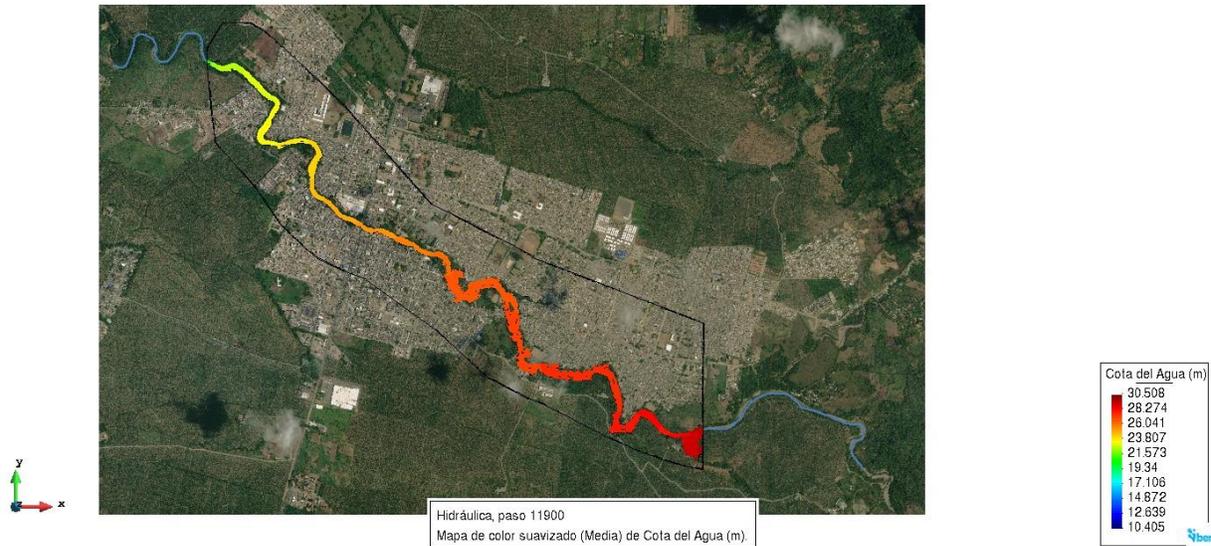
*Calado para un periodo de retorno correspondiente a 4 años.*



**Nota:** En la imagen se puede observar la mancha de inundación producida por un caudal de 100,8  $m^3/s$ , correspondiente a un periodo de retorno de 4 años. También se puede apreciar que el caudal presentado para este caso alcanza un calado entre 0,5 y 4 metros, por tanto, no se produce desbordamiento del río en ninguna de las zonas bajas.

**Figura 13**

*Cota del agua para un periodo de retorno correspondiente a 4 años.*



**Nota:** Se puede observar en la imagen la cota del agua máxima, que genera un caudal de  $100,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 4 años, presentando diferencias de altura de 21 metros hasta los 30 metros, encontrando una diferencia de 5 metros a los niveles normales del agua en el cauce.

**Figura 14**

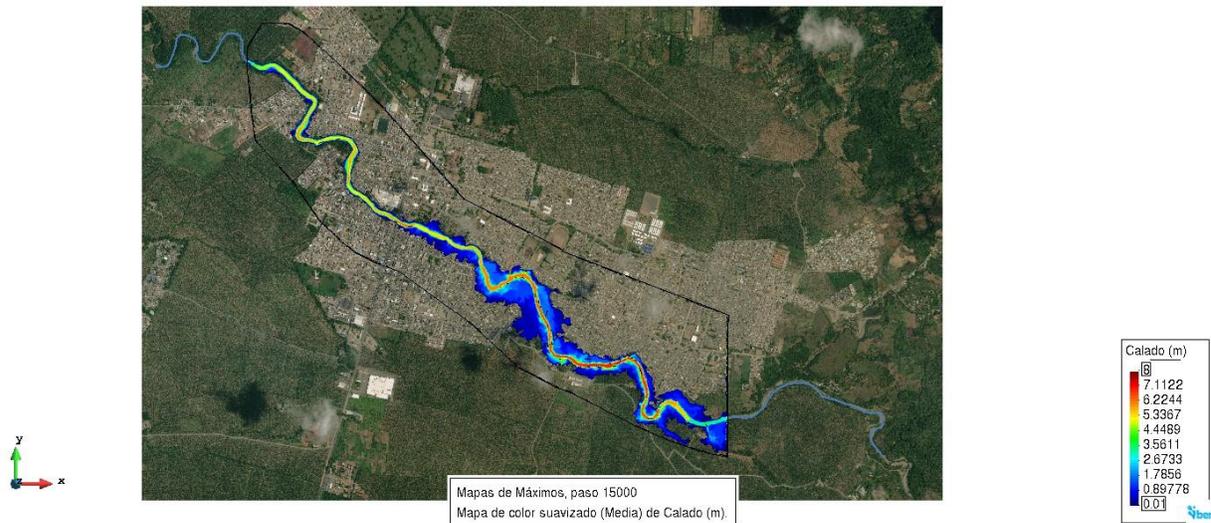
*Numero de froude para un periodo de retorno correspondiente a 4 años.*



**Nota:** Se puede observar en la imagen, los resultados arrojados por el modelo para el numero de froude para un caudal de  $100,8 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 4 años; obteniendo resultados constantes y menores a 1, lo cual hace referencia a un flujo subcrítico durante su paso del caudal por la zona urbana.

## Figura 15

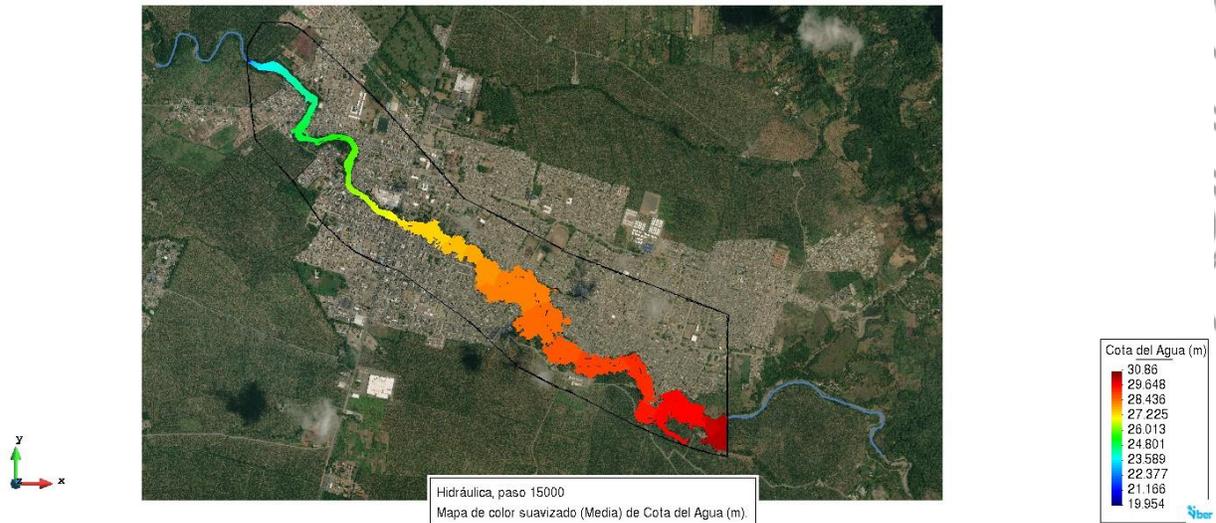
Calado para un periodo de retorno correspondiente a 50 años.



**Nota:** En la imagen se puede observar la mancha de inundación producida por un caudal de  $199,82 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 50 años. También se observa que, en barrios como el Concejo bajo, San Fernando, Primero de mayo, las brisas y Pueblo Nuevo, el agua alcanza un calado entre 5 y 7 metros de altura, provocando desbordamiento del caudal y causando afectaciones en estos barrios.

**Figura 16**

*Cota del agua para un periodo de retorno correspondiente a 50 años.*



**Nota:** Se puede observar en la imagen la cota del agua máxima y la mancha de inundación que genera un caudal de  $199,82 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, presentando diferencias de altura de 23 metros hasta los 30 metros, encontrando una diferencia de 10 metros a los niveles normales del agua en el cauce.

**Figura 17**

*Numero de froude para un periodo de retorno correspondiente a 50 años.*



**Nota:** Se puede observar en la imagen, los resultados arrojados por el modelo para el numero de froude, para un caudal de  $199,82 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 50 años, obteniendo resultados constantes y menores a 1, lo cual hace referencia a un flujo subcrítico durante su paso del caudal por la zona urbana.

## Figura 18

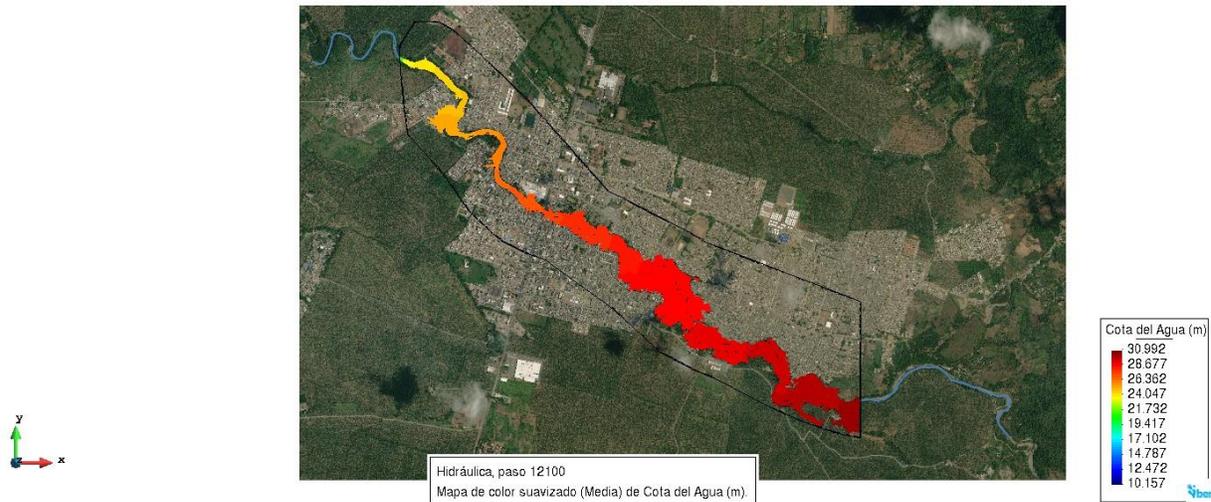
Calado para un periodo de retorno correspondiente a 100 años.



**Nota:** En la imagen se puede observar la mancha de inundación producida por un caudal de  $226,87 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 100 años. Para caudales tan altamente energéticos como lo es el de 50 y 100 años de retorno, se presenta desbordamiento del río y afectaciones en los barrios mencionados anteriormente y en barrios nuevos como Pueblo quemao, El Darién y la Libertad.

**Figura 19**

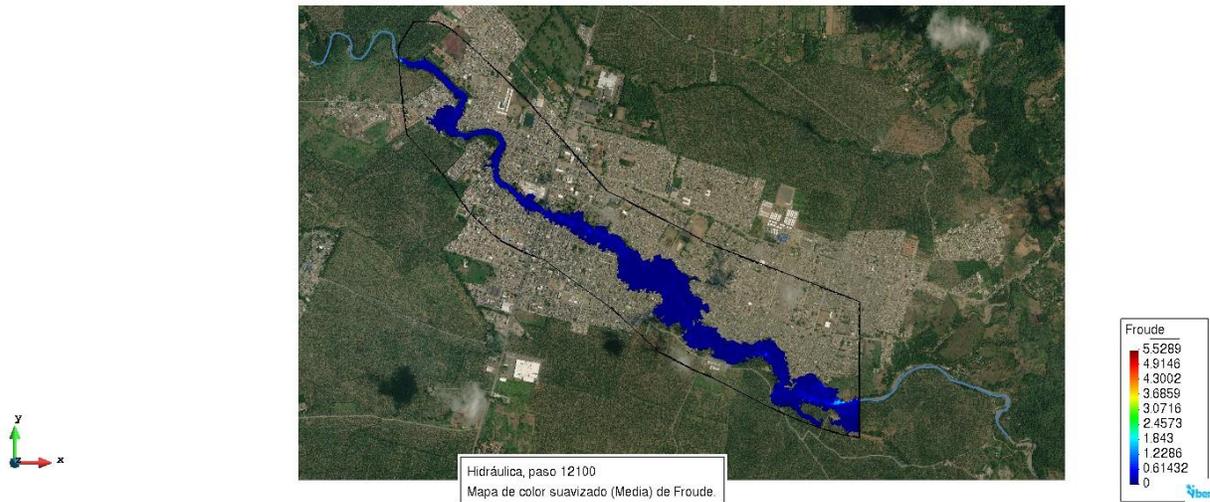
*Cota del agua para un periodo de retorno correspondiente a 100 años.*



**Nota:** Se puede observar en la imagen la cota del agua máxima y la mancha de inundación que genera un caudal de  $226,87 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, presentando diferencias de altura de 24 metros hasta los 30 metros, encontrando una diferencia de 10 metros a los niveles normales del agua en el cauce.

## Figura 20

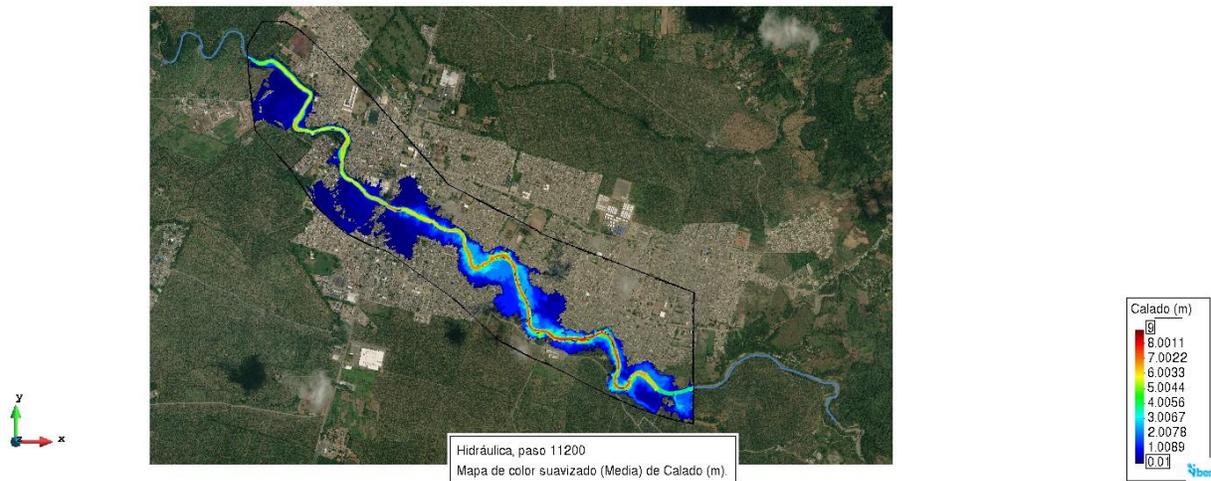
Numero de froude para un periodo de retorno correspondiente a 500 años.



**Nota:** Se puede observar en la imagen, los resultados arrojados por el modelo para el numero de froude, para un caudal de  $226,87 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 100 años, obteniendo resultados constantes y menores a 1, lo cual hace referencia a un flujo subcrítico durante su paso del caudal por la zona urbana.

## Figura 21

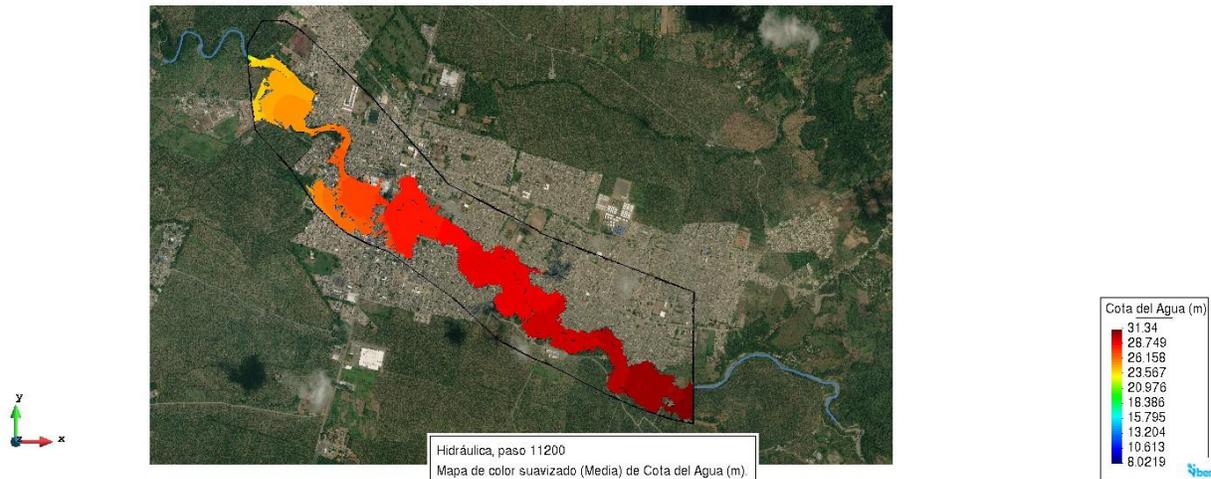
Calado para un periodo de retorno correspondiente a 500 años.



**Nota:** En la imagen se puede observar la mancha de inundación producida por un caudal de  $289,90 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 500 años. Este es por mucho uno de los escenarios más desfavorables que se presenta en el desbordamiento del río, ocupando casi en su totalidad la llanura de inundación, dicho desbordamiento provoca afectaciones en más de 15 barrios entre los cuales se destacan San Fernando, Las brisas, Primero de Mayo, El concejo Bajo, La libertad y Pueblo quemao como los más afectados, además, de la zona centro del municipio donde se ubica el comercio.

**Figura 22**

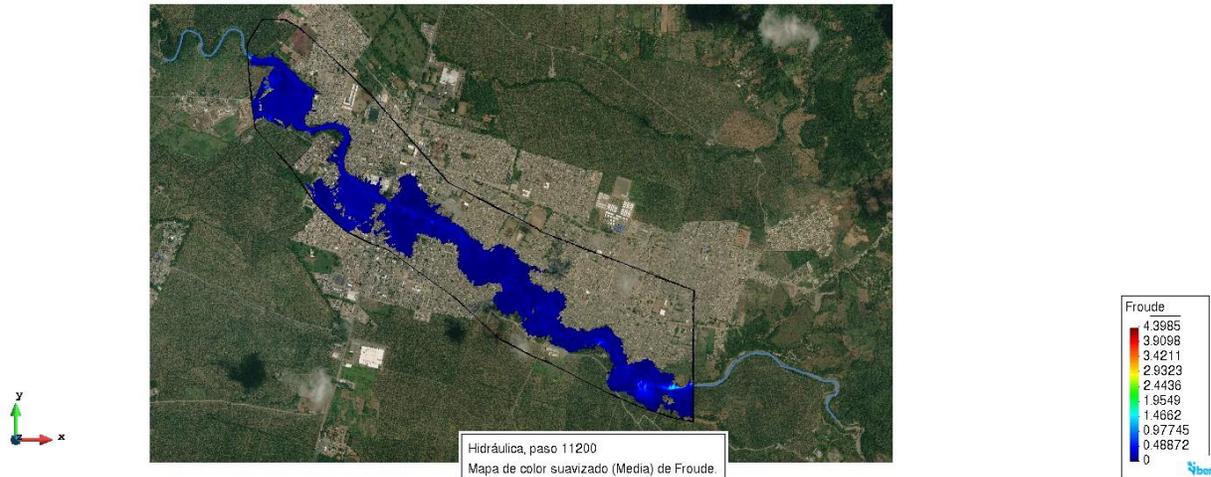
*Cota del agua para un periodo de retorno correspondiente a 4 años.*



**Nota:** Se puede observar en la imagen la cota del agua máxima y la mancha de inundación que genera un caudal de  $289,90 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 500 años, presentando diferencias de altura de 24 metros hasta los 32 metros.

**Figura 23**

*Numero de froude para un periodo de retorno correspondiente a 4 años.*



**Nota:** Se puede observar en la imagen, los resultados arrojados por el modelo para el numero de froude, para un caudal de  $289,90 \text{ m}^3/\text{s}$ , correspondiente a un periodo de retorno de 500 años, obteniendo resultados constantes y menores a 1, lo cual hace referencia a un flujo subcrítico durante su paso del caudal por la zona urbana.

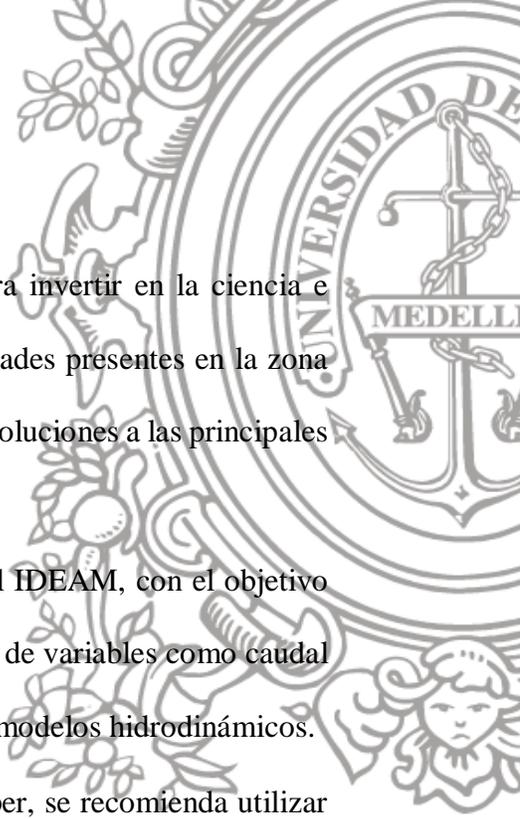
Durante la implementación del método de curva al modelo, se tomó la decisión de suspender su aplicación al modelo debido a que el computador con el cual estaba llevando a cabo la corrida de los casos no tenía la capacidad para soportar la exigencia del proceso y se podría tardar alrededor de una a dos semanas por caso, lo cual deja de ser viable para el proyecto por razones de tiempos de entrega.

## 7 Conclusiones

- Debido a su gran importancia en la estructura económica y social del municipio, es de vital importancia incorporar la biodiversidad y los servicios ecosistémicos de la cuenca del río

en los instrumentos de planificación mediante una estructura ecológica, que permita garantizar la preservación, conservación y restauración, además, del correcto uso y manejo sostenible del recurso natural.

- La educación ambiental a la comunidad es fundamental para garantizar una recuperación indirecta de ecosistemas ribereños degradados y afectados por el incorrecto manejo de estas zonas por parte de la comunidad, la cual, en su afán de proteger su patrimonio llevan a cabo obras de protección sin ningún tipo de criterio técnico, las cuales tienen un efecto negativo en la dinámica del río.
- Los modelos hidrodinámicos como IBER, nos ayudan a entender la dinámica interna que se presenta en una cuenca hidrográfica, obedeciendo a las variables de entrada como la topografía, condiciones de entrada, rugosidad y los procesos hidrológicos como lluvia y pérdidas por infiltración. Con la actualización de estas variables al modelo hidrodinámico del río Apartadó, además, de la introducción de estructuras que pueden afectar el flujo del agua, se pudo evidenciar un aumento en la mancha de inundación en los resultados de calado para 100 y 500 años de periodo de retorno, con respecto a los resultados obtenidos por (García Berrio, 2022).
- Es de suma importancia utilizar estas herramientas para la planificación de ordenamiento territorial de municipios ribereños como lo es Apartadó, con el objetivo de desarrollar e implementar un plan de acción ante episodios de desbordamiento del río, para la atención de los barrios más afectados.



## 8 Recomendaciones

- Gestionar recursos desde las administraciones municipales para invertir en la ciencia e investigación, teniendo en cuenta la gran variedad de universidades presentes en la zona de Urabá, que educan profesionales con la capacidad de ofrecer soluciones a las principales problemáticas que se presentan en la zona.
- Realizar acercamientos con entidades gubernamentales como el IDEAM, con el objetivo de poner en funcionamiento estaciones de monitoreo constantes de variables como caudal y lluvia, las cuales son de suma importancia para el trabajo con modelos hidrodinámicos.
- Para aplicación del método de la curva en la modelación con Iber, se recomienda utilizar un equipo tipo servidor, ya que, dependiendo del tamaño de malla, llenar las depresiones durante la ejecución del proceso, se puede tardar incluso semanas para un equipo convencional, lo cual deja de ser viable para estudios a corto y mediano plazo.

## 9 Bibliografía

Apartadó, A. d. (18 de 03 de 2022). Alcaldía de Apartadó. Obtenido de Alcaldía de Apartadó: <https://www.apartado-antioquia.gov.co/MiMunicipio/Paginas/Informacion-del-Municipio.aspx>

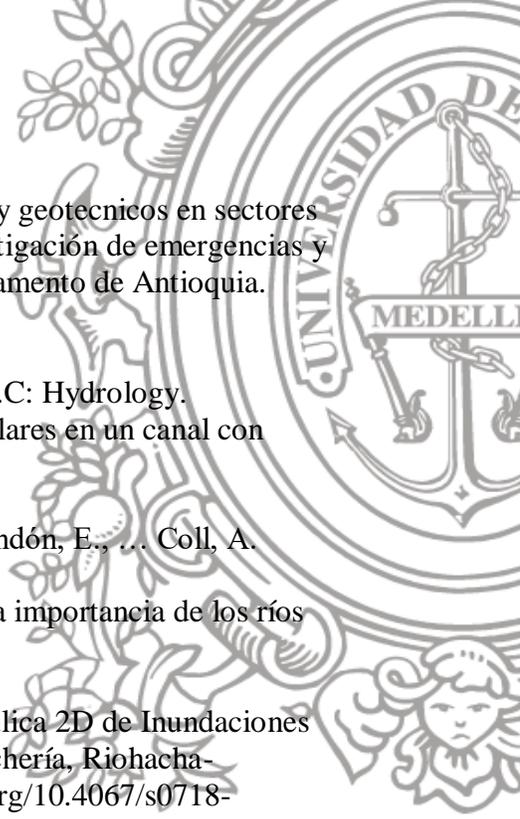
Berrio, L. A. (2022). Informe Final De Practica Académica En La Secretaría Municipal De Agricultura Y Medio Ambiente Del Municipio De Apartadó (SAMA). Apartadó.

Cardona, G. A. (2007). El Proceso de Urbanización de las Cuencas Hidrográficas . Boletín Ambiental, 4.

COLOMBIA, U. C. (2018). UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA. Obtenido de UNIVERSIDAD COOPERATIVA DE COLOMBIA:

<https://www.ucc.edu.co/internacionalizacion/Paginas/Apartado.aspx>

E. Bladéa, \*. L.-C. (2012). Iber: herramienta de simulación numérica del flujo en ríos. ELSERVIERDOYMA, 2-3.

- 
- E. Mejía, W. B. (2018). Estudios hidrológicos, hidráulicos, geológicos y geotécnicos en sectores críticos del río Apartadó y el río Vijagual como estrategia de mitigación de emergencias y desastres por inundaciones en el municipio de Apartadó-Departamento de Antioquia. Apartadó, Antioquia.
- USDA-SCS. (1985). National Engineering Handbook. Washington, D.C: Hydrology.
- Aguilera, Y.I. (2017). Modelación matemática e hidráulica del flujo en pilares en un canal con sedimentación. Bogotá: Facultad Tecnológica
- Bladé, E., Cea, L., Corestein, G., Escolano, E., Puertas, J., Vázquez-Cendón, E., ... Coll, A.
- Gastezzi-Arias, P., Alvarado-García, V., & Pérez-Gómez, G. (2016). La importancia de los ríos como corredores interurbanos. *Biocenosis*, 31(2), 39–45.
- Pérez, J. I., Escobar, J. R., & Fragozo, J. M. (2018). Modelación Hidráulica 2D de Inundaciones en Regiones con Escasez de Datos. El Caso del Delta del Río Ranchería, Riohacha-Colombia. *Información Tecnológica*, 29(4), 143–156. <https://doi.org/10.4067/s0718-07642018000400143>
- Azuay, U. D. E. L., Tecnología, F. D. E. C. Y., Ingeniería, E. D. E., & Gerencia, C. Y. (2020). Mauricio Santiago Barrera Ochoa.
- Nacher Rodríguez, B., Vallés Morán, F. J., Balaguer Beser, A., Lobera, G., Lopez Tarazon, J. A., Vericat, D., & Batalla, R. J. (2017). Procesos de transporte de sedimentos en un cauce aluvial con modelación hidráulica bidimensional. *Nácher-Rodríguez*. V Jornadas de Ingeniería Del Agua., 1–14.
- M.E. Vázquez-Cendón, Improved treatment of source terms in upwind schemes for the shallow water equations in channels with irregular geometry, *J. Comput. Phys.* 148 (1999) 497–526.
- E.F. Toro, *Riemann Solvers and Numerical Methods for Fluid Dynamics. A Practical Introduction*, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- L.Cea, J. Puertas, M.-E. Vázquez-Cendón, Depth averaged modelling of turbulent shallow water flow with wet-dry fronts, *Arch. Comput. Methods Eng.* 14 (2007) 303–341.
- Ojeda, J.A. (2003). Modelación numérica e hidráulica.
- Elizabeth Alvarez, W. B. (2018). ESTUDIOS HIDROLÓGICOS, HIDRÁULICOS, GEOLÓGICOS Y GEOTÉCNICOS EN SECTORES CRÍTICOS DEL RÍO APARTADÓ Y EL RÍO VIJAGUAL COMO ESTRATEGIA DE MITIGACIÓN DE EMERGENCIAS Y DESASTRES POR INUNDACIONES EN EL MUNICIPIO DE APARTADÓ – DEPARTAMENTO DE ANTIOQUIA. Apartadó.

UNAL-CTA., 2001. Universidad Nacional de Colombia – Centro de Ciencia y Tecnología de Antioquia, Balances hidrológicos y atlas digital de Antioquia. Posgrado en Aprovechamiento de Recursos Hidráulicos. Facultad de Minas. Medellín.

Vélez, M. V., 2002. Hidrología para Ingenieros. Postgrado en Aprovechamiento de los Recursos Hidráulicos, Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 377p.

Jaramillo, J. J. (2016). *ESTUDIO HIDROLÓGICO E HIDRÁULICO DEL CAÑO MAQUILÓN*. Medellín-Colombia: Ingeniería Hidraulica- Consultoria y diseño.

Territorial, S. d. (2021). *Plan Maestro: Apartadó de cara al Rio*. Apartadó-Colombia.

## 10 Anexos



**Foto 1:** Desbordamiento del río Apartadó a la altura del puente principal, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 2:** Desbordamiento del río Apartadó a la altura del puente principal, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 3:** Desbordamiento del río Apartadó a la altura de la Iglesia central, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 4:** Desbordamiento del río Apartadó a la altura del puente principal, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 5:** Desbordamiento del río Apartadó calle 96 Bancolombia del centro, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 6:** Desbordamiento del río Apartadó zona comercial centro, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 7:** Desbordamiento del río Apartadó Calle 94 banco BBVA, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 8:** Desbordamiento del río Apartadó zona comercial centro, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 9:** Desbordamiento del río Apartadó barrio San Fernando, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 10:** Desbordamiento del río Apartadó barrio San Fernando, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.



**Foto 11:** Desbordamiento del río Apartadó barrio Primero de mayo, año 2019. Foto tomada por Carlos Alberto Morales.

