

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Estudio comparativo del componente hidráulico en la determinación de la ronda hídrica, desde las perspectivas nacional e internacional

Comparative Study of Flood Zone Designation Guidelines for Colombia as they Relate to other International Standards

Camila López Vásquez

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia

2019

Estudio comparativo del componente hidráulico en la determinación de la ronda hídrica, desde las perspectivas nacional e internacional

Comparative Study of Flood Zone Designation Guidelines for Colombia as they Relate to other International Standards

Camila López Vásquez

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:
Magister en Ingeniería – Recursos Hidráulicos

Director:

PhD. Philippe Chang

Grupo de Investigación:

Grupo Académico de Trabajo en Ingeniería Hidráulica y Ambiental

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería y Arquitectura
Departamento de Ingeniería Civil
Manizales, Colombia

2019

Cada vez que te entren dudas acerca de tu futuro, piensa hasta dónde has llegado; recuerda todo lo que afrontaste, todas las batallas que ganaste y los miedos que superaste.

Anónimo

Agradecimientos

Agradezco a mi familia, padres y hermanos por apoyarme en cada decisión y reto que día a día asumo, gracias por soportar mis días de largo trabajo y compartir con amor mi felicidad y logros, esto se lo debo a ellos.

Agradezco a mi director de trabajo de grado y guía Philippe Chang por creer en mí y mis capacidades, apoyándome a lo largo de este proceso, siendo siempre pertinente en sus recomendaciones y consejos, haciendo posible este proceso de conocimiento.

Resumen

Las rondas hídricas son consideradas como una zona ribereña que permite formar barreras para gestionar el impacto de los fenómenos de inundación, y a su vez, mitigar y proteger las poblaciones. El propósito de este estudio fue evaluar la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia frente a normativas internacionales en Canadá y España, con el fin de determinar sus limitantes y generar aportes para su mejoramiento. Se evidencia la necesidad de determinar la ronda hídrica que permita el desarrollo dinámico del río, no obstante, se identifican problemáticas y limitantes presentes en la Guía Técnica colombiana. El estudio evidenció que las normativas internacionales proporcionan conceptos similares usados en Colombia, pero adicionalmente integran aspectos como la regionalización que permite una mejor caracterización, e incorporan la frecuencia de inundación y su probabilidad de ocurrencia en la estimación del periodo de retorno y el riesgo al momento de determinar el acotamiento, a través de una cuantificación numérica. El caso de estudio analizado en Dosquebradas – Risaralda tuvo como fin comparar la aplicación de las diferentes normas a través de una modelación hidráulica, en la que se destaca que la norma colombiana actual no ofrece detalles suficientes para su ejecución, lo que lleva a un falso concepto de seguridad relacionado a la inexactitud y ausencia de datos. De la modelación y aplicación de la norma al caso de estudio, se evidencia que la norma no está adaptada a las condiciones de Dosquebradas tanto en el aspecto social como hidráulico, y no disminuye el riesgo, ni aumenta la protección de la población. Nuestro estudio considera pertinente proponer la inclusión de la estimación del riesgo como parte integral al momento de determinar el acotamiento de la ronda hídrica, considerando la particularidad de los sistemas hídricos en Colombia, conociendo que presentan un comportamiento dinámico natural heterogéneo.

Palabras clave: Acotamiento, Ronda Hídrica, Dominio Hidráulico Público, Corredor Ambiental, Zona de Protección, Inundación.

Abstract

Flood protection zones are riparian buffers that are formed to manage and mitigate the impact of flooding, and in turn protect local populations. The purpose of this study was to evaluate the *Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia* against international regulations in Canada and Spain, in order to determine its limitations and contribute to its improvement. The need to establish a specific corridor that allows the dynamic development of a river is clear, however limitations present in the Colombian Technical Guide are identified. The study shows that international regulations provide similar concepts as used in Colombia, but additionally integrate aspects such as regionalization that allows for a better characterization of the channel way, and incorporate the frequency of flooding and its probability of occurrence in the concept of risk when determining the protection zone. The case study analyzed in Dosquebradas - Risaralda was aimed at comparing the application of the different standards through hydraulic modeling. It highlights that the current Colombian standard does not offer sufficient details in its implementation phase, which leads to a false sense of security related to inaccuracy and lack of data. Furthermore, the study demonstrates how the Colombian norm is ill adapted to the conditions of Dosquebradas typical in the Andes region, both in the social and hydraulic aspects, and does not reduce the risk, nor does it improve the protection of the population. Our study considers it pertinent to include risk estimation as an integral part of the methodology when establishing protect flood zone, considering the particularity of water systems in Colombia, as they are characterized by an heterogeneous natural dynamic behavior.

Keywords: Limitation, Flood zone, Riparian buffers, Public Hydraulic Domain, Environmental Corridor, Protection Zone, Flood.

Contenido

Agradecimientos	VII
Resumen	VIII
Abstract	IX
Contenido	X
Lista de figuras	XII
Lista de tablas	XIV
Lista de gráficas	XIV
Introducción	15
Contexto	17
Objetivos	26
Objetivo general.....	26
Objetivos específicos	26
Metodología	26
1. Revisión de literatura y normativas de interés	28
1.1 Revisión de la literatura.....	28
1.2 Identificación de normativas.....	35
1.3 Procesos metodológicos	35
1.3.1 Guía técnica – Canadá.....	35
1.3.2 Guía técnica – Colombia	38
1.3.3 Guía técnica – España	42
1.4 Comparación componente hidráulico	44
2. Marco teórico	48
2.1 Modelos hidráulicos de inundación	49
2.1.1 Ecuaciones de la modelación unidimensional	50
2.1.2 Ecuaciones 2D en aguas poco profundas	52
2.1.3 Métodos numéricos de discretización	53
2.2 Modelo hidráulico Hec – Ras	54
3. Modelación caso de estudio – proceso de modelación	57
3.1 Caracterización general de la zona	57
3.2 Quebrada Frailes	62
3.3 Eventos históricos.....	64

3.4	Visita de campo.....	67
3.4.1	Zona de aforo 1	69
3.4.2	Zona de aforo 2	70
3.4.3	Zona de aforo 3 – Zona rural	73
3.5	Características de la modelación.....	75
3.6	Caudales de simulación	80
3.7	Resultados	81
3.7.1	Resultados zona urbana.....	81
3.7.2	Resultados zona rural.....	92
3.7.3	Resultados y análisis	99
4.	Análisis y discusión	103
	Conclusiones.....	115
	Bibliografía	125

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1: Ciclo hidrológico a nivel de cuenca.	18
Figura 2: Río Cauca, tramo montañoso.....	20
Figura 3: Río Guaviare.	21
Figura 4: Marco conceptual de la evaluación probabilista del riesgo.	23
Figura 5: Mapa general Dosquebradas – Risaralda.	57
Figura 6: Mapa de coberturas y uso del suelo, Dosquebradas.....	59
Figura 7: Mapa de pendientes del municipio Dosquebradas - Risaralda.	60
Figura 8: Microcuencas y red de drenaje municipio Dosquebradas – Risaralda.....	61
Figura 9: Microcuenca Quebrada Frailes	62
Figura 10: Tramo zona urbana Qda. Frailes.....	63
Figura 11: Tramo zona rural Qda. Frailes.....	64
Figura 12: Represamiento Qda. Frailes, 30 de marzo de 2017.	65
Figura 13: Desbordamiento de la Qda. Frailes, 21 de octubre de 2018.....	66
Figura 14: Desbordamiento de la Qda. Frailes, 28 de mayo de 2019.....	67
Figura 15: Ubicación zonas de aforo en la Quebrada Frailes.	68
Figura 16: Cobertura vegetal y canalización en la zona de aforo 1.	70
Figura 17: Material del cauce en la zona de aforada 2.	71
Figura 18: Obras de mitigación y costales de suelo cemento en la quebrada Frailes.....	72
Figura 19: Modelo de Elevación Digital – DEM.	76
Figura 20: Modelo de Elevación Digital – zona urbana.....	76
Figura 21: Modelo de Elevación Digital – zona rural	77
Figura 22: Mapa de rugosidades – zona urbana.	79
Figura 23: Mapa de rugosidades – zona rural.	79
Figura 24: Cauce 3D – $Q_{\text{Obs. 31 de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$	82
Figura 25: Mapa de inundación – $Q_{\text{Obs. 31 de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$	82
Figura 26: Mapa de inundación – $T_R 2.33 \text{ años}$, $Q = 20.2 \text{ m}^3/\text{s}$	83
Figura 27: Mapa de inundación – $T_R 10 \text{ años}$, $Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$	83
Figura 28: Mapa de inundación – $T_R 15 \text{ años}$, $Q = 24.6 \text{ m}^3/\text{s}$	84
Figura 29: Mapa de inundación – $T_R 30 \text{ años}$, $Q = 28.9 \text{ m}^3/\text{s}$	84
Figura 30: Mapa de inundación – $T_R 40 \text{ años}$, $Q = 30.5 \text{ m}^3/\text{s}$	85
Figura 31: Mapa de inundación – $T_R 100 \text{ años}$, $Q = 35.8 \text{ m}^3/\text{s}$	85

Figura 32: Mapa de velocidades – $Q_{Obs. 31 \text{ de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$	86
Figura 33: Mapa de velocidades – $T_R 2.33 \text{ años}, Q = 20.23 \text{ m}^3/\text{s}$	86
Figura 34: Mapa de velocidades – $T_R 10 \text{ años}, Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$	87
Figura 35: Mapa de velocidades – $T_R 15 \text{ años}, Q = 24.65 \text{ m}^3/\text{s}$	87
Figura 36: Mapa de velocidades – $T_R 30 \text{ años}, Q = 28.97 \text{ m}^3/\text{s}$	88
Figura 37: Mapa de velocidades – $T_R 40 \text{ años}, Q = 30.51 \text{ m}^3/\text{s}$	88
Figura 38: Mapa de velocidades – $T_R 100 \text{ años}, Q = 35.8 \text{ m}^3/\text{s}$	89
Figura 39: Perfil del cauce – $Q_{Obs. 31 \text{ de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$	89
Figura 40: Perfil del cauce – $T_R 2.33 \text{ años}, Q = 20.23 \text{ m}^3/\text{s}$	90
Figura 41: Perfil del cauce – $T_R 10 \text{ años}, Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$	90
Figura 42: Perfil del cauce – $T_R 15 \text{ años}, Q = 24.65 \text{ m}^3/\text{s}$	90
Figura 43: Perfil del Cauce – $T_R 30 \text{ años}, Q = 28.97 \text{ m}^3/\text{s}$	91
Figura 44: Perfil del cauce – $T_R 40 \text{ años}, Q = 30.51 \text{ m}^3/\text{s}$	91
Figura 45: Perfil del cauce – $T_R 100 \text{ años}, Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$	91
Figura 46: Cauce 3D – $Q_{Obs. 31 \text{ de julio}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$	92
Figura 47: Mapa de inundación – $Q_{Obs. 31 \text{ de julio}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$	92
Figura 48: Mapa de inundación – $T_R 2.33 \text{ años}, Q = 14.47 \text{ m}^3/\text{s}$	93
Figura 49: Mapa de inundación – $T_R 10 \text{ años}, Q = 17.99 \text{ m}^3/\text{s}$	93
Figura 50: Mapa de inundación – $T_R 15 \text{ años}, Q = 18.6 \text{ m}^3/\text{s}$	93
Figura 51: Mapa de inundación – $T_R 30 \text{ años}, Q = 22.6 \text{ m}^3/\text{s}$	94
Figura 52: Mapa de inundación – $T_R 40 \text{ años}, Q = 24.1 \text{ m}^3/\text{s}$	94
Figura 53: Mapa de inundación – $T_R 100 \text{ años}, Q = 29.2 \text{ m}^3/\text{s}$	94
Figura 54: Mapa de velocidad – $Q_{Obs. 31 \text{ de julio}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Figura 55: Mapa de velocidad – $T_R 2.33 \text{ años}, Q = 14.47 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Figura 56: Mapa de velocidad – $T_R 10 \text{ años}, Q = 17.99 \text{ m}^3/\text{s}$	95
Figura 57: Mapa de velocidad – $T_R 15 \text{ años}, Q = 18.61 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Figura 58: Mapa de velocidad – $T_R 30 \text{ años}, Q = 22.62 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Figura 59: Mapa de velocidad – $T_R 40 \text{ años}, Q = 24.1 \text{ m}^3/\text{s}$	96
Figura 60: Mapa de velocidades – $T_R 100 \text{ años}, Q = 29.2 \text{ m}^3/\text{s}$	97
Figura 61: Perfil del cauce – $Q_{Obs. 31 \text{ de julio}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$	97
Figura 62: Perfil del cauce – $T_R 2.33 \text{ años}, Q = 14.47 \text{ m}^3/\text{s}$	97
Figura 63: Perfil del cauce – $T_R 10 \text{ años}, Q = 17.99 \text{ m}^3/\text{s}$	98
Figura 64: Perfil del cauce – $T_R 15 \text{ años}, Q = 18.61 \text{ m}^3/\text{s}$	98
Figura 65: Perfil del cauce – $T_R 30 \text{ años}, Q = 22.62 \text{ m}^3/\text{s}$	98
Figura 66: Perfil cauce – $T_R 40 \text{ años}, Q = 24.09 \text{ m}^3/\text{s}$	99
Figura 67: Perfil del cauce – $T_R 100 \text{ años}, Q = 29.2 \text{ m}^3/\text{s}$	99
Figura 68: Franja de ronda hídrica (a) Colombia, (b) Canadá, (c) España.....	111
Figura 69: Diagrama de flujo - Propuesta de Metodología alternativa para el acotamiento de la ronda hídrico – Componente hidráulico –.....	114

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1: Identificación de las normativas de estudio.	35
Tabla 2: Comparación componente hidráulico, normativa de acotamiento.	44
Tabla 3: Descripción modelos hidráulicos.	49
Tabla 4: Parámetros Morfométricos de la Microcuenca de la Quebrada Frailes.	63
Tabla 5: Datos y resultados aforo 1.	69
Tabla 6: Datos y resultados aforo 2.	71
Tabla 7: Datos y resultados aforo 3.	73
Tabla 8: Características generales de la moderación.	75
Tabla 9: Coordenadas del Modelo de Elevación Digital	77
Tabla 10a: Coeficientes de Manning "n" – Calibración 31 de julio de 2019.	78
Tabla 10b: Coeficientes de Manning "n" en caso de crecientes.	78
Tabla 11: Caudales zona urbana Qda. Frailes.	80
Tabla 12: Caudales zona rural Qda. Frailes.	81
Tabla 13: Franja de ronda hídrica según los criterios de cada país.	100
Tabla 14: Errores de la modelación.	100

Lista de gráficas

	Pág.
Gráfica 1: Sección transversal zona de aforo 1.	69
Gráfica 2: Sección transversal zona de aforo 2.	70
Gráfica 3: Sección transversal zona de aforo 3.	73

Introducción

El recurso hídrico contribuye al fortalecimiento de los procesos productivos en los sectores agropecuario, industrial, hidroeléctrico, minero y de abastecimiento a la población. De esta manera, los recursos hídricos representan un factor fundamental en el desarrollo de un país. Estos requieren normativas y estudios a nivel de cuenca que favorezcan el continuo desarrollo dinámico de los ríos. Los ríos son elementos naturales que captan las aguas de una cuenca y las transportan a superficie libre, hasta su desembocadura (Martín, 2007). La dinámica de la cuenca se encuentra condicionada a los cambios geomorfológicos asociados a los impactos y efectos antrópicos y naturales.

En algunas regiones de Colombia, las intensas precipitaciones con larga duración generan un aumento progresivo del nivel de agua, sea rápido o lento según el caso, como resultado del inmediato aumento de la escorrentía superficial, superando las alturas de las orillas de los ríos generando desbordamientos sobre las llanuras de inundación. Este fenómeno es considerado una de las amenazas más comunes que ocasionan daños en áreas susceptibles a inundación del sistema hídrico empleadas en agricultura y/o vivienda, y con mayor incidencia económica en el país (IDIGER, 2019). Estas áreas se encuentran ubicadas en las zonas de ronda hídrica, conocidas como franjas contiguas a los cuerpos de aguas naturales, sean sistemas lóticos o lénticos, y con flujo continuo, periódico o eventual durante el año hidrológico (MinAmbiente, 2018). Estas franjas tienen como fin permitir el normal funcionamiento dinámico en los componentes hidrológico, geomorfológico y eco sistémico de los cuerpos de agua (Cortolima, 2017).

El decreto 2245 del 29 de diciembre de 2017, establece que la ronda hídrica “comprende la faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho, [y] así mismo hará parte de la ronda hídrica el área de protección o conservación aferente”. Tanto para la faja paralela como para el área de protección se

establecerán directrices de manejo ambiental, conforme a lo dispuesto en la *Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia*.

Según lo mencionado, a partir de este decreto se establece un límite de 30 metros de ronda hídrica para todos los cuerpos de agua indiferente a sus características hidrológicas, geomorfológicas, ecosistémicas y aspectos de vulnerabilidad y riesgo, teniendo en cuenta que se están manejando dos conceptos diferentes, ronda hídrica y área de protección. Esto nos lleva a reflexionar sobre emplear una sola medida (30 m) para definir el área desde donde se permiten construcciones y asentamientos en zonas aledañas a los ríos, lo que resalta un probable desconocimiento de las singularidades de cada sistema fluvial, teniendo en cuenta que, al aumentar el tamaño de la fuente hídrica, aumentara su caudal y por lo tanto su ronda hídrica debería aumentar (Duque, 2018). Finalmente, esto nos lleva a cuestionamientos como ¿Por qué establecer como medida limite 30 metros de faja paralela? ¿Porque no asumir un valor mayor o una medida dependiente de las características hidro-geomorfológicas del rio, la vulnerabilidad y el riesgo presente en este?

En Colombia, a partir de normativas como la *Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas*, se busca asegurar el desarrollo adecuado de los ríos y la seguridad de las poblaciones ubicadas en la rivera, expuestas a sufrir daños frente a la amenaza por inundación, al desarrollar actividades productivas, agropecuarias, industriales, económicas, y sociales en la zona de ronda hídrica y área aferente de protección y conservación ambiental.

En consecuencia, el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial por medio de la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico (2010 – 2022) considera el agua como factor de desarrollo económico y bienestar social, el cual viene implementando procesos de participación equitativa e incluyente, promoviendo la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento de los recursos naturales renovables, a partir de normativas que aseguren el desarrollo sostenible del país.

La presente investigación se refiere al estudio comparativo en la determinación de la ronda hídrica enfocada en el componente hidráulico, desde las perspectivas nacional e internacional (Colombia, Canadá y España). El objetivo fundamental es evaluar la aplicabilidad de la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia publicada por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2018, en cumplimiento de lo dispuesto en el Decreto 2245 de 2017, frente a normativas internacionales equivalentes de España y Ontario

(Canadá). Esto se llevó a cabo mediante el contraste de las diferentes metodologías en el campo hidráulico con la aplicación en dos zonas, rural y urbana de la quebrada Frailes ubicada en el municipio Dosquebradas, Risaralda, la cual, en los últimos años, ha presentado problemas por inundación que han afectado a la población.

Contexto

Generalidades

Con el fin de tener una visión global acerca de la importancia que debe tener el acotamiento de las rondas hídricas y zonas de protección para la conservación del recurso hídrico en Colombia, se dispuso a desarrollar este trabajo con un enfoque de carácter cualitativo, teniendo en cuenta la importancia de criterios que garanticen la conservación y el desarrollo sostenible para estas áreas de protección, que no vayan en contra de la legislación ambiental de Colombia.

Basados en la información investigada y recolectada existente a nivel nacional e internacional de libros, estudios, normatividades y artículos indexados, se realiza la organización y selección de parámetros relevantes que se considera se deben tener en cuenta para establecer los lineamientos en la definición de un procedimiento para la delimitación de rondas hídricas y zonas de manejo ambiental adecuadas según el caso.

La cuenca hidrográfica es un territorio delimitado por su drenaje natural hacia un mismo punto llamado desembocadura. Las cuencas hidrográficas se dividen en tres zonas: la cuenca alta donde nace el río, presenta un alto gradiente, y una gran capacidad erosiva; la cuenca media, donde se presenta un equilibrio entre el material sólido atraído por la fuerza de la corriente, presentándose erosión y sedimentación simultáneas; y la cuenca baja, donde se deposita el material extraído de zonas altas en las llanuras aluviales (Valverde, 2012). El ciclo hidrológico, a nivel de cuenca se presenta en la Figura 1. La cuenca responde a la precipitación mediante el escurrimiento en su punto de salida.

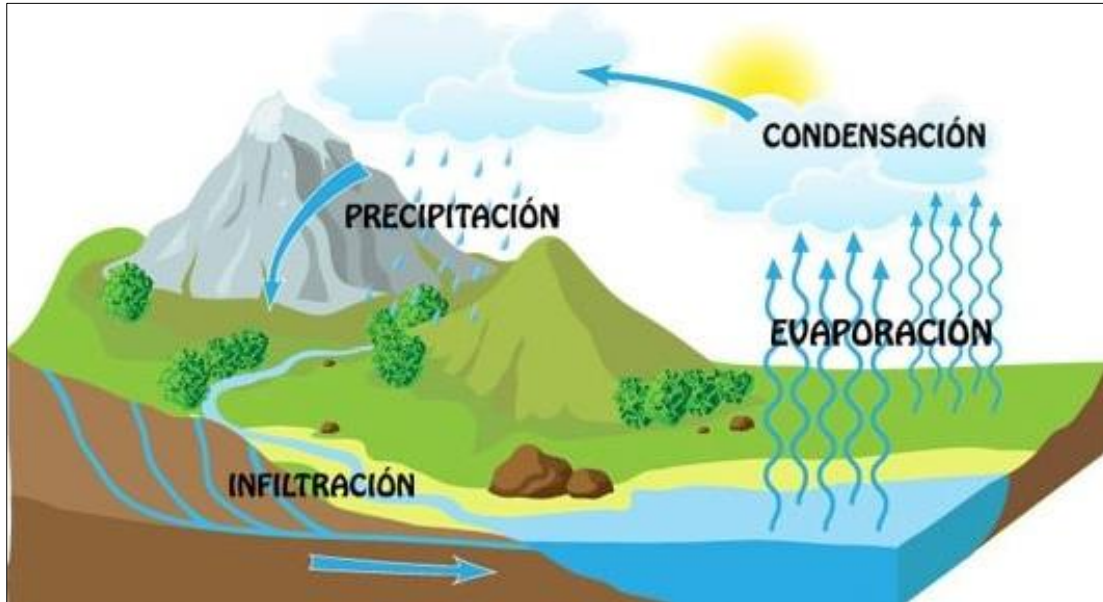


Figura 1: Ciclo hidrológico a nivel de cuenca.

Extraído de: <https://concepto.de/ciclo-del-agua/>, 2019

El ciclo hidrológico, se puede definir por las características geomorfológicas de la cuenca y su urbanización. Las características como la geometría, el tipo y uso del suelo, condicionan el volumen de escurrimiento, mientras que las pendientes, el orden de corrientes y red de drenaje entre otros condicionan el tiempo de respuesta. A continuación, se describen las principales características de la cuenca hidrográfica, que poseen influencia sobre la relación precipitación – escurrimiento:

- La divisoria de aguas: es una zona formada por los puntos topográficos más altos de la cuenca; el relieve que consta de valles, montañas y quebradas; y el río principal que va desde la naciente hasta la desembocadura de la cuenca.
- Los ríos son elementos dinámicos: cambiantes en el tiempo y el espacio, que evolucionan según las condiciones climáticas e hidrológicas de la cuenca.
- Los ríos poseen tres dimensiones: la dimensión longitudinal, transversal y vertical, donde se presenta la continuidad de flujos, espacios y hábitats.

De lo anterior se puede destacar que la dimensión longitudinal, es la más representativa en los ríos, comprendida desde el nacimiento hasta la desembocadura del río; se encuentran las zonas

hidrológicas, geomorfológicas y biológicas relacionadas a la continuidad de espacios y hábitats mediante el corredor fluvial.

La dimensión transversal, hace referencia al ancho del cauce y su llanura de inundación, la cual de forma periódica según avenidas y estiajes se amplía y se reduce, extrayendo o disminuyendo el dominio de las aguas según el caudal que transcurra. En esta dimensión, también es posible identificar los diferentes suelos y zonificar la fauna y flora que se encuentran entre el agua y sus orillas (Franco, 2018).

Es importante resaltar que la llanura de inundación es una zona de disipación de energía en presencia de lluvias fuertes y continuas que sobrepasan la capacidad de absorción del suelo y la capacidad de carga de los ríos. La frecuencia de inundaciones depende del clima, del material de las riberas del río y la pendiente del canal. La evaluación de los eventos de inundación se relaciona a frecuencias estadísticas según el grado de riesgo que se decida evaluar, ej., llanuras de 5 años, 20 años, 50 años, o 500 años (OAS, 1993).

Las principales causas de inundación son las lluvias frecuentes e intensas, residuos sólidos que taponan y reducen la sección de los cauces, el rompimiento de estructuras hidráulicas (jarillones, diques, presas), falta de capacidad hidráulica de las redes de alcantarillado, entre otras; adicionalmente es importante tener en cuenta que las construcciones, rellenos de tierra y otras intrusiones en la llanura de inundación ocupan espacio de los flujos de la inundación, lo que puede resultar en daños materiales, en las actividades de desarrollo y pérdidas humanas (IDIGER, 2019).

Con respecto al aumento de la vulnerabilidad y la amenaza por inundación, se tienen factores tales como el asentamiento de viviendas en zonas de ronda hídrica, manejo y preservación ambiental de los cuerpos de agua, el manejo no regulado de los ríos para los diferentes usos que se le da al agua (agrícola, pecuario, abastecimiento, generación de energía, etc.) y la variabilidad climática, siendo factores condicionantes en la magnitud de los daños ocasionados (IDIGER, 2019).

Características de los ríos en Colombia

Los ríos presentes en el territorio colombiano tienen características propias, de las que se pueden destacar las siguientes:

- *Ríos de montaña*

En Colombia, los ríos de montaña son de fuerte gradiente, comúnmente encañonados, de fuertes vertientes y con una alta capacidad de transporte de agua y arrastre, variando significativamente de acuerdo con las oscilaciones del clima tropical (Figura 2). Por su condición de alto gradiente, estos no tienen extensas llanuras de inundación, siendo estrechas o incluso inexistentes, por lo que los procesos de flujo y transporte se concentran en cauces únicos, fáciles de determinar (MinAmbiente, 2018).



Figura 2: Rio Cauca, tramo montañoso.

Extraído de Hoy Diario del Magdalena.

Estos sistemas presentan comúnmente un comportamiento torrencial, caracterizado por las avenidas torrenciales, movimiento en masa de una mezcla caótica de sólidos arrastrados y agua que se desplazan a grandes velocidades (MinAmbiente, 2018). La quebrada la Liboriana (Salgar, Antioquia), y los ríos Mocoa, Mulato y Sangoyaco (Mocoa, Putumayo) son ejemplos de este tipo de sistemas hídricos.

Las avenidas torrenciales ocurren cuando se presenta la confluencia de cuatro factores:

1. Altos gradientes y áreas medias, implicando rápidos tiempos de concentración y altas velocidades en las corrientes.
2. Precipitaciones de gran intensidad concentradas sobre la cuenca.
3. Material fino granular que pueda ser arrastrado por la corriente, producto de la erosión natural o por intervención antrópica.
4. Cambios bruscos en el gradiente de la fuente hídrica como consecuencia de la acumulación de sedimentos (Caballero, 2011).

El curso natural del río se ve afectado por estos factores, otorgándole el comportamiento dinámico característico en ellos, y ocasionando daños por inundaciones y desastres que habitualmente cobran vidas, y generan pérdidas económicas afectando la infraestructura, las actividades agropecuarias, productivas e industriales que se desarrollen en la zona aledaña al río, según sea rural o urbana.

- *Los ríos sinuosos*

En Colombia, los ríos sinuosos se desarrollan en zonas con bajos gradientes. Se encuentran asociados a corrientes de energía moderada y pueden tener carga desde gravas hasta arcillas. Dependiendo de su ubicación geomorfológica poseen una longitud del cauce mucho mayor a la longitud del valle en que se alojan. Por su poca capacidad de incisión, estos ríos y corrientes migran lateralmente formando grandes llanuras de inundación (MinAmbiente, 2018).

Estos ríos generalmente se encuentran restringidos a un sólo cauce que cambia continuamente de longitud dependiendo de la dinámica de los meandros (Figura 3). Pueden inundar grandes áreas por períodos de tiempo largos, cumpliendo así con procesos de fertilización o contaminación de suelos dependiendo de las condiciones particulares de las coberturas y usos de la tierra de la cuenca hidrográfica y de calidad del agua. Las condiciones de fertilidad de los suelos y sus amplias llanuras de inundación, han atraído el desarrollo de un gran número de actividades humanas, que se ven perturbadas periódicamente por el fenómeno de la inundación lenta (MinAmbiente, 2018).



Figura 3: Rio Guaviare.

Google Earth, 2019

En Colombia este tipo de ríos se encuentran en los altiplanos de alta montaña como el río Bogotá (Sabana de Bogotá), el río Penderisco (Urao, Antioquia) y, el río Cauca en los tramos del departamento del Cauca y Valle del Cauca, y el río Guaviare. Este tipo de dinámica es también característica de las planicies del Pacífico como los ríos San Juan y Patía; del Caribe como el Atrato, la parte baja de Sinú, el río San Jorge, el río Cesar y el río Magdalena (MinAmbiente, 2018).

Riesgo y vulnerabilidad

Las cuencas y los ríos en Colombia se encuentran afectados por actividades antrópicas, perturbando la estructura y funcionamiento natural de los cuerpos hídricos, generando desaparición de hábitats, pérdida de especies nativas, disminución del contenido de humedad entre otros efectos en la estructura hidro-geomorfo-biológicas de estos ríos (Franco, 2015).

Las autoridades ambientales buscan establecer lineamientos, políticas, regulaciones e instrumentos financieros para la inclusión del riesgo ante diversas amenazas asociadas al recurso hídrico, con el fin de disminuir la vulnerabilidad. En este sentido, es importante conocer que la evaluación del riesgo implica tres componentes:

- *Amenaza*: fenómeno, actividad humana o situación peligrosa que puede causar la muerte, lesiones u otros impactos sobre la salud, daños materiales, pérdida de los medios de vida y servicios, interrupción de la actividad social y económica, o degradación ambiental.
- *Exposición*: personas, infraestructura, viviendas, sistemas u otros activos humanos tangibles ubicados en zonas de amenaza, sujetos a pérdidas potenciales.
- *Vulnerabilidad*: las características y circunstancias que hacen susceptible a una persona, comunidad, bienes o sistemas a los efectos de las amenazas (UNGRD, 2018).

Para la evaluación probabilista del riesgo y su análisis se tienen en cuenta cuatro módulos principales expuestos a continuación y graficados en la Figura 4:

(i) *Evaluación de la amenaza*: Los resultados de esta evaluación son representados en un catálogo de eventos estocástico, relacionados a una frecuencia de ocurrencia asignada. Esta representación permite considerar eventos futuros posibles.

(ii) *Identificación y caracterización de los elementos expuestos*. A cada uno de los elementos considerados para la evaluación se le asignan atributos de acuerdo a sus características

estructurales, material de construcción, valor catastral, tipo de cultivo, costo de producción por fase de crecimiento, producción por unidad, entre otros.

(iii) *Definición de la vulnerabilidad*: De acuerdo a las características asociadas a cada uno de los elementos expuestos, se asigna una función de vulnerabilidad específica a cada una de las amenazas. Estas funciones permiten una representación probabilista del grado de daño, que permite a su vez definir las pérdidas económicas y humanas esperadas para cada uno de los componentes.

(iv) *Cálculo del riesgo*: Se debe considerar un conjunto exhaustivo de eventos que representen aquellos eventos que pueden afectar los elementos expuestos, realizando una integración de daños para la estimación de pérdidas esperadas asociadas a cada evento, proporcionando un panorama completo del riesgo. (UNGRD, 2018)

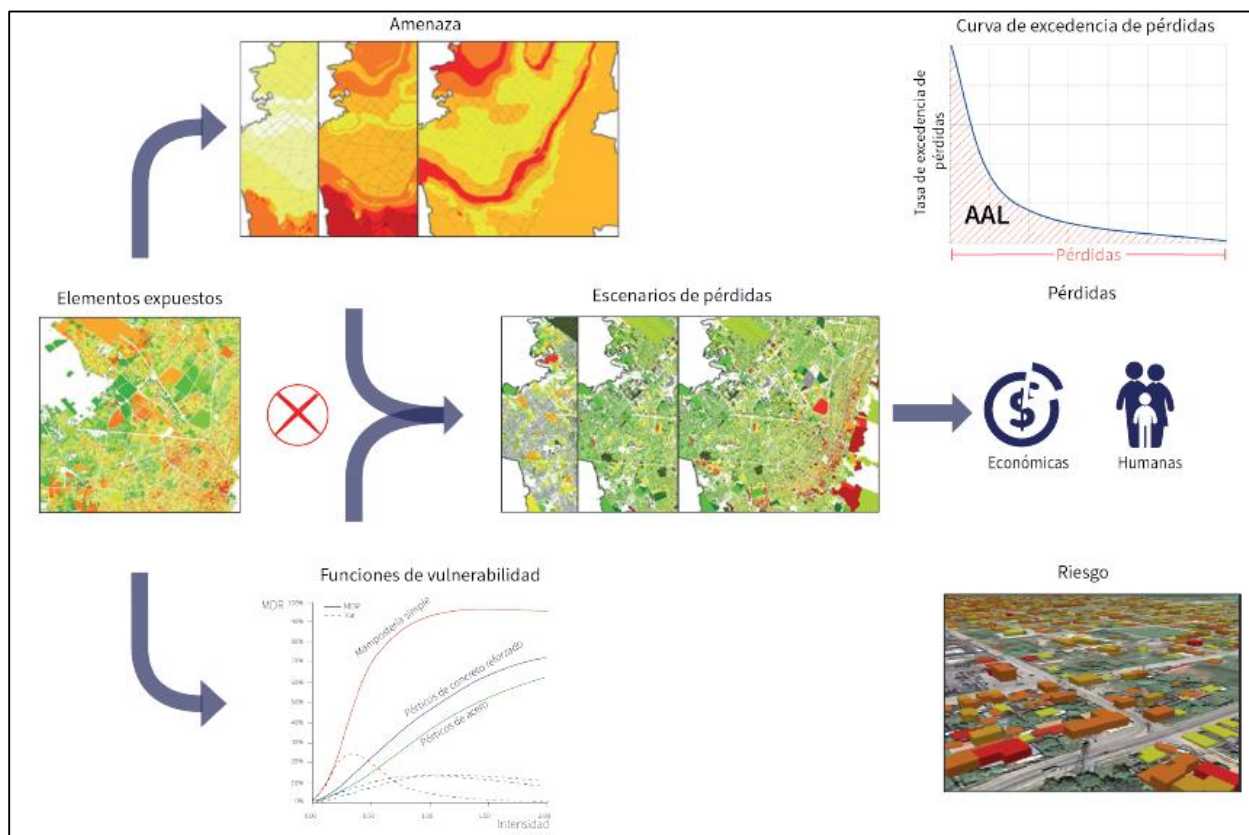


Figura 4: Marco conceptual de la evaluación probabilista del riesgo.

Fuente: Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes (UNGRD, 2018)

El falso concepto de seguridad asociado a la construcción de obras hidráulicas, se deriva en un aumento de la vulnerabilidad de las poblaciones y zonas productivas aledañas (Arreguín, 2014),

es por tanto que la mitigación del riesgo determina la necesidad de establecer normas que contribuyan a la protección de las poblaciones y la delimitación de las “zonas o franjas de terreno aledañas a los cuerpos de agua que tienen como fin permitir el normal funcionamiento de las dinámicas hidrológicas, geomorfológicas y ecosistémicas propias de dichos cuerpos de agua” denominadas como ronda hídrica (MinAmbiente, 2018), teniendo como enfoque la sostenibilidad, definida como el desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las futuras generaciones, garantizando el equilibrio entre el crecimiento económico, el cuidado del medio ambiente y el bienestar social.

Contexto colombiano

Según la *Guía Técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia* de 2018, se estableció una metodología a desarrollar en diferentes fases:

- **Fase 0** - Acciones previas: involucra la recopilación de información secundaria, diseño de la estrategia de participación y la programación de actividades.
- **Fase 1** - Delimitación del cauce permanente.
- **Fase 2** - Definición del límite físico y de estrategias para el manejo ambiental.

De manera complementaria se presentan unos indicadores mínimos a ser considerados en seguimiento y evaluación de la implementación de los resultados del proceso.

Las rondas hídricas son consideradas como una zona ribereña en donde se dan interacciones entre los medios terrestre y acuático, es decir, un ecotono (MinAmbiente, 2018). Estas son franjas contiguas a los cuerpos hídricos donde se da la transferencia de agua, nutrientes, sedimentos, organismos y materia orgánica, dando soporte a la biodiversidad y dinámica de la zona; así mismo, las rondas hídricas aseguran la disponibilidad y sostenibilidad del recurso hídrico, flora y fauna, que hacen de estas áreas hábitats propicios para organismos terrestres. En general las rondas hídricas ayudan a mantener la integridad hidrológica, hidráulica y ecológica del cauce, del suelo y de la vegetación, de ahí la importancia de la acotación de las rondas (Josa, 2018).

El acotamiento de las rondas hídricas permite formar barreras para disminuir el impacto de los contaminantes y, a su vez, mitigar y proteger a los pobladores o usuarios de los servicios ecosistémicos que ofrece la ronda (Duque, 2018). El hecho de que se permitan asentamientos en las riberas de los ríos conduce a un bajo ordenamiento territorial por parte del Estado, teniendo

como consecuencia un aumento de la vulnerabilidad de las poblaciones ante la amenaza por inundación, lo que lleva a pérdidas humanas y económicas de gran magnitud, según sea el caso.

La riqueza hídrica que posee Colombia aporta significativamente al desarrollo del país, de ahí la importancia de las rondas hídricas. Así, surge la necesidad de realizar el acotamiento de estas como normativa, función que deben cumplir las Autoridades Ambientales Competentes, tal como se establece en el artículo 206 sobre Rondas hídricas (Ley 1450, 2011), deben tener en cuenta los diferentes criterios geomorfológico, hidrológico y eco sistémico, establecidos en la Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia, adoptada por resolución del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible en 2018, y adicionalmente se considera que se debe incluir como parte importante de la evaluación para la determinación de la ronda hídrica, la amenaza, exposición y vulnerabilidad que conlleva al riesgo.

El artículo 83 establece “(...) una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta de treinta metros de ancho” (Ley 2811, 1978). En los estudios piloto realizados en el río Hacha, en Florencia, el río Mulato, en Mocoa y la quebrada Yahuaraca, en Leticia, se determinaron rondas hídricas mayores a treinta metros (Duque, 2018), incluso para otros casos. Lo anterior demuestra la necesidad del análisis de la normativa nacional frente a normativas internacionales con el fin de establecer parámetros de mejoramiento en los criterios del componente hidráulico que llevan a estipular el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia, puesto que la magnitud de la ronda hídrica dependerá de la dinámica propia del río (Duque, 2018).

Las normativas internacionales a contrastar con la normativa nacional son: la Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables realizada por la Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino a través del Grupo de Inundaciones de España en 2011, teniendo en cuenta que la normativa colombiana tiene como una de sus referencias la norma española, para determinar sus fases y parámetros en el acotamiento de la ronda hídrica; y la Guía técnica Sistemas de Ríos y Arroyos: Límite de Riesgo de inundación del Ministerio de Recursos Naturales de Ontario, Canadá de 2002 (en inglés *Technical Guide River & Stream Systems: Flooding Hazard Limit*). El alcance que se tiene al contrastar estas normativas con la nacional es tener en cuenta la relación cultural y tradicional que se tiene con España y la relación geográfica y condición de América como continente en relación con Ontario, Canadá.

Objetivos

Objetivo general

Evaluar la normativa colombiana vigente frente a normativas internacionales de Canadá y España al determinar el acotamiento de la ronda hídrica.

Objetivos específicos

- Contrastar las metodologías que integran la normativa de Colombia, Ontario (Canadá) y España en el componente hidráulico al establecer las rondas hídricas.
- Caracterizar el contexto específico del caso de estudio en zona rural y urbana desde un punto de vista del componente hidráulico según las normativas de interés.
- Establecer, mediante modelación hidráulica, los límites de la ronda hídrica del caso de estudio.
- Plantear recomendaciones a la normativa colombiana a partir de la evaluación y pertinencia de cada una de las normativas evaluadas en este estudio.

Metodología

Este estudio se desarrollará bajo una metodología conformada por cuatro fases correspondientes a cada objetivo específico.

Fase 1

Estudio de las normativas referentes al acotamiento de la ronda hídrica de Colombia, España y Ontario (Canadá).

- 1.1. Identificar las normativas nacionales e internacionales vigentes relacionadas al estudio.
- 1.2. Especificar los procesos metodológicos establecidos en las normativas para la determinación del acotamiento de la ronda hídrica, mediante un flujo de trabajo.
- 1.3. Destacar similitudes y diferencias de cada una de las normativas, mediante herramientas de comparación de procesos.

- 1.4. Establecer las ventajas y desventajas de las normativas, a través de un análisis crítico.

Fase 2

Caracterizar del caso de estudio en Dosquebradas, Risaralda.

- 2.1. Recopilar y analizar la información disponible para una zona de estudio rural y urbana, como cartografía y datos hidrometeorológicos.
- 2.2. Determinar el nivel de precisión y objeto de la modelación requerida según las normativas para establecer la ronda hídrica a través del componente hidráulico.
- 2.3. Caracterizar los softwares disponibles y su aplicabilidad al momento de modelar inundaciones.
- 2.4. Elección del modelo a aplicar en el caso de estudio según factores de adaptabilidad a inundaciones y al contexto colombiano.
- 2.5. Establecer los escenarios a simular y eventos históricos disponibles.

Fase 3

Determinación de la ronda hídrica en el caso de estudio en Dosquebradas, Risaralda.

- 3.1. Identificar los puntos de control en el cauce.
- 3.2. Construcción del modelo en el software Hec-Ras 5.0.7.
- 3.3. Realizar visita técnica en el sitio.
- 3.4. Calibrar el modelo según eventos históricos.
- 3.5. Validar el modelo según eventos históricos.
- 3.6. Definir el acotamiento de la ronda hídrica a partir de las manchas de inundación obtenidas en el modelo según cada normativa.
- 3.7. Realizar un análisis comparativo de los resultados obtenidos.

Fase 4

Se realizará un análisis crítico de los resultados obtenidos de la modelación, donde se proporcionará recomendaciones de mejoramiento en la determinación del acotamiento de la ronda hídrica en Colombia y el impacto de estas sobre el caso de estudio.

1. Revisión de literatura y normativas de interés

El objetivo de este capítulo, es presentar los antecedentes técnicos relevantes que se encontraron en la literatura reciente, con el propósito de ampliar nuestro entendimiento al momento de establecer el acotamiento de la ronda hídrica a nivel nacional e internacional. Adicionalmente, se revisan las guías metodológicas y normativas de Canadá, Colombia y España que han desarrollado para la delimitación las rondas hídricas y las áreas de protección ambiental, partiendo de la identificación de las normativas y las leyes que las preceden. Una breve síntesis de los aspectos generales que tiene en cuenta en cada metodología y, la comparación de los parámetros que cada metodología implementa al momento de establecer el acotamiento de la ronda hídrica con relación al componente hidráulico será igualmente presentado.

A nivel internacional las guías metodológicas de interés son la “Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables” de España; y la “Guía Técnica de Sistemas de Ríos y Arroyos: Límite de Peligro de inundación” de Ontario (Canadá) (en *inglés* *Technical Guide River & Stream Systems: Flooding Hazard Limit*). A nivel local la guía metodológica de interés es la “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia”.

1.1 Revisión de la literatura

A continuación, se presentan los antecedentes investigados, que permiten adquirir una breve perspectiva respecto al conocimiento de los estudios realizados y sus resultados de interés.

- *Arbeláez., et al (2002)*, realiza un análisis para definir los retiros mínimos a los cauces naturales, teniendo en cuenta que además del criterio geomorfológico, se requiere un análisis de vulnerabilidad y riesgo que permita determinar técnicamente la extensión y el mejor uso

de la planicie inundable. En este trabajo se presentan los lineamientos necesarios para determinar la vulnerabilidad hidrogeomorfológica de las zonas de inundación considerando diferentes niveles de riesgo hidrológico y los parámetros geomorfológicos más determinantes en la delimitación de la extensión ocupable de la planicie de inundación. Se concluye en la necesidad de mecanismos de reglamentación de las zonas ribereñas fundamentados sobre criterios físicos geomorfológicos, hidrológicos e hidráulicos, teniendo en cuenta una visión integral de la cuenca, y un análisis de amenaza, vulnerabilidad y riesgo que se estima a partir de técnicas hidrológicas e hidráulicas que permitan establecer los límites de inundación para cierta frecuencia e identificar los controles geomorfológicos con el fin de predecir la evolución de la corriente del río.

- *Gayoso, et al (2003)*, partiendo de la ausencia de investigación en Chile en el establecimiento de modelos que permitan establecer un ancho determinado de protección en los ríos, realizó un estudio cuyo fin, fue aportar a la discusión, identificación y análisis de la bibliografía basada en investigación en relación a las franjas de protección de cauces con prácticas forestales, calidad de agua y hábitat de peces a nivel nacional e internacional, evaluando los diferentes aspectos que tienen en cuenta para la determinación de la franja de protección. Del estudio se concluyó que mientras no existan modelos integrados que relacionen las diferentes funciones con los atributos de la franja y del sitio, parece adecuado establecer anchos de protección fijos pero asociados a ciertos parámetros del sitio de fácil determinación. Estos anchos serían función del tipo de uso de agua, del ancho del cauce, de su temporalidad y orden, y de la pendiente del terreno adyacente, entre otros. No obstante, para establecer los anchos apropiados a las diferentes condiciones nacionales será recomendable realizar la investigación de mediano y largo plazo.
- *Vélez (2004)*, propone una metodología para la definición de los retiros en cuencas urbanas altamente intervenidas, en función de elementos tales como: capacidad hidráulica del río, estabilidad de márgenes y taludes del cauce, franjas para zonas ornamentales y recreación pasiva, franjas de terreno para la extensión de redes de servicios públicos, zonas de la circulación, vías vehiculares o peatonales, zonas de amortiguación para la protección de los ecosistemas en los cauces y las riberas y acceso al cauce y a las zonas de amortiguación para su mantenimiento. De la investigación realizada, se establecieron las razones por las cuales las hipótesis base de la reglamentación vigente en la mayoría de las ciudades de Colombia para la delimitación y definición de retiros de corrientes de agua no son adecuadas. Para corregir las falencias en dicha reglamentación se realiza una propuesta metodológica que integra elementos relacionados con las dinámicas naturales de las corrientes, y que en

general son más consistentes con la visión de sostenibilidad, base del ordenamiento territorial. Se enuncian algunas reglamentaciones internacionales en las cuales se distinguen algunas líneas metodológicas que pueden ser discutidas e implementadas en el futuro haciendo las particularidades requeridas para su aplicación a nuestro medio. Algunos de los aspectos incluidos en la metodología propuesta incluyen: la necesidad de hacer un estudio integral de la zona de interés, considerando la geomorfología de la cuenca y los procesos dinámicos más relevantes, la definición de retiros por las manchas de inundación producto del modelamiento hidráulico del flujo y el establecimiento de la frecuencia de los eventos de inundación para delimitar y definir el área de retiro y las zonas con restricción al uso de acuerdo al riesgo tolerable, la zonificación de la amenaza de inundación en función de la velocidad y profundidad del flujo estimadas sobre la planicie de inundación y el modelamiento del flujo considerando las obstrucciones (edificaciones, obras de infraestructura, puentes, etc.) ya existentes sobre la planicie para determinar su incidencia sobre los niveles de inundación esperados.

- *Daza., et al (2008)*, propone una metodología que mediante la utilización de sistemas de información geográfica e información secundaria de los planes de ordenamiento territorial, facilite la identificación y cuantificación de rondas hídricas expuestas a la potencial degradación causada por los conflictos de uso del suelo presentes, y así dar criterios para la intervención y manejo ambiental de estas áreas. El caso de estudio es el municipio de Paipa, donde se encontró que, de las 3.420 hectáreas de ronda hídrica, el 68% se encuentra en zonas de conflictos de uso del suelo alto y medio. Se demostró la alta afectación presente en las rondas hídricas de la zona por usos inadecuados del suelo, permitiendo identificar áreas de intervención prioritaria, bajo la suposición que, a mayor conflicto de uso, mayor degradación ambiental. La implementación de la metodología se vio limitada por los límites político-administrativos, por lo que se sugiere estudiar las zonas definidas por los límites de las cuencas hidrográficas, y adicionalmente verificar resultados en campo en futuras investigaciones, ya que no se realizó en este caso y se considera necesario.
- *González (2011)*, realizó una revisión documental sobre las franjas ribereñas consideradas como áreas de protección y establecer criterios técnicos para la toma de decisiones sobre ancho de las mismas en Costa Rica y otros países, así mismo se revisó la normativa vigente del país. Según el análisis documental, en Costa Rica, el ancho de las franjas ribereñas va desde los 5 hasta 300 m a cada lado de los cursos de agua, a excepción del río Banano, cuyo ancho de protección establecido es de 500 m. Para la protección de manantiales las franjas oscilan entre 50 y 200 m. En otros países considerados en el estudio (Panamá,

Nicaragua, Chile y Brasil) el ancho de las franjas ribereñas oscila entre 5 y 600 m. De lo anterior se concluye que no existe una magnitud única ni homogénea de ancho de franja ribereña. Y finalmente se tiene que en los tres países centroamericanos analizados (Costa Rica, Panamá y Nicaragua), no se encuentran criterios técnicos o científicos concretos con los que se llegue a determinar el ancho de las franjas ribereñas. En los países sudamericanos (Brasil y Chile), la normativa sí establece algunos criterios técnicos que se deben considerar dentro de una cuenca hidrográfica para la protección de la red hidrológica y los márgenes de la misma.

- *Möller (2011)*, investigó la literatura de las zonas ribereñas, comprendiendo su definición, funcionamiento general y su estructura asociada a los sistemas lóticos. Hace referencia a los tipos de franjas de amortiguamiento y ancho de las mismas; haciendo un análisis a mayor detalle de las leyes de Chile que hacen referencia a la protección de la vegetación de las riberas de manantiales o quebradas. Los estudios demuestran una gran variación en el ancho de la franja de vegetación recomendado para ejercer este efecto de amortiguamiento, el que dependerá del tipo y la sensibilidad del hábitat acuático, de la función prevista de la franja, de la fisiografía del lugar y del uso del suelo. La disposición legal de anchos mínimos de franjas ribereñas debiera apoyarse en estudios científicos para servir efectivamente a los objetivos de protección o conservación deseados. La legislación en Chile ha incorporado en 2011 la zona de protección de cursos naturales de agua, conformadas por la zona contigua a los cauces o cuerpos de agua, cuyo ancho varía de 5 a 20 m dependiendo de diversas condiciones, en la que se excluye o restringe la intervención humana.
- *Alvarado (2014)*, desarrolló un modelo para el análisis de tipo predictivo con amenaza de inundación para la cuenca alta del río Bogotá en el sector de Cota – Cundinamarca y límites con la localidad de Suba. Teniendo en cuenta que la investigación es de tipo cuantitativo, se hizo uso de la recolección de información y análisis de datos, por medio de Sistemas de Información Geográfica, obteniendo un mapa que establece las zonas propensas a inundaciones. De la investigación se concluye que la zona de estudio tiene entre el 50% y 60% de probabilidad de inundación debido al desbordamiento de su afluente principal, su finalidad principal fue transferir los resultados a entidades estatales que hagan adecuado uso de la información facilitando la toma de decisiones y planes de gestión del riesgo frente al fenómeno de inundación. De esta investigación se puede reconocer la necesidad de establecer la franja de ronda hídrica pertinente que permita el desarrollo de la dinámica del río sin afectar las poblaciones.

- *Romero., et al (2014)*, Analizo la relevancia de las zonas ribereñas en Chile, considerando la legislación actual, con el objetivo de aportar antecedentes entorno a su restauración y conservación. Se concluye que la legislación chilena identifica zonas ribereñas asociadas a la función de protección, existiendo algunas deficiencias en lo que respecta al concepto de restauración, y la falta de incentivos económicos para llevar a cabo una mayor protección, siendo necesario que el Estado cree o adecue normas que permitan la preservación de los ecosistemas ribereños y su restauración, incluyendo los recursos para incentivar estas acciones, lo cual otorgaría viabilidad de largo plazo a estos y a las funciones que cumplen.
- *Amaya (2015)*, realizo el modelamiento de la franja de inundación hidráulica en la quebrada Lavanderas del municipio de Barrancabermeja – Santander, teniendo como finalidad la sustentación de la modificatoria al Artículo 44 del POT municipal, el cual establece una ronda hídrica de 30 metros, que afecta la mayoría de las viviendas que se encuentran asentadas cerca de este cuerpo hídrico. Los datos de los estudios realizados se modelaron hidráulicamente por medio del software HecRas y su extensión Hec-GeoRas para llevar a cabo el área de inundación incluyendo las secciones geométricas, cotas tomadas en campo y de información histórica, luego se exportó el modelo en ArcGIS para plasmarlo en la imagen del mapa. Los resultados según la metodología implementada en este estudio, arroja que la zona de inundación hidráulica de la quebrada Lavanderas se debía reducir de 30m a 8m, donde se vieron afectadas 66 viviendas de las 188 que anteriormente estaban dentro de los 30 m de ronda hídrica, ya que estas viviendas se encuentran dentro de los 30m y fuera de los 8m en las que no han llegado estos fenómenos naturales.
- *Barrios., et al (2015)*, Investiga el estado del arte de las metodologías para la delimitación de rondas hídricas en el ámbito internacional y local, con el fin de establecer parámetros y herramientas relevantes para la construcción de dichas metodologías propias de las entidades ambientales gubernamentales, las cuales deben garantizar la conservación y protección del área en su jurisdicción. Se revisaron las metodologías a nivel internacional de Estados Unidos, Holanda, España, México y Chile, y a nivel nacional se revisaron las metodologías propuestas por las corporaciones autónomas regionales de Cundinamarca, Caldas, Risaralda y la metodología que venía desarrollando el ministerio del medio ambiente con la participación de la Universidad Nacional sede Medellín. A partir de este estudio se concluye que existe una gran variación en el ancho de la franja de vegetación recomendado para ejercer el efecto de amortiguamiento, el que dependerá del tipo y la sensibilidad del hábitat acuático, de la fisiografía del lugar y del uso del suelo.

-
- *Sarache (2015)*, propone formular una propuesta de mejoras o complementaciones a la normatividad para la delimitación de ronda hidráulica de Colombia, a partir de un concepto técnico de ronda hidráulica con base en la evaluación de la aplicación de la normatividad colombiana y de los criterios internacionales de vía de intenso desagüe y de dominio público hidráulico empleados en Estados Unidos y España respectivamente, realizada en tres casos de estudio. En dicha propuesta de mejoramiento a la normatividad vigente y partiendo de los resultados de comparación en la aplicación del marco normativo, se sugiere que la ronda se incorpore a la gestión del riesgo de desastres como parte del conocimiento del riesgo y su delimitación se ligue a la determinación de la amenaza.
 - *Gaitán (2016)*, proponer una metodología para determinar el límite de la ronda hidráulica de la cuenca media del río Magdalena, realizando un estudio y prueba piloto para un trayecto de 20 kilómetros entre la población de San Luis (Orilla del departamento de Antioquia) y Barrancabermeja (orilla del departamento de Santander), con base en una recopilación normativa nacional e internacional (Estados Unidos, México, Uruguay, Holanda, Chile y España), estableciendo una propuesta para procesar y analizar la información geomorfológica, la dinámica fluvial, hidrológica y el resultado de una modelación hidráulica en una dimensión. Los resultados de la metodología fueron satisfactorios en la determinación del cauce permanente y la magnitud de la ronda hídrica bajo los aspectos ya mencionados. La metodología establecida puede ser la base de un análisis, y el complemento de estudios posteriores para determinar un procedimiento de cálculo en la cuenca baja del río Magdalena o para otros ríos del país. Adicionalmente dentro del polígono definido, se recomienda desarrollar estudios de evaluación de riesgos contra inundación.
 - *Duque (2018)*, realizó un análisis crítico en el empleo de una única medida de 30 m según las leyes colombianas para definir el área desde donde se permiten construcciones y asentamientos en zonas aledañas a los ríos. Duque hace énfasis en la definición de las rondas hídricas y, la historia del reconocimiento de las mismas, teniendo en cuenta la actual guía de manejo técnico y la definición de la ronda hídrica como espacio que el río antiguamente ocupó y tiene altas probabilidades de que vuelva a ocupar. Se concluye que el espacio que ocupa la ronda hídrica dependerá directamente de la dinámica del río, y no podrá ser una medida establecida como lo es 30 metros establecidos en el decreto 2245 del 29 de diciembre.
 - *Forero., et al (2018)*, realizar un análisis comparativo entre las metodologías de valoración de rondas hídricas más usuales y la técnica del Factor de Ponderación de Uso desde el punto

de vista de la explotación de los predios rurales, y aplicar tales procedimientos en un caso de estudio a fin de apreciar mejor sus diferencias. Se realiza la aplicación en la zona de Aguazul – Casanare. Los resultados sugieren no generalizar los factores que se empleen al hacer avalúos de ronda hídrica, ya que las condiciones de un predio respecto a otro varían en gran magnitud. Es práctico usar factores, porcentajes o relaciones que estén debidamente sustentados con datos de la zona, ya que se puede llegar a caracterizar con veracidad el comportamiento de los valores en ciertas partes del país y respecto a determinadas explotaciones del terreno.

- Sossa., *et al* (2019), realizó un estudio en el río Mijitayo (Pasto), cuyo objetivo fue aplicar una metodología basada en la protección de los ecosistemas para definir el ancho de ronda hídrica y las especies más apropiadas para su recuperación. Para ello, se estudiaron algunas de las características fitosociológicas (altura, cobertura, densidad y frecuencia relativa), que sirvieron para determinar el Índice de Valor de Importancia (IVI), parámetro fundamental junto con la densidad de drenaje y el área de la cuenca aferente para la delimitación de la ronda hídrica con criterios ecosistémicos. En el sitio de estudio se encontró bosque seco, bosque húmedo, bosque muy húmedo y páramo sub andino, estimando un ancho de ronda hídrica de 15, 25, 29 y 23 metros, respectivamente. Finalmente, se hace la recomendación de las especies óptimas para su recuperación y haciendo cumplimiento a la ley que determina la ronda hídrica de hasta 30 metros, el autor determina que el ancho de la ronda hídrica se debe aproximar a esta cifra; respecto a esto no me encuentro de acuerdo a la medida tomada teniendo en cuenta que esta no es la óptima según los estudios realizados.

Teniendo en cuenta, lo anteriormente expuesto, se hace evidente que el estudio de la determinación del acotamiento de la ronda hídrica en Colombia y el mundo, ha sido objeto de discusión y debate en el transcurso de los últimos años. Se destaca la necesidad de determinar el acotamiento de la ronda hídrica a partir de características hidráulicas del sistema hídrico. Adicionalmente en algunos casos se reporta la necesidad de integrar el análisis de gestión del riesgo implementando los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y exposición, que permitan establecer el acotamiento según los daños y pérdidas anticipadas. De manera general, se cuestiona la dimensión de la faja más adecuada para la ronda hídrica una vez definido el cauce permanente; lo anterior genera apertura a un debate sobre estas medidas.

1.2 Identificación de normativas

La Tabla 1, presenta el detalle de las principales características que contribuyen a la identificación de las normativas de Canadá, Colombia y España, evidenciando su antigüedad, y ley a partir de la cual fue aprobada.

Tabla 1: Identificación de las normativas de estudio.

PAÍS	CANADÁ	COLOMBIA	ESPAÑA
NORMATIVA	<i>Technical Guide River & Stream Systems: Flooding Hazard Limit</i>	Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia	Guía Metodológica para el Desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables
AÑO	2002	2018	2011
AUTOR	<i>Ontario Ministry of Natural Resources</i>	Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible	Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marítimo
LEY	<i>Provincial Policy Statement (1997), Planning Act. Declaración de política provincial de 1997 y la Ley de Planificación.</i>	Decreto 2245 de 2017,	Reglamento de Dominio Público Hidráulico, aprobado por el Real Decreto 849/1986

1.3 Procesos metodológicos

Esta sección describe de forma general los parámetros que tienen en cuenta cada una de las guías metodológicas objeto de estudio con el fin de proporcionar una visión global del contenido de estas.

1.3.1 Guía técnica – Canadá

La “Guía Técnica de Sistemas de Ríos y Arroyos: Límite de Peligro de inundación” de Ontario (Canadá) (en inglés *Technical Guide River & Stream Systems: Flooding Hazard Limit*), establece siete (7) etapas que describen la metodología de estudio requerida para establecer las planicies de inundación, y relaciona los capítulos pertinentes de la guía técnica que proporcionan descripciones más detalladas sobre los procedimientos recomendados.

Etapas 1. *Seleccionar el estándar de llanura de inundación*

- Identificar el área de estudio para determinar la zona y el estándar de inundación correspondiente. La guía cuenta con un mapa de Ontario, donde se establecen tres zonas diferentes a las cuales se relaciona el estándar de inundación según eventos históricos.
- Seleccionar el estándar de inundación de una tormenta histórica (Hazel o Timmins según el caso), una inundación de 100 años o una tormenta histórica observada en el área siempre que supere la inundación de 100 años.

Etapas 2. *Revisar los requisitos de datos, métodos de cálculos hidrológicos e hidráulicos*

- Se proporcionan los requisitos de datos, caudales, niveles de agua, datos meteorológicos y fisiográficos teniendo en cuenta que varían según el caso de estudio.
- Se establecen recomendaciones para el cálculo de las magnitudes de inundación y análisis de frecuencia de inundaciones para inundaciones de 100 años, o modelado hidrológico de inundaciones a partir de un evento meteorológico específico.
- Se proporciona una descripción y comparación del análisis hidráulico y las técnicas de modelado adecuadas para la aplicación en los ríos de Ontario, el tipo de flujo, los datos de sección transversal, rugosidad, pérdidas de puente y alcantarilla, con el fin de estimar los niveles de agua.

Etapas 3. *Seleccionar los parámetros de modelación hidrológica*

- Teniendo en cuenta la inundación estándar adecuada (Huracán Hazel, Timmins, inundación de 100 años o una inundación que supere los 100 años), se selecciona la entrada de lluvia al modelo de inundación, profundidad de tormenta de 100 años, duración y distribución.
- En la selección de datos de uso del suelo, la guía proporciona información general y dirige al usuario al *Canadian Soil Information Services (CANSIS)*, donde se encuentran los datos de suelo para Canadá disponibles.

Etapas 4. *Selección de métodos de cálculo de flujos*

- Determinar el modelo hidrológico a utilizar, teniendo en cuenta dos tipos de tormenta de diseño; el modelo simple o individual basado en una tormenta histórica o tormenta sintética calculada a partir de un análisis estadístico de datos, y el modelo o simulación continua basado en el análisis lluvia-escorrentía.

-
- Teniendo en cuenta la estacionalidad en Canadá, y según el registro de datos que poseen, en primavera se presentan los caudales pico anuales como resultado de la fusión de la nieve y la lluvia, por esta razón, la guía dispone de parámetros y métodos que lleven a una mejor aproximación en el cálculo de lluvia teniendo en cuenta nevadas, infiltración, humedad del suelo, flujo base y, recorrido de cuencas hidrográficas.
 - La calibración del modelo usando una sola estación o estimaciones de frecuencia regionales debe realizarse siempre que sea factible.

Etapa 5. *Seleccionar el método para calcular los niveles de agua para condiciones de aguas abiertas (lagos)*

- Se proporciona una matriz de selección de modelos hidráulicos, la selección apropiada del modelo debe dejarse a juicio del profesional.
- Se debe realizar el cálculo de tránsito de avenidas (*flood routing*), se exponen diferentes métodos para realizar este cálculo entre ellos el método indicación-almacenamiento usado en modelos hidrológicos tales como INTERHYMO 89, GAWSER y QUALHYMO.
- Se deben tener en cuenta los efectos que tienen los embalses, lagos, cruces de vías navegables e invasiones en el cálculo del perfil de inundación, dado que representan discontinuidades.
- La guía determina la importancia de la calibración del modelo, estableciendo procedimientos apropiados para realizarla, tales como mediciones de caudal y nivel en campo que permiten comparar flujos y niveles observados versus los simulados, datos de secciones transversales y magnitudes de hielo que representan parámetros sensibles al modelo.
- Se consideran algunos parámetros para realizar un análisis de sensibilidad del modelo cuyo propósito es evaluar el impacto de las variaciones en los diversos parámetros del modelo calibrado en los perfiles de inundación.

Etapa 6. *Cálculo de los niveles de embalses de hielo, cuando corresponda.*

- Determinar la necesidad de calcular los niveles de embalse de hielo para el sitio.
- Seleccionar método computacional de cálculo de embalses de hielo.
- Estimar la frecuencia de los embalses de hielo.

Etapa 7. Preparación del informe técnico

Una vez completadas las investigaciones hidrológicas e hidráulicas, y antes de la compilación de los mapas de riesgo de inundación, se presentará un borrador del informe técnico al comité de Revisión Técnica del Estudio de la llanura de inundación. El informe debe presentar los estudios con suficiente detalle para que los especialistas en este campo puedan determinar la idoneidad del trabajo y su conformidad con los procedimientos descritos en este documento. Se realizará una revisión del borrador del informe en esta etapa y luego, sujeto a la aceptación del trabajo descrito en él, se compilarán los mapas de riesgo de inundación. El informe técnico no está destinado a una amplia distribución; Se preparará un folleto que resume los puntos importantes y se pondrá a disposición del público.

1.3.2 Guía técnica – Colombia

La “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas hídricas”, establece los criterios para definir el orden de prioridades para el acotamiento de las rondas hídricas, desarrolla los criterios para definir desde donde se acota y hasta donde llega su límite físico y define las directrices para su manejo ambiental. El enfoque metodológico para el desarrollo de los criterios tiene como principio la funcionalidad de las rondas hídricas y está planteado para ser desarrollado en las siguientes fases:

Fase 0. Acciones previas

Esta fase establece un marco de prioridades, teniendo en cuenta criterios mínimos agrupados en aspectos de gestión ambiental, físico – bióticos, y socio – culturales, para finalmente realizar un análisis multi-criterio que permita realizar una valoración de orden de prioridad de los cuerpos hídricos que las Autoridades ambientales competentes tengan en su jurisdicción. La siguiente actividad está relacionada con la recopilación de información secundaria de aspectos físico-bióticos y socio-económicos que sea de utilidad para las siguientes fases; la guía técnica establece una información con precisión mínima requerida y escalas de trabajo según la actividad a desarrollar, adicionalmente enumera algunas fuentes de información. Finalmente, en ésta se fijan los roles, cronograma y presupuestos designados para el inicio del acotamiento de la ronda hídrica.

Fase 1. Delimitación del cauce permanente o de la línea de mareas máxima

El cauce permanente de los sistemas loticos, lenticos y líneas de mareas máximas, se definirán a partir de una aproximación desde el análisis de las formas del terreno, teniendo en cuenta la zona de terreno en que fluye el agua con sus sedimentos en condiciones normales sin producir un desbordamiento de sus márgenes naturales.

- La delimitación del cauce para sistemas loticos, se lleva a cabo a partir de tres actividades:
Actividad 1: Identificar preliminarmente las formas del terreno asociadas al cauce permanente realizando un análisis de imágenes de sensores remotos y fotografías aéreas; y un análisis desde relación de geometría hidráulica, generando un mapa en el cual quedaran delimitadas las geoformas asociadas al cauce en escala mínima de 1:25000.
Actividad 2: Delimitar el ancho del cauce permanente y verificarlo en campo partiendo de mapas topográficos en escala 1:5000 para área rural y 1:2000 en área urbana; se planeará y ejecutará el levantamiento de información en campo para medir el ancho de banca llena, niveles de agua, y sedimentos, teniendo como resultado el ancho preliminar del cauce permanente.
Actividad 3: Delimitar el cauce permanente como resultado de la recopilación de mapas e información recolectada en las actividades anteriores.
- La delimitación del cauce para sistemas lénticos, se lleva a cabo a partir de cinco actividades:
Actividad 1: Identificar y clasificar el sistema léntico desde la macroescala, teniendo como referencia el Mapa Nacional de Humedales del Ministerio Ambiente y Desarrollo Sostenible, obteniendo una aproximación preliminar de la extensión del sistema léntico.
Actividad 2: Delimitar el cauce permanente desde las formas del terreno a partir del procesamiento de información secundaria obtenida de sensores remotos, fotografías aéreas, mapas de pendiente, entre otros.
Actividad 3: Identificar en campo el material del sustrato, las geoformas o elementos de relieve.
Actividad 4: Determinar la amplitud a partir del pulso de inundación teniendo en cuenta los niveles máximos observados de por lo menos una estación con una longitud mínima de 15 años de registros sistemáticos, una vez esta se define, complementada con información batimétrica y topográfica se procede a realizar su proyección en el terreno para obtener el nivel máximo promedio de la lámina de agua.

Actividad 5: Finalmente con la información recolectada en las actividades anteriores, se determinará el cauce permanente del sistema léntico.

- La delimitación de la línea de mareas máximas, solo incluye los cuerpos de aguas continentales afectados por las mareas altas o pleamar y la marea viva o sicigial, para las cuales se deberá considerar la elevación máxima alcanzada por estas en la desembocadura de los sistemas loticos o lénticos. En el caso de análisis de otros fenómenos, se hará a cargo la Dirección General Marítima y Portuaria de Colombia.

Fase 2. Definición del límite físico y de estrategias para el manejo ambiental de la ronda hídrica

El límite físico de la ronda hídrica se definirá a partir de su funcionalidad, teniendo en cuenta los componentes geomorfológico, hidrológico / hidráulico y ecosistémico, cuyos resultados son la base para la definición de las estrategias para el manejo ambiental de la ronda hídrica.

- Definición del límite físico:

Componente Geomorfológico: Resultado de la relación independiente del caudal, longitud, carga y capacidad de la corriente. El objetivo del análisis es garantizar el normal funcionamiento de la dinámica propia de los sistemas fluviales a través de las siguientes actividades:

Actividad 1: Identificar las geoformas asociadas a la ronda hídrica.

Actividad 2: Referenciar en campo evidencias asociadas a unidades morfológicas por tipologías de cuerpos de agua.

Actividad 3: Delimitar el componente geomorfológico de la ronda hídrica.

Componente hidrológico: está delimitado por la zona ocupada por la corriente durante los eventos de crecida e inundaciones de acuerdo con la variabilidad intra-anual e inter-anual del régimen hidrológico que se presenta en el país al ubicarse en la zona de convergencia intertropical (ZCIT). Su delimitación se realiza a través de las siguientes actividades:

Actividad 1: Obtener información de niveles o caudales desde información sistemática, no sistemática, sensores remotos y fotografías aéreas; modelación hidrológica; Análisis de frecuencia de máximo para periodos de retorno de interés.

Actividad 2: Establecimiento y evaluación del modelo hidráulico / hidrodinámico.

Actividad 3: Delimitar el componente hidrológico.

Componente ecosistémico: a través de este componente se busca establecer, mantener o recuperar las coberturas vegetales propias de la región en los cuerpos de agua, de tal manera que se mantengan o restablezcan sus funciones ecosistémicas. Las actividades para su delimitación son las siguientes:

Actividad 1: Identificar las zonas de vida.

Actividad 2: Calcular la altura media de dosel de una comunidad vegetal.

Actividad 3: Definir la relación entre la densidad y área de drenaje por Unidad Geomorfológica.

Actividad 4: Delimitar el componente ecosistémico.

Finalmente, el límite físico de la ronda hídrica es la envolvente de la superposición de las superficies obtenidas en cada uno de los componentes: geomorfológico, hidrológico y ecosistémico.

- Definición de las directrices para el manejo ambiental de las rondas hídricas

Se tendrá en cuenta el desarrollo histórico de los asentamientos humanos realizados, buscando darse el mejor manejo de estos, de tal manera que sean compatibles con la funcionalidad de la ronda hídrica, evitando la generación de condiciones de riesgo.

Se establece la identificación de los elementos constituyentes de la ronda hídrica establecido por el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011; identificación de actores que contribuyan a establecer estrategias de manejo ambiental a la Autoridad Ambiental implicada; identificación de los servicios ecosistémicos establecidos en la Política Nacional para la Gestión Integral de la Biodiversidad y sus Servicios Ecosistémicos.

Finalmente, se establecen directrices mínimas para establecer las estrategias de manejo ambiental, considerando los dos elementos de la ronda hídrica (ronda hídrica y área de protección). Las estrategias se dividen en: estrategia de preservación, estrategia de restauración y estrategia de uso sostenible.

Como capítulo final de la Guía Técnica Colombiana, se tiene el *Seguimiento y Evaluación*, el cual aborda los aspectos relacionados con el seguimiento a la efectividad en la implementación de las estrategias mencionadas anteriormente, para el logro del objetivo de conservación y protección ambiental en el corto, mediano y largo plazo. Para el logro y sostenibilidad del acotamiento de la ronda hídrica de los cuerpos de agua, la Autoridad Ambiental competente deberá tener un programa de seguimiento permanente y sistemático que le permita evaluar y

tomar los correctivos a que haya lugar, siguiendo los indicadores mínimos a considerar para sistemas lóticos y lénticos que establece la Guía Técnica en cuestión.

1.3.3 Guía técnica – España

La metodología española señala que la franja riparia será diferente en función de la distancia al curso de agua y de las características de este. En general, un río más ancho necesita una franja riparia más ancha. La guía metodológica abarca cada uno de los aspectos a tener en cuenta en los trabajos de definición de zonas inundables que darán lugar a la generación de mapas de peligrosidad, divididos en siete bloques principales.

Bloque 1 (capítulo 2). Corresponde al desarrollo de los aspectos relacionados con la cartografía necesaria para la elaboración de los trabajos posteriores, necesitándose básicamente un modelo digital de alta resolución lo más actual posible, al igual que ortofotos actuales y fotos aéreas antiguas.

Bloque 2 (capítulo 3). Corresponde a los estudios hidrológicos requeridos, que bien podrán obtenerse a partir de los mapas de caudales máximos en régimen natural, desarrollados por el Centro de estudios y Experimentación de Obras Públicas – CEDEX y propuestos para el desarrollo del Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables – SNCZI, o bien, cuando éstos no sean suficientes para llevar a cabo la modelación hidráulica, sea por existir alteraciones hidrológicas importantes en la cuenca que impidan la consideración de un régimen natural o bien por la necesidad de utilizar una modelación hidráulica en régimen variable que requiera la construcción de un hidrograma de la avenida que se propagará a lo largo del tramo, mediante estudios hidrológicos complementarios.

Bloque 3 (capítulo 4). Corresponde con el análisis histórico del tramo considerado, a través de un estudio evolutivo del medio fluvial, comparando la situación actual con, al menos, la disponible en el vuelo americano realizado durante los años 1956-1957 y la reconstrucción, cuando sea posible, de series históricas de inundaciones.

Bloque 4 (capítulo 5). Presenta las bases para la realización de los estudios geomorfológicos del tramo tratado, mediante una observación minuciosa, tanto en gabinete como en campo, del

cauce y sus márgenes, analizando las evidencias encontradas de inundaciones y la delimitación de las unidades inundables, flujos secundarios, etc.

Bloque 5 (capítulo 6). Este bloque concluye el bloque anterior, conjuga el análisis histórico con el geomorfológico, para identificar el Dominio Público Hidráulico probable y las distintas zonas inundables.

Bloque 6 (capítulo 7). Corresponde al desarrollo de los aspectos relacionados con la modelización hidráulica requerida para la delimitación de las zonas inundables, de la zona de flujo preferente y del cauce en base a la cartografía y la hidrología generadas, empleando modelos hidráulicos uni o bidimensionales.

Bloque 7 (capítulo 8). En muchas ocasiones, será el análisis histórico y geomorfológico el que alimente al estudio hidráulico, pero habrá otras muchas situaciones en las que esto sea al revés, y los resultados obtenidos a partir de la modelización hidráulica sirvan de ayuda al primero, lo cual se intenta reflejar en el último bloque de la guía. Este último bloque de calibración y delimitación de la inundabilidad, conviene que los equipos que hayan realizado ambos estudios estén perfectamente coordinados, con el fin de optimizar y aprovechar los avances realizados en ambos sentidos.

Finalmente, la guía proporciona cuadros de recomendaciones y anexos que desarrollan algunos puntos significativos, tales como la rugosidad del cauce, o métodos más complejos y detallados para estudios particulares, que permiten un rápido análisis de los casos de estudio.

En la guía metodológica y el decreto 849/1986 del 11 de abril, por el que se aprueba el Reglamento del Dominio Público Hidráulico, establece que el Dominio Público Hidráulico – DPH está constituido por la zona inundable ordinaria, es decir, aquella en la que el cauce es ocupado sin desbordarse, inmediatamente le sigue la Zona de Servidumbre de 5 metros de anchura para el uso público que se encuentra incluida a la Zona de Policía de un ancho superior de hasta 100 metros.

1.4 Comparación componente hidráulico

En esta sección se realiza la comparación en la tabla 2 de las guías técnicas a partir de determinados aspectos relevantes en la determinación de la ronda hídrica a partir del componente hidráulico.

Tabla 2: Comparación componente hidráulico, normativa de acotamiento.

CARACTERÍSTICA	CANADÁ	COLOMBIA	ESPAÑA
Periodo de retorno (T_R)	<p>Según la zona de estudio, se debe seleccionar un evento meteorológico específico:</p> <ul style="list-style-type: none"> El huracán Hazel (1954) / la tormenta Timmins (1961), que pueden superar los 200 años de periodo de retorno Una inundación con probabilidad de 100 años, o Una inundación observada superior al nivel de inundación de 100 años. 	<p>Las zonas inundables se establecen así:</p> <ul style="list-style-type: none"> Un periodo de retorno de 15 años, teniendo en cuenta la variabilidad climática que se presenta en el país por el fenómeno ENSO con una ocurrencia asociada a 15 años, o Eventos de 100 años de periodo de retorno según el caso. 	<p>A partir de un análisis histórico geomorfológico los periodos de retorno se definen según el nivel de inundabilidad así:</p> <p>Muy alta $T_R \leq 10$ años Alta $10 \leq T_R \leq 100$ años Intermedia $T_R = 50$ años Media-baja $100 \leq T_R \leq 500$ años</p>
Registros históricos (N° de datos)	<ul style="list-style-type: none"> Para análisis de frecuencia de inundación con una sola estación se requiere un registro de 30 a 40 años. Para un análisis de frecuencia de inundación regional, se requiere para cada corriente de la región un registro de al menos 10 años. 	<p>Datos a escala diaria, con registros superiores o iguales a 15 años y un porcentaje de datos faltantes menor al 10 %. Lo ideal son 100 años de registros.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Registros de datos entre 10 y 40 años, complementados con encuestas a entidades de gestión en inundaciones y la población que permiten determinar el número de eventos ocurridos. Registros de 100 años de difícil acceso.
Topografía	<p>Obtención de secciones transversales a partir de mapas topográficos a escala 1:2000 o mayores, métodos fotogramétricos,</p>	<p>Se requieren equipos que permitan obtener precisiones altitudinales de centímetros para</p>	<p>Se determina a partir de un modelo de elevación digital generado a con tecnología de detección por luz y distancia (LIDAR - Light Detection</p>

CARACTERÍSTICA	CANADÁ	COLOMBIA	ESPAÑA
	y modelos digitales de terreno disponibles.	generar curvas de nivel con diferencias de máximo 20 cm.	and Ranging) y confirmación en campo.
Zona de ronda hídrica	<p>Divide la llanura de inundación en dos zonas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Canal de inundación que tiene un desarrollo prohibido o restringido y; • La franja de inundación que tiene un desarrollo condicional. Su magnitud se determinará en función de las condiciones de la cuenca hidrográfica local. 	<p>Se habla de dos zonas:</p> <ul style="list-style-type: none"> • La ronda hídrica que tendrá hasta 30 m de ancho con un desarrollo prohibido y, • El área de protección cuya dimensión dependerá del resultado obtenido de la aplicación de la normativa. 	<p>La zona de ronda hídrica comprende:</p> <ul style="list-style-type: none"> • El cauce permanente, denominado Dominio hidráulico público (DPH) • Zona de servidumbre de 5 metros • Zona de policía de 100 metros que incluyen la zona de servidumbre.
Rugosidad	Varía según el nivel del agua. La información disponible sobre los suelos se encuentra en la página web de <i>Canadian Soil Information Services (CANSIS)</i> , fuente autorizada de datos e información de suelos en Canadá.	Se recomienda calcular la rugosidad aplicando la ecuación de Jarres (1984) o estimaciones indirectas para ríos de alta pendiente, los valores de rugosidad se deben verificar en campo y compara con valores de estudios anteriores.	Condicionada por los mapas de uso del suelo del Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España, se le atribuye un coeficiente de rugosidad aplicando el método Corine Land Cover. Para la rugosidad del cauce se hace énfasis en los sedimentos y la aplicación del método de Cowan.
Secciones del modelo hidráulico	Se recomienda un intervalo de secciones que permita definir adecuadamente la geometría del río, además de secciones donde ocurren cambios en la pendiente, el área de la sección transversal o la rugosidad del canal, lugares donde comienzan y terminan diques, puentes y otros.	Se recomiendan secciones perpendiculares a la corriente, cada 4 a 6 veces el ancho del cauce permanente. Si el DEM tiene menor resolución se recomiendan secciones con separación igual a la resolución. Para corrientes meandricas se recomiendan secciones en la zonas de máxima y mínima curvatura del tramo.	Inicialmente, se recomiendan secciones con separación no mayor a 100 metros, pero en general, dependen de la resolución que tenga el DEM y el periodo de retorno seleccionado; se recomiendan secciones al menos cada 10 m para $T_R=100$ años. Para el resto de periodos se recomiendan distancias entre 10 y 25 m.

CARACTERÍSTICA	CANADÁ	COLOMBIA	ESPAÑA
Procedimiento	<ol style="list-style-type: none"> 1. Selección del estándar de inundación, según las zonas y los eventos históricos que se le atribuyen. 2. Revisión de datos y conceptos teóricos para realizar la modelación hidráulica e hidrológica. 3. Calculo de caudales, y niveles. 4. Determinación de la franja y realización del informe final. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Priorización de intervención de los cuerpos de agua. 2. Delimitación del cauce permanente. 3. Delimitación del límite físico a partir del componente geomorfológico, hidrológico/hidráulico y ecosistémico. 4. Estrategias de manejo ambiental y seguimiento. 	<ol style="list-style-type: none"> 1. Recolección de información de partida. 2. Realización de estudios hidrológicos teniendo en cuenta mapas de caudales máximos. 3. Análisis históricos que determinan el dominio hidráulico público probable. 4. Análisis de riesgo según el componente Geomorfológico e histórico. 5. Modelación hidráulica. 6. Delimitación del dominio hidráulico público y zona de flujo preferente.

Del análisis de las diferentes características que se tienen en cuenta al momento de determinar el acotamiento hídrico en las tres metodologías de los países objeto de estudio, se comprobó que a pesar de tener en cuenta los mismos parámetros, su manejo y aplicación se realiza de manera distinta. Específicamente en Canadá se observa que hay un enfoque en la determinación del periodo de retorno a partir de eventos históricos de gran magnitud, asociados a una regionalización del país al momento de determinar los parámetros de modelación. En España se evidencia un enfoque en el análisis de eventos históricos, su frecuencia y nivel de inundabilidad de la zona, con una componente de análisis geomorfológico – históricos. Adicionalmente, en el proceso metodológico de Canadá y España la determinación del acotamiento de la ronda hídrica se realiza al final del procedimiento, mientras que en el caso de Colombia se determina al inicio. De manera general, se consideraría pertinente incluir en el acotamiento de la ronda hídrica en Colombia, las características del sistema hídrico y la integración del riesgo de manera específica.

El siguiente capítulo presenta los fundamentos teóricos de los modelos hidráulicos de inundaciones, características, hipótesis y consideraciones del software Hec-Ras.

2.Marco teórico

El presente capítulo tiene como propósito destacar los principales modelos utilizados al momento de realizar la modelación hidráulica y la problemática de inundación, así mismo las principales ecuaciones e hipótesis básicas.

Teniendo en cuenta el enfoque de este estudio en el componente hidráulico al momento de establecer el acotamiento de la ronda hídrica, se presentan las características básicas de la modelación hidráulica en 1D, 1D+, 2D y 3D, tal como las ecuaciones que se aplican, el tiempo de cálculo y los resultantes esperados. Finalmente, se presentan las características, hipótesis, consideraciones y resultados del software Hec-Ras 5.0.2 utilizado en la modelación del caso de estudio.

2.1 Modelos hidráulicos de inundación

La tabla 3 presenta las principales características de los modelos hidráulico de inundación según su aproximación espacial.

Tabla 3: Descripción modelos hidráulicos.
Fuente: Néelz, S. & Pender, G., 2009

Método	Descripción	Potencia de aplicación	Tiempo calculo	Salidas/resultante	Ejemplos (modelos)
1D	Solución unidimensional de las ecuaciones de St- Venant, y la ecuación de Bernoulli	Modelado a escala del diseño que depende del tamaño de la cuenca.	Minutos	Profundidad del agua, velocidad promedio y caudal en cada sección transversal. Extensión de la inundación si las planicies de inundación son parte del modelo 1D.	Mike 11 HEC-RAS, ISIS InfoWorks RS
1D+	Enfoque de celda de almacenamiento para la simulación del flujo de la llanura de inundación.	El modelado a escala del diseño depende del tamaño de la cuenca, también tiene el potencial para una aplicación a gran escala si se usa con datos de sección transversal dispersos.	Minutos	Como los modelos 1D, más los niveles de agua y el grado de inundación en las celdas de almacenamiento de llanuras de inundación	Mike 11 HEC-RAS ISIS InfoWorks RS
2D-	2D, menos la ley de conservación del momentum para el flujo de la llanura de inundación.	Modelado a gran escala y aplicaciones donde los efectos inerciales no son importantes.	Horas	Planicie de inundación, profundidades del agua.	LISFLOOD- FP JFLOW
2D	Solución de las ecuaciones bidimensionales para aguas poco profundas	Puede tener el potencial para su uso en el modelado a gran escala si se aplica con grillas muy gruesas.	Horas o días	Planicie de inundación, profundidades del agua, Velocidades promediadas en profundidad.	TUFLOW Mike21 TELEMAC InfoWorks- 2D
2D+	2D más una solución para velocidades verticales usando solo continuidad.	Predominan las aplicaciones de modelado costero donde los perfiles de velocidad 3D son importantes. También se ha aplicado en problemas con alcances de modelación de ríos a escala en proyectos de investigación.	Días	Planicie de inundación, profundidades del agua, velocidades en 3D.	TELEMAC 3D
3D	Solución de las ecuaciones tridimensionales de Navier Stokes promediadas con Reynolds (RANS)	Predicciones locales de campos de velocidad tridimensionales en canales principales y planicies de inundación.	Días	Planicie de inundación, profundidades del agua, velocidades en 3D.	CFX

2.1.1 Ecuaciones de la modelación unidimensional

Las ecuaciones de St-Venant se pueden expresar de la siguiente manera:

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(s_0 - s_f) = 0 \quad (2)$$

La ecuación (1) hace referencia a la ecuación de continuidad o conservación de la masa, y la ecuación (2) es la ecuación de momentum. Donde Q es el caudal, A es el área de la sección transversal, g es la aceleración de la gravedad, h es la profundidad de agua promediada en la sección transversal, S_0 es la pendiente del lecho en la dirección longitudinal y S_f es la pendiente de fricción (pendiente de la línea de energía).

Los diversos términos en la ecuación de conservación de momentum en su respectivo orden son los siguientes: aceleración local, aceleración advectiva, presión, pendiente del lecho y pendiente de fricción. La ecuación de momentum esta expresada en forma conservadora.

La pendiente de fricción S_f es una medida de la fricción que actúa sobre el flujo. Varios modelos de fricción se pueden proporcionar:

$$S_f = \frac{1}{C^2 R} U|U| \quad \text{según Chézy} \quad (3)$$

$$S_f = \frac{n^2}{R^{4/3}} U|U| \quad \text{según Manning} \quad (4)$$

Donde C es el coeficiente de Chézy, n es el coeficiente de Manning, R es el radio hidráulico y U es la velocidad media del flujo. La n de Manning es la más comúnmente aplicada.

El desarrollo de las ecuaciones de Saint Venant requieren las siguientes hipótesis teóricas para su uso (Ven Te Chow, 1994):

- La profundidad y la velocidad de flujo solamente varía en la dirección longitudinal del canal.

- Las variaciones de profundidad y velocidad a lo largo del canal se realizan de manera gradual.
- El canal es aproximadamente lineal.
- La pendiente del lecho del cauce es pequeña.
- El lecho es fijo, es decir, que no hay erosión ni sedimentación.
- La resistencia puede ser calculada a partir de los modelos de flujo uniforme permanente.
- El fluido es incompresible y de densidad constante.

Adicionalmente, la modelación unidimensional se puede realizar también mediante la ecuación de energía (5) propuesta por Bernoulli (1738), considerando un fluido incompresible y un flujo permanente.

$$Z_2 + Y_2 + \frac{a_2 V_2^2}{2g} = Z_1 + Y_1 + \frac{a_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad (5)$$

$$\alpha_i = \frac{[Q_1 V_1^2 + Q_2 V_2^2 + \dots + Q_N V_N^2]}{Q V^2} \quad (6)$$

Donde Z_1 y Z_2 son las elevaciones del canal principal, Y_1 y Y_2 son las profundidades de la lamina de agua en la sección transversal, V_1 y V_2 son las velocidades promedio, α_1 y α_2 son los coeficientes de ponderación de la velocidad según la ecuación (6), g es la aceleración de la gravedad, h_e corresponde a las pérdidas de energía, Q_N y V_N son el caudal y la velocidad en la sección N , respectivamente (USACE, 2016).

Las pérdidas de energía entre dos secciones se determinan según la ecuación siguiente:

$$h_e = L S_f + C \left| \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} - \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right| \quad (7)$$

Donde L corresponde a la longitud ponderada de una sección a otra, S_f corresponde a la pendiente de fricción entre dos secciones y C corresponde al coeficiente de expansión o contracción (USACE, 2016).

La posición de la lámina de agua de cada sección es determinada a través de un procedimiento iterativo resolviendo un sistema de dos ecuaciones (8) y (9) (Chaudhry, 2008).

$$H_2 = H_1 - h_f \quad (8)$$

$$H_2 = H_{vel} - h_{ele} \quad (9)$$

Donde H_i es la cabeza total en el punto i , h_f representa las pérdidas de energía entre el punto i y el punto $i + 1$, H_{vel} es la cabeza de velocidad y h_{ele} es la cabeza de elevación.

2.1.2 Ecuaciones 2D en aguas poco profundas

La ecuación bidimensional de aguas poco profundas expresada en forma vectorial es:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = H \quad (10)$$

Donde x y y son las dos dimensiones espaciales. Los cuatro vectores U , F , G , H están definidos como sigue:

$$U = \begin{pmatrix} h \\ hu \\ hv \end{pmatrix}; F = \begin{pmatrix} hu \\ g \frac{h^2}{2} + hu^2 \\ huv \end{pmatrix}; G = \begin{pmatrix} hv \\ huv \\ g \frac{h^2}{2} + hu^2 \end{pmatrix}; H = \begin{pmatrix} 0 \\ gh(S_{0x} - S_{fx}) \\ gh(S_{0y} - S_{fy}) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Donde u y v son las velocidades promediadas en profundidad en las direcciones x y y respectivamente y, S_{0x} y S_{0y} son las pendientes del lecho en las direcciones x y y . Las pendientes de fricción en las direcciones x y y se pueden expresar de manera análoga a la formulación unidimensional de la siguiente manera (suponiendo el uso de n de Manning):

$$S_{fx} = -\frac{n^2 u \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad \text{y} \quad S_{fy} = -\frac{n^2 v \sqrt{u^2 + v^2}}{h^{4/3}} \quad (12)$$

Se puede mostrar que la ecuación (11) revierte las ecuaciones de 1D St-Venant asumiendo que $v = 0$, ignorando cualquier gradiente en la dirección y y multiplicándolo por la profundidad promediada del ancho del canal. La ecuación (10) es expresada en forma conservadora.

2.1.3 Métodos numéricos de discretización

El modelado numérico consiste en reemplazar ecuaciones diferenciales como las presentadas anteriormente por ecuaciones algebraicas, vinculando las variables calculadas a un conjunto finito de números en el dominio espacio-tiempo, este proceso se es denominado como discretización. Existen muchos métodos numéricos, de los cuales en su mayoría se dividen en tres estrategias de discretización presentadas a continuación:

Métodos de diferencias finitas

Los métodos de diferencia finita (FDM) se basan en expansiones de series de Taylor para expresar el valor tomado por una variable en un punto dado, en función de los valores en puntos vecinos y de derivados locales de órdenes crecientes. Estas series de Taylor se combinan para producir expresiones aproximadas para las derivadas involucradas en las ecuaciones de aguas poco profundas, en función de un número finito de valores de puntos vecinos. La precisión de las aproximaciones puede controlarse mediante el orden en que se desarrollan las expansiones de la serie Taylor.

La implementación de métodos de diferencia finita es significativamente más sencilla en una cuadrícula computacional estructurada. Esto explica en cierta medida porque su popularidad está actualmente en disminución en la comunidad académica, ya que las redes no estructuradas son una mejor herramienta para modelar los flujos ambientales. Sin embargo, son usados debido a su compatibilidad con modelos digitales de terreno de alta resolución y modelos batimétricos digitales creados a partir de encuestas LiDAR y sonar (Néelz & Pender, 2009).

Métodos de elementos finitos

En los métodos de elementos finitos, el espacio de la solución se divide en varios elementos en 2D. En cada elemento, las variables desconocidas se aproximan mediante una combinación lineal de funciones lineales por partes llamadas funciones de prueba. Existen tantas funciones como vértices que definen el elemento, y cada una toma el valor de uno (1) en un vértice y el valor de cero (0) en todos los demás vértices. Una función global basada en esta aproximación se sustituye en las ecuaciones diferenciales parciales que gobiernan. Esta ecuación se integra luego con las funciones de ponderación y el error resultante se minimiza para dar coeficientes a las funciones de prueba que representan una solución aproximada.

Los métodos de elementos finitos se benefician de una base matemática rigurosa; sin embargo, la técnica no se ha utilizado tanto como otros enfoques en software comercial, quizás porque es menos accesible conceptualmente y produce modelos que resultan en tiempos de ejecución mayores (Néelz & Pender, 2009).

Métodos de volumen finito

En el método de volumen finito, el espacio se divide celdas llamadas volumen finito que son elementos de cualquier forma geométrica. Las ecuaciones de aguas poco profundas (en forma conservadora) se integran sobre cada volumen para producir ecuaciones en términos de flujos a través de los límites. Los valores de flujo a través de un límite dado (calculado usando variables interpoladas) se usan para ambos volúmenes separados por el límite, lo que resulta en la conservabilidad teórica de la masa y el momento del enfoque (un flujo en un volumen finito a través de un límite siempre es igual a un flujo de uno vecino a través del mismo límite). En 1D, los métodos de volumen finito son equivalentes a los métodos de diferencia finita. Los métodos de volumen finito son cada vez más populares y se han convertido en el método más utilizado en el área de modelado de flujo de aguas poco profundas. Esto puede explicarse por sus ventajas en términos de conservadurismo, flexibilidad geométrica y simplicidad conceptual (Néelz & Pender, 2009).

2.2 Modelo hidráulico Hec – Ras

El software HEC RAS (Hydrologic Engineering Center - River Analysis System), desarrollado por Cuerpo de Ingenieros del Ejército de los Estados Unidos, es uno de los modelos más utilizados en la modelización hidráulica, diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales, bidimensionales o combinados (1D y 2D) para canales naturales o construidos. HEC RAS contiene cuatro (4) componentes de análisis hidráulico: (1) Cálculo de perfil de superficie a flujo constante; (2) simulación de flujo inestable unidimensional y bidimensional; (3) Cálculo de transporte de sedimentos; y (4) análisis de calidad de agua.

Para el caso de estudio el componente aplicado es el cálculo de perfil de superficie a flujo constante, destinado a cálculos para flujo permanente gradualmente variado, el cual maneja un alcance de un solo río, un sistema dendrítico o red completa de canales. El componente de flujo constante es capaz de modelar perfiles de superficie de agua en

condiciones de flujo a régimen subcrítico, supercrítico y mixto. El sistema de flujo constante es diseñado para su aplicación en la gestión de llanuras de inundación. Además, hay herramientas disponibles para evaluar el cambio en los perfiles de superficie de agua debido a mejoras de canal y diques.

El procedimiento computacional se basa en el cálculo iterativo de una sección a la siguiente resolviendo la ecuación unidimensional de energía (ecuación de Bernoulli (5)). Las pérdidas de energía se evalúan por fricción (ecuación de Manning (4)) y contracción/expansión (coeficiente multiplicado por el cambio de la velocidad). La ecuación de momentum (2) se utiliza en situaciones en las que el perfil de la superficie del agua varía rápidamente (USACE, 2016).

Para la aplicación adecuada del software, es importante conocer las limitaciones del programa para el componente de cálculo de perfil de superficie a flujo constante y sus capacidades hidráulicas sujetas a la ecuación de Bernoulli (5), presentadas a continuación:

- a. Se supone que el flujo es permanente porque los términos dependientes del tiempo no están incluidos en la ecuación de energía (5).
- b. El flujo varía gradualmente a lo largo del canal, porque la ecuación de Bernoulli (5), se basa bajo la premisa de que existe una distribución de presiones hidrostáticas que permanece en cada sección al momento de calcular las pérdidas de energía por fricción.
- c. La profundidad y velocidad del flujo varía en dirección longitudinal al canal, y es constante en cada sección.
- d. Sólo se pueden modelar ríos con pendientes menores a 10° ($\alpha < 10^\circ$, $S_o < 0.18$), ya que no se tiene en cuenta la componente vertical del peso de la columna de agua en la ecuación¹.
- e. El lecho del cauce es fijo.

¹ La derivación de la ecuación de energía calcula la presión vertical. Para una pendiente inferior del canal de 1:10 (5.71 grados) o menos, se tiene que la altura de presión vertical se usa como profundidad vertical de agua. Con un error estimado a 0.5%. Si se trabaja con pendientes más pronunciadas, no se puede realizar la simplificación.

- f. Ni saltos u obstáculos son reproducidos correctamente. Existen otros métodos para simular o reproducir dichos efectos que dependen del tipo de flujo.
- g. El resultado viene condicionado por las consideraciones geométricas adoptadas.
- h. Reconociendo en la literatura como valioso, se tiene que el software HEC RAS es preciso para observar la llanura de inundación del cauce principal pero no de los bancos en su componente unidimensional.

Respecto a la visualización de los resultados que se obtienen a partir del software, se maneja la herramienta RasMapper, la cual presenta graficas de extensión de la mancha de inundación, calados y velocidades; para tener la posibilidad de esta visualización de resultados se requiere de un archivo del terreno .tiff; adicionalmente a partir de la extensión HEC-GeoRas, se pueden visualizar resultados en Sistemas de Información Geográfica tales como ArcGis.

3. Modelación caso de estudio – proceso de modelación

3.1 Caracterización general de la zona

El Municipio de Dosquebradas, está localizado al sur oriente del departamento de Risaralda, su cabecera municipal limita con la ciudad de Pereira (Figura 5). Dosquebradas conforma el Área Metropolitana Centro Occidente con los municipios de Pereira y La Virginia y; limita por el norte y el oriente con el municipio de Santa Rosa de Cabal, por el occidente con los municipios de Marsella y Pereira, y al sur con el municipio de Pereira. El municipio está localizado altiméricamente entre las cotas 1350 y 2150 msnm, presentando una apreciable diferenciación entre zonas planas, de piedemonte y de laderas largas con pendientes fuertes (Plan de Ordenamiento Territorial de Risaralda). El área aproximada del municipio es de 70.81 km², de los cuales 13 km² corresponden a la zona urbana.

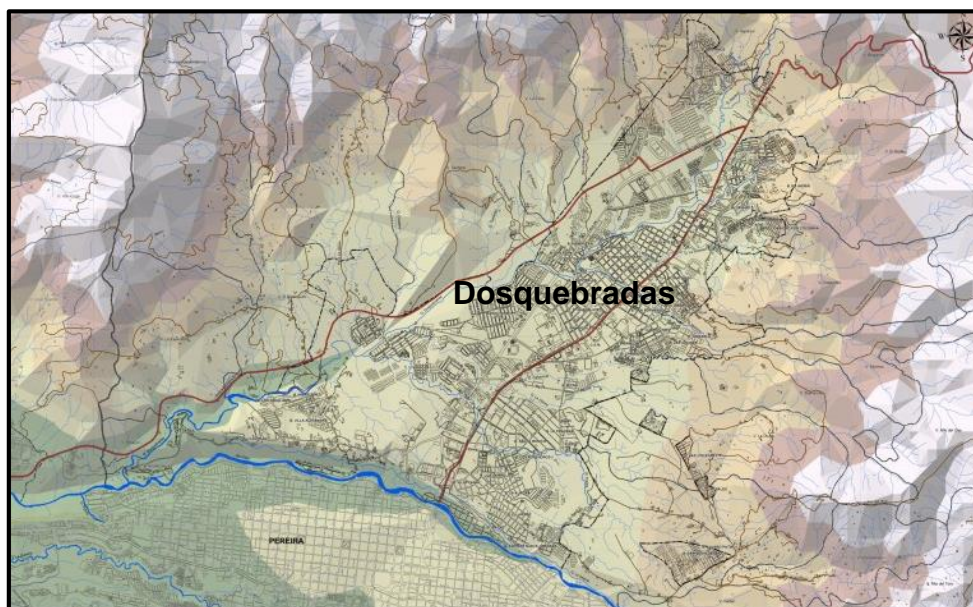


Figura 5: Mapa general Dosquebradas – Risaralda.

Fuente: Atlas de Risaralda – Gobernación de Risaralda, 2004.

Dosquebradas hizo parte del municipio de Santa Rosa de Cabal hasta 1972, cuando se convirtió en el décimo cuarto y más joven municipio del departamento de Risaralda. Cuenta aproximadamente con 6500 empresas de orden natural y jurídico, algunas ubicadas en su territorio hace más de 50 años. Su dinámica empresarial aporta al departamento cerca del 20% del PIB, más del 35% de las exportaciones no tradicionales y más de 22.000 empleos directos (Cámara de Comercio de Dosquebradas, 2012).

La precipitación en el municipio, varía entre 2300 y 3100 mm/año aproximadamente, presentando las mayores pluviosidades en la zona norte del departamento. La precipitación tiende a disminuir hacia el sur y suroccidente (límites con el Municipio de Pereira); existe un régimen bimodal de meses poco lluviosos, cálidos y soleados (enero, febrero, julio, agosto) y otro de meses lluviosos más nublados y fríos (abril, mayo, octubre, noviembre), con una temperatura media muy uniforme entre 17°C y 22°C (CARDER, 2008).

En cuanto a la cobertura vegetal y uso del suelo en el municipio de Dosquebradas, el café es el principal cultivo con una extensión de 1.636,6 ha, que representa el 23.19% en lo referente a los cultivos permanentes y semipermanentes. El bosque secundario representa el 20.32%, así mismo se identifica un área de bosque plantado con 87,6 ha (1.24%), en la Figura 6 se puede observar la distribución de la cobertura y uso del suelo en Dosquebradas (CARDER, 2008).

El Municipio de Dosquebradas presenta gran variabilidad de pendiente, desde un 3% hasta 75% o superior. Como se puede observar en la Figura 7, la mayoría del territorio presenta pendientes superiores al 12%, esto se atribuye a que la zona rural del municipio corresponde aproximadamente al 81.6%, correspondiente a zona montañosa del país. La zona donde se encuentra ubicada la quebrada Frailes, presenta variación del 3% en la zona urbana hasta el 50 % en la zona rural.

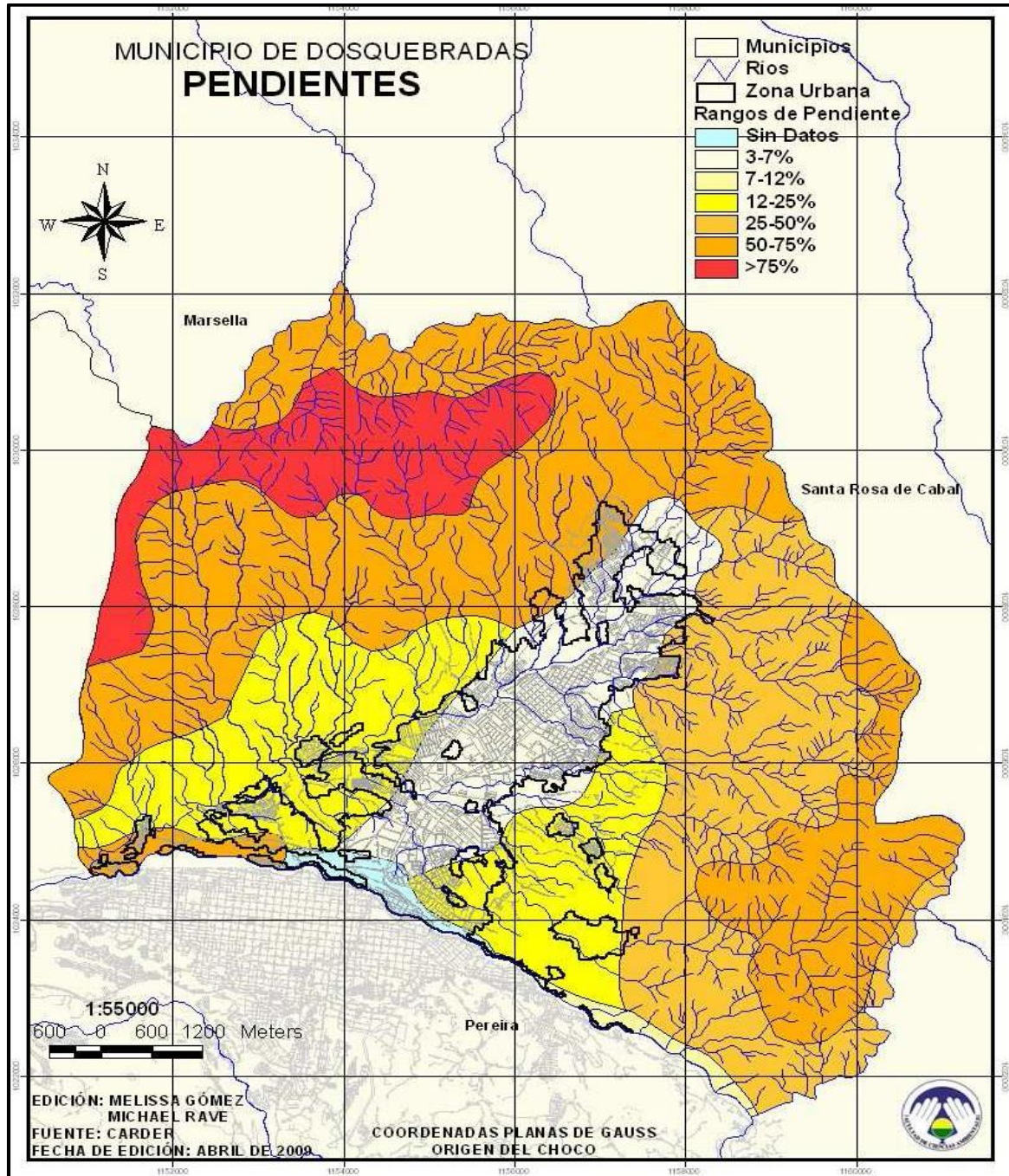


Figura 7: Mapa de pendientes del municipio Dosquebradas - Risaralda.
Fuente: CARDER, 2008.

La principal cuenca del municipio es la Quebrada Dosquebradas, formada por la unión de las quebradas Manizales y Aguazul, entregando sus aguas al Río Otún. La red hidrográfica se origina de manantiales y de aguas subterráneas que afloran entre 1600 y 1800 msnm,

de ella depende varios acueductos urbanos y rurales que abastecen a la población. La red hidrográfica principal del municipio está conformada por las quebradas: La Fría, Tominejo, La Amoladora, Gutiérrez, Aguazul, Frailes, Manizales, La Víbora, La Soledad y Molinos, entre otras (Figura 8).

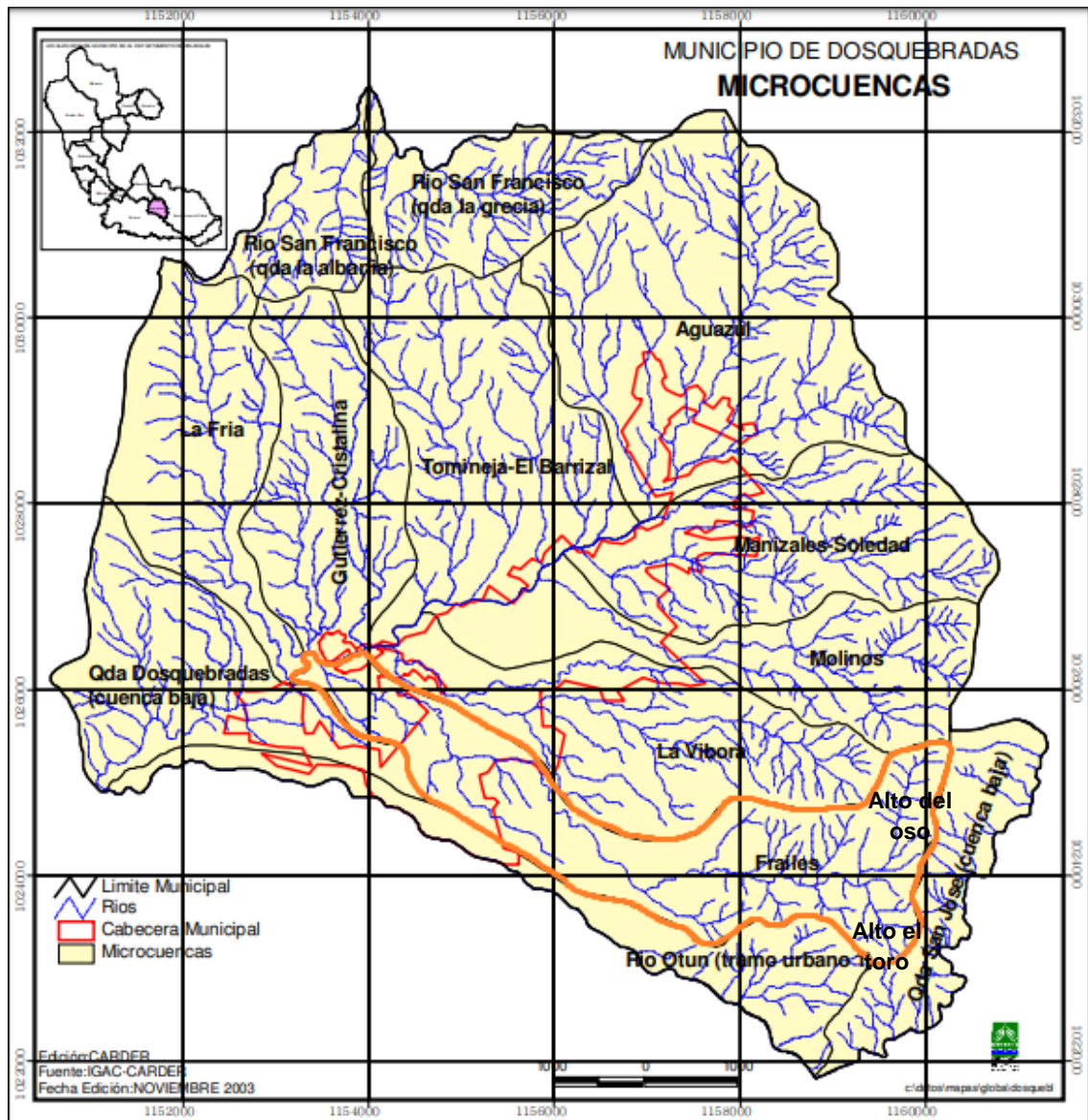


Figura 8: Microcuencas y red de drenaje municipio Dosquebradas – Risaralda.
Fuente: modificado de CARDER, 2008.

La zona objeto de estudio es la quebrada Frailes en su zona urbana y rural descrita a continuación:

3.2 Quebrada Frailes

La *Quebrada Frailes* se encuentra ubicada en el sector suroriental del municipio Dosquebradas, los afluentes que la forman se localizan en el Alto del Oso y en el Alto el Toro a 2030 y 1975 msnm, respectivamente (Figura 9). Inicia su recorrido en dirección norte - sur para luego girar hacia el occidente y entregar sus aguas a la quebrada Dosquebradas a la altura del Barrio Campestre B. Limita por el norte con la microcuenca de la quebrada La Víbora y por el sur con la cuenca del río Otún.

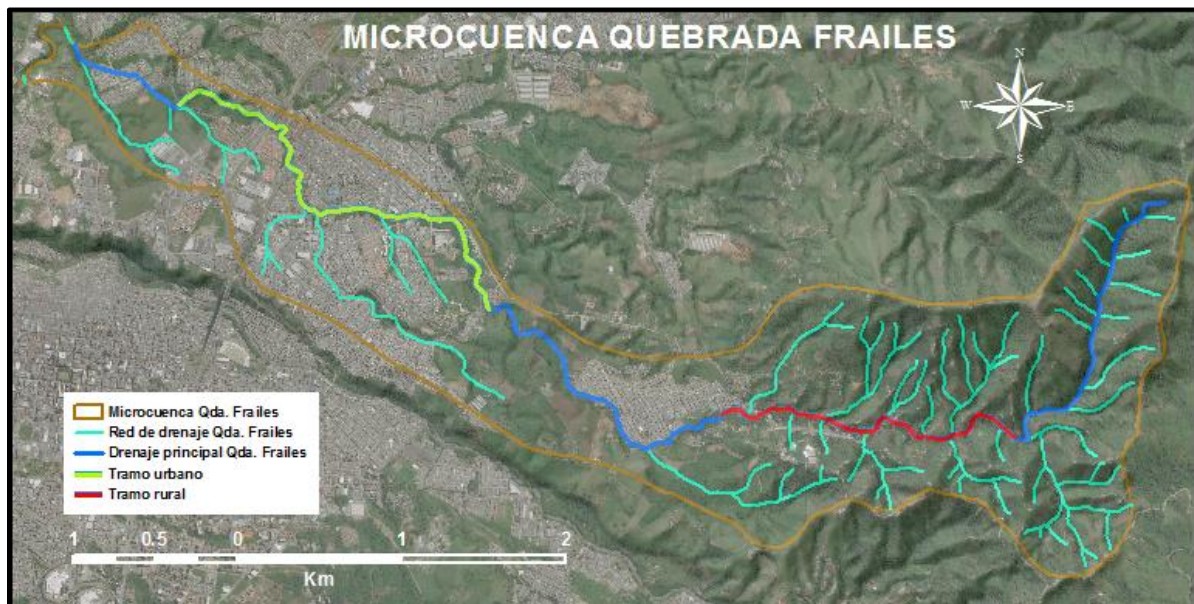


Figura 9: Microcuenca Quebrada Frailes

Fuente: Adaptado de SASPlanet – Red de drenaje CARDER

La Tabla 4, presenta las principales características morfométricas de la microcuenca Frailes, datos extraídos del documento "Evolución Geomorfológica de la Microcuenca de la Quebrada Dosquebradas. 1992 citado en el Diagnostico de riesgos ambientales, municipio de Dosquebradas - CARDER, 2009".

Tabla 4: Parámetros Morfométricos de la Microcuenca de la Quebrada Frailes.
Fuente: CARDER – Universidad de Caldas, 2009.

Parámetro	Valor
Área (km ²)	6.53
Perímetro (km)	18.08
Ancho Promedio (km)	1.04
Longitud Axial (km)	6.25
Coefficiente de Compacidad - Kc	2.00
Factor de forma - Ft	0.17

La Quebrada Frailes a lo largo de su recorrido pasa por zona rural y urbana, las cuales se evaluarán de manera independiente para la aplicación en el acotamiento de la ronda hidrúca. La Figura 10 y Figura 11 presentan los tramos de zona urbana y rural objeto de estudio respectivamente.



Figura 10: Tramo zona urbana Qda. Frailes.
Fuente: Adaptado SASPlanet – Red de drenaje CARDER



Figura 11: Tramo zona rural Qda. Frailes.
Fuente: Adaptado SASPlanet – Red de drenaje CARDER

3.3 Eventos históricos

En el municipio de Dosquebradas – Risaralda a lo largo de los años se ha presentado eventos que han marcado la historia de la zona, según el Inventario Histórico de Desastres del Municipio de Dosquebradas para el periodo 1933-2002, y los datos recopilados por Rodrigo Montes Restrepo para su trabajo de grado en Administración del Medio Ambiente por en el año 2003, Dosquebradas ha sido afectado por 252 eventos de inundación, los cuales representan un 32% del total de los eventos reportados en este periodo de tiempo. En los últimos años se han presentado eventos importantes a tener en cuenta:

Desbordamiento de la quebrada Frailes (26 de agosto de 1996)

Fuente: eltiempo.com

El 26 de agosto de 1996 las fuertes lluvias presentadas en Dosquebradas (Risaralda), dejaron dos personas muertas, tres niños desaparecidos y 887 familias damnificadas, 66 de ellas ubicadas en albergues comunitarios y escuelas del lugar. Así mismo, se estableció que 13 acueductos rurales quedaron inservibles. Las inundaciones provocadas por las quebradas Manizales, La Chillona, Frailes, La Soledad y Dosquebradas, alcanzaron en algunos puntos los 2,5 metros, y afectaron a los habitantes del barrio Campestre D. Según el alcalde de la localidad, Germán Aguirre Muñoz, también resultaron inundados los barrios La Soledad, Santa Isabel, Los Pinos, Bosques de la Acuarela, Playa Rica, Villa Diana, La Floresta, Los Libertadores, Lusitania y Los Alpes. La mayoría de las viviendas inundadas representan pérdidas millonarias de enseres y alimentos.

Represamiento en la quebrada Frailes (30 de marzo de 2017)

Fuente: Caracol radio., RisaraldaHoy.com

En las horas de la mañana del día jueves 30 de marzo de 2017, se presentó un movimiento de tierra de aproximadamente 7000 metros cúbicos en los sectores de Comuneros y La Playita, generando un taponamiento de la quebrada Frailes y un represamiento de la misma.

El represamiento originó que los habitantes del barrio Comuneros y la Playita perdieran sus enseres, 15 viviendas terminaron inundadas, y 30 barrios en estado de alerta por donde pasa la quebrada. Las aguas de la quebrada Frailes subieron cerca de 3 metros, por lo cual se realizaron líneas de alerta temprano en el sector de comuneros hasta el barrio Campestre B por parte de los funcionarios de los organismos de socorro.



Figura 12: Represamiento Qda. Frailes, 30 de marzo de 2017.
Fuente: Caracol radio, 2017.

Desbordamiento de la quebrada Frailes y La Fría: 21 de octubre de 2018

Fuente: Eltiempo.com., CiudadRegión., Eje21

Las lluvias provocaron el aumento del caudal de varias quebradas, que se represaron y se desbordaron. Las aguas de las quebradas Frailes y La Víbora arrastraron palos, material vegetal y basuras, colapsando el sistema vial de Dosquebradas. Vehículos bajo el agua, vías convertidas en arroyos y establecimientos comerciales anegados, fue el panorama que se vio en el 80% de dicho municipio.



Figura 13: Desbordamiento de la Qda. Frailes, 21 de octubre de 2018.
Fuente: CiudadRegión, 2018.

De acuerdo con la administración municipal, por lo menos 30 barrios, sin contar las vías y los sectores rurales resultaron inundados por el fuerte aguacero que duró varias horas en la zona urbana y rural de Dosquebradas. La peor parte la llevó el hospital Santa Mónica que tuvo que ser evacuado debido a que se inundó parte de sus instalaciones.

Los sectores rurales y urbanos afectados en Dosquebradas son los siguientes: Valher, Santa Mónica, Comuneros, Colinas, El Japón, Frailes, La Aurora Baja, Okarina, La Playita, Maracay, San Judas, Portal de La Pradera, Quintas de Aragón, Granate, El Limonar, Campestres B y C, Reservas de La Pradera, Reservas de Milán, Los Naranjos, Los Reyes, Playa Rica, Santa Teresita, Camilo Mejía Duque, Álvaro Patiño, El Edén. Además, la vía La Divisa y las veredas Gaitán, Filo Bonito, La Cima, La Estufita, Alto del Toro, Santana, y los acueductos de Barrios Unidos y Frailes. También resultaron afectados el Lago La Pradera, el supermercado Mercamás, Maderas El Baudó y el Hospital Santa Mónica.

Inundaciones en el hospital Santa Mónica por desbordamiento de la quebrada frailes (28 de mayo de 2019).

Fuente: Caracol., CM&

Las intensas precipitaciones registradas el 28 de mayo de 2018 generaron la inundación del 90% del Hospital Santa Mónica de Dosquebradas debido al desbordamiento de la quebrada Frailes aledaña al centro médico. El 90% de los servicios del centro médico resultaron afectados.



Figura 14: Desbordamiento de la Qda. Frailes, 28 de mayo de 2019.

Fuente: CM&,2019.

Por lo menos 170 viviendas quedaron afectadas en Dosquebradas por las inundaciones que generaron el desbordamiento de las quebradas frailes y la víbora que cruzan la localidad, la creciente inundó calles y algunos barrios dejando en medio a vehículos y personas. Se vieron afectados los barrios Alamos 1 y 2 (14 viviendas), Maracay (4 viviendas), Portal del parque (60 viviendas), igualmente afectado el barrio La Aurora, Centro Comercial El Único y el barrio Comuneros.

3.4 Visita de campo

La salida de campo realizada el día miércoles 31 de julio de 2019 en Dosquebradas – Risaralda tuvo como objetivo efectuar un reconocimiento de la zona de estudio (Qda. Frailes) y realizar aforos de caudal en tres (3) puntos del cauce, determinando zonas susceptibles a inundación, forma del cauce y verificar la topografía del lugar, teniendo en cuenta que el modelo del terreno utilizado en la modelación hidráulica se obtiene a partir de las curvas de nivel proporcionadas por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda – CARDER, y existen zonas en el terreno con alturas inferiores al cauce de la quebrada Frailes.

Los aforos en la quebrada se realizaron con el equipo OTT MF Pro, con el cual, se toman velocidades a lo largo de la sección transversal del río en diferentes dovelas definidas según la longitud de la sección y la lámina de agua que se presente en la sección. La ubicación de los puntos aforados se presentan en la Figura 15, seguidamente se relaciona cada zona de aforo con sus coordenadas, sección transversal, datos y cálculos resultado.

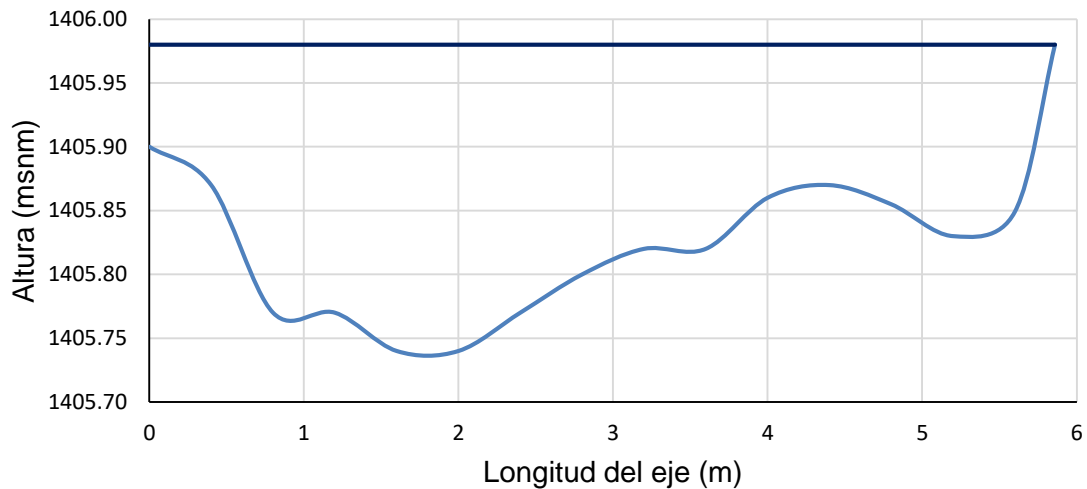


Figura 15: Ubicación zonas de aforo en la Quebrada Frailes.
Fuente: Adaptado de OpenStreetMap.

3.4.1 Zona de aforo 1

La zona de aforo 1, se encuentra ubicada en la desembocadura de la Quebrada Frailes donde entrega sus aguas a la Quebrada Dosquebradas. Sus coordenadas en el sistema WGS84 corresponden a latitud 4°49'53.7"N, longitud 75°41'32.6" W.

En la Gráfica 1, se muestra la sección transversal de la zona de aforo 1; seguidamente en la Tabla 5, se relacionan los datos tomados en campo, los cálculos realizados y el resultado, obteniendo un caudal de 0.32 m³/s.



Gráfica 1: Sección transversal zona de aforo 1.

Tabla 5: Datos y resultados aforo 1.

Dovela #	Abscisa [m]	Abscisa acumulada [m]	hi [m]	yi [m]		Vi [m/seg]	Vi [m/s]	Ai [m ²]	Qi [m ³ /s]	Q [%]
				0.2y	0.8y					
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.00
1	0.8	0.8	0.23	0.2y	0.046	0.402	0.350	0.092	0.0322	10.01
				0.8y	0.184	0.297				
2	0.8	1.6	0.26	0.2y	0.052	0.468	0.357	0.196	0.0699	21.76
				0.8y	0.208	0.245				
3	0.8	2.4	0.23	0.2y	0.046	0.439	0.396	0.196	0.0775	24.14
				0.8y	0.184	0.352				
4	0.8	3.2	0.18	0.2y	0.036	0.379	0.341	0.164	0.0559	17.42
				0.8y	0.144	0.303				
5	0.8	4	0.14	0.2y	0.028	0.378	0.328	0.128	0.0420	13.08
				0.8y	0.112	0.278				
6	0.8	4.8	0.145	0.2y	0.029	0.209	0.196	0.114	0.0223	6.96
				0.8y	0.116	0.183				
7	0.8	5.6	0.151	0.2y	0.030	0.099	0.093	0.1184	0.0110	3.41
				0.8y	0.121	0.086				
	0.26	5.86	0.02	0.2y	0.004	0.464	0.464	0.02223	0.0103	3.21
			0.8y	0.016	0.464					
			hi media				V media	At = ΣAi	Qt = ΣQi	
			0.1695				0.29	1.03	0.32	

En la zona las orillas se encuentran con cobertura apreciable (pastos altos) como se muestra en la Figura 16, pero es importante resaltar que aguas arriba se encuentran casas ubicadas en la orilla de la quebrada y un tramo canalizado lo que altera la dinámica de la misma; adicionalmente se logró observar mala calidad del agua, descoles directos y actividades de extracción de material.

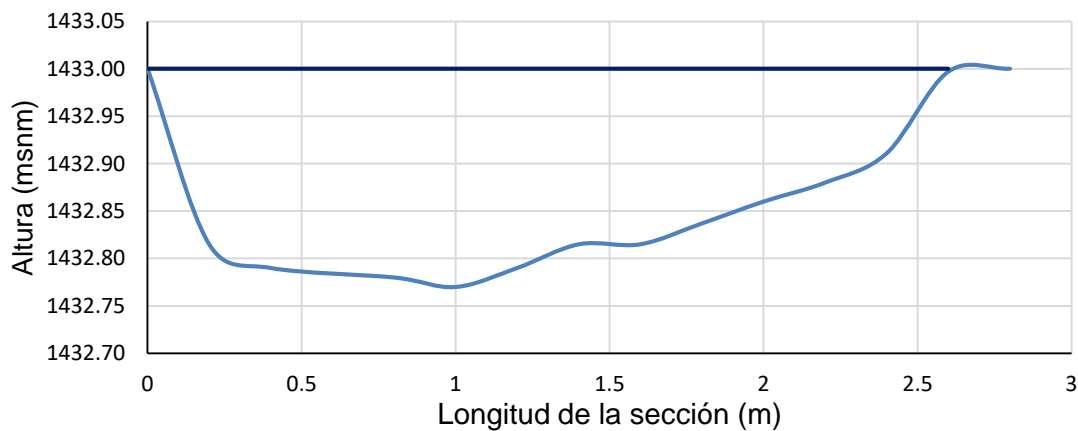


Figura 16: Cobertura vegetal y canalización en la zona de aforo 1.

3.4.2 Zona de aforo 2

La zona de aforo 2, se encuentra ubicada a la altura del Hospital Santa Mónica del municipio. Sus coordenadas en el sistema WGS84 corresponden a latitud 4°49'22.7"N, longitud 75°40'46.4" W.

En la Gráfica 2, se muestra la sección transversal de la zona de aforo 2; seguidamente en la Tabla 6, se relacionan los datos tomados en campo, los cálculos realizados y el resultado, obteniendo un caudal de 0.15 m³/s.



Gráfica 2: Sección transversal zona de aforo 2.

Tabla 6: Datos y resultados aforo 2.

Dovela #	Abscisa [m]	Abscisa acumulada [m]	hi [m]	yi [m]		Vi [m/seg]	Vi [m/s]	Ai [m ²]	Qi [m ³ /s]	Q [%]
				0.2y	0.8y	0.2y	0.8y	0.2y	0.8y	0.2y
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.4	0.4	0.185	0.2y	0.037	0.349	0.343	0.037	0.0127	3.95
				0.8y	0.148	0.336				
2	0.4	0.8	0.22	0.2y	0.044	0.585	0.506	0.081	0.0410	12.77
				0.8y	0.176	0.427				
3	0.4	1.2	0.21	0.2y	0.042	0.509	0.463	0.086	0.0398	12.39
				0.8y	0.168	0.416				
4	0.4	1.6	0.185	0.2y	0.037	0.398	0.363	0.079	0.0286	8.92
				0.8y	0.148	0.327				
5	0.4	2	0.14	0.2y	0.028	0.298	0.248	0.065	0.0161	5.02
				0.8y	0.112	0.198				
6	0.4	2.4	0.089	0.2y	0.018	0.169	0.145	0.0458	0.0066	2.07
				0.8y	0.071	0.121				
7	0.4	2.8	0.003	0.2y	0.001	0.495	0.495	0.0184	0.0091	2.84
				0.8y	0.002	0.495				
			<i>hi media</i>				<i>V media</i>	<i>At = ΣAi</i>	<i>Qt = ΣQi</i>	
			0.14743				0.34	0.41	0.15	

En la Figura 17, se observa material granular de diferentes tamaños presente en el río, a través de estas imágenes se determina la rugosidad del cauce y las bancas para esta zona, adicionalmente se puede observar la carencia de cobertura vegetal en las orillas del río.



Figura 17: Material del cauce en la zona de aforada 2.

En la Figura 18, se evidencia la existencia de obras de mitigación y control del cauce deterioradas, es importante tener en cuenta que la mala implementación de este tipo de obras alteran la dinámica del río. En esta zona, los habitantes reportan que la última emergencia por inundación presentada se dio por el desbordamiento del río en la zona que se muestra de la imagen derecha de la Figura 18, es por esto que las autoridades

competentes ubicaron costales con suelo-cemento elevando el nivel de la orilla del río en el punto implicado.



Figura 18: Obras de mitigación y costales de suelo cemento en la quebrada Frailes.

En la zona 2, se realizaron entrevistas a los habitantes, relacionadas a continuación:

- Pedro Alejandrino Yepes

Reporta que el río se desborda por la zona mostrada en Figura 18, las casas del sector estuvieron afectadas por la inundación incluyendo su casa, reporta que el nivel del agua le tapaba los pies.

- Luis Eduardo Agudelo

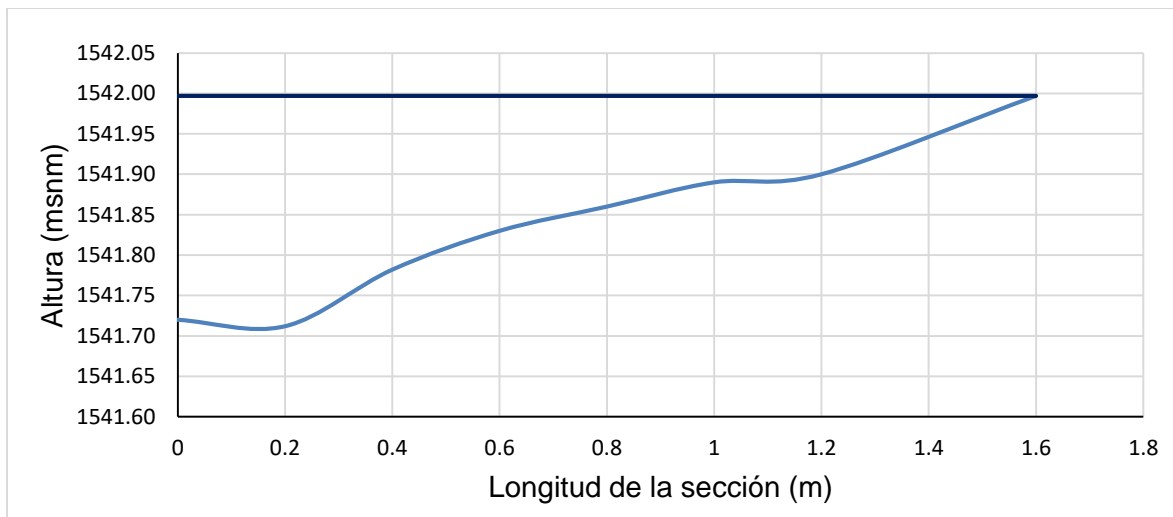
Reporta que la última inundación del presente año afectó el hospital, el desbordamiento se da en la zona que se muestra en Figura 18, y el agua baja por las calles teniendo un nivel de hasta 30 cm entrándose el agua a las viviendas con una lámina de 3 cm de altura en el interior de la vivienda, adicionalmente reporta que los servicios públicos en la vivienda no fueron afectados por la inundación, pero sí tuvieron pérdidas materiales.

Adicionalmente, en la salida de campo se tomaron fotografías que permiten determinar la rugosidad de la quebrada Frailes y verificar zonas de posible inundación.

3.4.3 Zona de aforo 3 – Zona rural

La zona de aforo 3, se encuentra ubicada en la zona rural del municipio Dosquebradas, comuna Frailes. Sus coordenadas en el sistema WGS84 corresponden a latitud $4^{\circ}48'43.2''N$, longitud $75^{\circ}39'21.8'' W$.

En la Gráfica 3, se muestra la sección transversal de la zona de aforo 3; seguidamente en la Tabla 7, se relacionan los datos tomados en campo, los cálculos realizados y el resultado, obteniendo un caudal de $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$.



Gráfica 3: Sección transversal zona de aforo 3.

Tabla 7: Datos y resultados aforo 3.

Dovela #	Abscisa	Abscisa acumulada	hi	yi		Vi	Vi	Ai	Qi	Q
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[m/seg]	[m/s]	[m ²]	[m ³ /s]	[%]
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0.2	0.2	0.288	0.2y	0.058	0.381	0.359	0.0288	0.0103	3.22
				0.8y	0.230	0.337				
2	0.2	0.4	0.218	0.2y	0.044	0.404	0.374	0.0506	0.0189	5.89
				0.8y	0.174	0.343				
3	0.2	0.6	0.17	0.2y	0.034	0.396	0.416	0.0388	0.0161	5.02
				0.8y	0.136	0.435				
4	0.2	0.8	0.14	0.2y	0.028	0.428	0.436	0.031	0.0135	4.21
				0.8y	0.112	0.444				
5	0.2	1	0.11	0.2y	0.022	0.421	0.428	0.025	0.0107	3.33
				0.8y	0.088	0.434				
6	0.2	1.2	0.1	0.6y	0.060	0.384	0.384	0.021	0.0081	2.51
7	0.4	1.6	0.03	0.2y	0.006		0.000	0.026	0.0000	0.00
				0.8y	0.024					
			hi media				V media	At = $\sum Ai$	Qt = $\sum Qi$	
			0.15086				0.40	0.22	0.08	

En el sector rural aforado se realizó la medida de la pendiente con el nivel de precisión teniendo como resultado 3% de pendiente, en ese lugar se encuentran caída de aguas negras directas al río y descoles, los habitantes del sector reportan que en temporada de lluvias el río puede aumentar de 2 a 3 metros su nivel. De manera general, el cauce en las zonas aforadas se encuentra incisado, con alturas en las orillas de 2 hasta 5 metros de altura.

La salida de campo permitió realizar un reconocimiento preliminar de la zona y establecer el caudal en tres puntos a lo largo de la quebrada Frailes en zona rural y urbana a partir de aforos de velocidad. Se evidencio que las edificaciones se encuentran ubicadas a proximidad de las orillas de la quebrada. La zona urbana se caracterizó por una topografía plana, y extensa por ambas orillas del río y el cauce principal se encuentra incisado y con un ancho limitado (aproximadamente de 4 a 8 m) por obras de control. La zona rural presenta pendientes fuertes y zonas de difícil acceso. Además, a través de las entrevistas realizadas se determinó que los organismos de socorro como el Hospital Santa Mónica se encuentran ubicados en la margen inundable de la quebrada, sienten afectados por episodios de inundación.

De lo anterior se concluye que el municipio de Dosquebradas presenta altos niveles de exposición lo que se deriva en una alta vulnerabilidad, que la norma colombiana no contempla al momento de establecer el acotamiento de la ronda hídrica. El hecho de que las casas se encuentran ubicadas en esta zona resulta de un desarrollo urbano descontrolado. La aplicación de la norma en la zona exigiría la reubicación de una parte importante del casco urbano del municipio, de difícil implementación y que conlleva a problemas socio-económicos. No obstante, la aplicación de la norma tal como está prevista, y teniendo en cuenta las características de la zona no proporcionará soluciones optimas ni adaptadas a la realidad local. Considerando que la zona afectada es muy amplia y de difícil acceso, la caracterización topográfica y la determinación de los parámetros de modelación implicaran un extenso trabajo en campo.

3.5 Características de la modelación

Teniendo en cuenta lo expuesto en los modelos hidráulicos de inundación del capítulo 2. Marco teórico, se determina realizar la modelación hidráulica en el software HEC RAS 5.0.7. A continuación, en la Tabla 8, se relacionan las características del modelo para la zona rural y urbana de la Quebrada Frailes.

Tabla 8: Características generales de la moderación.

CARACTERÍSTICA	ZONA URBANA	ZONA RURAL
Geometría	A partir de la herramienta HEC-RAS Mapper se genera el modelo del terreno con el archivo .tif el cual proporciona coordenadas horizontales al proyecto y es necesario para establecer la geometría del modelo y las elevaciones para generar las secciones transversales.	
Rugosidad	Asignación del coeficiente de Manning "n" en cada sección, estos valores varían según la zona y se presentan en la Tabla 10, y los mapas de rugosidades en las Figura 22 y Figura 23 .	
Mallado	Secciones de cálculo cada 3 a 4 m de longitud.	
	Se realizaron 890 secciones a lo largo de 3050 m de longitud del cauce.	Se realizaron 544 secciones a lo largo de 2100 m de longitud del cauce.
Condiciones borde	Se ingresan los caudales en la sección inicial de los tramos estudiados. Ver Tabla 11 y Tabla 12.	

Los Modelos Digitales de Elevación (DEM por sus siglas en inglés) se definen como un conjunto de datos numéricos que describe la distribución espacial de la altitud en una zona determinada (IDEAM, 2017, para la modelación con el uso de la herramienta HEC-RAS Mapper se utilizó un DEM construido a partir de la extracción de curvas de nivel de la zona desde el archivo *curvas_PereiraDosquebradas.shp* suministradas por la CARDER. En la Figura 19 se puede visualizar el modelo de elevación digital de Dosquebradas – Risaralda; en la Figura 20 y Figura 21 de manera específica, se muestra el modelo de elevación digital DEM de la zona urbana y rural respectivamente.

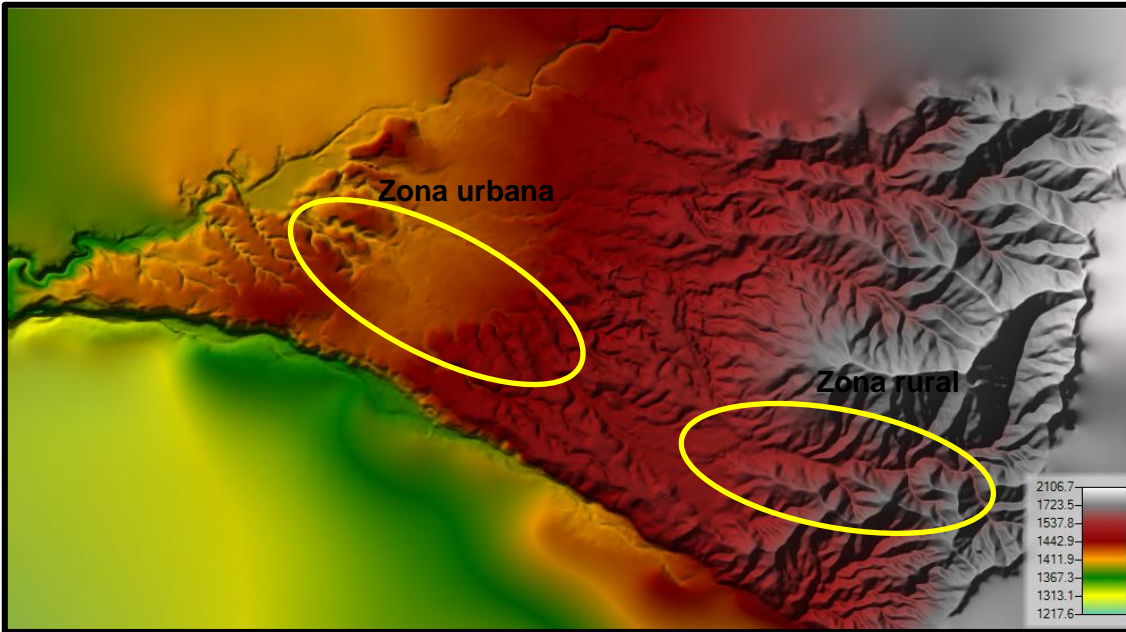


Figura 19: Modelo de Elevación Digital – DEM.
Fuente: Adaptado de interfaz RasMapper – Hec Ras 5.0.7

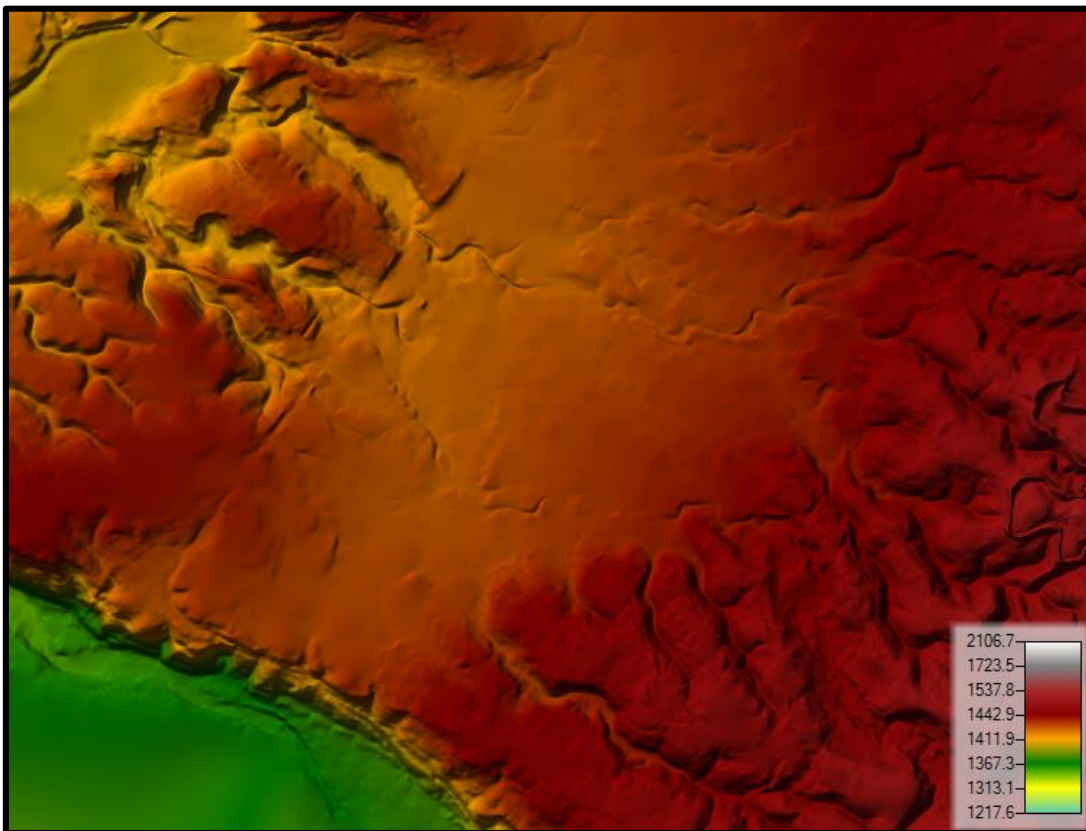


Figura 20: Modelo de Elevación Digital – zona urbana
Fuente: Interfaz RasMapper – Hec Ras 5.0.7

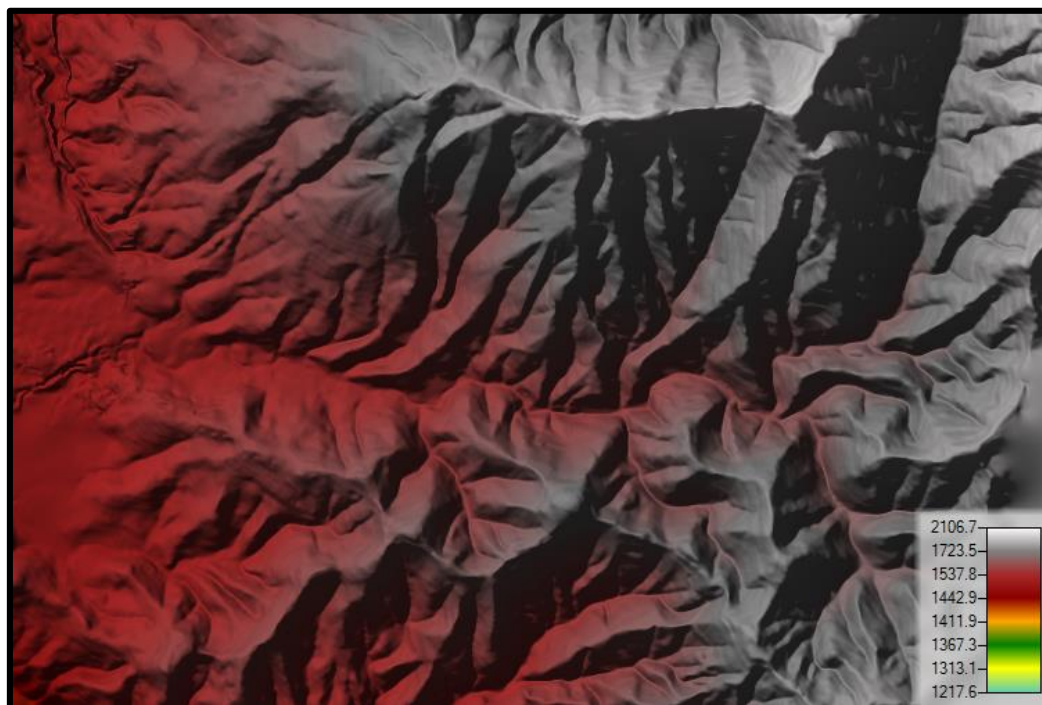


Figura 21: Modelo de Elevación Digital – zona rural
Fuente: Interfaz RasMapper – Hec Ras 5.0.7

El uso de la herramienta RAS Mapper requiere un sistema de coordenadas para el modelo de elevación digital y proyección del modelo. Las coordenadas usadas para la modelación de la zona son:

Tabla 9: Coordenadas del Modelo de Elevación Digital

Sistema de coordenadas	MAGNA Colombia Oeste
Proyección	Transverse Mercator
Datum	MAGNA
Falso Este	1'000.000,00
Falso Norte	1'000.000,00
Meridiano Central	-77.0775
Factor de Escala	1.00
Latitud de Origen	4.5962
Unidad	Metro

Del modelo de elevación digital – DEM se extraen los datos topográficos necesarios para obtener la geometría del cauce principal, las bancas y las secciones transversales. Posteriormente se asigna los coeficientes de rugosidad “n” a cada sección, para el cauce principal y las bancas tanto en la zona urbana como rural; para este caso de estudio los

valores asignados se determinan bajo la observación de imágenes satelitales, y algunas zonas visitadas el día 31 de julio de 2019; la Tabla 10a contiene los valores utilizados para la calibración del modelo del 31 de julio de 2019 usando el método de Cowan², la Tabla 10b contiene los valores Manning en caso de crecientes, y la Figura 22 y Figura 23 muestran la distribución espacial a lo largo de los tramos modelados. Los valores asignados de acuerdo a las características de cobertura y uso de suelo de las zonas estudiadas, fueron consultados en el manual del software HEC RAS "HEC-RAS River Analysis System, Hydraulic Reference Manual, capítulo 3. *Basic Data Requirements*, pág. 3-14" Versión 5.0 de febrero de 2016.

Tabla 10a: Coeficientes de Manning "n" – Calibración 31 de julio de 2019.

Sección	Caudal (m ³ /s)	Manning compuesto	n _i	n
1	0.32	Grava gruesa	0.028	0.159
		Irregularidad moderada	0.015	
		Variación frecuente en la sección	0.015	
		Efecto de obstáculos apreciable	0.030	
		Vegetación alta	0.050	
		Sinuosidad apreciable	1.150	
2	0.15	Cauce de grava	0.040	
		Zonas arbustivas y pastos	0.050	
		Morteros	0.023	
3	0.08	Roca	0.025	0.230
		Irregularidad severa	0.020	
		Variación frecuente en la sección	0.015	
		Efecto de obstáculos severo	0.040	
		Vegetación muy alta	0.100	
		Sinuosidad alta	1.150	

Tabla 10b: Coeficientes de Manning "n" en caso de crecientes.

DESCRIPCIÓN	VALOR MEDIO
Cauce de grava, cantos rodados y algunas rocas.	0.040
Zonas arbustivas, pequeños árboles, abundante pasto	0.050
Sinuoso, bancos de arena y algunos pozos poco profundos	0.040
Zonas con pastos altos, piedras y malezas	0.035
Piedras con mortero, costales con mortero	0.023
Hormigón conformado	0.020

² El método de Cowan hace referencia a la ecuación $n = (n_0 + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * n_5$, la cual tiene en cuenta los factores primarios que afectan el coeficiente de rugosidad.

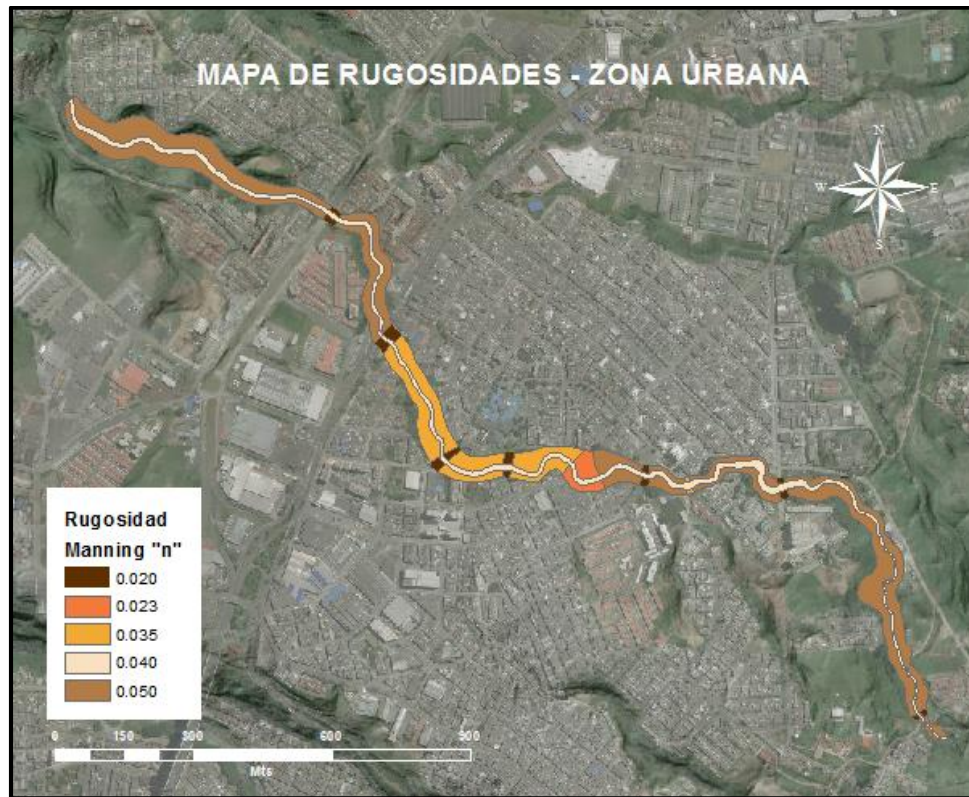


Figura 22: Mapa de rugosidades – zona urbana.

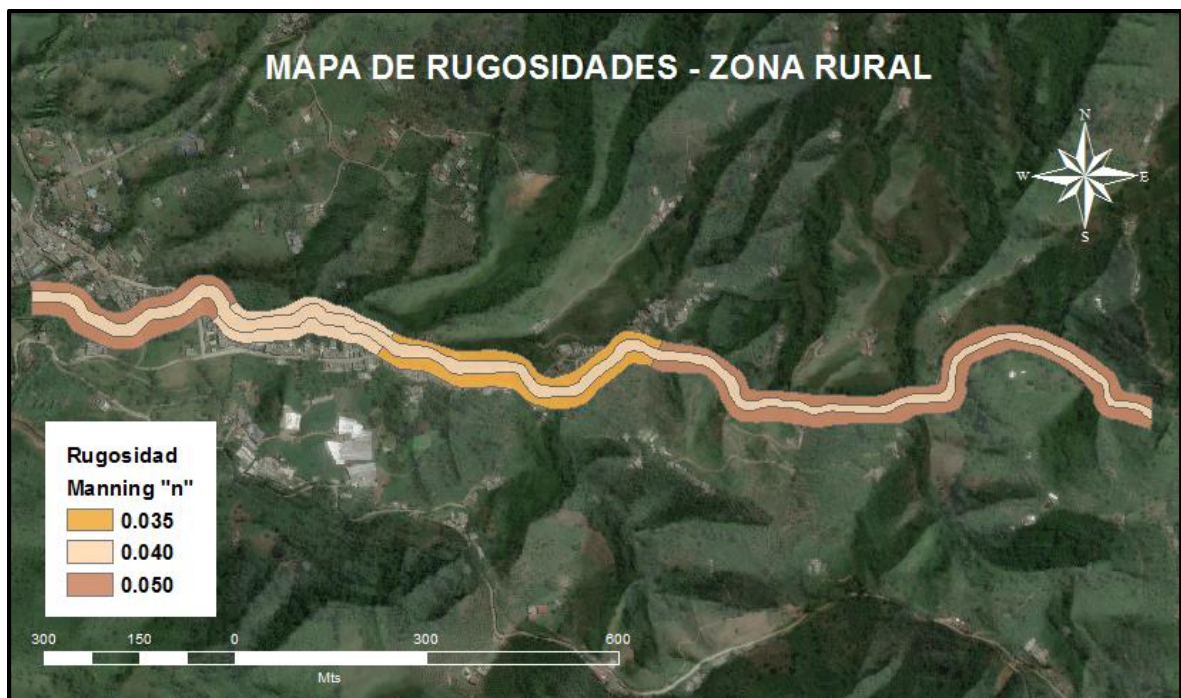


Figura 23: Mapa de rugosidades – zona rural.

3.6 Caudales de simulación

Los caudales de simulación fueron determinados a través del uso del modelo estadístico y matemático para la cuantificación de los caudales de las fuentes hídricas, asociado al proyecto de investigación “Aplicación de la modelación hidrológica distribuida de tipo conceptual en el departamento de Caldas para eventos extremos”, presentado por el Instituto de Estudios Ambientales – IDEA – y el Grupo de Trabajo Académico en Ingeniería Hidráulica y Ambiental de la Universidad Nacional de Colombia, sede Manizales, (Vélez, 2012) a la Corporación Autónoma Regional de Caldas – CORPOCALDAS.

De manera general se tiene que, el modelo utilizado, para la obtención de la lluvia de diseño, se desarrolló a partir de un script en Matlab que genera un archivo en formato texto de entrada para el modelo TETIS (modelo de simulación hidrológica). La información recopilada para el proyecto, tiene una resolución espacial de celda de 8100 m² (90m x 90m), con coordenadas en origen Bogotá. Para la elaboración del programa y mediante el uso de los Sistemas de información Geográfica (SIG) se emplean archivos en formato de texto relacionados al mapa de direcciones de flujo, el mapa de tiempos de concentración de la cuenca, y los mapas de precipitación de diseño para cada periodo de retorno (2.33, 10, 15, 30, 40 y 100 años).

En la Tabla 11 y Tabla 12, se muestran los caudales obtenidos para la cuenca correspondiente a la quebrada Frailes para la zona urbana y rural respectivamente, y el caudal del río calculado a partir del aforo realizado en la salida técnica del día miércoles 31 de julio de 2019.

Tabla 11: Caudales zona urbana Qda. Frailes.
Fuente de datos: Vélez, 2012.

Simulación	Periodo de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)
1	Aforo (31 de julio de 2019)	0.32
2	2.33	20.23
3	10	24.01
4	15	24.65
5	30	28.97
6	40	30.51
7	100	35.83

Tabla 12: Caudales zona rural Qda. Frailes.

Fuente de datos: Vélez, 2012.

Simulación	Periodo de retorno (años)	Caudal (m ³ /s)
1	Aforo (31 de julio de 2019)	0.08
2	2.33	14.47
3	10	17.99
4	15	18.61
5	30	22.62
6	40	24.09
7	100	29.21

Los caudales obtenidos a partir de los aforos realizados en la salida de campo el día miércoles 31 de julio, se hacen válidos para calibrar el modelo.

3.7 Resultados

El propósito del proceso de modelación fue evaluar la determinación del acotamiento de la ronda hídrica según las tres normas y la disponibilidad de datos de acuerdo a lo suministrado por la Corporación Autónoma Regional de Risaralda– CARDER, con el fin de evaluar y verificar la validez. La calibración del modelo se realizó mediante los datos tomados en campo el 31 de julio de 2019, considerando el cauce en condiciones de temporada seca. Y el proceso de validación en condiciones de creciente se realizó a partir de los eventos históricos y reportes proporcionado por observadores locales.

Desde el análisis de la zona de estudio, se realizó la simulación teniendo en cuenta las características generales de la modelación presentadas en la Tabla 8 y los caudales de la zona urbana y rural presentados en la Tabla 11 y Tabla 12 respectivamente, mediante el uso del software Hec-Ras 5.0.7. A continuación, se presentan los resultados de la mancha de inundación, la velocidad y el perfil para cada simulación realizada.

3.7.1 Resultados zona urbana

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la zona urbana (Figura 24 a Figura 45), en términos de manchas de inundación, velocidad y perfil longitudinal.

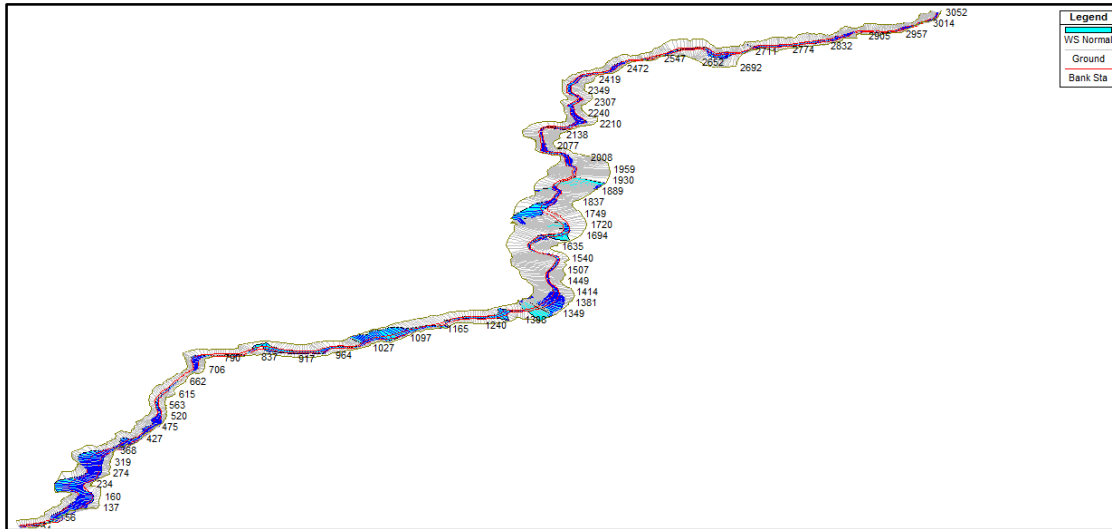


Figura 24: Cauce 3D – $Q_{\text{Obs. 31 de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mapas de inundación:

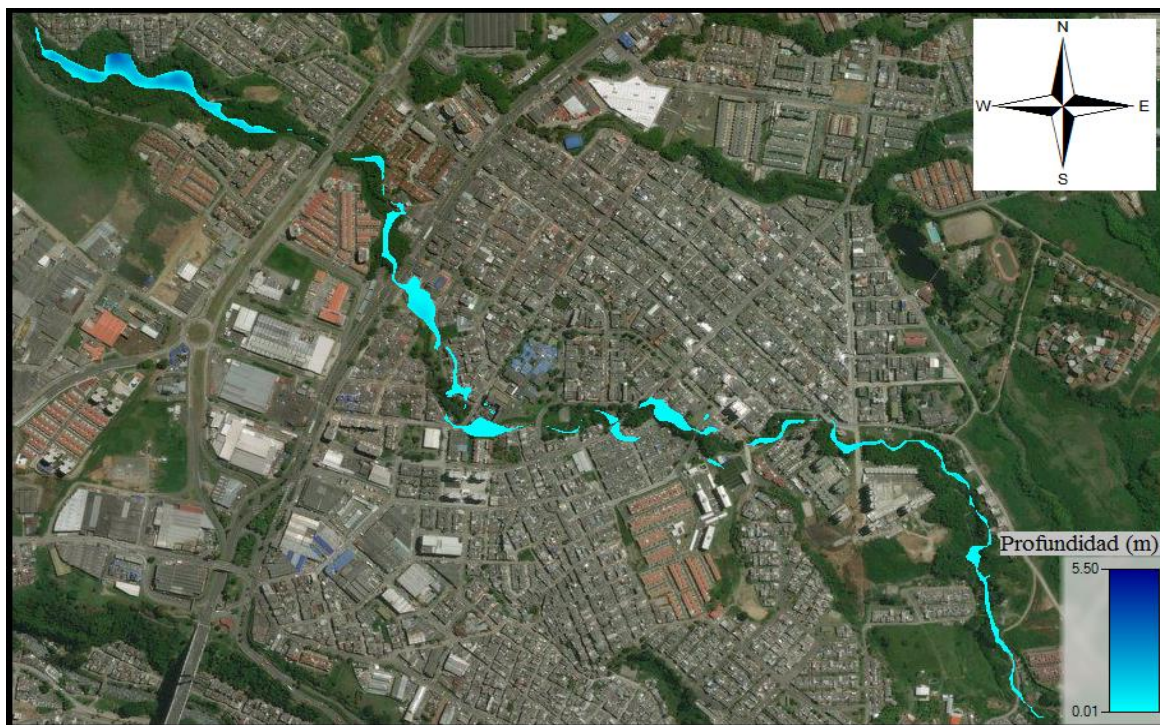


Figura 25: Mapa de inundación – $Q_{\text{Obs. 31 de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$

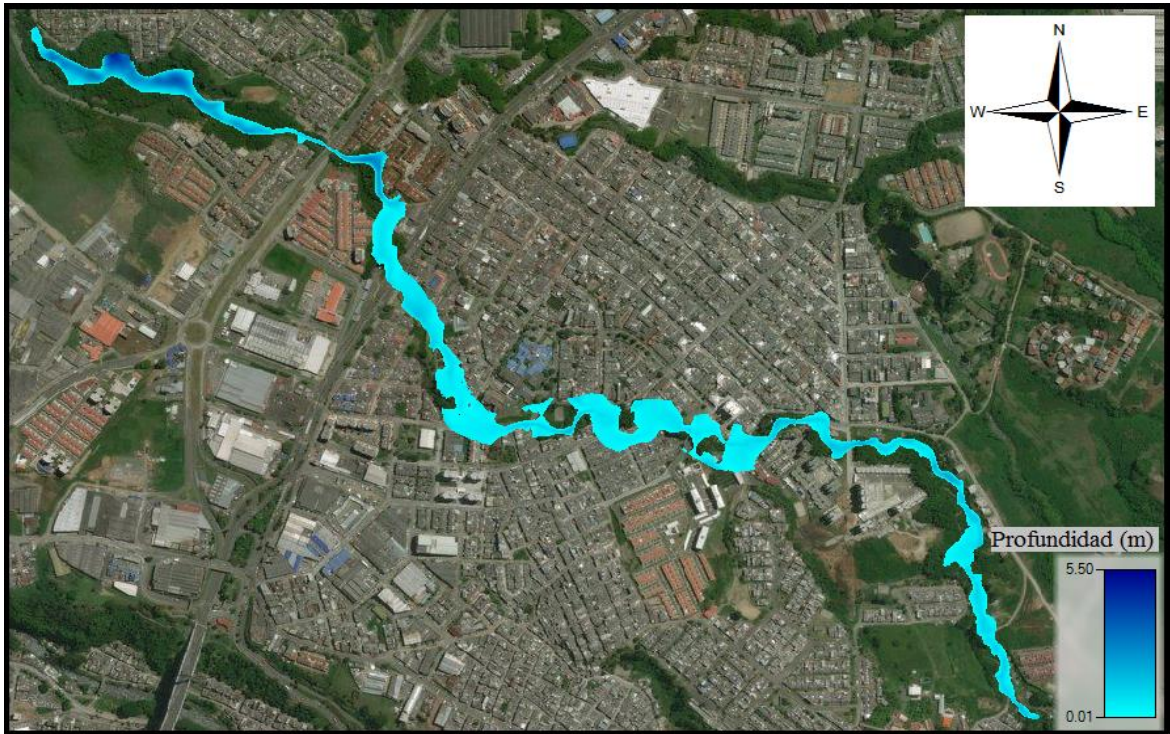


Figura 26: Mapa de inundación – T_R 2.33 años, $Q = 20.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

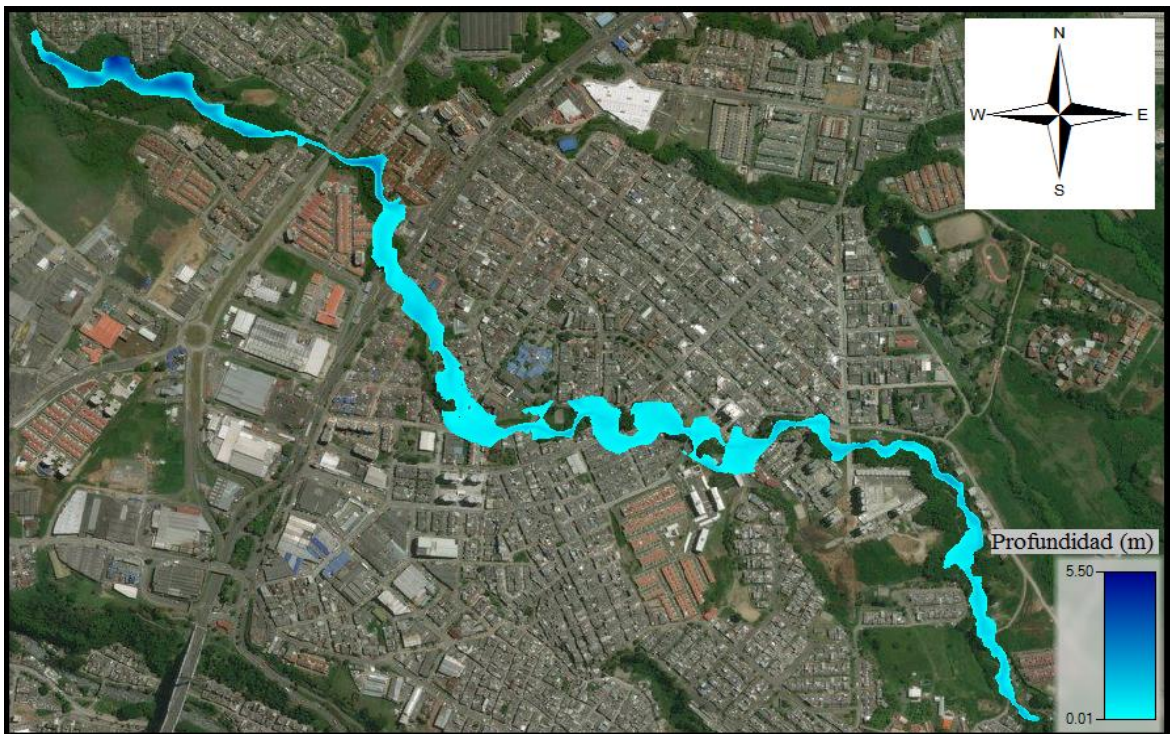


Figura 27: Mapa de inundación – T_R 10 años, $Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$.

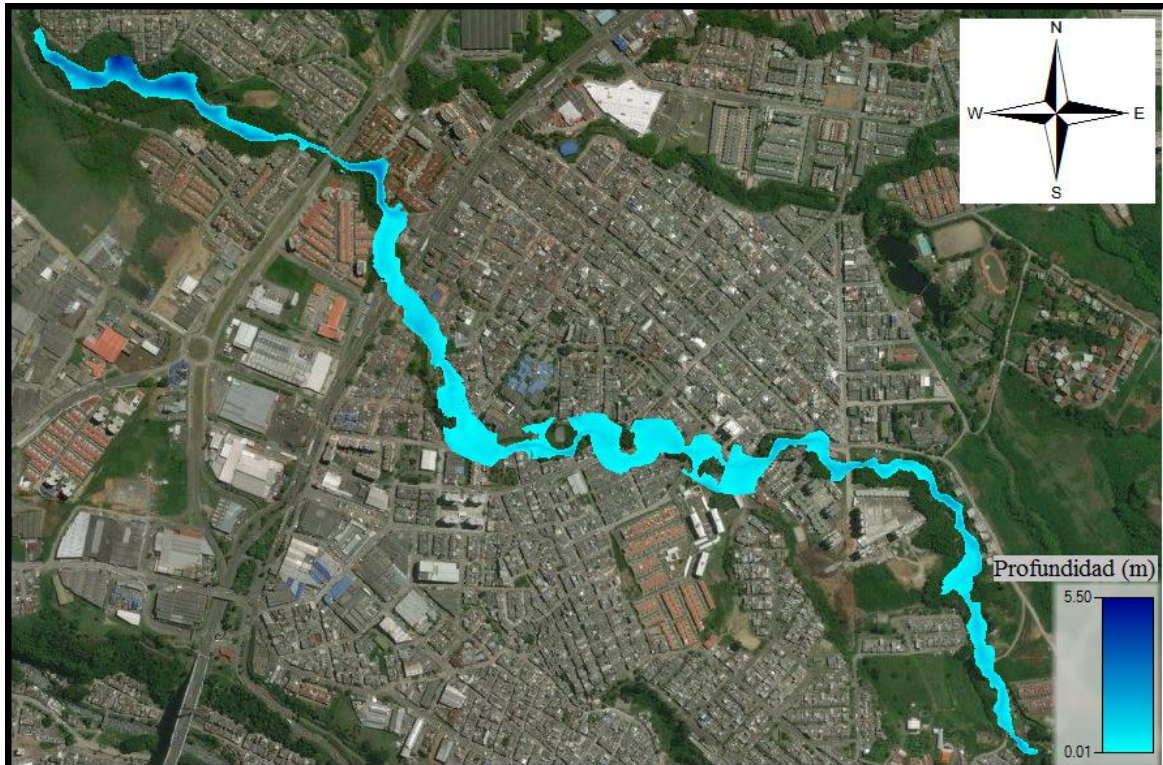


Figura 28: Mapa de inundación – T_R 15 años, $Q = 24.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

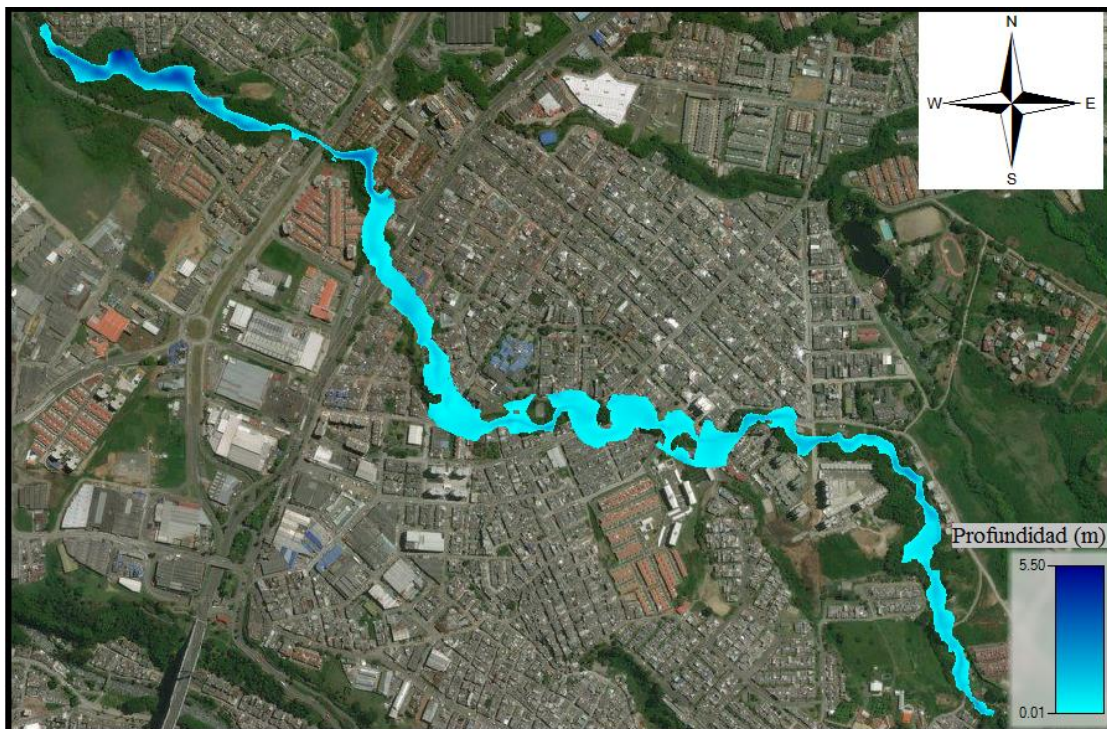


Figura 29: Mapa de inundación – T_R 30 años, $Q = 28.9 \text{ m}^3/\text{s}$.

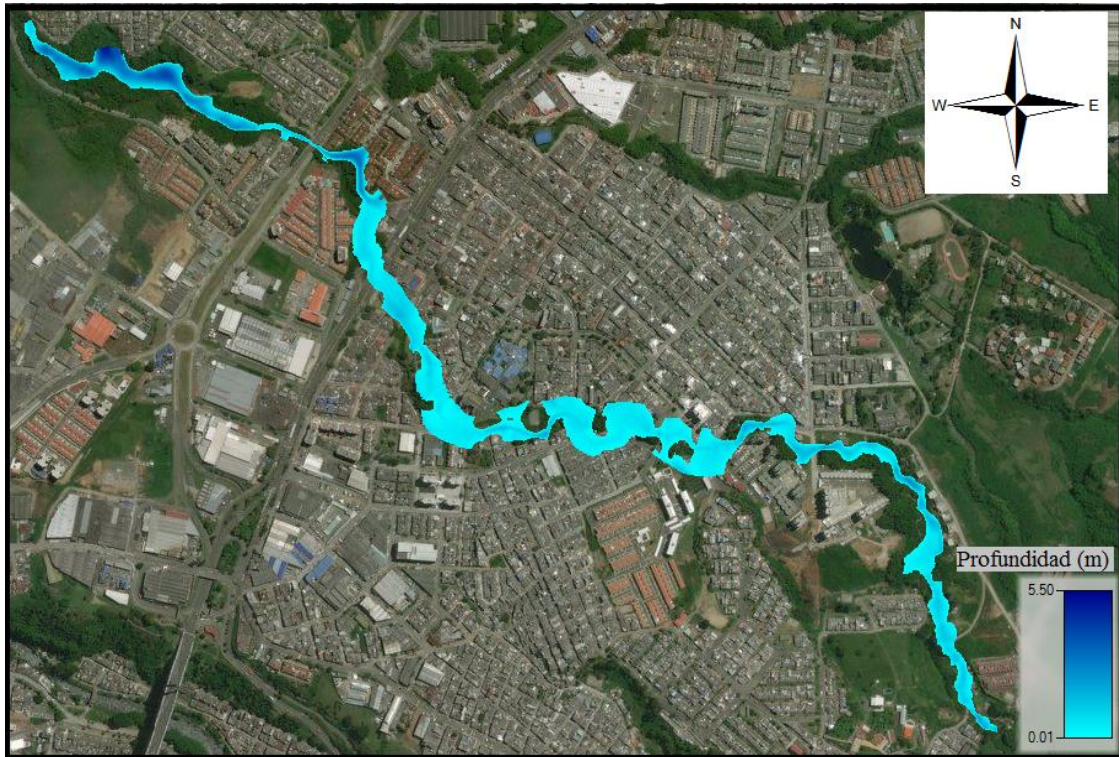
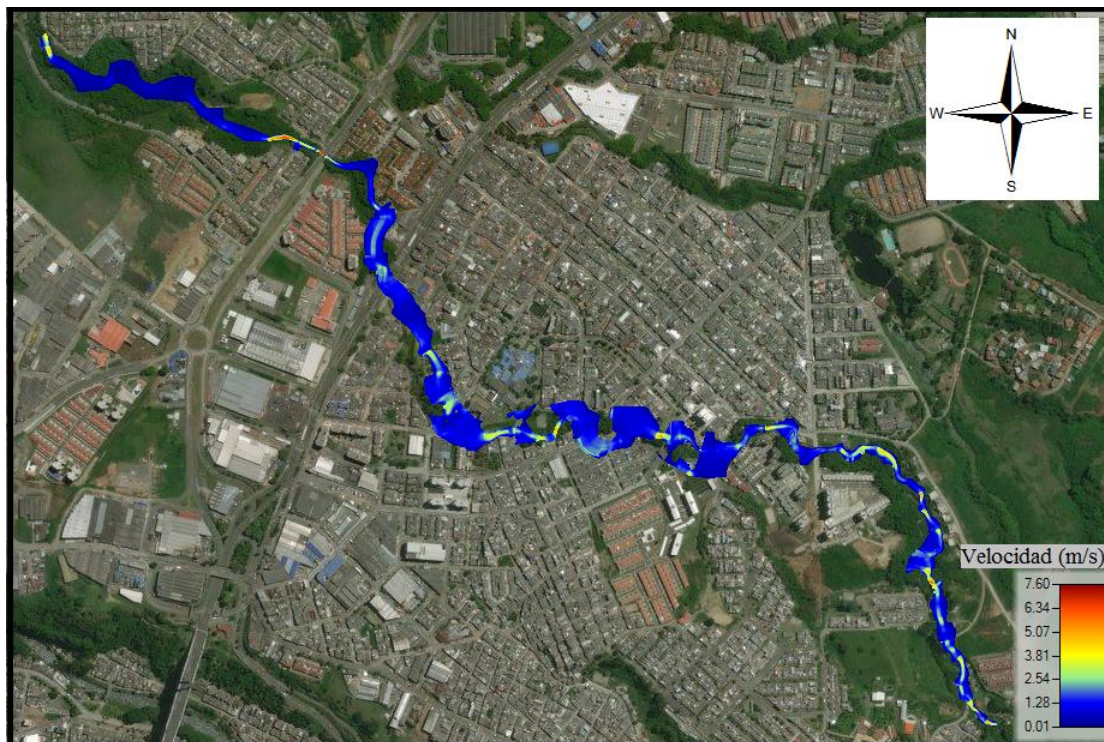


Figura 30: Mapa de inundación – T_R 40 años, $Q = 30.5 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 31: Mapa de inundación – T_R 100 años, $Q = 35.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mapas de velocidad:Figura 32: Mapa de velocidades – $Q_{\text{Obs. 31 de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$.Figura 33: Mapa de velocidades – T_R 2.33 años, $Q = 20.23 \text{ m}^3/\text{s}$.

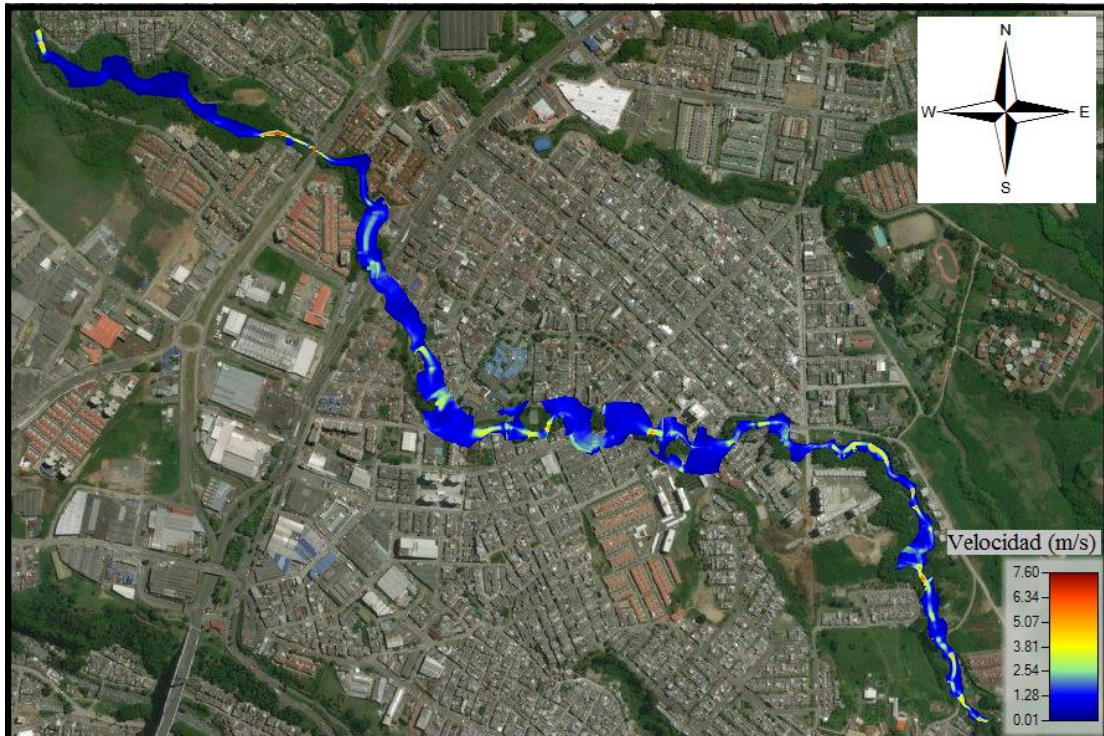


Figura 34: Mapa de velocidades – T_R 10 años, $Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$.

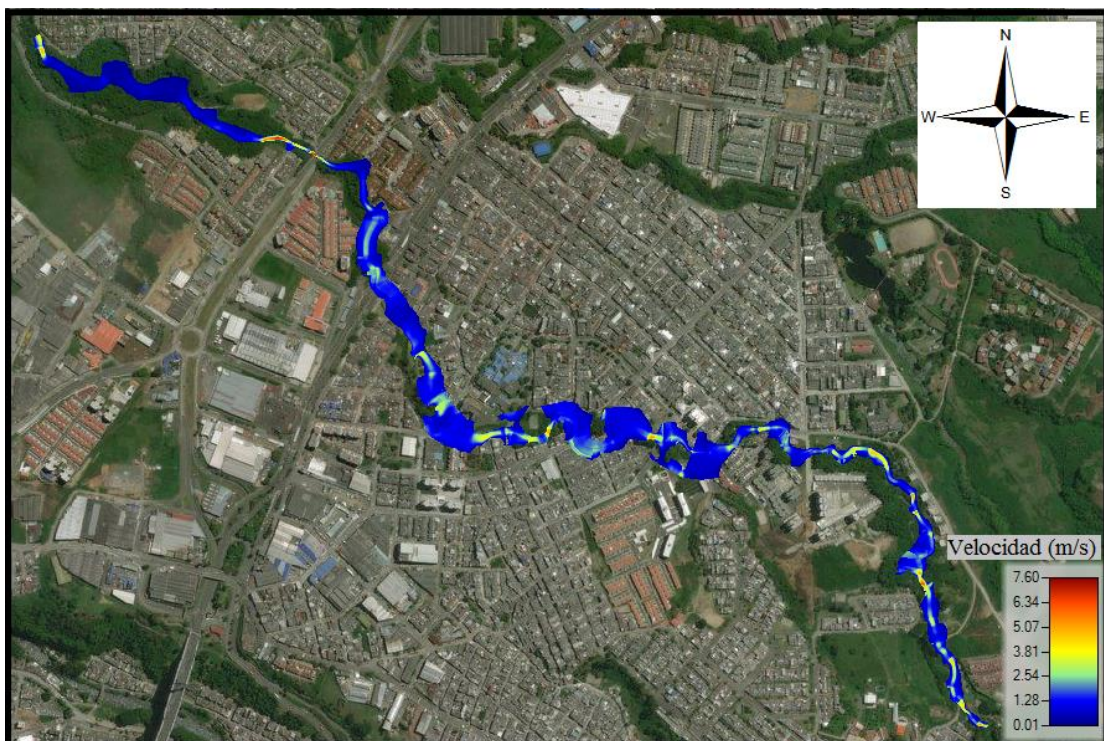


Figura 35: Mapa de velocidades – T_R 15 años, $Q = 24.65 \text{ m}^3/\text{s}$.

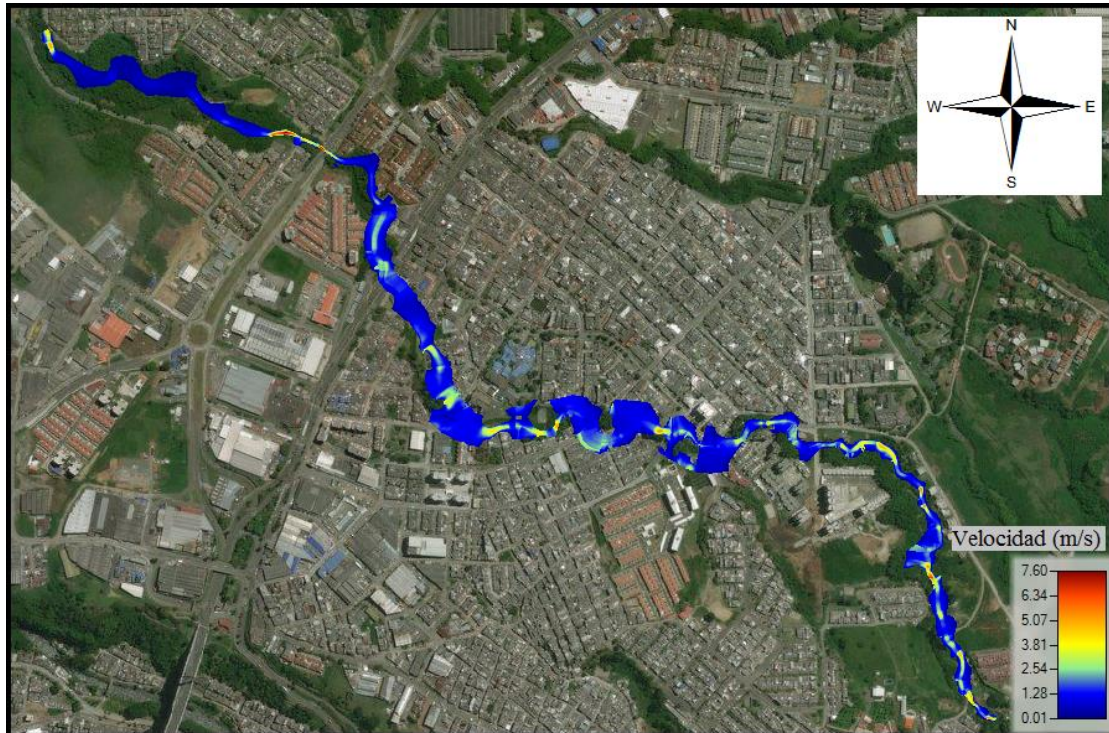


Figura 36: Mapa de velocidades – T_R 30 años, $Q = 28.97 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 37: Mapa de velocidades – T_R 40 años, $Q = 30.51 \text{ m}^3/\text{s}$.

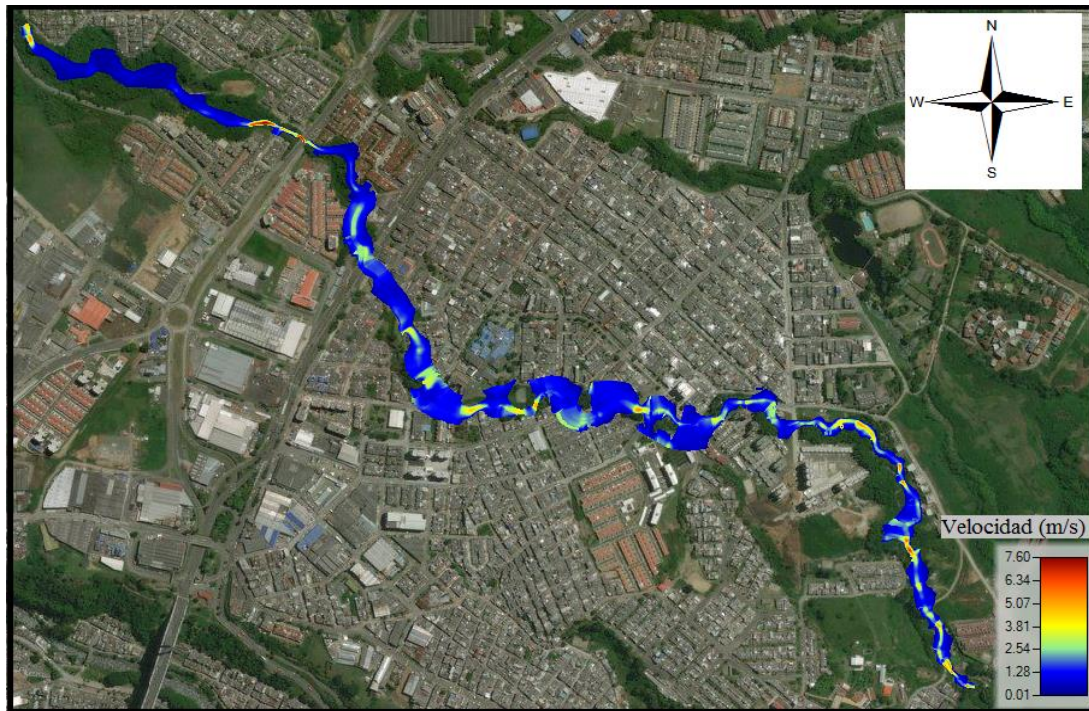


Figura 38: Mapa de velocidades – T_R 100 años, $Q = 35.8 \text{ m}^3/\text{s}$.

Perfiles:

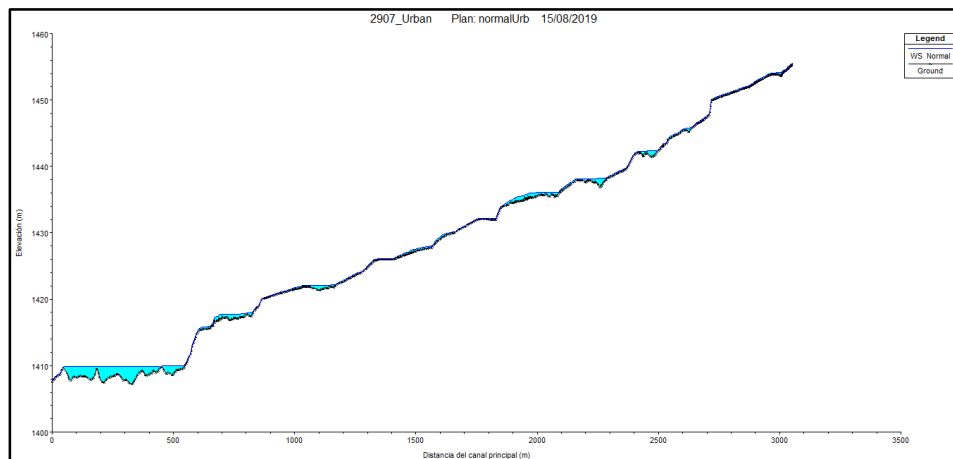


Figura 39: Perfil del cauce – $Q_{\text{obs. 31 de julio}} = 0.32 \text{ m}^3/\text{s}$.

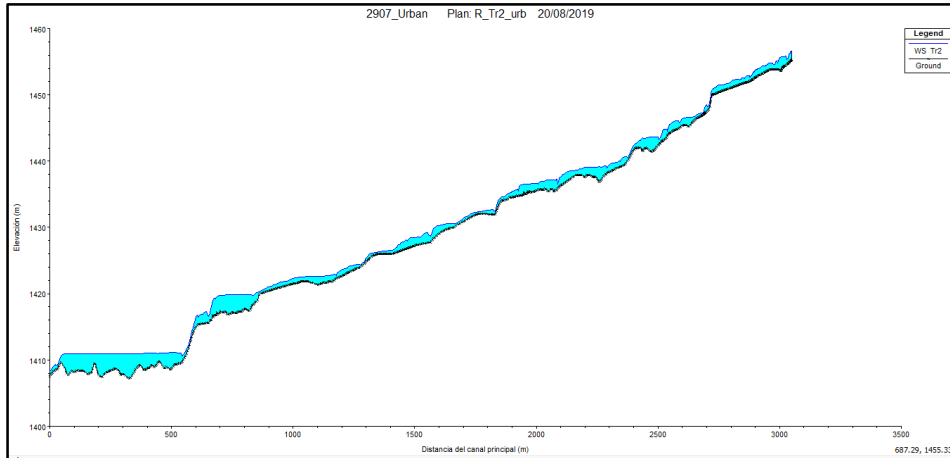


Figura 40: Perfil del cauce – T_R 2.33 años, $Q = 20.23 \text{ m}^3/\text{s}$.

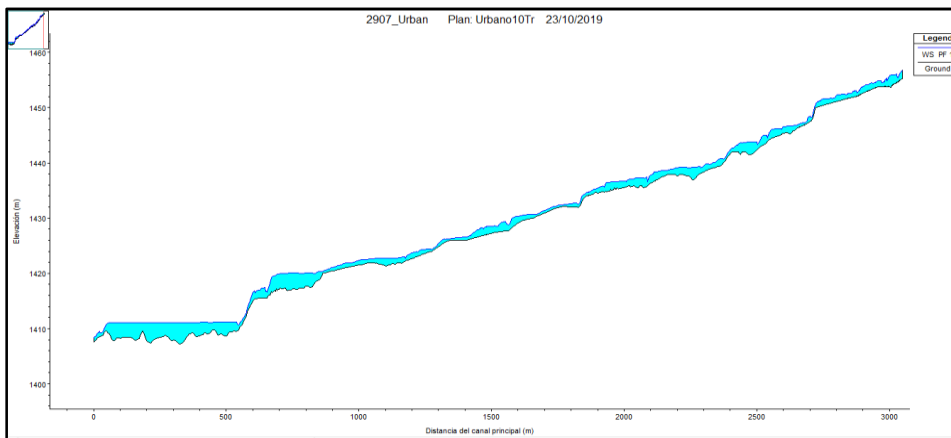


Figura 41: Perfil del cauce – T_R 10 años, $Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$.

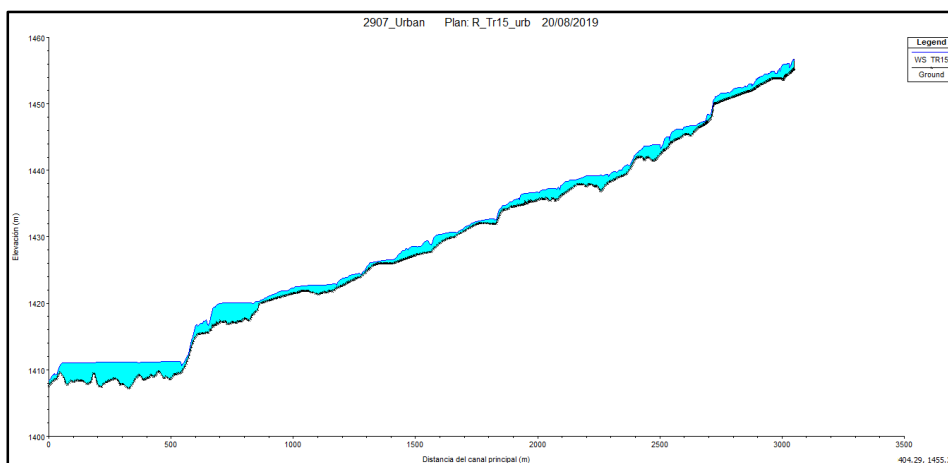


Figura 42: Perfil del cauce – T_R 15 años, $Q = 24.65 \text{ m}^3/\text{s}$.

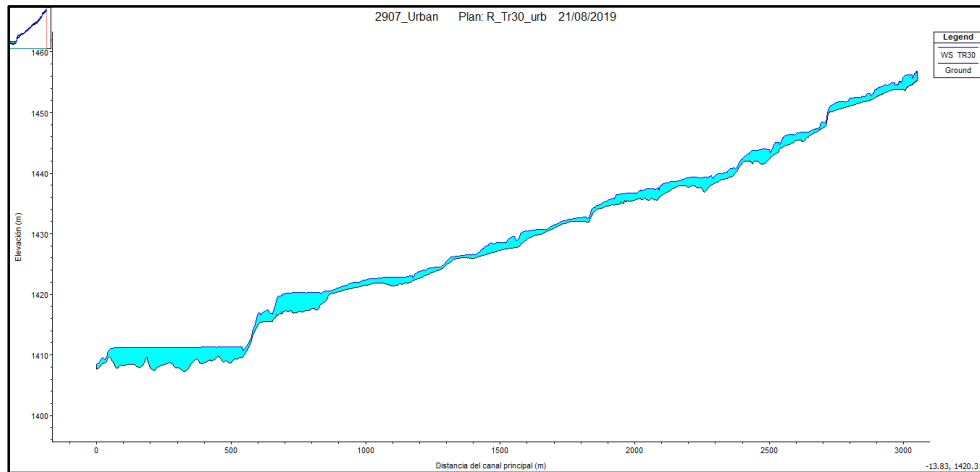


Figura 43: Perfil del Cauce – T_R 30 años, $Q = 28.97 \text{ m}^3/\text{s}$.

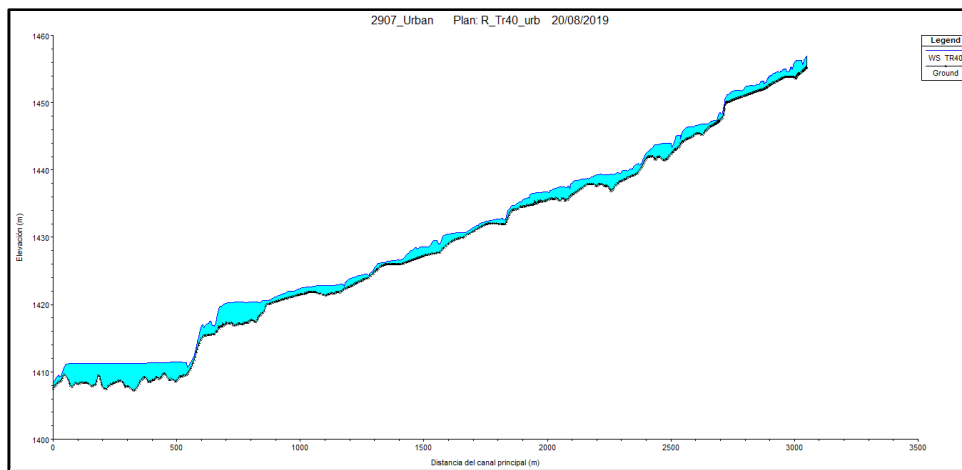


Figura 44: Perfil del cauce – T_R 40 años, $Q = 30.51 \text{ m}^3/\text{s}$.

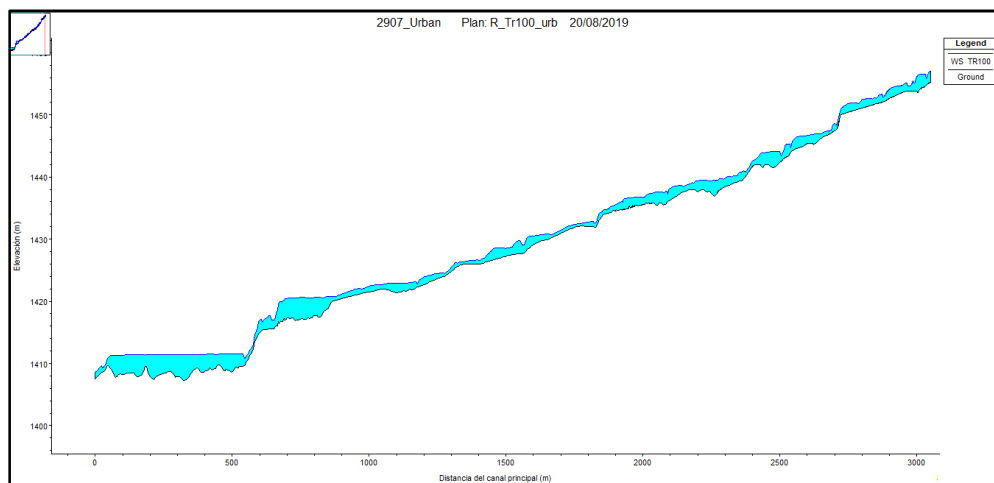


Figura 45: Perfil del cauce – T_R 100 años, $Q = 24.01 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.7.2 Resultados zona rural

A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la zona rural (Figura 46 a Figura 67), en términos de manchas de inundación, velocidad y perfil longitudinal.

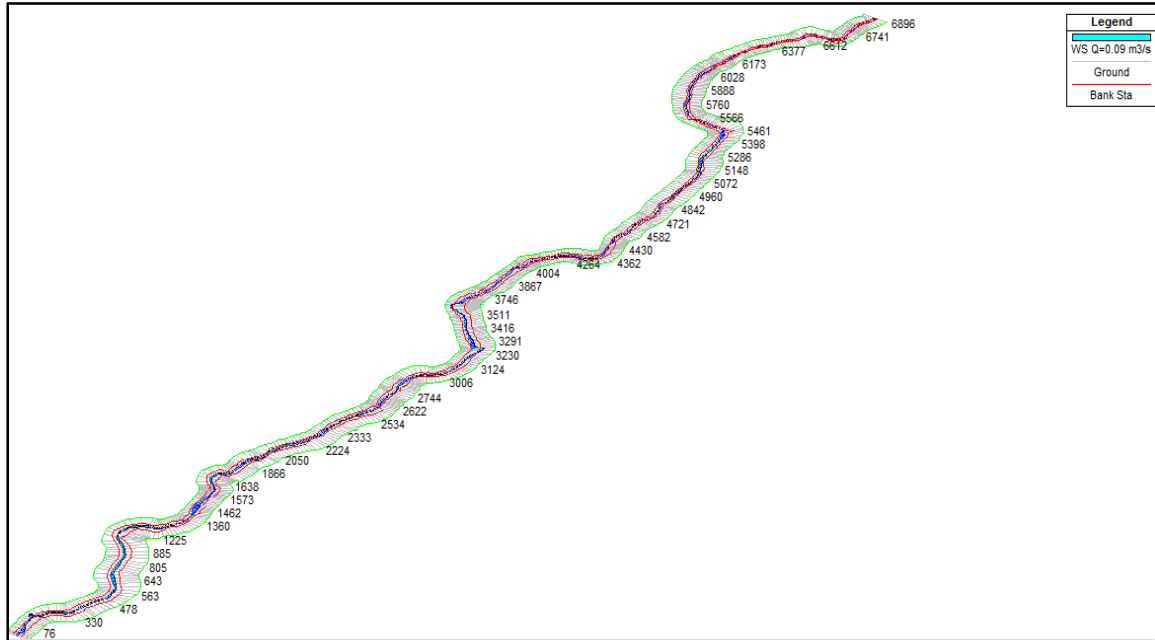


Figura 46: Cauce 3D – $Q_{Obs.}$ 31 de julio = $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mapas de inundación:



Figura 47: Mapa de inundación – $Q_{Obs.}$ 31 de julio = $0.08 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 48: Mapa de inundación – T_R 2.33 años, $Q = 14.47\text{m}^3/\text{s}$.

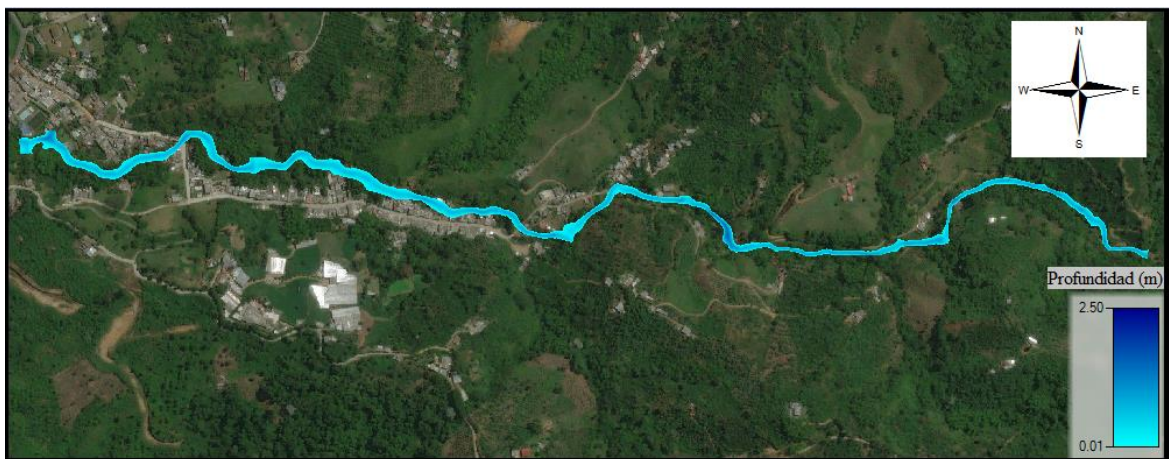


Figura 49: Mapa de inundación – T_R 10 años, $Q = 17.99\text{ m}^3/\text{s}$.

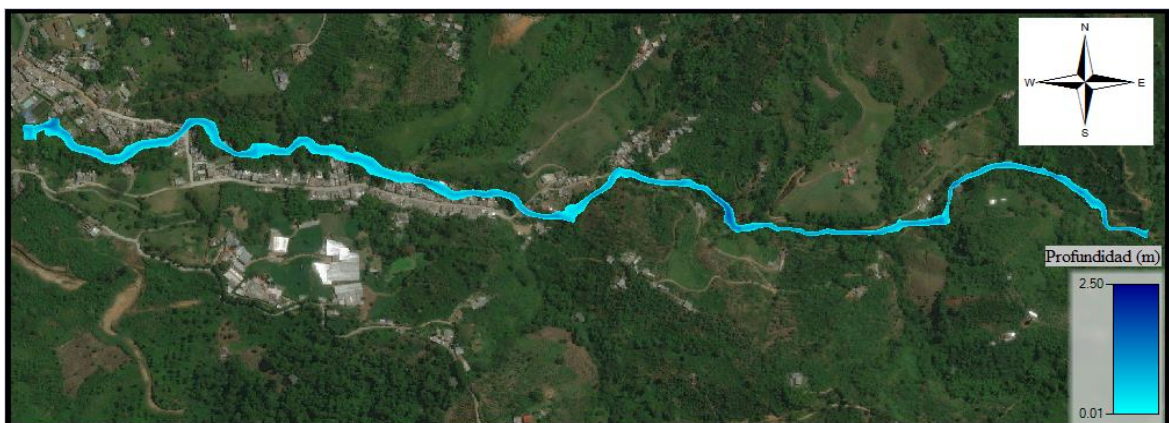


Figura 50: Mapa de inundación – T_R 15 años, $Q = 18.6\text{ m}^3/\text{s}$.

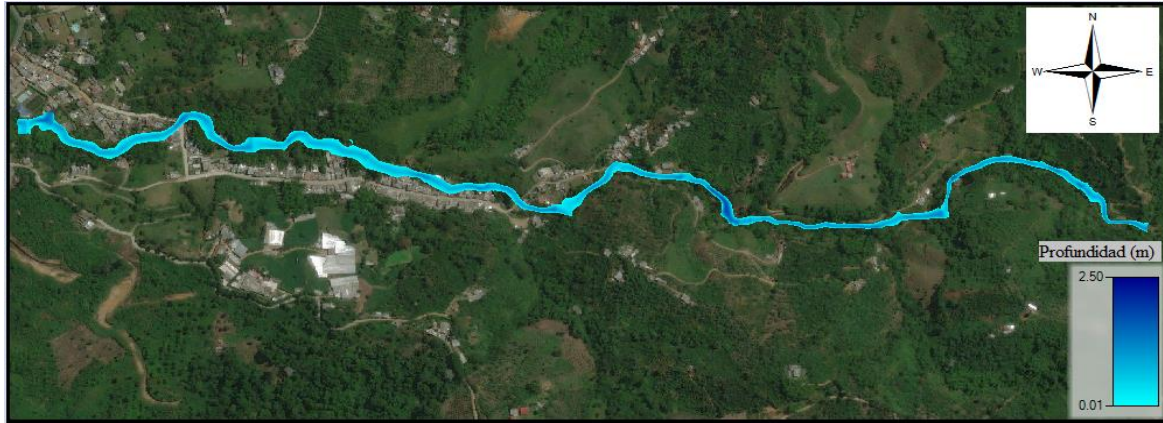


Figura 51: Mapa de inundación – T_R 30 años, $Q = 22.6 \text{ m}^3/\text{s}$.

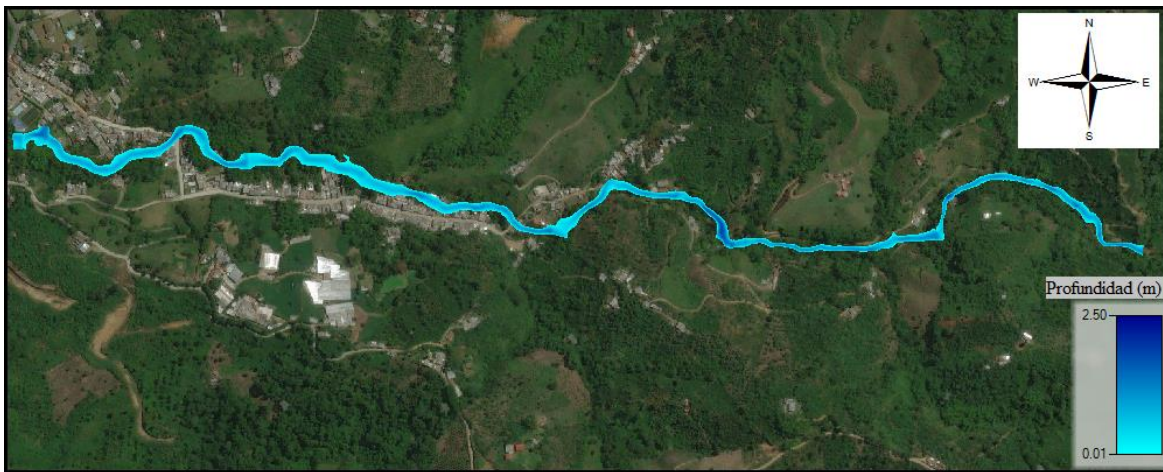


Figura 52: Mapa de inundación – T_R 40 años. $Q = 24.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

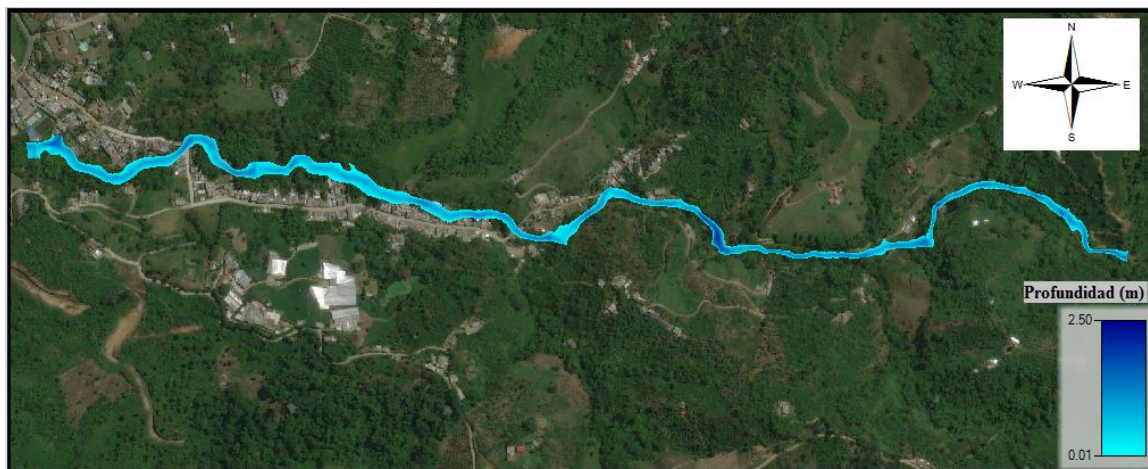


Figura 53: Mapa de inundación – T_R 100 años, $Q = 29.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Mapas de velocidad:

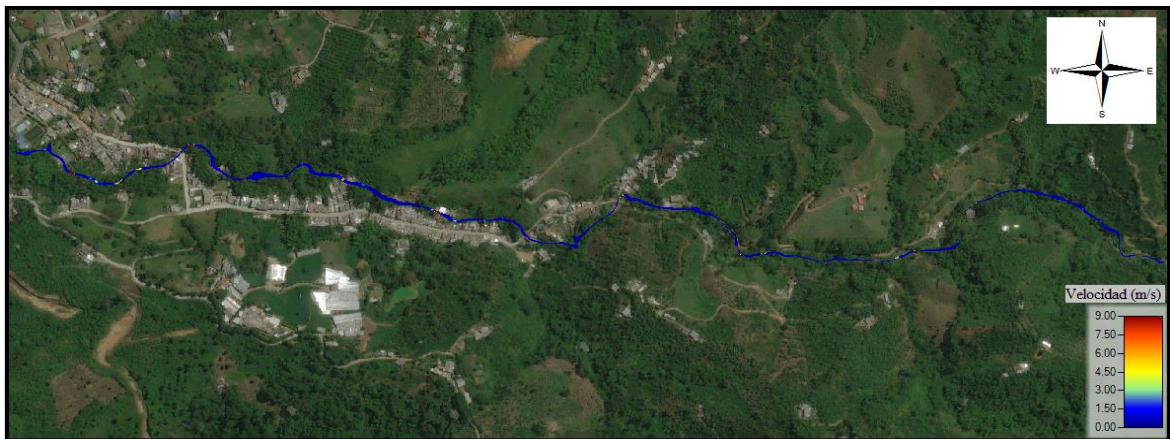


Figura 54: Mapa de velocidad – $Q_{\text{Obs. 31 de julio}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$.

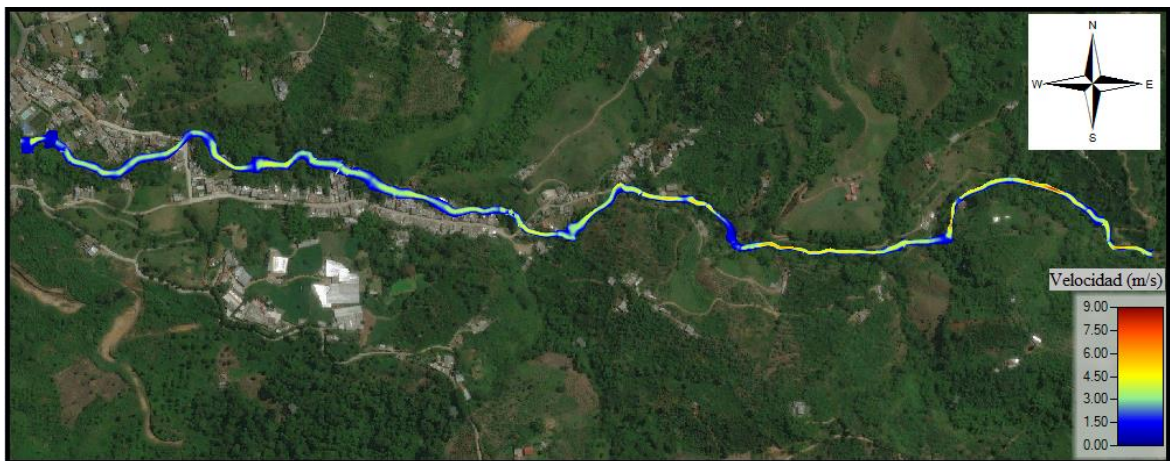


Figura 55: Mapa de velocidad – T_R 2.33 años, $Q = 14.47 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figura 56: Mapa de velocidad – T_R 10 años, $Q = 17.99 \text{ m}^3/\text{s}$.

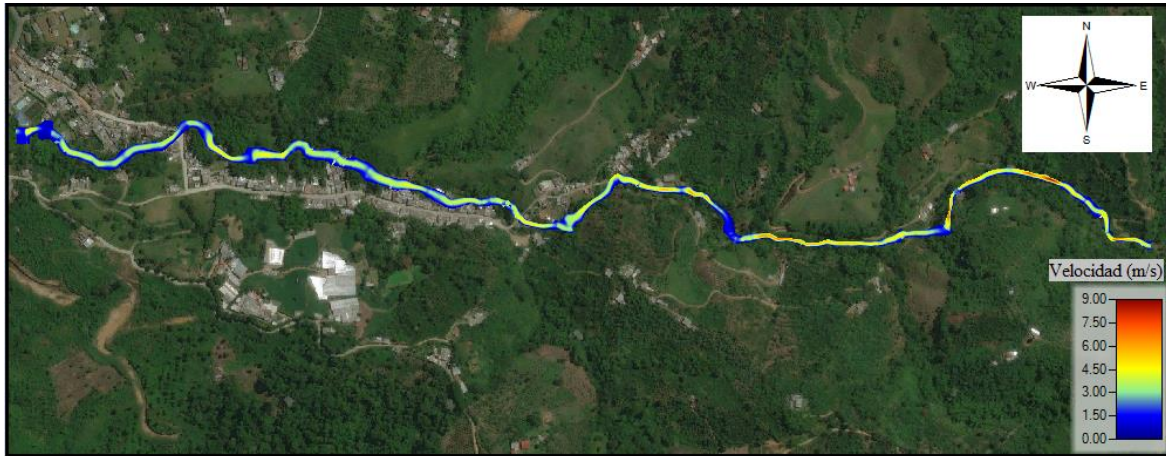


Figura 57: Mapa de velocidad – T_R 15 años, $Q = 18.61 \text{ m}^3/\text{s}$.

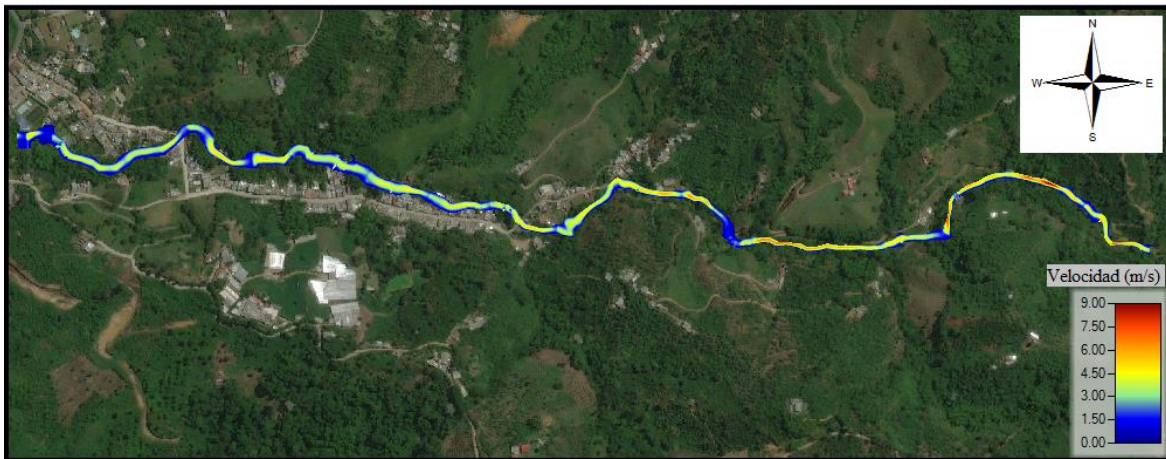


Figura 58: Mapa de velocidad – T_R 30 años, $Q = 22.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

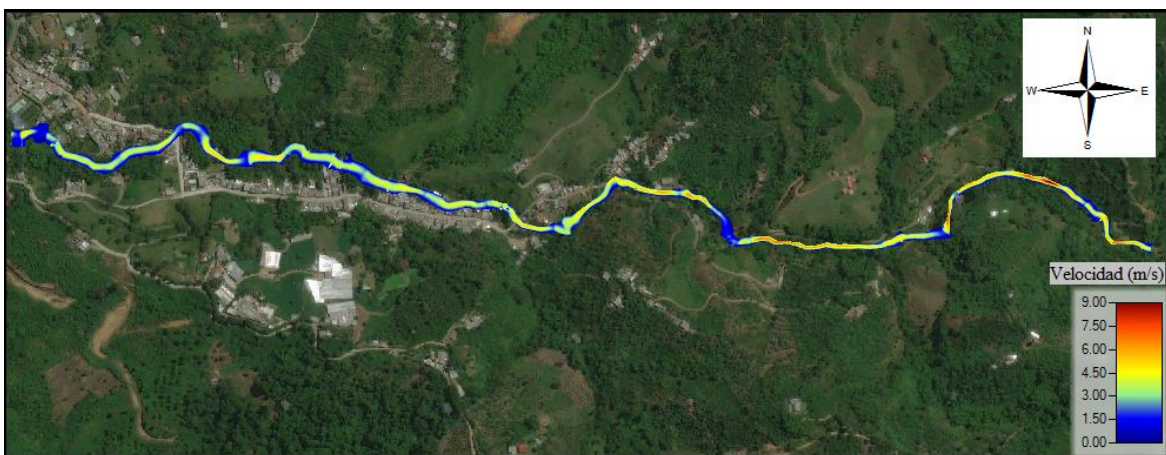


Figura 59: Mapa de velocidad – T_R 40 años, $Q = 24.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

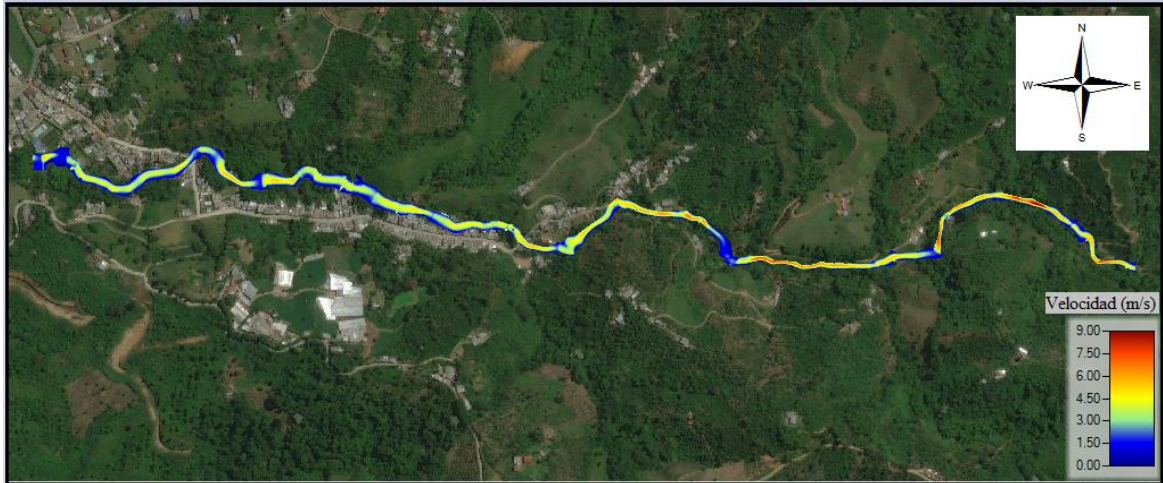


Figura 60: Mapa de velocidades – T_R 100 años, $Q = 29.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

Perfiles del cauce:

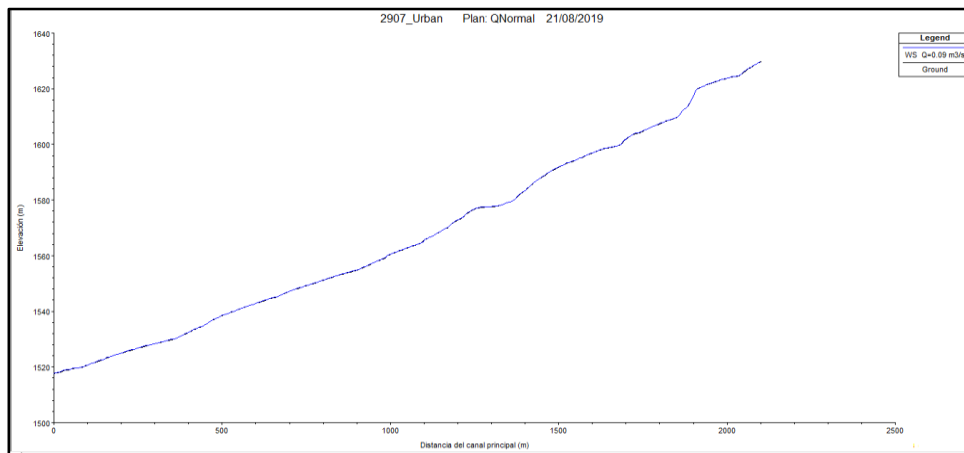


Figura 61: Perfil del cauce – $Q_{\text{Obs. 31 de julio}} = 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$.

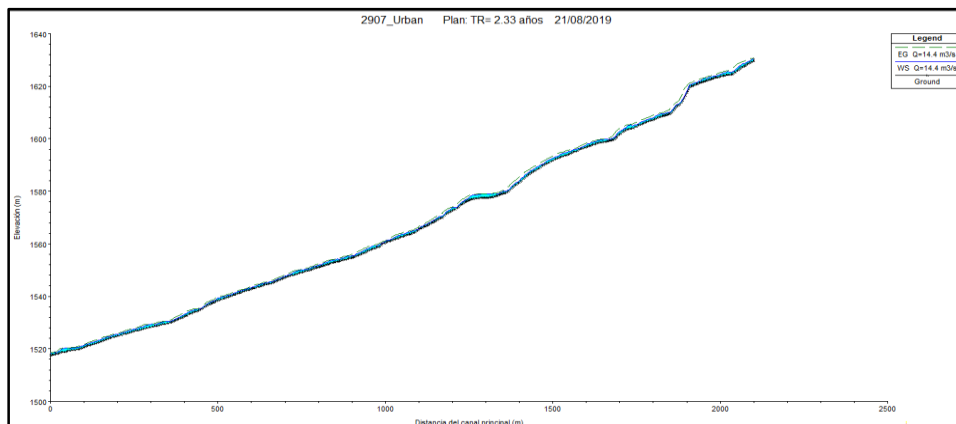


Figura 62: Perfil del cauce – T_R 2.33 años, $Q = 14.47 \text{ m}^3/\text{s}$.

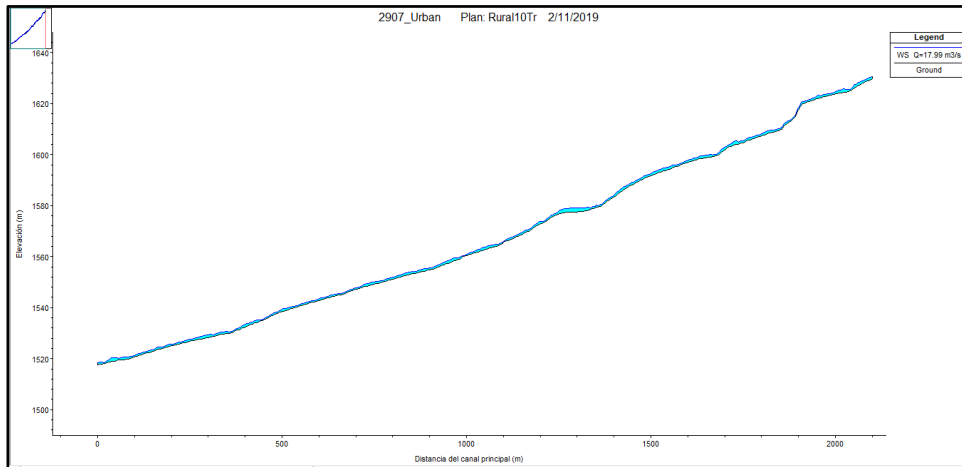


Figura 63: Perfil del cauce – T_R 10 años, $Q = 17.99 \text{ m}^3/\text{s}$.

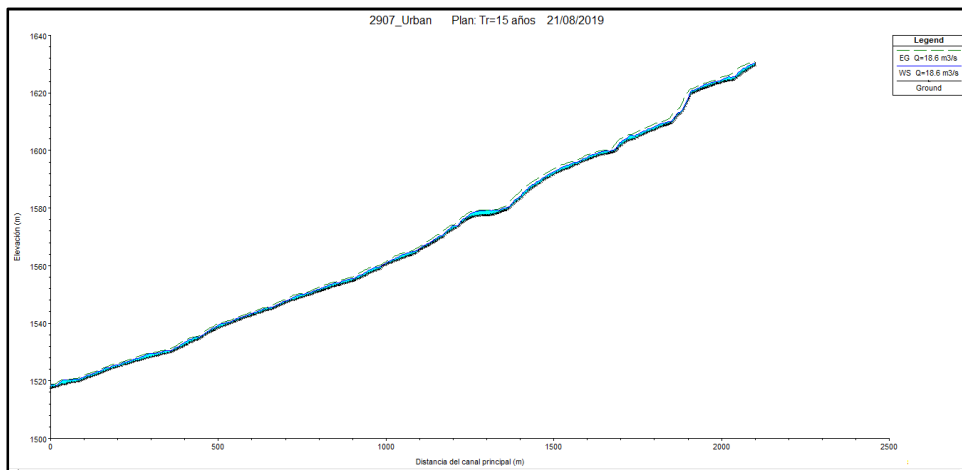


Figura 64: Perfil del cauce – T_R 15 años, $Q = 18.61 \text{ m}^3/\text{s}$.

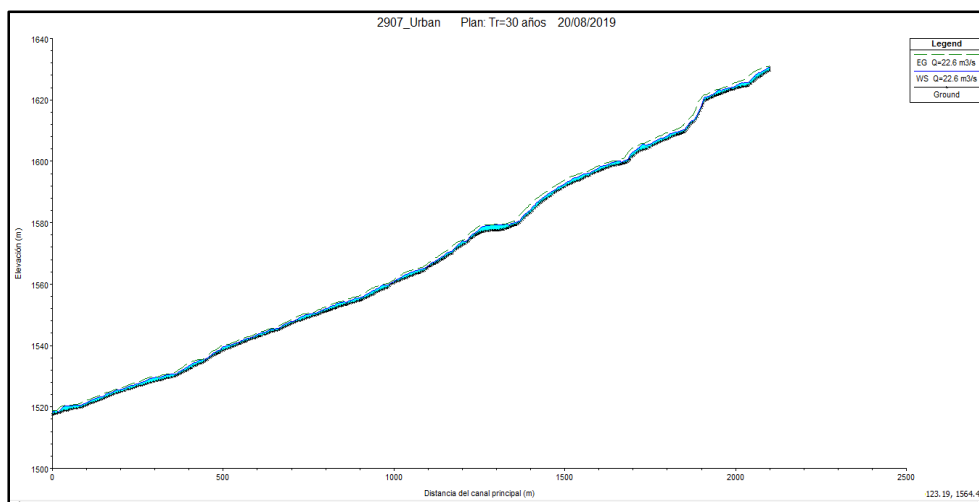


Figura 65: Perfil del cauce – T_R 30 años, $Q = 22.62 \text{ m}^3/\text{s}$.

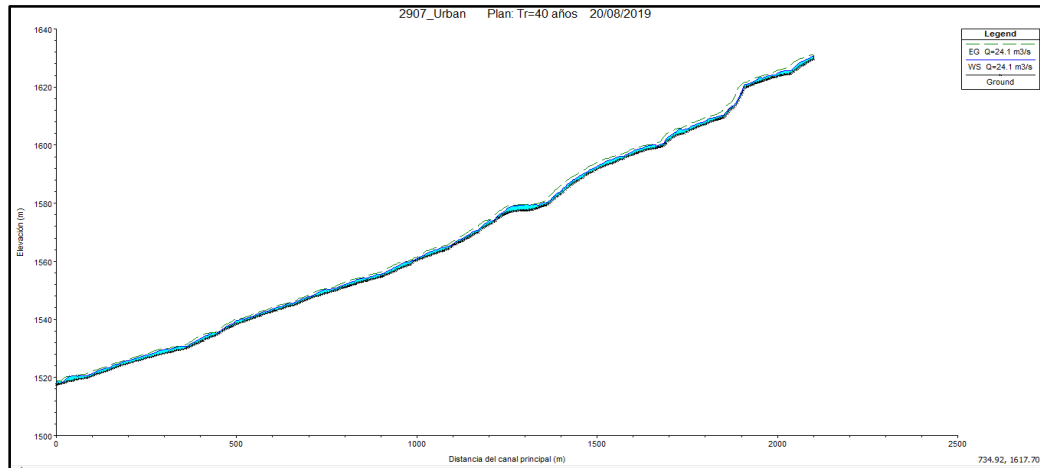


Figura 66: Perfil cauce – T_R 40 años, $Q = 24.09 \text{ m}^3/\text{s}$.

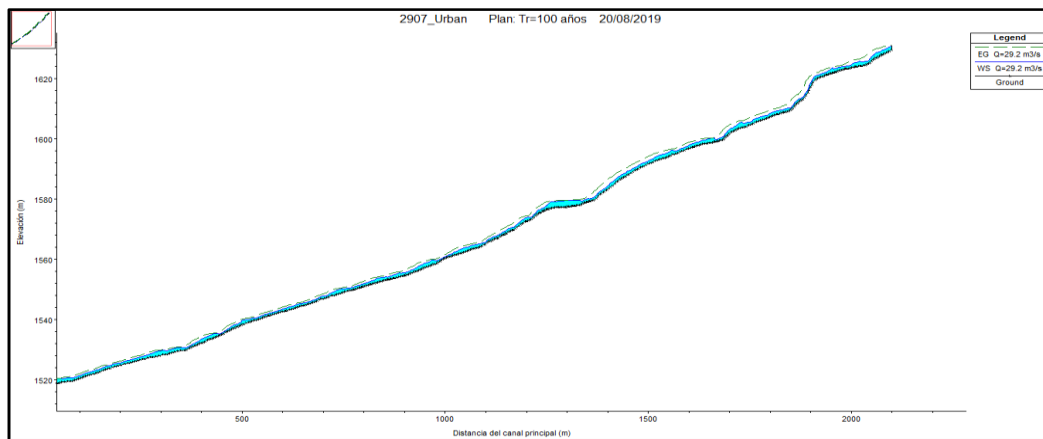


Figura 67: Perfil del cauce – T_R 100 años, $Q = 29.2 \text{ m}^3/\text{s}$.

3.7.3 Resultados y análisis

La Tabla 13 presenta los resultados obtenidos del acotamiento de la ronda hídrica para los periodos de retorno que cada normativa objeto de estudio establece según la zona de interés. Teniendo en cuenta las directrices de cada normativa, se determina que para Canadá el periodo de retorno corresponde a 100 años; para Colombia, teniendo en cuenta la variabilidad climática se determina un periodo de retorno de 15 años; y para España según el criterio de frecuencia de inundación anual referenciada como alta, se determinó un periodo de retorno de 10 años.

Tabla 13: Franja de ronda hídrica según los criterios de cada país.

RONDA HÍDRICA

Zona	Canadá	Colombia	España
Urbana	$T_R = 100$ años $Q = 35.8 \text{ m}^3/\text{s}$ Ancho inundable = 106m aprox.	$T_R = 15$ años $Q = 24.6 \text{ m}^3/\text{s}$ Ancho inundable = 98m aprox.	$T_R = 10$ años $Q = 24.0 \text{ m}^3/\text{s}$ Ancho inundable = 96m aprox.
	Flooding Hazard Limit <i>Floodway (Dev. Proh.):</i> 106m + <i>Flood Fringe (Condicional Dev.)</i>	Ronda hídrica Cauce permanente: 8m + Faja // al cauce (Drillo. Proh.): 30m + Área de protección // (Drillo. Cond.): 15m	Ronda hídrica Dominio Hidráulico Público: 96m + Zona de policía: 100m
Rural	$T_R = 100$ años $Q = 29.2 \text{ m}^3/\text{s}$ Ancho inundable = 37m aprox.	$T_R = 15$ años $Q = 18.6 \text{ m}^3/\text{s}$ Ancho inundable = 36m aprox.	$T_R = 10$ años $Q = 17.9 \text{ m}^3/\text{s}$ Ancho inundable = 35m aprox.
	Flooding Hazard Limit <i>Floodway (Dev. Proh.):</i> 37m + <i>Flood Fringe (condicional dev.)</i>	Ronda hídrica Cauce permanente: 5m + Faja // al cauce (Drillo. Proh.): 15.5m + Área de protección // (Drillo. Cond.): 0m	Ronda hídrica Dominio Hidráulico Público: 35m + Zona de Policía: 100m

Tabla 14: Errores de la modelación.

Sección de aforo		Zona Urbana		Zona Rural
		1	2	3
Caudal 31 de julio	m^3/s	0.32	0.15	0.08
Lamina máx. Obs.	m	0.26	0.22	0.29
Lamina máx. Sim.	m	0.18	0.21	0.21
Error de lamina	%	30.77	4.55	27.50
Velocidad media Obs.	m/s	0.29	0.34	0.40
Velocidad total Sim.	m/s	0.34	0.12	0.19
Error de Velocidad	%	17.24	64.71	52.50
Sección Obs.	m^2	1.03	0.41	0.22
Sección Sim.	m^2	0.94	1.23	0.42
Error de sección	%	8.74	200.00	99.90
Observación		Presencia de curva, canalización aguas arriba y descoles	Zona amplia, tramo recto, próximo a puente	Presencia de puente y descoles, próximo a una curva

El error obtenido al comparar la lámina de agua observada el 31 de julio de 2019 en cada una de las secciones aforadas, respecto a la lámina de agua simulada, se encuentra dentro de un margen de 30% de error aceptable. Hay que reconocer que la sección del flujo es mínima, lo que genera errores relativos relevantes, aunque el error absoluto es mínimo. Se concluyó que el modelo es válido en condiciones de flujo normal. La dificultad para generar un DEM confiable en ausencia de datos, aumenta los errores en el modelo, por tanto, para mejorar los resultados se buscó un equilibrio a partir de la determinación de la rugosidad.

Las manchas de inundación simuladas, aunque alteradas se relacionan a las informaciones reportadas por los eventos históricos y observadores de la zona, de este modo, se considera que en condiciones de creciente el modelo reporta niveles adecuados.

Es necesario aclarar que el modelo proporcionó los mensajes de error siguientes:

- “*The velocity head has changed by more than 0.5 ft (0.15m). This may indicate the need for additional cross section*”: La altura de velocidad ha cambiado más de 0.15 m, lo que puede indicar la necesidad de secciones transversales adicionales.
- “*The energy loss was greater than 1.0 ft (0.3m) between the current and previous cross section. This may indicate the need for additional cross sections*”: La pérdida de energía fue mayor que 0.3 m entre las secciones actual y anterior, lo que puede indicar la necesidad de secciones transversales adicionales.

De los errores presentados, se puede inferir que las pendientes de la zona superan las máximas admisibles por el modelo, y las velocidades presentan cambios bruscos consecuencia de esto, de este modo, se requeriría un mayor número de secciones. En la zona urbana y rural faltaría implementar campañas con el fin de realizar levantamientos topográficos que brinden mayor detalle y superen el nivel de densidad de la malla utilizada en este estudio, basada en un DEM de 2m x 2m, y secciones de cálculo del modelo con intervalos inferiores a 3 o 4m. En el caso de la zona rural que presenta pendientes fuertes, se consideraría necesario implementar una herramienta de modelación más adaptada según lo presentado en el capítulo 2.

Las rondas hídricas determinadas para los diferentes periodos de retorno no presentan un cambio significativo en la zona rural. Al opuesto en la zona urbana se encuentra un cambio significativo según las tres normativas estudiadas.

Considerando la topografía del sitio tal como se observó el 31 de julio de 2019 y los eventos históricos reportados, es evidente que el modelo no está proporcionando resultados compatibles con lo esperado. Un ejemplo de esto es el evento del 28 de mayo de 2019 (ver numeral 3.3), donde se inundó el hospital Santa Mónica y el viaducto Cesar Gaviria Trujillo, lo que el modelo no pronosticó. No obstante, aguas arriba y aguas abajo de la zona, la mancha de inundación se extiende hasta las zonas afectadas, lo que demuestra compatibilidad del modelo por sectores. En la zona rural, se presenta homogeneidad de los resultados a lo largo del tramo estudiado, esto se atribuye a que el cauce en esta zona se encuentra encañonado, y la lámina debe superar alturas de hasta 6 metros para presentar desbordamientos.

Al analizar el perfil longitudinal en la zona urbana, se observó cambios bruscos de pendiente y saltos que no se relacionan a la topografía observada en el sitio. En la zona rural se evidenció un perfil longitudinal homogéneo, a pesar de presentar un desnivel mayor con respecto a la zona urbana.

La modelación hidráulica presenta inconsistencias debido a: i) vacíos en los datos topográficos lo que lleva a la utilización de un DEM que puede presentar deficiencias; ii) pendientes altas y superiores a las máximas supuestas para la aplicación de las ecuaciones del modelo numérico; y iii) caudales simulados que no pueden ser asociados a caudales históricos. Lo anterior limita el uso del modelo como herramienta válida al momento de establecer el acotamiento de la ronda hídrica.

4. Análisis y discusión

El enfoque fundamental de este estudio fue evaluar la “Guía Técnica de Criterios para el Acotamiento de las Rondas Hídricas en Colombia” publicada el 2018, con respecto a normativas internacionales de Canadá y España, con el fin de determinar sus limitantes en el componente hidráulico y generar aportes para su mejoramiento. Esta iniciativa nació considerando que, se reconoce la necesidad de establecer una franja de ronda hídrica pertinente que permita el desarrollo de la dinámica del río sin afectar las poblaciones, pero que diferentes autores identifican problemáticas, limitantes y ausencia en aspectos importantes a tener en cuenta, en la determinación de la ronda hídrica, tales como: el análisis de la amenaza, la vulnerabilidad, la exposición, la estabilidad de las márgenes del río, y un análisis socioeconómico, que permiten determinar las pérdidas y daños por inundación.

Se hace evidente que el estudio de la determinación del acotamiento de la ronda hídrica en Colombia y el mundo, ha sido objeto de discusión y debate en el transcurrir de los últimos años. Se evidencia también la necesidad de incorporar una visión de sostenibilidad, base del ordenamiento territorial, a partir de análisis en la gestión del riesgo, que permita establecer el acotamiento a partir de daños y pérdidas en la población, además de implementar técnicas que permitan una determinación de los caudales a simular. Es de resaltar que, la norma colombiana reconoce que las riberas son zonas frecuentemente inundables de manera natural, y la ocupación antrópica de estas, genera condiciones de vulnerabilidad y riesgo, debido a la exposición de personas, bienes, y actividades económicas. No obstante, la norma colombiana en su Guía Técnica no incorpora estos conceptos en las fases establecidas al momento de determinar el acotamiento de la ronda hídrica.

La necesidad de cuantificar el riesgo a partir de la probabilidad de ocurrencia de un evento por las consecuencias medidas en costos, es establecido como concepto fundamental en la evaluación de la zona inundable. Considerando que el riesgo se define como el producto del peligro por la vulnerabilidad y la exposición, un análisis de riesgo proporcionaría como resultado la expectativa anual de daño y de pérdidas humanas. Se considera que una manera de evaluar el riesgo e integrarlo en la determinación del acotamiento de la ronda hídrica se puede realizar a través de su estimación considerando las profundidades y velocidades en el cauce según los eventos históricos. En este caso, el riesgo de inundaciones fluviales y pluviales que se presente en una zona de estudio, se vería cuantificado numéricamente mediante el análisis del riesgo relacionado al acotamiento de la ronda hídrica.

El decreto 2245 del 29 de diciembre de 2017, expone la ronda hídrica como “Una faja paralela a la línea de mareas máximas o a la del cauce permanente de ríos y lagos, hasta treinta metros de ancho”, y a su vez como una zona donde no se admiten construcciones o desarrollar actividades económicas, a pesar de que los sistemas hídricos, no presentan un mismo desarrollo dinámico natural³. La franja de ronda hídrica según algunos autores, debería ser proporcional al ancho del cauce, considerando pertinente una discriminación de medidas para el acotamiento de la ronda hídrica establecida a partir del tipo de sistema hídrico que se estudie, sea río, quebrada, arroyo, manantial, naciente, vertiente, lago, embalse, acuífero, humedal, entre otros; y adicionalmente tener en cuenta que cada sistema hídrico posee diferentes características hidráulicas, hidrológicas, geomorfológicas y ecosistémicas dependiendo de la región del país en que se encuentre ubicado. Lastimosamente, el concepto de riesgo no se ve reflejado, al determinar únicamente las características del sistema hídrico en cuestión.

A pesar de que la norma colombiana implementada ha sido resultado de estudios y modificaciones de la ley a través de los años, se identifica que el documento aún no proporciona las herramientas necesarias o el nivel de detalle requerido, para determinar el

³Por ejemplo, una quebrada de dos (2) metros de ancho presenta un comportamiento diferente a un río de trecientos (300) metros de ancho.

acotamiento de la ronda hídrica que proporcione seguridad y sostenibilidad a la población y no un falso concepto de seguridad tal y como lo demuestra nuestro caso de estudio.

Es de resaltar que la última actualización de la ley colombiana relacionada al acotamiento de las rondas hídricas manifiesta una zona determinada como ronda hídrica de la cual hará parte un área de protección o conservación aferente determinada a partir de aplicación de la Guía Técnica. La diferencia entre la zona de ronda hídrica y el área de protección radica en limitar la capacidad de construcción y posibilidad de empleo para un fin productivo del suelo correspondiente a la ronda hídrica aprobado por las autoridades competentes. Respecto a la medida “de hasta treinta (30) metros” establecida para la ronda hídrica, existen desacuerdos entre la comunidad técnica, entre si se considera como un valor máximo o mínimo. A partir de esto, se reflexiona ante los casos de inundación que superen el ancho de treinta (30) metros que establece la norma, conociendo que la zona de ronda hídrica no es permitida la ocupación poblacional, pero en el área de protección contigua a esta sí, lo que afecta directamente a la población que habite esta zona ante altos niveles de exposición.

La presente investigación se ha centrado en evaluar las normativas colombiana, canadiense y española en el componente hidráulico a partir de un análisis comparativo, el cual tuvo en cuenta características como el periodo de retorno, los registros históricos, la topografía, el ancho de la ronda hídrica, la rugosidad y parámetros de la modelación. A partir de estas características se logra evidenciar similitudes y diferencias existentes. Aunque la norma colombiana tuvo como referencia las bases teóricas y metodología de la normativa española al momento de determinar la ronda hídrica, esta se encuentra adaptada a las necesidades del país, al aplicar métodos con frecuencia desacertados para las características geográficas, topográficas e hidrogeomorfológicas de Colombia.

De la aplicación de la normativa al caso de estudio en Dosquebradas – Risaralda, zona rural y urbana de la quebrada Frailes, caso típico en Colombia, es importante tener en cuenta que el propósito de este estudio no fue la determinación más exacta y optima de la ronda hídrica a partir del modelo hidráulico, debido a que para efectuar esto se requiere de mayor información topográfica, puntos de control, mayor evidencia de eventos históricos y registros de datos para una mejor determinación del caudal. El caso de estudio tuvo como propósito realizar la simulación hidráulica mediante los datos que la Corporación Autónoma

Regional de Risaralda - CARDER tenía disponible para este afluente, evidenciando el impacto y las consecuencias de la determinación de la ronda hídrica con las herramientas que se tienen disponibles y ausencia de detalle en las mismas.

Teniendo en cuenta lo anterior, se muestran pautas insuficientes al momento de determinar el acotamiento según la normativa colombiana, teniendo en cuenta que para el caso de estudio no se podría implementar de manera integral y realísticamente los criterios establecidos por la norma (e.j. hasta 30m de faja paralela), debido al desarrollo económico e industrial que representa Dosquebradas actualmente; además, al implementarla no se disminuiría el riesgo, ni aumentaría el nivel de protección a la población. En este caso, la norma no se encuentra adaptada a las condiciones particulares de Colombia, tanto en el aspecto social como hidráulico y retos técnicos en ausencia de información.

Es interesante destacar que las normativas internacionales de Ontario (Canadá) y España, proporcionan en sus procedimientos la inclusión de conceptos similares a los usados en Colombia, pero incluyen también aspectos esenciales que consideramos importante incorporar en la norma colombiana, tales como: i) la regionalización del país, que aporta a un mejor estimativo en la caracterización de las zonas de estudio al momento de evaluar las áreas inundables, en aspectos como la topografía, rugosidad y pendiente, suplantando en muchos casos la ausencia de información local; y ii) la frecuencia de inundación en zonas que tienen mayor impacto incorporando la exposición y la gravedad de estas en la determinación del acotamiento de la ronda hídrica.

De las características que proporcionan diferencias se destacan:

La determinación del periodo de retorno:

En el caso de Colombia, la norma prevé que los eventos de inundaciones a simular se determinan teniendo en cuenta los fenómenos de variabilidad climática que se presenta en el país a escala inter-anual, el fenómeno de mayor importancia es el ENSO (El Niño – Southern Oscillation por sus siglas en inglés) o ENOS (El Niño – Oscilación del Sur), el cual de acuerdo a registros históricos de ocurrencia se puede asociar a una crecida de un periodo de retorno de 15 años, este para sistemas loticos y lenticos sin alteraciones morfológicas. En el caso de sistemas loticos que presenten modificaciones tales como asentamientos y actividades económicas, o se encuentren afectados por la dinámica

marina, se determina según criterios de seguridad, 100 años de periodo de retorno al presentarse eventos extremos o de mayor magnitud. Adicionalmente, la norma establece que la determinación del cauce permanente se realizará a partir de criterio morfológico (ancho, profundidad, escarpes, cambios en la vegetación, granulometría, etc.) o a partir de un periodo de retorno asociado al caudal formador que en promedio será de 2.33 años. Al aplicar el criterio del periodo de retorno en ausencia de datos para determinar el cauce permanente en el caso de estudio en Dosquebradas – Risaralda se encuentra que no es adecuado, presentándose inundaciones que generan grandes pérdidas similares a las inundaciones registradas en el sitio (ver numeral 3.3 Eventos históricos) y o muy distinta a las inundaciones presentadas para un periodo de retorno de 100 años.

Para el caso de España la determinación del periodo de retorno se realiza a partir de un análisis de frecuencias de inundación, es decir, desde información recolectada de los eventos históricos reportados y archivados. Se efectúa una clasificación por año y magnitud de inundación. La frecuencia de inundación se obtiene a través de conteos de repetición de las diferentes magnitudes de inundación obteniendo así una frecuencia de estas. Una vez determinada la frecuencia de inundación, se clasifica en la escala de muy alta, alta, media-alta y baja a las cuales les corresponde un periodo de retorno de 10, 50, 100 y 500 años respectivamente. La norma aclara que, en ausencia de datos suficientes atribuido a la falta de estaciones cercanas a la zona de estudio, se considerara válida la determinación del periodo de retorno a partir de este método. En caso de tener los registros de datos suficientes, se debe corroborar la información obtenida a partir de la frecuencia de inundación, con el fin de determinar el nivel y el caudal para el estudio de interés de manera más precisa.

En Canadá, la determinación del periodo de retorno se realiza a partir de la magnitud del peligro de inundación en eventos específicos. La inundación debe ser resultante de: i) una lluvia experimentada durante una tormenta importante como la tormenta del Huracán Hazel (1954) o la tormenta Timmins (1961), transpuesta a la cuenca de interés y combinada con las condiciones locales; ii) Una inundación de 100 años; o iii) una inundación mayor a 100 años, experimentada en la cuenca de interés particular, que aunque no supere el evento de Hazel o Timmins fue aprobada como estándar para esa área específica por el Ministerio de Recursos Naturales. La inundación de 100 años es el estándar mínimo aceptable para la delineación de la llanura de inundación, pero en casos donde existan cuencas con un

nivel mayor al mínimo aceptable, existe la posibilidad de cambiar el estándar de acuerdo a procedimientos establecidos por el Ministerio. Respecto a los registros de datos, la normativa solicita longitudes de datos entre 30 y 40 años, y dependiendo del caso de estudio solicita una estación con datos suficientes o varias estaciones por drenaje ubicados en cada subcuenca, los cuales se consideran apropiados.

Si analizamos el criterio que emplea la norma de España con respecto a la evaluación de los eventos y su frecuencia de ocurrencia para determinar el periodo de retorno con el cual se establecerá la franja de ronda hídrica, se observó que no se requiere definir la esorrentía, caudal o nivel a partir de registros históricos de estaciones meteorológicas. Reconociendo que Colombia no cuenta con estaciones meteorológicas que cubran todo el territorio y en ausencia de mantenimiento de las ya existentes, el modelo español es interesante. De esta manera se determinarían periodos de retorno de acuerdo al registro y frecuencia de inundaciones que se presentan en la zona de estudio, estableciendo un adecuado periodo de retorno, es decir, específico al caso de estudio y no general para Colombia como actualmente está definido por la norma.

Aplicando lo anteriormente expuesto al caso de estudio de la quebrada Frailes ubicada en Dosquebradas – Risaralda, se determina una frecuencia de inundación alta, a partir de los eventos históricos reportados en la zona (ver numeral 3.3), de tal modo que un periodo de retorno de dos (2) años sería pertinente conociendo que anualmente en los meses de lluvia (abril, mayo, octubre, noviembre) la zona presenta problemas por inundaciones que generan daños y pérdidas. Además, conociendo que no hay estaciones ubicadas en la fuente hídrica, determinar el caudal a partir de registros de eventos históricos, resulta más efectivo que determinarlo a partir de extrapolación de datos extraídos de estaciones que probablemente no representen una muestra estadística justa de la lluvia del área de estudio, teniendo en cuenta la alta variabilidad climatológica que se presenta en el territorio colombiano. De tal modo, es importante resaltar que evaluar el acotamiento de la ronda hídrica para un periodo de retorno superior a 100 años, no resulta eficiente, y menos en este caso donde cada año la zona se inunda, ocasionando daños en edificaciones de primer nivel de importancia en casos de emergencia como el Hospital Santa Mónica.

Teniendo en cuenta que en Canadá existe una distribución del territorio según los eventos ocurridos para determinar el periodo de retorno, y conociendo que Colombia conserva

divisiones territoriales denominadas regiones naturales, establecidas a partir de características heterogéneas en cuanto a relieve, clima, vegetación, distancia al mar, promedio de lluvias y condiciones de suelo del país; se considera pertinente la implementación de los conceptos abordados en Canadá y España a partir de una regionalización o zonificación según eventos extremos específicos, teniendo en cuenta las características de los ríos, geomorfología entre otros aspectos importantes que se presenten en las regiones del país, determinados a partir de análisis de frecuencia de inundación. La ventaja de implementar la regionalización es la posibilidad de tener datos específicos relacionados a cada una de las regiones de Colombia que contribuyen a una mayor especificidad en la determinación de los caudales y eventos a simular, obteniendo un mejor estimativo al momento de realizar la modelación. Esto se deriva en el aumento de la capacidad asertiva al determinar la ronda hídrica de manera distintiva y adecuada para los diversos ríos que se encuentran en el territorio colombiano. Adicionalmente, se atribuye la posibilidad de desarrollar investigaciones que contribuyan a la realización de metodologías para determinar los eventos extremos a partir de registro históricos y estudios que proporcionen la regionalización del país en estos aspectos.

La rugosidad:

En Colombia, existen mapas de cobertura vegetal administrados por el Instituto Geográfico Agustín Codazzi – IGAC los cuales, en la mayoría del territorio poseen un costo para adquirirlos, estos mapas vienen en versiones impresas y versiones digitales a través de archivos de tipo Shapefile, manejables en Sistemas de Información Geográfica. Se identifica que estos datos presentan falencias al ser establecidos a partir de la utilización de métodos europeos como el Corine Land cover – CLC, que según algunos autores no se encuentra completamente adaptado al territorio colombiano. A partir de la cobertura del suelo, se relaciona un coeficiente de rugosidad, para el cual la norma recomienda el uso de la ecuación de Jarres (1984) o estimaciones indirectas para ríos de alta pendiente, que en la mayoría de los casos es determinada a partir de la literatura. Se considera importante tener en cuenta que la rugosidad es un parámetro que se ve influenciado por la vegetación, la infiltración, el tamaño de las piedras y su porosidad, la sinuosidad del cauce, la pendiente, la presencia de sedimentos, entre otros aspectos. Adicionalmente, la norma colombiana establece que los valores de rugosidad deben ser verificados en campo y

comparados con valores de estudios realizados anteriormente, lo que no es posible siempre.

En España, a falta de información más detallada, se propone utilizar como información de partida el mapa de usos del suelo del proyecto europeo CORINE LAND COVER (CLC) combinada con los datos del SIOSE (Sistema de Información de Ocupación del Suelo en España) y las orto fotos del PNOA. La normativa proporciona tablas en las que relaciona los usos del suelo del SIOSE y el CLC a los coeficientes de Manning y explican Método de Cowan para la estimación del número de Manning en el lecho del cauce; para casos que no cuenten con información suficiente para aplicar el método, se recomienda el cálculo del coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach relacionado a las características físicas del cauce mediante la ecuación de Colebrook-White, complementado con una investigación en campo.

En el caso de Canadá se cuenta con información disponible sobre los suelos en la página web del CANSIS (Canadian Soil Information Services). La norma hace énfasis en la importancia del parámetro del coeficiente de Manning como un valor que no puede ser medido directamente, pero su estimación merece un alto esfuerzo investigativo, debido a su influencia en los resultados de la modelación. No se recomiendan ecuaciones para su determinación, pero si se hace énfasis en la utilización de los niveles de agua conocidos y niveles máximos teniendo en cuenta que en general, el valor de coeficiente de rugosidad disminuye a medida que aumenta la profundidad del flujo.

Ancho de la franja de ronda hídrica:

Teniendo en cuenta lo estudiado en las normativas, se tiene que para el caso de los tres países Colombia, Canadá y España, se tiene una franja que no permite asentamientos poblacionales o el desarrollo de actividades productivas y una zona de protección contigua con desarrollo condicionado donde se permite la ubicación de edificaciones y actividades económicas y productivas, desde el punto de vista legal.

Como se observa en la Figura 68, para Colombia se tiene el cauce permanente, y la ronda hídrica a la cual se le atribuye la faja paralela al cauce determinada a partir del componente hidrológico/hidráulico y el área de protección a partir del componente geomorfológico y ecosistémico. En Canadá se considera el concepto en dos zonas que corresponde a un cauce de alivio y la franja de inundación, teniendo en cuenta que en las partes exteriores de las llanuras de inundación se pueden desarrollar actividades de manera segura, y sin efectos adversos para la población. En España, se considera la zona de Dominio Hidráulico Público, y contigua a esta la zona de servidumbre y zona de policía con una distancia de 100 metros de ancho a lado y lado.

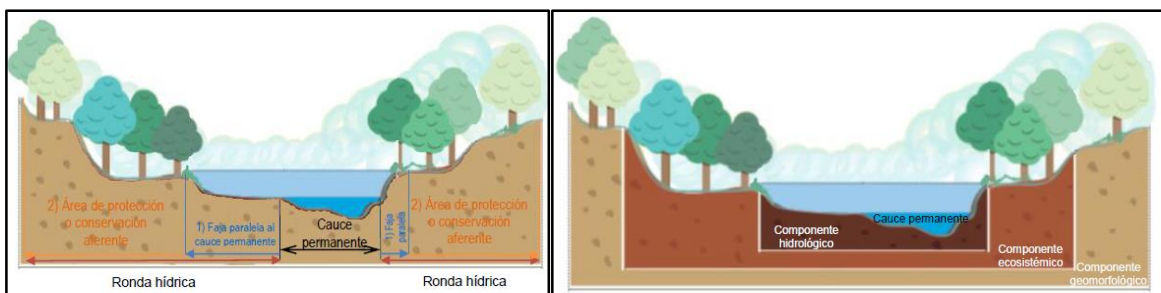


Figura 68a1: Delimitación ronda hídrica - Colombia

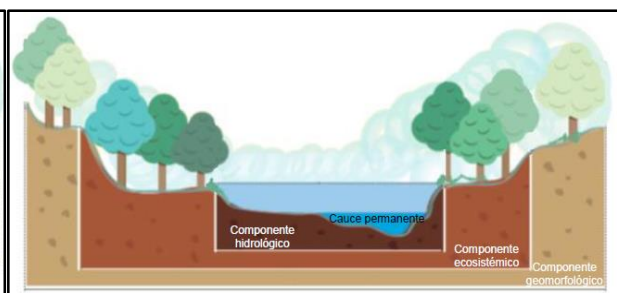


Figura 68a2: Componentes ronda hídrica - Colombia

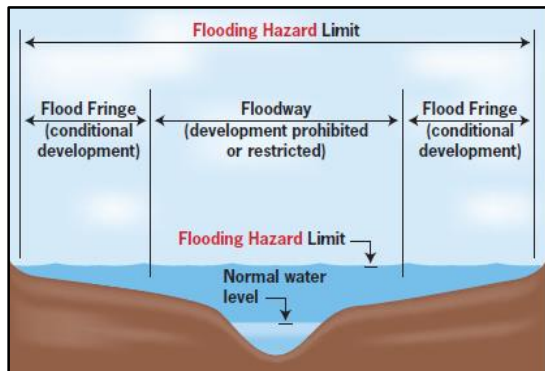


Figura 68b: Delimitación ronda hídrica - Canadá

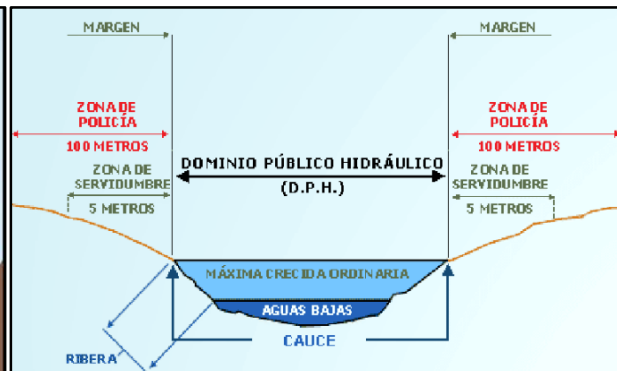


Figura 68c: Delimitación ronda hídrica - España

Figura 68: Franja de ronda hídrica (a) Colombia, (b) Canadá, (c) España.

Modelación:

Tanto en Canadá como en España explican las bases teóricas de la modelación unidimensional, y presentan alternativas de software que pueden ser utilizados; adicionalmente, en el caso de España se ofrece al profesional características básicas de la modelación bidimensional y se presentan casos de aplicación reales. En Colombia no se proporcionan características de modelos hidráulicos, dejando al criterio del experto la

determinación del mejor software según el caso de estudio, de este modo se resalta que para determinar el software idóneo es necesario conocer las características, insumos y métodos de cálculo que poseen, teniendo en cuenta que hay softwares que presentan resultados indistinto de si los insumos ingresados coinciden con las hipótesis y supuestos necesarios para un resultado ideo y aproximado del modelo.

En el capítulo 2, se expuso una breve descripción de los modelos de hidráulicos de inundación, las ecuaciones que gobiernan los modelos unidimensionales y bidimensionales, y se presentó los métodos numéricos más utilizados para la solución en los modelos presentados, esto se considera necesario, al momento de determinar qué modelo es más óptimo para el caso de estudio y cual presenta mayor aplicabilidad según las hipótesis, consideraciones y sugerencias que maneja cada software. Nos parece importante incluir estos aspectos en la normativa, siendo de gran aporte para el experto al momento de determinar el acotamiento para el componente hidráulico.

Seguidamente, una vez estudiadas las normativas y su aplicabilidad, se considera importante destacar, la relación existente entre el acotamiento de la ronda hídrica y los factores de riesgo (amenaza, vulnerabilidad, exposición). En Canadá, esto se encuentra implícito al determinar los eventos estándar, los cuales están evaluados y establecidos a partir de las pérdidas generadas y daños que dichos eventos representaron para el país. Por esto tiene de guía eventos como el Huracán Hazel y la Tormenta Timmins, los cuales generaron grandes pérdidas, pero pueden ser reemplazados por eventos que representen mayor amenaza para la zona de interés, a través de adecuados estudios que determinen que si representan un impacto significativo respecto al riesgo en que se encuentra la población aledaña al cuerpo de agua. Por lo tanto, el evento de referencia será aquel represente mayores pérdidas, a partir del cual se determinará el periodo de diseño para la determinación del caudal.

Para el caso de Colombia se determina la lluvia de diseño relacionada a un determinado periodo de retorno sin tener en cuenta las pérdidas importantes tales como edificaciones que presten servicio a la comunidad en caso de emergencia, perdidas de humanas entre otras que los eventos extremos históricos representan. Es pertinente resaltar que, en la Guía Técnica Colombiana, esto se integra al momento de realizar la priorización de intervención de cauces, para lo cual se tiene en cuenta los cuerpos de agua instrumentos

de gestión ambiental, fuentes hídricas con afectaciones en los aspectos físico-bióticos, y aspectos socio-culturales tales como problemáticas o conflictos ambientales, cuerpos de agua que discurren en zonas urbanas o de expansión urbana, cuerpos de agua con llanuras inundables, valles o abanicos aluviales con ocupación, entre otros. El proceso se aplica solamente para determinar la priorización de intervención. Se considera apropiada la inclusión de factores como la amenaza, la exposición y la vulnerabilidad en las fases del proceso de acotamiento de la ronda hídrica, para determinar los eventos a simular y magnitud. Por ejemplo, para el caso de Dosquebradas – Risaralda, la quebrada Frailes evidencia presencia de los criterios mencionados anteriormente lo que lleva a una alta priorización de intervención, pero al establecer la ronda hídrica, la ausencia de registros de datos suficiente y estaciones meteorológicas lo suficientemente cercanas limita la capacidad de determinar un caudal apropiada según un periodo de retorno relacionado específicamente a la zona según eventos históricos. La Figura 69, muestra una propuesta alternativa de la metodología para la determinación del acotamiento de la ronda hídrica en su componente hidráulico, teniendo en cuenta la frecuencia de inundación según los eventos históricos y la obtención de datos a partir de la regionalización.

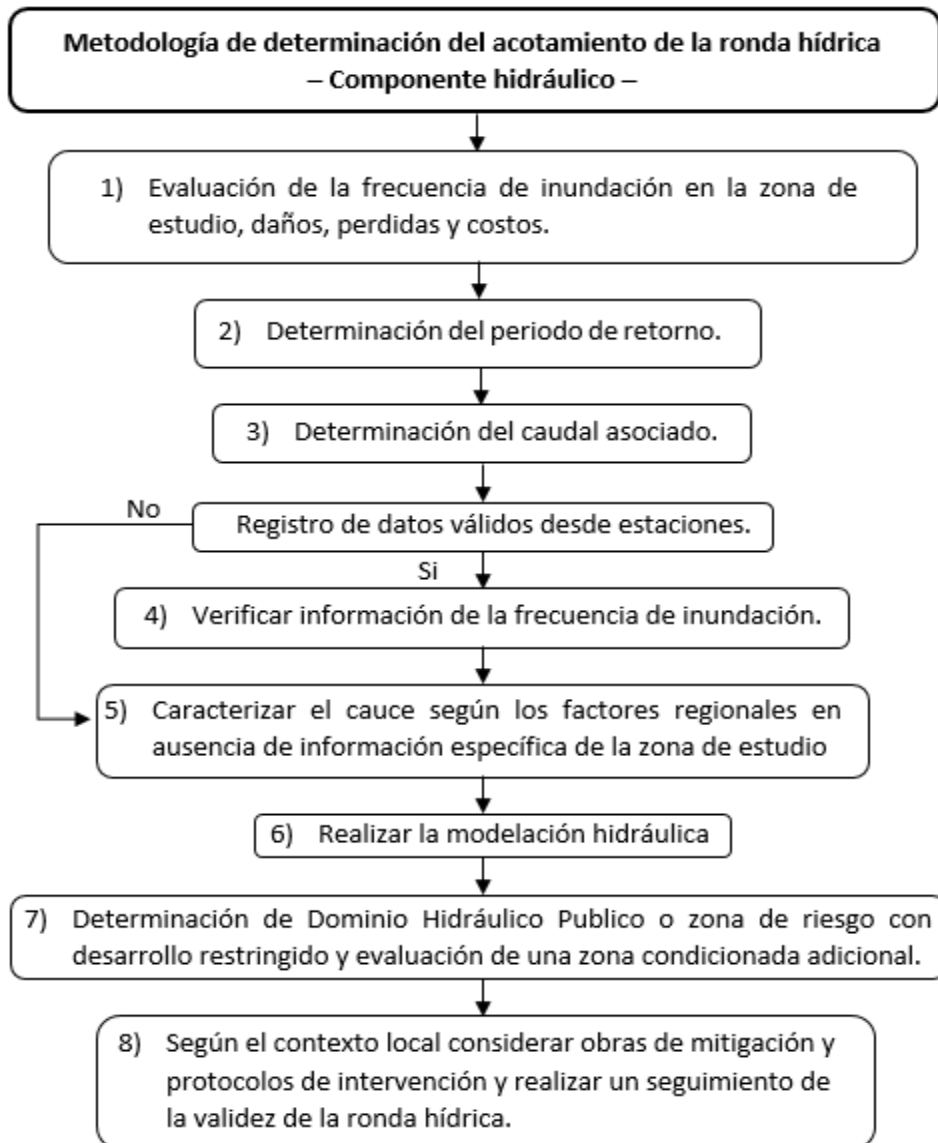


Figura 69: Diagrama de flujo - Propuesta de Metodología alternativa para el acotamiento de la ronda hídrica – Componente hidráulico –

Para la zona rural de la subcuenca Frailes, manejar la misma lógica, implica que se modelara según periodos de retorno que se establezcan a partir de eventos que hayan generado grandes pérdidas, para este caso las inundaciones no son tan frecuentes, como en la zona urbana, en consecuencia, su periodo de retorno será mayor al relacionarlo con la frecuencia de inundabilidad. Y en algunos casos al no presentarse pérdidas representativas, el periodo de retorno no tendrá gran sensibilidad o relevancia. Lo que indica que generalizar periodos de retorno de 15 y 100 años para Colombia no es un criterio óptimo en el acotamiento de la ronda hídrica.

Conclusiones

Nuestro estudio tuvo como propósito demostrar que la norma colombiana presenta limitantes al momento de determinar el acotamiento de la ronda hídrica, considerando que diferentes autores identifican falencias y problemáticas en ausencia de inclusión de estudio de análisis de riesgo que tengan en cuenta los conceptos de amenaza, vulnerabilidad y exposición, favoreciendo la determinación de daños y la cuantificación de pérdidas que afectan el acotamiento de la ronda hídrica. Las normativas internacionales de Canadá y España analizadas proporcionan e integran en sus procedimientos conceptos similares a los usados en Colombia, pero adicionalmente integran aspectos como la regionalización que proporciona una mejor estimativa de características como la topografía y la rugosidad, y un análisis de frecuencia de inundación en zonas que tienen mayor impacto. A partir de la aplicación de la norma colombiana en el caso de estudio, se evidencian pautas insuficientes al momento de determinar el acotamiento de la ronda hídrica, teniendo en cuenta que este no se puede implementar de manera integral considerando las características de la zona, además al implementarla se tendrían pérdidas por inundación. A pesar que la norma ha sido objeto de modificaciones y aplicación en diferentes casos de estudio en Colombia, no proporciona herramientas a un nivel de detalle necesario, proporcionando un falso concepto de seguridad a partir de los resultados que se puedan obtener.

Colombia integra el riesgo y la vulnerabilidad al estudio al momento de priorizar las intervenciones y no en el procedimiento al determinar el acotamiento. La consecuencia de eso es tener rondas hídricas basada en periodos de retorno según la variabilidad climática para todo el territorio nacional sin importar las afectaciones que se tengan. De hecho, una ronda de “hasta 30 metros” como lo propone la ley colombiana estará apta para ciertos

casos donde no se esperan grandes pérdidas, pero para el caso de estudio de la quebrada Frailes donde son más de 100 metros de orilla afectados por las crecidas, se consideraría inadaptada.

El desarrollo industrial que representa Dosquebradas para el país, impide la aplicación adecuada del acotamiento de la ronda hídrica según la metodología colombiana. En este caso es necesario buscar el equilibrio entre el riesgo, la vulnerabilidad y las consecuencias sociales con la posibilidad de promover obras de protección permanente y protocolos de intervención en caso de emergencia anticipados como un sistema de alerta temprana adecuado, por ejemplo, a partir de un estudio realizado con el detalle suficiente que determine las alertas oportunas y minimicen el impacto de las crecidas. Esto teniendo en cuenta que la quebrada Frailes posee tramos con pendientes altas lo cual influye en la velocidad del flujo y la rapidez con la cual la creciente llega a las partes aguas abajo de la cuenca. Las riberas de la quebrada Frailes se encuentran habitadas y las posibilidades de reubicación de la población se ven limitadas.

En este caso se consideró fundamental informar a la sociedad sobre los riesgos a los que se encuentran expuestos, y en zonas aledañas al río, es necesario evaluar la pertinencia por parte de las entidades gubernamentales al desarrollar protocolos de mitigación, protección y restricción considerando el equilibrio normal y natural del río.

**A. Anexo: Datos tomados en campo
de la salida técnica del 31 de julio de
2019**

PROYECTO		FECHA		TABLA							
UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES		HORA INICIO		Notas:							
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA		HORA FINAL		Notas:							
COORDENADAS		HELICE #		TIEMPO DE MEDIDA (s)							
INSTRUMENTO		Ancho Sección (B)		In Ks							
X	Fracciones de B (m)	H (m)	Y1 (m)	VI	VI media (m/seg)	Al (m ²)	Q _{media} (m ³ /seg)	V ² Al	V ² Al	In Ks	Ks
1	B/10	0.40		0.402	0.402	0.402	0.402				
		0.20		0.20	0.20						
		0.40		0.40	0.40						
		0.60		0.60	0.60						
		0.80		0.80	0.80						
2	B/10	0.20		0.20	0.20						
		0.40		0.40	0.40						
		0.60		0.60	0.60						
		0.80		0.80	0.80						
3	B/10	0.20		0.20	0.20						
		0.40		0.40	0.40						
		0.60		0.60	0.60						
		0.80		0.80	0.80						
4	B/10	0.20		0.20	0.20						
		0.40		0.40	0.40						
		0.60		0.60	0.60						
		0.80		0.80	0.80						
5	B/10	0.20		0.20	0.20						
		0.40		0.40	0.40						
		0.60		0.60	0.60						
		0.80		0.80	0.80						
Ecuación MINI-MOLINETE		Promedio (m)		Vmedia=Q _{media} /A _{media}		Suma		Suma		Promedio	
Ecuación MINI-MOLINETE		Promedio (m)		Vmedia=Q _{media} /A _{media}		Suma		Suma		Promedio	
Ecuación MINI-MOLINETE		Promedio (m)		Vmedia=Q _{media} /A _{media}		Suma		Suma		Promedio	

Observaciones: En las secciones 2, 3 y 4 se toman las muestras de sedimentos.

PARÁMETROS:
 B= Ancho de la sección
 hi= Profundidad de cada sector en el punto medio
 Vi = Punto de medición de velocidad
 V= Valor de velocidad dado por el molinete
 Vmedia= Velocidad media en el sector
 A= Área de cada sector

Superficial:
 0,389 m/s
 6,46 s → 3 m

N 64°49'37"
 W 075°41'32,6"
 cada 90 cm

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MANIZALES FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA												
PROYECTO	SITIO DE MEDIDA		FECHA		TABLA		Notas:					
			HORA INICIO		Nivel							
			HORA FINAL		Nivel							
COORDENADAS			HÉLICE #		TIEMPO DE MEDIDA (s)							
					In Ks	$\ln(5) + \ln(h) - \ln(4) / ((V_0.8/V_0.2)^2 - 1)$	$\mu^* = \frac{\sum(V^* \ln K_s)}{\sum(V^*)}$	$\mu^* = 1$	$(0.4^* (V_0.8/V_0.2)) / \mu^*$			
INSTRUMENTO			Ancho Sección (B)		Ks	$\ln(5) + \ln(h) - \ln(4) / ((V_0.8/V_0.2)^2 - 1)$	$\exp^*(\ln K_s)$	$\mu^* = 1$	$(0.4^* (V_0.8/V_0.2)) / \mu^*$			
X	Fraciones de B (m)	hi (m)	Yi (m)	rpm	VI	Vf media (m/seg)	Al (m ²)	Qf = $\sum(V_i \cdot V_i)$ media (m ³ /seg)	Suma $\sum(V_i^2 \cdot A_i)$	Suma $\sum(V_i^2 \cdot A_i)$	Promedio $\mu^* = 1$	Promedio K_s
1	B/10	4.40 4.80	0.13 0.145	0.4 hi 0.6 hi 0.8 hi	0.209							
2	3B/10	5.20 5.60	0.17 0.151	0.2 hi 0.4 hi 0.6 hi 0.8 hi	0.086							
3	5B/10	5.86	0.02	0.2 hi 0.4 hi 0.6 hi 0.8 hi								
4	7B/10			0.2 hi 0.4 hi 0.6 hi 0.8 hi								
5	9B/10			0.2 hi 0.4 hi 0.6 hi 0.8 hi								
EQUACIÓN MINI-MOLINETE												
OBSERVACIONES												
En las secciones 2, 3 y 4 se toman las muestras de sedimentos												
PARAMETROS												
B= Ancho de la sección												
hi= Profundidad de cada sector en el punto medio												
Yi = Punto de medición de velocidad												
Vi = Valor de velocidad dado por el molinete												
Vi media = Velocidad media en el sector												
Ai = Área de cada sector												

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA SEDE MAANIZALES FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA									
PROYECTO		FECHA		TABLA		Nivel		Notas:	
SITIO DE MEDIDA		HORA INICIO HORA FINAL		Hélice #		TIEMPO DE MEDIDA (s)			
COORDENADAS		Ancho Sección (B)		Ks		In Ks			
INSTRUMENTO		VI media (m/seg)		Al (mz)		Ql= Al*Vi media (mz/seg)		exp*(lnKs)	
X		Fracciones de B (m)		VI (m)		VI media (m/seg)		Vi ² Al	
1		B/10		rpm		Al (mz)		Vi ² Al	
2		3B/10		m/seg		Ql= sum Ql		Suma	
3		5B/10				At= sum Al		Suma	
4		7B/10				Qt= sum Ql		Suma	
5		9B/10				Suma		Suma	
PROMEDIO		Promedio (m)						Promedio	
<p>En las secciones 2, 3 y 4 se toman las muestras de sedimentos</p> <p>ECUACIÓN MINI-MOLINETE</p> <p>OBSERVACIONES</p>									
<p>PARÁMETROS</p> <p>B= Ancho de la sección</p> <p>h_i= Profundidad de cada sector en el punto medio</p> <p>Vi = Punto de medición de velocidad</p> <p>V_{is} = Valor de velocidad dado por el molinete</p> <p>Vi media = Velocidad media en el sector</p> <p>Al= Área de cada sector</p>									

UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
SEDE MANIZALES
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA

PROYECTO		FECHA		TABLA								
SITIO DE MEDIDA		HORA INICIO	Nivel	Notas:								
COORDENADAS		HORA FINAL	Nivel									
INSTRUMENTO		HÉLICE #	TIEMPO DE MEDIDA (s)									
		Ancho Sección (B)	In Ks	$\ln(6) + \ln(h) - (\ln(4) / ((V_{0.8} / V_{0.2}) - 1))$								
			Ks	$\exp^{-1}(\ln K_s)$								
			media	$V^3 \cdot A_i$	$V^2 \cdot A_i$							
			m^3/seg	μ^3	$\ln K_s$							
				μ^2	Ks							
				μ^1	$(0.4 \cdot (V_{0.8} \cdot V_{0.2})) / \ln 4$							
X	Fracciones de B (m)	h _i (m)	V _i (m)			V _i media (m/seg)	A _i (m ²)	Q _i = A _i · V _i	Suma	Suma	Promedio	Promedio
			rpm									
1	B/10	0,12	0,2 hi	0,764								
		0,089	0,4 hi									
			0,8 hi									
2	3B/10	2,80	0,2 hi	0,721								
			0,4 hi									
			0,6 hi									
			0,8 hi									
3	5B/10		0,2 hi									
			0,4 hi									
			0,6 hi									
			0,8 hi									
4	7B/10		0,2 hi									
			0,4 hi									
			0,6 hi									
			0,8 hi									
5	9B/10		0,2 hi									
			0,4 hi									
			0,6 hi									
			0,8 hi									
Ecuación MINI-MOLINETE		Promedio										
OBSERVACIONES		En las secciones 2, 3 y 4 se toman las muestras de sedimentos										
PARAMETROS		$d_m = \frac{\sum(V_i^3 \cdot A_i)}{\sum(V_i^2 \cdot A_i)}$	$d_p = \frac{\sum(V_i^2 \cdot A_i)}{\sum(V_i \cdot A_i)}$	Sf =								
		d _m = Ancho de la sección h _i = Profundidad de cada sector en el punto medio V _i = Punto de medición de velocidad V _m = Valor de velocidad dado por el molinete V _i media = Velocidad media en el sector A _i = Área de cada sector										

Bibliografía

- Alvarado-Bello, S. A. (2014). *Uso de un Sistema de Información Geográfica para el análisis de amenaza por inundación en la cuenca alta del río Bogotá - municipio de Cota - límites localidad de Suba*. (Trabajo de grado). Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogotá D.C.
- Amaya-Arévalo, M. F. (2015). *Demarcación de la nueva franja de ronda hídrica y posible inundación hidráulica según estudios técnicos en la modificación del POT correspondiente a la Quebrada Lavanderas del municipio de Barrancabermeja - Santander*. (Trabajo de grado). Especialización en Sistemas de Información Geográfica., Universidad de Manizales. Colombia. Recuperado de http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/bitstream/handle/6789/2340/Amaya_Maria_Fernanda_2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Arbeláez-Arboleda, A. C., Posada-García, L. & Vélez-Otálvaro, M. V. (2002). *Vulnerabilidad y uso de la planicie de inundación*. Ponencia presentada en el XV Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 29-31 de agosto, Medellín, Colombia. Recuperado de <http://bdigital.unal.edu.co/4287/1/DA3492.pdf>
- Arreguín-Cortés, F. I., Rubio-Gutiérrez, H., Domínguez-Mora, R., & De Luna-Cruz, F. (2014). *Análisis de las inundaciones en la planicie tabasqueña en el periodo 1995-2010*. Artículo técnico. Tecnología y Ciencias Del Agua, 5(3). Versión On-line ISSN 2007-2422. Recuperado de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222014000300001

- Barquero-Zafra, I. (2010). *Determinación de los límites del dominio público hidráulico y las zonas inundables en la zona de los Gámez, en los desarrollos previstos por el P.G.O.U en revisión.* Recuperado de http://www.malaga.eu/recursos/urbanismo/pgou_ap2/Documento%20I.%20Anejos/1.%20Anejos%20a%20la%20memoria%20informativa/7.%20Estudio%20hidrologico/Los%20Gamez/Estudio%20inundabilidad%20Los%20Gamez%20PARTE%2001.pdf
- Barrios-Castillo, A. G. & Guzmán-Moncaleano, C. A. (2015). *Estado del arte de las metodologías para delimitación de rondas hídricas en el contexto internacional y local.* (Trabajo de grado). Especialización en Recursos Hídricos. Facultad de Ingeniería. Universidad Católica de Colombia. Bogota D.C. Recuperado de https://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/2357/1/Trabajo_de_grado_Estado_del%20Arte_Metodologia_para_Delimitacion_de_Rondas_Final_V3.pdf.
- Bravo-Sossa, L. I., Romo-Bravo, L. Y., Madroñero-Palacios, S. M. & Mafla-Chamorro, F. R. (2019). *Delimitación de la ronda hídrica con criterio ecosistémico del río Mijitayo, municipio de Pasto- Nariño.* Revista de Investigación Agraria y ambiental. Vol. 10 No. 1. doi: <https://doi.org/10.22490/21456453.2373>
- Caballero-Acosta, J. H. (2011). *Las avenidas torrenciales: una amenaza potencial en el valle de Aburra.* Universidad Nacional de Colombia. Medellín.
- Cardona-Arboleda, O. D. (1993). *Los desastres no son naturales, Capítulo 3. Evaluación de la amenaza, la vulnerabilidad y el riesgo.* Red de Estudios Sociales en Prevención de Desastres en América Latina, LA RED.
- Cardona-Arboleda, O. D. (2005). *Gestión Integral de Riesgo y Desastres.* Maestría en Medio Ambiente y Desarrollo. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.
- Castañeda-Díaz, C. A. & Ocampo-Rodríguez, J. L. (2019). *Delimitación de la ronda hídrica y zonificación del riesgo del Río Bogotá en el municipio de Villapinzón basado en la modelación hidrológica e hidráulica.* Facultad de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil. Universidad Santo Tomás. Bogotá D.C., Colombia.

Chaudhry, M.H. (2008). *Open-Channel Flow*. Springer. Columbia. United States.

Centro Nacional de Estimación, Prevención, y Reducción del Riesgo de Desastres - CENEPRED. (2017). *Informe evaluación del riesgo por inundación pluvial en el centro del poblado Capote, distrito de Picsi, provincia del Chiclayo, departamento de Lambayeque*. Perú.

Centro Nacional de Modelación & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM -. (2017). *Guía metodológica para la elaboración de mapas de inundación*.

Cepeda, C. & Navarro, G. A. (2010). *Protección del recurso hídrico en Costa Rica: propuesta para la reforma de los artículos 33 y 34 de la Ley Forestal*. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Turrialba, Costa Rica, CATIE. Boletín Técnico No. 95. Colección Economía, Política y Gobernanza del Ordenamiento de Recursos Naturales No. 15.

Chow, V.T., Maidment, D. R. & Mays, L. W. (1988). *Hidrología aplicada*. TT.

Congreso de la República de Colombia. (16 de junio de 2011). *Ley 1450 de 2011. "Por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo, 2010 - 2014"*. Bogotá D.C., Colombia.

Corporación Autónoma Regional de Caldas - CORPOCALDAS. (30 de octubre de 2012). *Resolución No. 561. "Por la cual se fijan los lineamientos para demarcar la faja de protección de los cauces naturales de las corrientes urbanas y las reglas para su intervención"*. Caldas, Colombia.

Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (s.f). *Guía metodológica para la delimitación de zonas de ronda en la jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR*. República de Colombia

Corporación Autónoma Regional de Risaralda – CARDER. (2008). *Diagnóstico de riesgos ambientales en el municipio de Dosquebradas Risaralda*. Colombia.

Corporación Autónoma Regional de Risaralda - CARDER. (s.f). *Diagnóstico de Riesgos Ambientales - Municipio de Dosquebradas, Risaralda*. Colombia

Corporación Autónoma Regional del Tolima - CORTOLIMA. 2017. *¿Qué es una ronda hídrica?* Boletín 159 17/10/2017. Recuperado de <https://www.cortolima.gov.co/boletines-prensa/qu-ronda-h-drica>.

Daza-Leguizamón, O. J. & Sanabria-Marín, R. (2008). *Identificación de conflictos de uso de suelo en rondas hídricas: herramienta para manejo ambiental. Caso de estudio municipio de Paipa*. Perspectiva geográfica: Revista del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía, ISSN-e 0123-3769, N°. 13, pp. 13-26. Recuperado de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3650858>.

Dirección General del Agua del Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino - España. (2011). *Guía metodológica para el desarrollo del sistema nacional de cartografía de zonas inundables - SNCZI*.

Duque, R. S. (17 de septiembre de 2018). *Hay que rondar a las rondas hídricas*. UN Periódico Digital. Recuperado de <http://unperiodico.unal.edu.co/pages/detail/hay-que-rondar-a-las-rondas-hidricas/>

Forero-Torres, J. E. & Garay-Escobar, M. S. (2018). *Comparación entre los métodos convencionales de valoración de rondas hídricas en zona rural y el método del factor de ponderación asociado al uso actual. Caso de estudio: Finca Berlín de Aguazul, Casanare*. (Proyecto de grado). Especialización en Avalúos, Facultad de Ingeniería, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia.

Franco-Idarraga, F. L. (2010). *Respuestas y propuestas ante el riesgo de inundación de las ciudades colombianas*. Revista de Ingeniería. Universidad de los Andes. No. 31. pp. 97-108. ISSN 0121-4993. Bogotá D.C., Colombia.

Gaitán-Campos, J. E. (2016). *Propuesta metodológica para la definición del límite de la ronda hidráulica de la cuenca media del río Magdalena. Sector de análisis y prueba*

- piloto entre San Luis y Barrancabermeja.* (Tesis de maestría, Escuela Colombia de Ingeniería Julio Garavito).
- Gayoso, J. & Gayoso, S. (2003). *Diseño de zonas ribereñas requerimiento de un ancho mínimo.* Universidad Austral de Chile. Valdivia.
- González-Cueva, M. S. (2011). *Análisis de la normativa, criterios y escenarios para la determinación del ancho de franjas ribereñas como áreas de protección en Costa Rica.* (Tesis de grado). Magister Scientiae en Manejo y Gestión Integral de Cuencas Hidrográficas. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza - Escuela de posgrado - CATIE. Turrialba, Costa Rica.
- Instituto de estudios ambientales - IDEA. Grupo de trabajo académico en ingeniería hidráulica y ambiental - GTA. (2010). *Estimación de las áreas de protección ambiental en la zona urbana del Vergel - Municipio de Ibagué, Cuenca del Río Chípalo.* Informe presentado a la Corporación Autónoma Regional del Tolima - CORTOLIMA. Manizales, Colombia.
- Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático – IDIGER. (2019). *Caracterización General del Escenario de Riesgos por Inundación.* Colombia. Recuperado de <https://www.idiger.gov.co/rinundacion>
- Josa-Paz, C., Ortiz-Gómez, L. E., Villacres-Díaz, J. V. & Mafla-Chamorro, F. R. (2018). *La importancia de las rondas hídricas y el acotamiento de las mismas en Colombia.* Universidad Mariana. Colombia.
- Martín-Vide, J. P. (2007). *Ingeniería de ríos.* Universidad Politécnica De Cataluña. España.
- Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente del Gobierno de España. (2014). *Cauces con DPH Cartográfico o Probable.*
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente - Anotado. Decreto Ley*

2811 de 1974. Bogotá D.C. Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2014). *Respuestas a los comentarios presentados por actores externos a propuestas normativas*. Recuperado de http://www.minambiente.gov.co/images/Atencion_y_participacion_al_ciudadano/consultas_publicas_2018/Respuesta_a_coment_de_act_ext_a_prop_norm__Ronda.pdf

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2018). *Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia*. Bogotá.

Möller, P. (2011). *Las franjas de vegetación ribereña y su función de amortiguamiento, una consideración importante para la conservación de humedales*. Revista Gestión Ambiental ISSN 0718-445X On-line No. 21. pp. 96-106.

Murcia-García, U. G., Fonseca, J. & Tobón, F. (2015). *Zonificación y cuantificación de áreas para restaurar en rondas hídricas, nacimientos y suelos con pendientes >100% en la amazonia colombiana*. Revista Colombia Amazónica N° 08 de 2015, pp. 137-150.

Néelz, S. & Pender. G. (2009). Desktop review of 2D hydraulic modelling packages. Environment Agency. Department for Environment Food and Rural Affairs. Defra. Inglaterra.

Ontario Ministry of Natural Resources. (2002). *Technical Guide - River and Stream Systems: Flooding Hazard Limit*. Ontario, Canadá.

Organization of American States - OAS. (1993). *Cap. 8. Definición de llanura de inundación y evaluación del peligro de inundaciones*. Manual sobre el Manejo de Peligros Naturales en la Planificación para el Desarrollo Regional Integrado. Washington, D.C. Recuperado de <http://www.oas.org/dsd/PUBLICATIONS/UNIT/OEA65S/ch13.htm>

Ospina-Restrepo, O.E., Fernández, C. F. & Velásquez R, J.E. (2005). *Diagnóstico de uso actual del recurso hídrico y de la franja de protección de la parte media del Río Hacha*

en Florencia, Caquetá. Revista Momentos de Ciencia. Vol. 2 No. 2. pp. 101-106. ISSN On-line 2538-9602.

Presidencia de la República de Colombia. (18 de diciembre de 1974). *Decreto Ley 2811 de 1974. "Por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección del Medio Ambiente"*. Bogotá D.C., Colombia.

Presidencia de la República de Colombia. (29 de diciembre de 2017). *Decreto 2245. "Por el cual se reglamenta el artículo 206 de la Ley 1450 de 2011 y se adiciona una sección al Decreto 1076 de 2015, Decreto Único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible, en lo relacionado con el acotamiento de rondas hídricas"*. Bogotá D.C., Colombia.

Romero, F. I., Cozano, M. A., Gangas, R. A. & Naulin, P. I. (2014). *Zonas ribereñas: protección, restauración y contexto legal el Chile*. Revista BOSQUE (Valdivia). Vol 35 No. 1. Versión On-line ISSN 0717.9200.

Sarache-Silva, M. (2015). *Una propuesta técnica para el fortalecimiento de la normatividad colombiana en relación con la definición de la ronda hidráulica*. (Trabajo de grado). Maestría en Ingeniería – Recursos Hidráulicos. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C.

Secretaria Distrital de Ambiente. (Consultado de 2019). *Lineamientos técnicos para las franjas de control ambiental*. Recuperado de <http://www.ambientebogota.gov.co/web/sda/franjas-de-control-ambiental>

Sistema de Información Ambiental de Colombia. (Consultado en 2019). *Mapas de inundación de Colombia*. Recuperado de <http://www.siac.gov.co/inundaciones>

Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. (2010). *Evaluación preliminar del riesgo de inundación de la demarcación hidrográfica del Júcar. Tomo I de I - Resumen*. Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. (2011). *Evaluación preliminar del riesgo de inundación de la demarcación hidrográfica del Ebro. Memoria*. Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Sistema Nacional de Cartografía de Zonas Inundables. (2012). *Evaluación preliminar del riesgo de inundación de la demarcación hidrográfica del Júcar. Memoria*. Gobierno de España. Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino.

Sistema Nacional de Información para la Gestión del Riesgo de Desastres. (Consultado en 2019). *Inundaciones*. Recuperado de <http://gestiondelriesgo.gov.co/snigrd/pagina.aspx?id=144>

Stutter, M. I., Chardonb, W. J. & Kronvangc, B. (2012). *Riparian Buffer Strips as a Multifunctional Management Tool in Agricultural Landscapes: Introduction*. Madison: American Society of Agronomy. Journal of Environmental Quallity. 41. pp. 297-303. doi:10.2134/jeq2011.0439

Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres – UNGRD. (2018). *Atlas de Riesgo de Colombia: revelando los desastres latentes*. Bogotá, D.C., Colombia.

US Army Corps of Engineers. (2016). *Hydraulic Reference Manual. Hydrologic Engineering Center*.

Velarde, F.G. A.. (2012). *Restauración del paisaje*. Editorial Paraninfo. España. Recuperado de <https://books.google.com.co/books?id=Ln9G8XISUt8C&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Vélez-Upegui, J. J. (2012). *Manual de hidrología para obras viales basada en el uso de Sistemas de Información Geográfica*. Grupo de trabajo académico en ingeniería hidráulica y ambiental. Universidad Nacional de Colombia. Manizales.

Vélez, J. I., Rave, C. C., Caballero, H., Montes, L. F., Escobar, D., Arango-A, A., Cuadrado-

A, A. & Smith, R. A. (2004). *Definición de retiros en cuencas urbanas*. Artículo presentado en el XVI Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, 29 a 31 de octubre de 2004, Armenia, Quindío.