

Maestría en Ingeniería Civil

Análisis del modelo bidimensional de la obstrucción en box culverts y puentes.

Caso de estudio: Caño Matute y tributarios en la ciudad de Cartagena

Jessica Estephany Torres Forero



UNIVERSIDAD

Bogotá D.C.

Diciembre 2022

Análisis del modelo bidimensional de la obstrucción en box culverts y puentes.

Caso de estudio: Caño Matute y tributarios en la ciudad de Cartagena

Trabajo de grado para optar al título de Magister en Ingeniería Civil con Énfasis en
Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente

Directora de trabajo

Ing. Yuly Andrea Sánchez Londoño, I.C, ESP, MSC IC

Asesor externo

Ing. Andrés Aguirre Mendoza

Diciembre 2022

Página de aceptación del jurado

El Trabajo de grado de maestría titulada “Análisis del modelo bidimensional de la obstrucción en box culverts y puentes. Caso de estudio: Caño Matute y tributarios en la ciudad de Cartagena”, presentada por Jessica Estephany Torres Forero, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con Énfasis en Recursos Hidráulicos y Medio Ambiente.



Msc. Yuly Andrea Sánchez Londoño

Dr. German Ricardo Santos

Ms. Hector Matamoros

Agradecimientos

A todas las personas que creyeron en mi cuando yo no lo hice.

Resumen

A lo largo de los años los asentamientos poblacionales sin ningún tipo de regulación en la ciudad de Cartagena han ocasionado la invasión de la ronda hídrica de caño Matute lo que ha impactado negativamente para la flora, la fauna y hasta para los mismo asentamiento por la problemática de inundación; mediante una evaluación de impactos ambientales es posible reconocer los principales factores que se están evidenciando actualmente ante la interacción antrópica con los sistemas en los canales urbanos.

Así mismo, las condiciones hidráulicas de estructuras como puentes o box impactan negativamente debido a la deposición de basuras, escombros y acumulación de maleza generando altos tirantes para periodos de retorno T_r de 2.33 y 100 años siendo estas estructuras controles hidráulicos para el flujo en los canales. Mediante una modelación bidimensional en el software de dominio público Hec Ras se permite identificar el comportamiento hidráulico de estas estructuras bajo condiciones libre y con obstrucción para determinar la afectación del normal desarrollo del flujo en caño Matute y tributarios.

Tabla de Contenidos

Capítulo 1 Introducción e información general	2
Objetivos.....	5
Objetivo General.....	5
Objetivos Específicos.....	5
Planteamiento del problema	5
Capítulo 2 Marco Teórico	7
Modelo matemático	7
HEC RAS.....	7
Fundamentos matemáticos	7
Volumen Finito en HEC RAS.....	7
Ecuación de continuidad	9
Conservación de la cantidad de movimiento.....	10
Ecuaciones de Navier-Stokes.....	11
Puentes y alcantarillados	11
Capítulo 3 Cartagena, caso de estudio de canales urbanos	18
Ubicación geográfica de los canales urbanos de estudio	19
Contexto social entorno a los canales urbanos, caso de estudio.	21
Características ecosistémicas (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).....	24

Capítulo 4 Evaluación de impactos ambientales.....	27
Capítulo 5 Desarrollo del modelo bidimensional HEC RAS	33
Terreno	34
Área de drenaje 2D	36
Coeficiente de rugosidad de Manning asociado	38
Geometría de puentes y box	39
Datos y condiciones de contorno para flujo no permanente.....	41
Capítulo 6 Análisis de resultados	44
Canales sin estructuras hidráulicas.....	45
Estructuras hidráulicas sin obstrucción	50
Estructuras hidráulicas con obstrucción	57
Conclusiones.....	63
Referencias	66
Anexos.....	69

Lista de Figuras

Figura 1 Mallado del volumen finito	9
Figura 2 Sección de puente o alcantarilla	12
Figura 3 Configuración típica de una alcantarilla	14
Figura 4 Alcantarilla de flujo total con líneas de energía e hidráulicas	15
Figura 5 Flujo a través de alcantarilla según condiciones de flujo	16
Figura 6 Canales urbanos Matute y tributarios, Cartagena.	20
Figura 7 Localidades Cartagena, Bolívar.	21
Figura 8 Impactos Ambientales con mayor impacto negativo de las condiciones actuales de Matute.	30
Figura 9 Diagrama de modelo matemático	33
Figura 10 Canales de estudio Cartagena y Turbaco.	34
Figura 11 MDT canales de estudio en Ras Mapper.....	35
Figura 12 Mallado con ajuste al eje del cauce.	36
Figura 13 Características geométricas de malla sobre cada cauce de estudio.	37
Figura 14 Coeficientes de Manning definidos en las celdas de ortofoto.	38
Figura 15 Ejemplo geométrico y método de evaluación para puentes.....	39
Figura 16 Detalle de pila con bloques asemejando escombros o maleza.	40
Figura 17 Subdivisión de la microcuenca del Arroyo Matute-Chanpundun	42

Figura 18 Canales tributarios Matute	42
Figura 19 Condiciones de contorno interno y externo Matute.	44
Figura 20 Profundidad de lámina de agua en los canales de análisis.....	46
Figura 21 Zona aguas abajo con mayores valores de lamina de agua Tr 2.33 años.....	46
Figura 22 Zona aguas abajo con mayores valores de lámina de agua Tr 2.33 años.....	47
Figura 23 Geometría de canales aguas abajo	48
Figura 24 Lámina de agua en canal Simón Bolívar Tr 2.33 años.....	49
Figura 25 Velocidad de agua en canal Simón Bolívar Tr 2.33 años.....	49
Figura 26 Geometría de canal Simón Bolívar.....	50
Figura 27 Velocidad estructura tipo puente (Conexión 7) Tr 2.33 años	51
Figura 28 Velocidad tramo medio Tr 2.33 años	52
Figura 29 Velocidad estructura tipo puente (Conexión 7) Tr 100 años	52
Figura 30 Velocidad estructura tipo puente (Conexión 7) Tr 100 años	53
Figura 31 Elevación de la lámina de agua Tr 2.33 años Calicanto Viejo.....	54
Figura 32 Elevación de la lámina de agua Tr 100 años Calicanto Viejo	54
Figura 33 Elevación de la lámina de agua estructura 11.....	55
Figura 34 Elevación de la lámina de agua estructura 7.	55
Figura 35 Elevación de la lámina de agua estructura 3.	56
Figura 36 Elevación de la lámina de agua estructura 2 Box.	56

Figura 37 Elevación de la lámina de agua Calicanto Tr 2.33 años.....	57
Figura 38 Elevación de la lámina de agua Calicanto Tr 100 años.....	58
Figura 39 Elevación de la lámina de agua Matute Tr 2.33 años.....	59
Figura 40 Elevación de la lámina de agua Matute Tr 100 años	59
Figura 41 Elevación de la lámina de agua estructura 11.....	60
Figura 42 Elevación de la lámina de agua estructura 7.	60
Figura 43 Elevación de la lámina de agua estructura 3.	61
Figura 44 Velocidad en cauce principal Matute.....	61

Lista de tablas

Tabla 1 Características canales urbanos Cartagena.	19
Tabla 2 Barrios que interactúan con los canales de estudio.	22
Tabla 3 Caracterización forestal sobre caño Matute y tributarios.....	24
Tabla 4 Impactos de Evaluación Ambiental	28

Capítulo 1 Introducción e información general

El agua es el elemento primordial para el desarrollo pleno de los seres vivos, puesto que es vital para el buen funcionamiento de los diferentes organismos. De acuerdo con el informe de la Unesco sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos del año 2019, desde la década de 1980 se ha aumentado el uso del agua de manera significativa, esto como producto del crecimiento de la población y la urbanización, acompañado de los cambios socioeconómicos y los modelos de consumo, que reflejan un incremento del 1% anual; sumado a esto, el gran impacto generado por la baja calidad con la que el recurso regresa a la fuente hídrica y los cambios hidromorfológicos generados sobre los cauces, han sido y seguirán siendo una problemática mundial (UNESCO, 2019).

Un territorio que ha enfrentado y sigue enfrentando en la actualidad la contaminación y baja calidad del recurso del agua es Latinoamérica, y resulta paradójico ya que, “según cálculos del Programa Ambiental de Naciones Unidas, la región cuenta con el 65% de agua dulce del mundo.” y pese a esto, se nota un fuerte desgaste debido a la relación entre la demanda y la oferta; lastimosamente se enfrenta al ineficiente trabajo que realizan las instituciones tanto en la planeación de la distribución como en la gestión del agua, reflejándose en la precariedad de las estructuras, inundaciones o desastres naturales que afectan principalmente a la población más pobre y vulnerable (Carrero, 2022).

Colombia, como país latinoamericano, establece dentro de su Constitución Política que el estado debe prevenir y controlar los factores de deterioro ambiental que degradan los ecosistemas y destruyen los recursos naturales. Las diferentes instituciones han

implementado directrices que buscan dar mayor relevancia al buen uso y manejo de los recursos. Sin embargo, en el hídrico Colombia tiene grandes desafíos, especialmente en lo referente a mitigar la contaminación del agua por la mala gestión y uso que se hace en diferentes actividades domésticas e industriales, todo esto teniendo en cuenta el plan que se lleva desde organizaciones universales para ponerle freno a la contaminación como los objetivos de desarrollo sostenible (ODS).

Un artículo del *Journal of Environmental Management*, destaca que diferentes ríos de Colombia presentan altos grados de contaminación y el sector doméstico es el principal agente de vertimiento, sumado a esto la carencia de sistemas de alcantarillado y el mal funcionamiento de las plantas de tratamiento que dejan en malas condiciones los recursos hídricos del país (Blackman, 2009). La cantidad de basura que llega a los caños y fuentes hídricas se convierten en agentes contaminantes sólidos que ante la presencia de microorganismos y reacciones químicas dan como resultado mal olor, gases e incluso deficiencia de oxígeno en las fuentes hídricas (León Castro & Rocha, 2010).

En el caso de Cartagena, ubicado en el departamento de Bolívar en Colombia, presenta grandes problemáticas ocasionadas por el desbordamiento de los canales y arroyos, manifestándose como una mala gestión hídrica y de saneamiento. Este sector se ha caracterizado por la presencia de asentamientos poblacionales sin ningún tipo de regulación; la invasión hacia la zona hídrica, el vertimiento de residuos sólidos y el cambio del uso del suelo ha generado deterioro en los ecosistemas naturales y también ha incrementado la problemática de inundaciones por la baja capacidad de infiltración del terreno en el sector urbano (Botero Pareja et al., 2008). Las noticias hacia esta zona del

país a lo largo de los años han sido reiterativas con problemas que se intensifican en los periodos de lluvias, el estado de los caños es precario, generando afectación a la población que los colinda por las inundaciones que se generan; la falta de mantenimiento, óptimo funcionamiento de las estructuras hidráulicas y la poca conciencia ambiental de la población han sido el reflejo de la baja calidad de vida (Romero Iriarte, 2022).

Uno de los caños que se ubica entre Cartagena y Turbaco se denomina “Caño Matute”, el cual posee diferentes afluentes; dentro de este se hallan estructuras hidráulicas encargadas de transportar el flujo proveniente de la cuenca: puentes, alcantarillados y box culverts, aun así, el funcionamiento de las obras se ve afectado en gran medida por la mala disposición de los residuos sólidos como material de escombros, basuras o materia orgánica presente, convirtiéndose en barreras para el curso normal del agua (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Teniendo en cuenta la problemática que se genera por la mala disposición de los residuos sólidos y líquidos, la acumulación sobre las obras hidráulicas en los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, ubicados en la jurisdicción de la EPA, hace necesario analizar el comportamiento hidráulico de los puentes y box culverts de los canales anteriormente mencionados por medio de una modelación bidimensional en el software de dominio público HEC RAS, complementándose con una evaluación de impactos ambientales para cuantificar la incidencia positiva o negativa del estado actual de los canales, y de una propuesta sobre la recuperación de los corredores.

Este trabajo se inscribe en la línea de profundización del centro de estudios de recursos hidráulicos y medio ambiente.

Objetivos

Objetivo General

Analizar el efecto sobre flujo de la acumulación de desechos sólidos en box culverts y puentes en caño Matute y tributarios en la ciudad de Cartagena.

Objetivos Específicos

1. Identificar las condiciones sociales, ambientales, geográficas e hidrológicas que se presentan sobre el caño Matute y tributarios.
2. Analizar el impacto ambiental del estado actual de los canales y una proyección ante una posible recuperación del corredor en el caso de estudio en la Ciudad de Cartagena.
3. Desarrollar el modelo bidimensional mediante el software Hec Ras para evaluar el comportamiento hidráulico ante la obstrucción por la acumulación de residuos sólidos sobre las estructuras de box culverts y puentes ubicados sobre caño Matute y tributarios.

Planteamiento del problema

Ante la presencia de material que modifica el funcionamiento de las estructuras de paso, puentes y box culvert, y a partir del estudio realizado para el acotamiento de la ronda hidráulica de los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, se plantea un modelo matemático orientado hacia el

análisis hidráulico del comportamiento de estas estructuras ante el paso del flujo en estos puntos específicos. Estas estructuras son utilizadas para el paso peatonal y/o vehicular; teniendo en cuenta que a través de los años se han sufrido numerosos desbordamientos ante el aumento de escorrentía y pérdida del terreno de la ronda hídrica no se ha especificado cual es el comportamiento de los puentes y box.

Con el fin de complementar el modelo matemático, una evaluación ambiental permite analizar los impactos que se están presentando ante las condiciones actuales de los diferentes componentes que interactúan alrededor y con los canales en mención.

Capítulo 2 Marco Teórico

Modelo matemático

Es una expresión cuantitativa de los procesos físicos que están relacionados, en este caso, en la corriente de agua dentro de un canal urbano. La aplicación de los modelos matemáticos permite predecir el comportamiento de los componentes dinámicos del sistema como el transporte de sedimento, áreas de inundación u otros parámetros hidráulicos (Ochoa Rubio, 2011).

HEC RAS

Software de dominio público desarrollado por la U.S. Federal Government (Gobierno Federal de los Estados Unidos) entidad conformada desde 1964 la cual ha innovado en la presentación de software para el ámbito de la hidráulica e hidrología. En la actualidad el equipo de ingenieros presentó para el 2020 la versión 6.1 de HEC RAS, el cual permite evaluar condiciones hidráulicas de flujo constante y flujo no estacionario en una y dos dimensiones, modelización del transporte de sedimentos en el lecho móvil y el análisis de la temperatura del agua. HEC RAS permite modelar geometría de canales o de ríos siempre y cuando se cuente con los datos de posicionamiento de las abscisas de estudio como sus secciones transversales y se incorpore información como coeficientes para la orientación del modelo (US Army Corps of Engineers, n.d.).

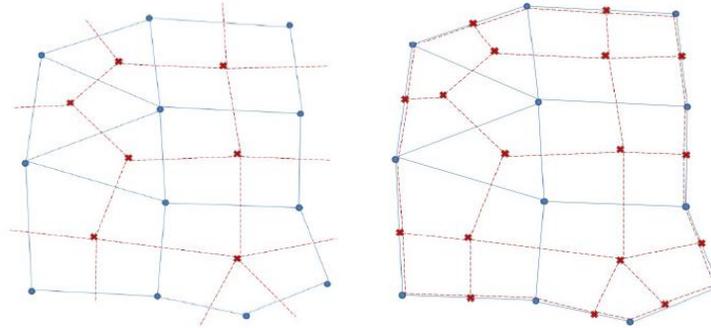
Fundamentos matemáticos

Volumen Finito en HEC RAS

Se entiende por método numérico al mecanismo matemático que busca dar una solución aproximada de un problema considerando un número finito de operaciones lógicas y algebraicas (Xamán & Gijón-Rivera, 2015). El software emplea el volumen finito implícito como método numérico el cual es un método alternativo a las diferencias y elementos finitos y permite discretizar y resolver numéricamente ecuaciones diferenciales buscando un balance en los volúmenes de control. El método de volúmenes finitos considera una malla de discretización del fluido donde cada punto de la malla se considera un volumen de control que no se traslapa y el volumen total será la sumatoria de cada volumen de control considerado (Niño C., 2002).

De acuerdo con el manual de usuario de HEC RAS los volúmenes finitos se incorporan en una malla computacional que puede mezclarse en secciones de 3, 4, 5 y hasta 8 lados lo que permite una estabilidad y precisión del mallado. Para dar solución, el mallado dependen del tamaño, la orientación y las características geométricas de los elementos de la cuadrícula, teniendo en cuenta que se hace uso de dos mallados superpuestos el segundo es el encargado de dar solución a las ecuaciones diferenciales (US Army Corps of Engineers, 2021).

Figura 1 Mallado del volumen finito



Nota. Representación gráfica del mallado con diferentes características en sus secciones y al otro lado la superposición de dos mallas. Tomado de HEC RAS Hydraulic Reference Manual por US Army Corps of Engineers, 2021.

Ecuación de continuidad

Ecuación fundamental de la mecánica de los fluidos la cual nace de la conservación de la masa describe donde en el transporte del flujo, la materia no se crea ni se destruye (Vázquez, 2004). La ecuación de continuidad describe la conservación de la masa mediante un volumen de control que tiene en cuenta el flujo entrante, el flujo saliente y la variación en el almacenamiento por lo que finalmente se establece de siguiente manera:

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q = 0$$

Ecuación 1 Ecuación de continuidad (US Army Corps of Engineers, 2021).

Donde:

A = Area total de la seccion

Q = Caudal total

$q = \text{Caudal lateral}$

Teniendo en cuenta la ley de la conservación de la masa, HEC RAS en su Manual de Referencia indica que la forma integral de la ecuación de continuidad es adoptada para la solución de la grilla para la batimetría (US Army Corps of Engineers, 2021).

Conservación de la cantidad de movimiento

La ecuación de movimiento de un fluido expresa la Segunda Ley de Newton que mide el cambio en la cantidad de movimiento de acuerdo con la resultante de la fuerza que actúan en un volumen de control (Vázquez, 2004); la cantidad de movimiento se debe a la acción de diferentes fuerzas como lo son la gravedad, la fricción, la presión, la contracción o expansión y la fuerza cortante por el viento. La expresión usada en el software es la expresión vectorial aplicada en x y considera solo las fuerzas de presión, gravedad y fricción dando como resultado:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f \right) = 0$$

Ecuación 2 Ecuación de cantidad de movimiento (US Army Corps of Engineers, 2021).

Donde:

$g = \text{gravedad}$

$S_f = \text{la pendiente de fricción}$

$V = \text{velocidad.}$

Ecuaciones de Navier-Stokes

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de fluidos en tres dimensiones expresando matemáticamente la conservación de la cantidad de movimiento y la conservación de la masa para los fluidos newtonianos incluyendo efectos de viscosidad, incompresibilidad densidad $\rho = 1$ (Vázquez, 2004). Aplicando los principios de conservación de la mecánica y la termodinámica a un volumen fluido se obtiene la llamada formulación integral de las ecuaciones. Usado en un contexto de modelado de canales e inundaciones, se imponen más simplificaciones dentro del modelo matemático de HEC RAS del uso de las ecuaciones de Navier Stokes.

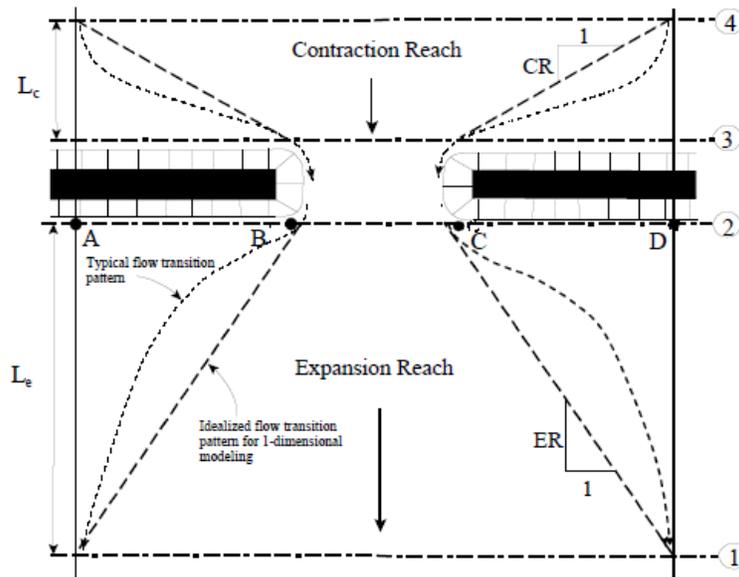
Una vez entendido la malla discretizada de volúmenes finitos, el software permite definir el parámetro para el tiempo computacional basado en el Número de Courant el cual se añade a la ecuación de cantidad de movimiento, y según se emplee la ecuación de Saint Venant u Onda Difusa para resolver el modelo.

Puentes y alcantarillados

Estructura de paso y conexión en la que se analiza la pérdida de energía ocasionada por la contracción y expansión del flujo, aguas arriba y abajo respectivamente. En la Figura 2 se visualizan las cuatro secciones en la que se desarrollaran las pérdidas en la obra hidráulica: Sección 1: Es el final de la expansión y se desarrolla el flujo con normalidad. Sección 2 se desarrolla aguas abajo, al pie del talud de acceso de la estructura. Sección 3, aguas arriba del talud de acceso donde se desarrolla la parte más pequeña de la contracción al pie del talud. Sección 4, localizada aguas arriba donde L_c en la longitud de contracción, según el

Cuerpo de Ingenieros, esta longitud puede ser tomada como la longitud media entre AB y CD. La pérdida por expansión del flujo es por lo general superior a la pérdida por contracción y pérdidas por transiciones abruptas son mayores a transiciones suaves.

Figura 2 Sección de puente o alcantarilla



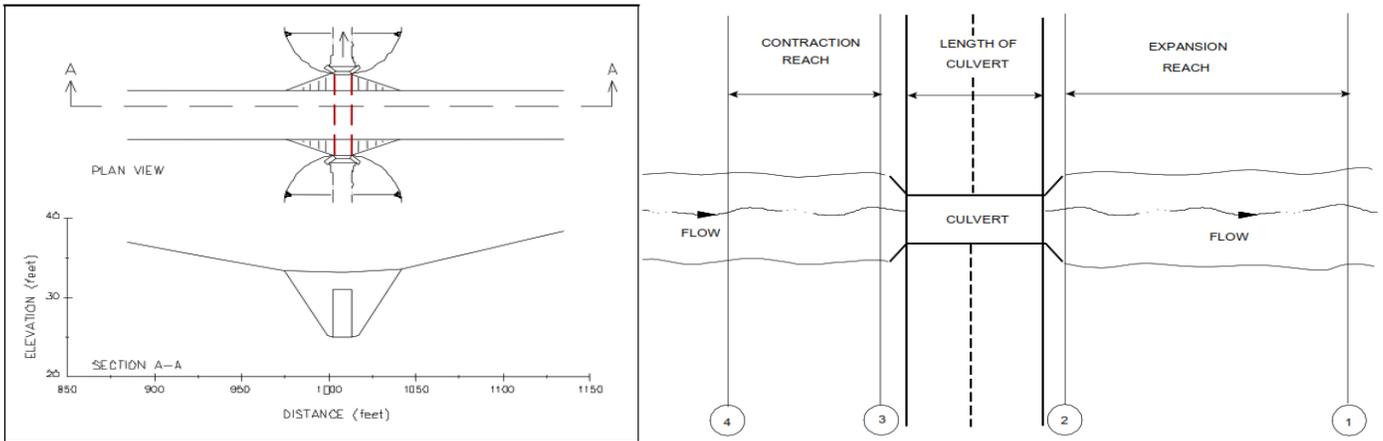
Nota. Tomado de HEC RAS Manual User (US Army Corps of Engineers, 2021)

La documentación del software presenta rangos de expansión que dependen de la relación de abertura del puente y la longitud de la llanura de inundación (b/B), relación entre el número de Manning de los laterales y el número de Manning del canal (n_{ob}/n_c) y la pendiente (S). Las pérdidas por contracción y expansión presentes dentro de la sección se establecen mediante coeficientes que deben ser establecidos de acuerdo con la situación que se presente. El análisis que hace HEC RAS para las alcantarillas se basa en las ecuaciones estándar de la Administración Federal de Carreteras (FHWA) de la publicación *Hydraulic Design of Highway Culverts* (FHWA, 1985).

La estructura de un puente o alcantarilla puede presentar cuatro tipos de flujo y puede asemejarse a un canal abierto. El análisis debe realizarse en la profundidad crítica aguas arriba y abajo del puente para determinar la sección de control. El flujo Clase A se presenta cuando la superficie de agua a través del puente es subcrítica y se busca determinar las pérdidas de energía a través de la expansión que son calculadas como pérdidas por fricción y expansión. Hay cuatro métodos para calcular las pérdidas a través del puente: 1. Ecuación de energía (método de paso estándar). 2. Ecuación de momento. 3. Ecuación de Yarnell. 4. Método FHWA WSPRO. Lo más importante del uso de estas ecuaciones es la correcta elección de los coeficientes que emplean. El flujo de Clase B puede darse ya sea para perfiles subcrítico o supercríticos, este tipo de flujo se da cuando el perfil pasa a través de la profundidad crítica en la contracción del puente. El flujo de Clase C se presenta cuando la superficie de agua a través del puente es totalmente supercrítica.

Sobre el curso del agua se puede presentar material flotante, que genera una reducción de la sección hidráulica de las pilas y es simulado mediante bloques rectangulares alrededor de las pilas, asumiendo el mismo nivel de la superficie de agua donde es el usuario quien asume las dimensiones del bloque en cuestión y el programa ajusta entonces el área y el perímetro húmedo de la abertura del puente.

Figura 3 Configuración típica de una alcantarilla



Nota. Tomado de HEC RAS Manual User por (US Army Corps of Engineers, 2021)

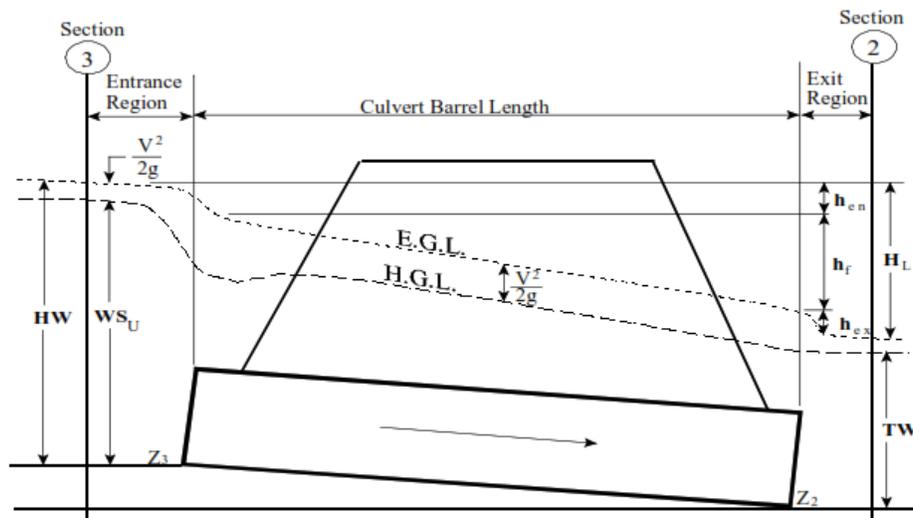
Las alcantarillas son obras de arte hidráulicas que permiten la circulación de agua en conductos cortos que conectan dos canales de agua o dos cuerpos de agua. La capacidad total de flujo de una alcantarilla depende de las características de ingreso y salida del flujo, así como las características del tubo. Su análisis se evalúa en: 1. Pérdidas aguas abajo. 2. Pérdidas que ocurren en el interior cuando el flujo atraviesa. 3. Pérdidas aguas arriba en la contracción de la abertura. El flujo dentro de la alcantarilla por lo general es no uniforme y puede llegar a presentar régimen gradual y rápidamente variado, según sea su condición, es por lo que, el análisis hidráulico no es sencillo e incluye cálculos de remanso y reducción, balance de energía y momento.

Mediante la herramienta HEC RAS se permite modelar 9 tipos de Alcantarillas en la que su análisis, muy similar a lo visto para puentes, se ubica en cuatro secciones vista en planta: Sección 1: Aguas abajo donde el flujo ya se ha estabilizado. Sección 2: Inmediatamente a la salida de la alcantarilla donde se produce la expansión. Sección 4: Aguas arriba de la

alcantarilla determinada por la longitud hasta donde se contrae el flujo. Sección 3: Donde inicia la contracción del flujo.

En la figura 4, se identifica una alcantarilla en corte transversal de la cual se identifica: Tailwater, profundidad de agua en la salida o aguas abajo; Headwater, profundidad de la línea de energía en la entrada de la alcantarilla; Upstream wáter Surface, profundidad de agua en la entrada; Energía total se entiende como la sumatoria de la elevación del terreno más la cabeza de velocidad en el punto de análisis.

Figura 4 Alcantarilla de flujo total con líneas de energía e hidráulicas

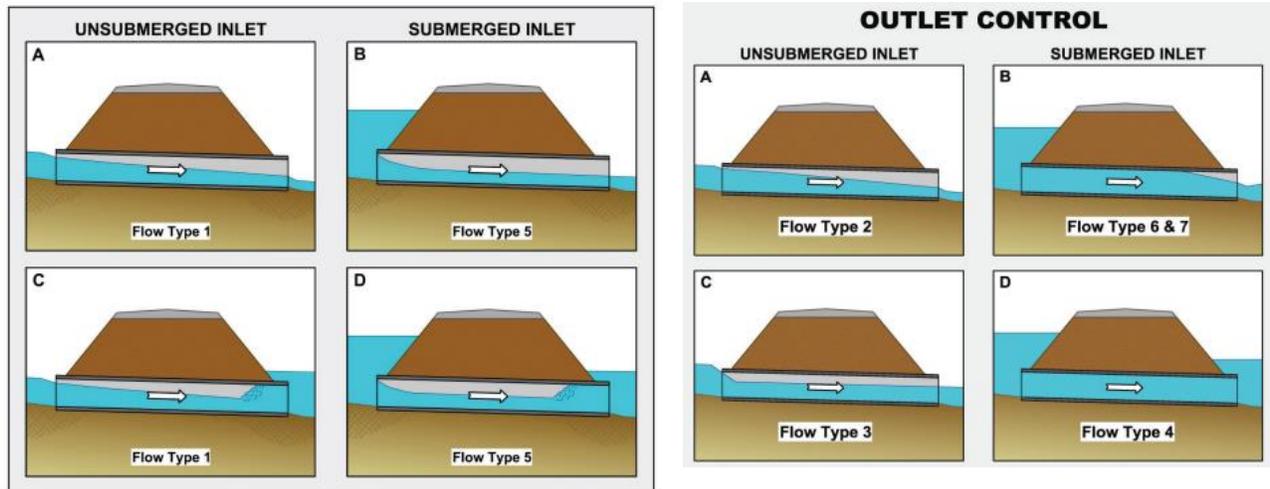


Nota. Tomado de HEC RAS Manual User por (US Army Corps of Engineers, 2021)

El flujo en las alcantarillas es analizado por el control de entrada y control de salida: Control de entrada, hace referencia a las condiciones de entrada que se rigen y se asume que la alcantarilla actúa como una compuerta y el control depende de la geometría de ingreso. Control de salida, son las condiciones que rigen el flujo a lo largo de la alcantarilla como la rugosidad, forma y área del tubo, longitud, pendiente y elevación del tubo. De

acuerdo con las condiciones de entrada y salida se presentan diferentes condiciones de flujo (Schall et al., 2012).

Figura 5 Flujo a través de alcantarilla según condiciones de flujo



Nota. En la imagen de la izquierda se visualiza el comportamiento del flujo según las condiciones de control de entrada y en la derecha según las condiciones de salida. Tomado de Hydraulic Design of Highway Culverts (Schall et al., 2012)

HEC RAS calcula la energía aguas arriba para determinar el flujo a través de la alcantarilla y definir el control que se provoca, para que el control sea de salida, la energía aguas arriba se determina ejecutando un balance de energía a partir de la sección aguas abajo considerando las pérdidas en la entrada, pérdidas de fricción dentro del tubo y en la salida. Para determinar un control a la entrada, el software realiza cálculos adicionales, si la respuesta persiste se trabaja bajo la hipótesis de que el flujo pasa a través de la profundidad crítica cerca de la entrada y se transforma en flujo supercrítico. Dentro de todo el análisis se define el perfil de la superficie de agua mediante el método directo, profundidad normal (profundidad normal a la cual el flujo uniforme ocurriría en un canal abierto), profundidad

de flujo crítico (ocurre en un canal donde el flujo presenta un mínimo de energía y flujo de compuerta, todo esto con el fin de definir el comportamiento hidráulico de la alcantarilla.

Capítulo 3 Cartagena, caso de estudio de canales urbanos

Colombia cuenta con bastantes recursos hídricos que a lo largo de los años se han visto afectados por la intervención humana. Alrededor de los cauces se desarrollan diferentes actividades como la agricultura, la extracción de recursos, asentamientos humanos, entre otras actividades, lo que ha desarrollado diferentes obras civiles y daño del recurso. El caso de estudio se sitúa en la ciudad de Cartagena, ciudad portuaria de la costa caribe en Colombia, con una población aproximada de 1.003.685 habitantes (Departamento Administrativo Nacional de Estadística, n.d.) ha presentado en diferentes ocasiones, ante los efectos climáticos, problemáticas de inundaciones y desbordamientos de los arroyos y canales que se encuentran en la ciudad (Botero Pareja et al., 2008).

Las autoridades ambientales del país deben promover, proteger y garantizar que los recursos naturales se conserven mediante un uso sostenible, lo que conlleva a limitar el caso de estudio sobre la ronda hídrica de Matute que comprende los canales urbanos de Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo los cuales alimentan el cauce principal que llega a desembocar en la Ciénaga de la Virgen ubicados en la localidad 1 y 3 de la ciudad de Cartagena, departamento de Bolívar, canales que a lo largo de su trayecto presentan estructuras hidráulicas como box culvert y puentes que cumplen su función de paso peatonal y/o vehicular, pero muchas ocasiones su funcionamiento se ve afectado ante la pérdida de su capacidad hidráulica (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Ubicación geográfica de los canales urbanos de estudio

El corredor de estudio se desarrolla sobre siete canales urbanos que actualmente transportan agua lluvia presentado vertimientos de agua residual y residuos sólidos que se presentan sobre los canales por la falta de cultura ciudadana y/o la mala gestión de recolección de basuras del sector. Los canales de estudio se encuentran ubicados entre la Localidad histórica y del Caribe Norte y Localidad Industrial y de la Bahía de Cartagena. La extensión total de los canales es de 10.34 km de acuerdo con el estudio previo desarrollado para el proceso de Concurso de méritos Abierto No 002 – 2019 (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019). En la Figura 6 se visualiza la ubicación de los canales y en la Tabla 1 se describe la dirección y la distancia para cada canal.

Tabla 1 Características canales urbanos Cartagena.

	DESCRIPCIÓN	DIRECCIÓN	DISTANCIA (KM)
1	Matute	Desde la vía variante Mamonal – Bayunca	6
2	Simón Bolívar	Desde el barrio la ciudadela 2000 hasta la avenida pedro de Heredia o Calle 31	1.64
3	La Princesa	Desde avenida pedro de Heredia o Calle 31 hasta el canal Matute	0.44
4	Isla Belén	Desde el canal calicanto viejo hasta el canal el canal Matute	0.45
5	Calicanto viejo	Desde el canal Nuevo Paraíso hasta el canal Belén	0.99
6	Nuevo Paraíso	Desde la Av. Pedro Romero hasta el canal calicanto viejo	0.27

	DESCRIPCIÓN	DIRECCIÓN	DISTANCIA (KM)
7	Lacayo	Desde su inicio en el barrio Nuevo paraíso hasta el canal calicanto viejo	0.55
		TOTAL	10.34

Nota. Tomado de Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, ubicados en la jurisdicción del Establecimiento Público Ambiental de la ciudad de Cartagena (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Figura 6 Canales urbanos Matute y tributarios, Cartagena.



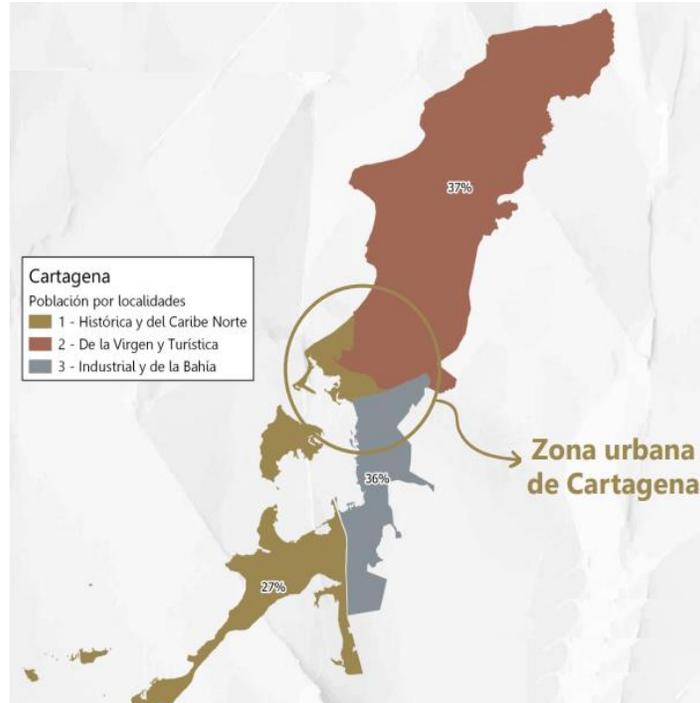
Nota. Tomado de Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo

Paraíso y Lacayo, ubicados en la jurisdicción del Establecimiento Público Ambiental de la ciudad de Cartagena (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Contexto social entorno a los canales urbanos, caso de estudio.

Cartagena se organiza en tres localidades y a su vez cada una en unidades comuneras. En la Figura 7 se observa la ciudad de Cartagena de la que se diferencia: La localidad con mayor asentamiento poblacional, la localidad 2 De la Virgen y Turística con una concentración del 37% de la población, a la que le sigue Localidad 3 Industrial y de la Bahía el 36% y la localidad 1 Histórica y del Caribe Norte el 27% (Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias, 2020).

Figura 7 Localidades Cartagena, Bolívar.



Nota. Tomado de Plan de desarrollo Cartagena 2020/2023 (Alcaldía Mayor de Cartagena de Indias, 2020)

El Canal Matute antes de desembocar en la Ciénaga de la Virgen interactúa con una población de 122075 habitantes aproximada la cual se distribuye en 20 barrios de zonas residenciales que se encuentran entre la localidad uno y tres (ver Tabla 2).

Tabla 2 Barrios que interactúan con los canales de estudio.

BARRIO	LOCALIDAD	ESTRATO	PERSONAS	VIVIENDAS
Fredonia	1	1	6532	1240
Olaya Sector Playa Blanca	1	1	4871	864
Olaya Sector zarabanda	1	1	876	178
Olaya Sector La Magdalena	1	1	3686	648
Nuevo Paraíso	1	1	10695	2023
San José Obrero	1	2	2156	318
Nuevo Porvenir	1	1	2027	289
Las Palmeras	1	2	7054	1291
Viejo Porvenir	1	2	6267	1287
El Gallo	1	2	1178	215
Anita	3	3	1092	215
Providencia	3	3	1344	286
Villa Rosita	3	2	2576	499
El Recreo	3	4	3926	761
Tenera	3	2	9097	1889
San José de los Campanos	3	2	20492	4068
Urbanización Simón Bolívar	3	2	3416	667
Ciudadela 11 de noviembre	3	2	1346	256

BARRIO	LOCALIDAD	ESTRATO	PERSONAS	VIVIENDAS
Ciudadela 2000	3	1	3408	735
San Fernando	3	2	30036	5307
TOTAL			122075	23036

Nota. Tomado de Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, ubicados en la jurisdicción del Establecimiento Público Ambiental de la ciudad de Cartagena (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Los barrios que se relacionaron anteriormente cuentan con una cobertura del 100% en lo que respecta a acueducto y alcantarillado provisto por la empresa Aguas de Cartagena E.S.P. S.A. El Servicio de energía es proporcionado por la empresa Electricaribe E.S.P. S.A. con una cobertura del 100%. El servicio de gas es prestado por la empresa SURTIGAS E.S.P. S.A con una cobertura del 100%. Si bien, los barrios vinculados con el Canal Matute registran una cobertura del 100% en la recolección residuos sólidos por parte de las empresas Promotora Ambiental del Caribe-PACARIBE y Veolia, se presentan vertimiento inadecuados de residuos sólidos. Así mismo se presentan vertimientos de agua servidas como resultados de actividades de los hogares que se ubican a lo largo del corredor de estudio (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019). Es de suma importancia promover programas de educación ambiental y cultura ciudadana acompañados de actividades culturales ambientales con la participación de las instituciones educativas de los barrios que interactúan con el Canal Matute y sus tributarios.

Características ecosistémicas (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019)

Como resultado de la consultoría realizada en el año 2019 donde se evaluó y limitó la ronda hídrica para los 7 canales de estudio, se obtuvo un análisis ecosistémico, componente fundamental para el funcionamiento de este. Esta caracterización se orientó en identificar la fauna y flora que interactúa, vive o se relacionan con los canales. La Tabla 3 muestra un compilado de los resultados obtenidos para la caracterización forestal. Esta se determinó mediante la división sobre el cauce del Arroyo Matute, los dos canales afluentes más importantes, Simón Bolívar y Fredonia, y todo el cauce principal en cuatro tramos conformando cuatro transectos de inventario

Tabla 3 Caracterización forestal sobre caño Matute y tributarios

SECCIÓN	DESCRIPCIÓN DE COBERTURA ARBOREA	ALTURA Y DPA PROMEDIO DE LOS INDIVIDUOS ARBÓREOS
Canal Simón Bolívar	Características de arbolado aislado de influencia antrópica Predominio de especies Roble, Mango y Almendro Cobertura de 35 familias en las que se agrupan 3 especies y 246 individuos	Altura media de 6.95m DAP medio de 0.25m
Canal Fredonia	Características de arbolado aislado de influencia antrópica Predominio de especies Roble y Almendro Cobertura de 22 familias en las que se agrupan 43 especies y 246 individuos	Altura media de 7.14m DAP medio de 0.25m
Transecto Bajo Miranda	Características de bosque de galería muy fragmentado y orillero Predominio de especies Ancaraño, Hobo y Guácimo	Altura media de 10.92m DAP medio de 0.35m

SECCIÓN	DESCRIPCIÓN DE COBERTURA ARBOREA	ALTURA Y DPA PROMEDIO DE LOS INDIVIDUOS ARBÓREOS
	Cobertura de 47 especies y 277 individuos	
Transecto Quintas del Manantial	Predominio de especies Mango y Roble Cobertura de 40 especies y 22 familias.	Altura media de 9.27m DAP medio de 0.29m
Transecto San Buenaventura	Predominio de especies Mango y Roble Cobertura de 3 especies	Altura media de 9.24m DAP medio de 0.27m
Transecto Palmeritas Zarabanda	Predominio de familia Combretácea y Bombacácea Cobertura de 29 especies pertenecientes a 16 familias	Altura media de 6.95m DAP medio de 0.25m

Nota. DPA entiéndase como diámetro a la altura del pecho del individuo. Tomado de Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, ubicados en la jurisdicción del Establecimiento Público Ambiental de la ciudad de Cartagena (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Sobre los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, la caracterización de fauna dio como resultado la presencia de aves, de los que se registraron 952 individuos, los que corresponden a 145 especies, 43 familias y 19 órdenes; para los reptiles se identificaron 17 especies, 13 familias y tres órdenes (Sármata; Testudínea; Crocodilia); en anfibios se identificaron 184 individuos pertenecientes a la clase Amphibia, todos pertenecientes al Orden Anura (Ranas y sapos), distribuidos en 15 especies y cuatro familias (Leptodactylidae; Hylidae; Microhylidae; Bufonidae).

El informe del estudio realizado por la consultoría EPA (2021) , las construcciones han generado las desapariciones de flora y fauna como se evidencia del bosque de Galería, del cual en la actualidad solo se mantiene una franja en Arroyo Matute lo que hace necesario que se implementen acciones de conservación y recuperación de especies; de igual forma debe buscarse proceso de conectividad entre las coberturas que conforman la zona verde del distrito de Cartagena, lo que favorecerá la diversidad de fauna y flora conforme el daño generado por la invasión hacia la ronda hídrica principal causa de deforestación.

Capítulo 4 Evaluación de impactos ambientales

Teniendo en cuenta el Anexo 1 se realizó una evaluación de impactos ambientales en dos escenarios: Evaluación ambiental del estado actual de los canales urbanos y otro, evaluando las condiciones donde se realice una recuperación ambiental; esto como complemento a la Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso Y Lacayo, ubicados en la jurisdicción del establecimiento público ambiental de la ciudad de Cartagena (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Dentro del marco metodológico se utilizó la evaluación ambiental mediante dos matrices de Leopold trabajando con dos variables: Eje 'x' actividades operacionales y eje 'y' impactos ambientales. Se evaluó los componentes físicos, bióticos, socioeconómicos y culturales de la interacción con los diferentes ciclos que se comportan en los canales. Para las condiciones actuales se evaluó la operación y el mantenimiento; para una recuperación de los corredores se evaluó preliminares, ejecución y operación.

Las dos matrices de evaluación tuvieron en cuenta un total de 24 impactos que se pueden visualizar en la Tabla 4.

Tabla 4 Impactos de Evaluación Ambiental

COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO ESPECÍFICO
FÍSICO	SUELO	Alteración de la geomorfología del suelo
		Degradación química
		Disposición de basuras y/o vertimientos
	HÍDRICO	Desbordamiento de canales y arroyos que tributan a la Ronda Hidráulica de Matute
		Modificación en capacidad hidráulica de la Ronda Hídrica Matute
		Disponibilidad del recurso hídrico
		Contaminación del agua por vertimientos
		Modificación de la geomorfología fluvial
		Aporte de solidos suspendidos
		ATMOSFÉRICO
	Incremento en los niveles de ruido	
BIÓTICO	FLORA Y FAUNA	Afectación a la flora
		Afectación a la fauna
	PAISAJE	Cambio en el paisaje
SOCIO – ECONÓMI CO	COMUNIDAD Y ACTIVIDAD ECONÓMICA	Generación de empleo
		Asentamientos humanos al borde de la ronda hidráulica de Matute

COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO ESPECÍFICO
		Incomodidades con la comunidad
		Actividades lúdicas, recreativas, deportivas, contemplativas y de educación ambiental
		Restricciones de tránsito peatonal y vehicular
		Calidad de vida
		Accidentes
	SALUD Y SEGURIDAD HUMANA	Proliferación de vectores
		Modificación al patrimonio cultural
	CULTURA	Modificación al patrimonio cultural
	INSTITUCIONAL	Imagen corporativa

Nota. Fuente Evaluación de impactos ambientales corredor ronda hidráulica Matute (Sánchez Londoño & Torres Forero, 2022)

La evaluación de impactos ambientales sobre el estado actual del corredor donde se ubican los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, en la ciudad de Cartagena dan como resultado una calificación negativa alta a baja teniendo en cuenta los 24 impactos que se contemplaron para su análisis (ver Anexo 1). En la Figura 8 se definen los 6 impactos con mayor puntuación negativa evaluada para los corredores.

Figura 8 Impactos Ambientales con mayor impacto negativo de las condiciones actuales de Matute.

COMPONENTE	ELEMENTO	IMPACTO ESPECÍFICO	CICLO DE VIDA DEL PROYECTO	OBRA GENERADORA DEL IMPACTO	PARÁMETRO DE CALIFICACIÓN					CALIFICACIÓN PONDERADA DEL IMPACTO
FÍSICO	SUELO	Degradación química	MANTENIMIENTO	Recolección de basuras dentro del corredor	-	10	10	10	-30	-23
		Disposición de basuras y/o vertimientos	MANTENIMIENTO	Recolección de basuras dentro del corredor	-	10	10	10	-30	-30
	HÍDRICO	Disponibilidad del recurso hídrico	OPERACION	Características del agua (Retención de sólidos, pH, etc)	-	10	10	10	-30	-30
		Contaminación del agua por vertimientos	OPERACION	Características del agua (Retención de sólidos, pH, etc)	-	10	10	10	-30	-25
SOCIO-ECONÓMICO	SALUD Y SEGURIDAD HUMANA	Incomodidades con la comunidad	OPERACION	Condiciones hidráulica (Velocidad, esfuerzos, etc)	-	10	10	10	-30	-30
		Proliferación de vectores	OPERACION	Condiciones hidráulica (Velocidad, esfuerzos, etc)	-	5	5	5	-15	-22

Nota. Fuente Evaluación de impactos ambientales corredor ronda hidráulica Matute (Sánchez Londoño & Torres Forero, 2022)

De acuerdo con la metodología uno de los impactos negativos de mayor incidencia se encuentra los asentamientos humanos al borde de la ronda hidráulica de Matute, teniendo en cuenta que esta tiene una invasión del 74.35% (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019) y a su vez las actividades antrópicas generan efectos adversos sobre el cuerpo de agua, tales como disposición final de residuos sólidos y vertimiento de aguas residuales.

El mal mantenimiento y supervisión ha generado zonas con presencia de gran cantidad de barras o crecimiento de sus laterales, estas deben ser monitoreadas para evitar que lleguen movimientos laterales, teniendo en cuenta la concentración de residuos. Todo esto modifica las condiciones de operación hidráulica de los canales.

La incomodidad de la comunidad y la influencia humana en estos canales han modificado su estado original y están siendo reclamados por líderes estratégicos que participan activamente en el proceso de mejorar su calidad de vida. A lo largo de los años, las características ambientales y los componentes de plantas y animales se han reducido. Falta de regulación sobre el aumento desmesurado de la urbanización en la región de la Faja Hidrográfica del Canal Matute, las malas prácticas de tratamiento de residuos sólidos y líquidos, y la importancia de la conservación del canal para mejorar la calidad de vida y los ecosistemas han sido el resultado de inundaciones en periodos de lluvia que han ocasionado evacuaciones inmediatas como la más reciente del año 2010 (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Las enfermedades transmitidas por vectores son un conjunto de patologías en las cuales virus, parásitos y bacterias se transmiten a través de la picadura de mosquitos, flebótomos, triatomos, garrapatas, ácaros, caracoles y piojos (Organización Panamericana de la salud (OPS), n.d.), teniendo en cuenta los focos de basura y mala calidad del agua que se presenta constantemente a lo largo de los canales y las condiciones climáticas de la región hacen que sea más probable repercutir en problemas de salud pública dada la cercanía de mucho de los barrios con los canales.

La afectación en la flora y la fauna es evidente por la poca o falta de protección sobre este ámbito; esto se evidencia en la desaparición del bosque de galería del Arroyo Matute manteniendo solo en la franja de Bajo Miranda un arbolado con especies relictas del bosque anterior entre las que sobresalen el Caracol, el Amargo, entre otros. Esto no solo afecta la flora y la fauna sino que impacta directamente en el paisajismo.

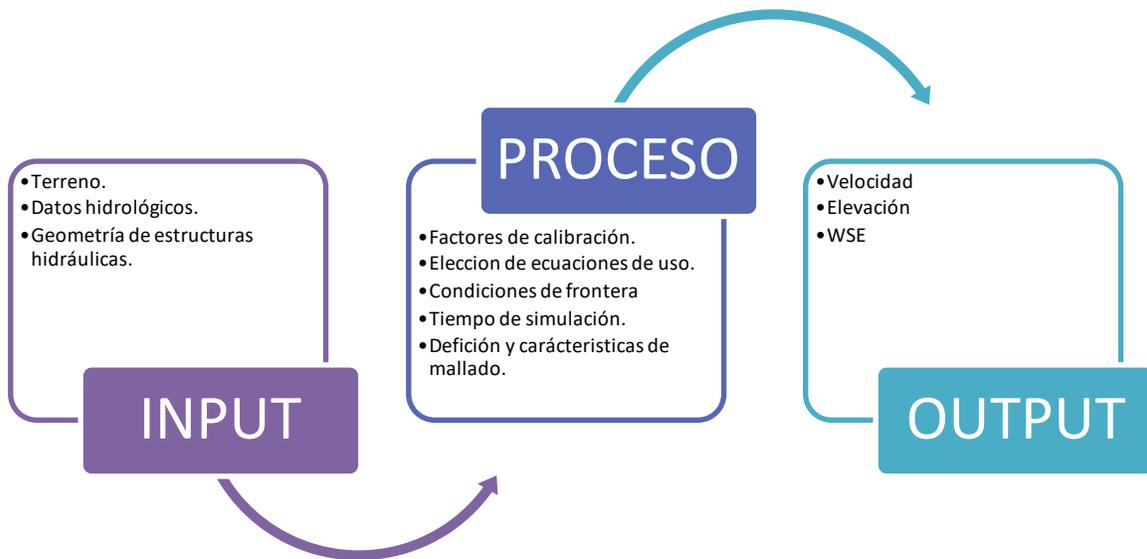
Teniendo en cuenta todos los impactos negativos que se evidencian actualmente en los canales de estudio, se propone implementar un proceso de conectividad entre las coberturas que conforman la zona verde del distrito de Cartagena, lo que favorecerá la diversidad de fauna debido a que encontrará mejores condiciones para actividades comportamentales típicas. Para el cumplimiento de esta meta se recomienda la realización de un programa de restauración ecológica que incluya un componente social y ambiental; se realizó una evaluación de impactos ambientales evidenciando componentes positivos para la población, la fauna y la flora que se relacionan, teniendo en cuenta que la implementación de estructuras de protección ambiental acompañados de espacios como parques o ciclorrutas para el uso del ser humano hace una sinergia en sus interactuantes.

La falta de cultura ambiental debe dejar una de las problemáticas sociales más representativas, la implementación de cualquier infraestructura se verá afectada si la población sigue realizando depósitos de basura o vertimientos residuales directos.

Capítulo 5 Desarrollo del modelo bidimensional HEC RAS

La entidad del Establecimiento Público Ambiental (EPA) desarrolló para el año 2021 una consultoría con varios enfoques de análisis, dentro de ellos se evaluaron el aspecto hidrológicos e hidráulicos de los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, ubicados en la ciudad de Cartagena. El análisis hidráulico empleó el modelo numérico HEC RAS modelando unidimensionalmente a flujo permanente los canales mencionados, sin embargo, no tuvieron en cuenta el comportamiento de puentes y box culvert, es por lo que, en búsqueda de dar cumplimiento a los objetivos de estudio, se realiza dentro de la metodología un modelo bidimensional que necesita de datos input y definición de condiciones de proceso para generar un output o resultado dentro de HEC RAS 6.3.1 en desarrollo bidimensional.

Figura 9 Diagrama de modelo matemático



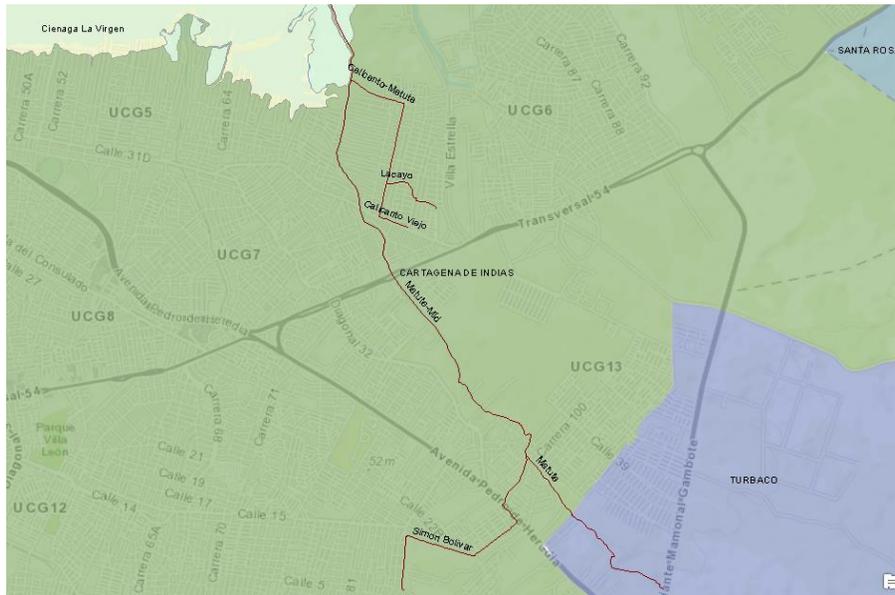
Nota. Fuente el autor.

Terreno

Para el inicio de la modelación 2D se requiere de un modelo digital de terreno (MDT) sobre el cual se creará una malla compuesta y permitirá el cálculo de los parámetros geométricos e hidráulicos. El insumo MDT para el estudio de este documento es tomado de la consultoría realizada por la EPA el cual tuvo en cuenta los datos de levantamientos topográficos y batimétricos tomados en campo.

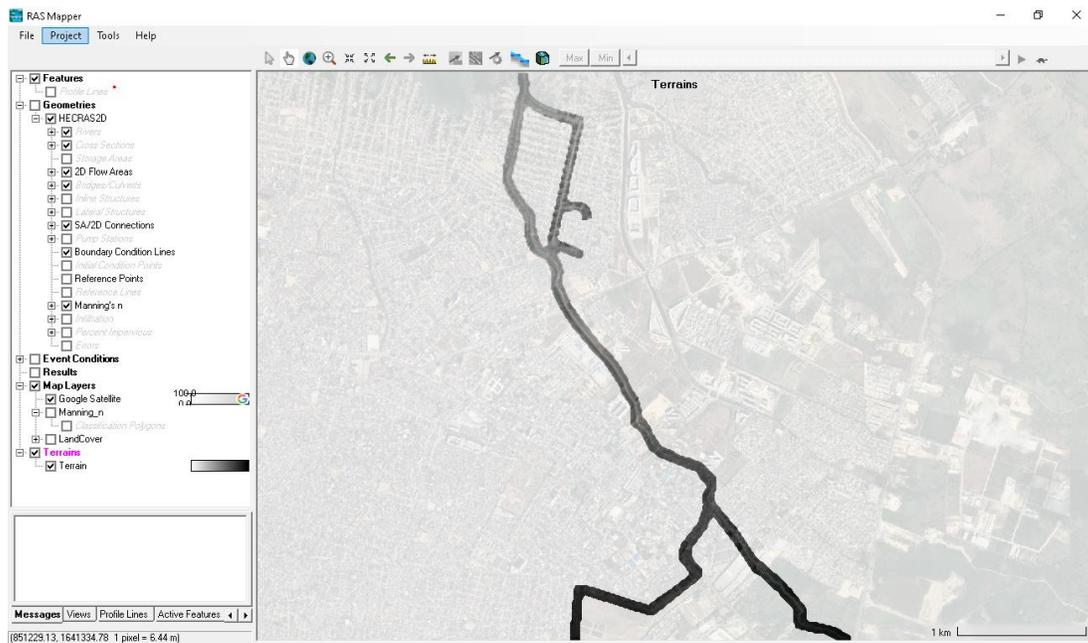
Los canales de estudio se encuentran entre los municipios de Cartagena y Turbaco como se visualiza en la Figura 10. El MDT de insumo es geoposicionado en el componente Ras Mapper del software HEC RAS sobre el cual se implantarán posteriormente la geometría de los puentes y box (ver Figura 11).

Figura 10 Canales de estudio Cartagena y Turbaco.



Nota. Fuente el autor.

Figura 11 MDT canales de estudio en Ras Mapper.



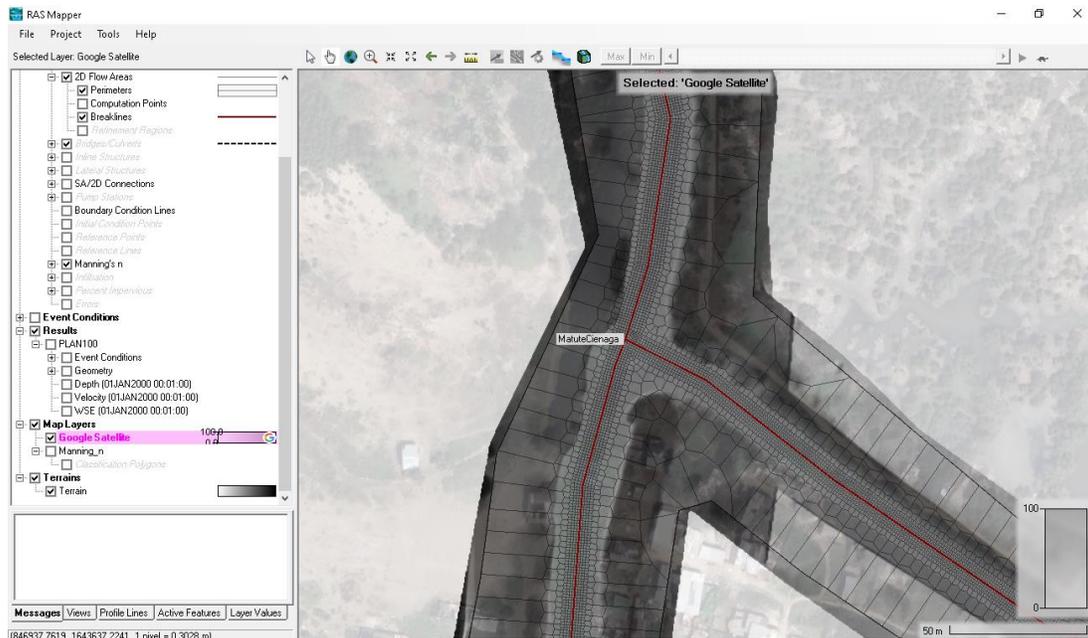
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Dentro de los canales de estudios se encuentran naturales y antrópicos, lo que condiciona sus características hidráulicas. El canal principal Matute viene desde agua arriba del municipio de Turbaco recolectando aguas lluvia y en zonas urbanas, en puntos específicos aguas residuales; este canal natural es el más ancho y con estructuras hidráulicas (Puentes) de mayor dimensión.

Área de drenaje 2D

La modelación 2D requiere del límite de la zona de estudio dentro de la cual se definirá el mallado; en Ras Mapper es dibujado manualmente delimitando dentro del MDT los canales de estudio (ver Figura 12).

Figura 12 Mallado con ajuste al eje del cauce.



Nota. Se visualiza la conexión de dos canales que desembocan hacia la ciénaga La Virgen. El mallado se acentúa hacia el centro del eje de los cauces teniendo en cuenta el ancho del canal. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Una vez definido el perímetro, se crea una malla computacional a partir del área de drenaje; la geometría y distribución de la malla es definida a partir del ancho y el eje de cada canal (ver Figura 13). Para este caso de estudio se generan 94196 celdas con un área máxima de 664.89 m².

Figura 13 Características geométricas de malla sobre cada cauce de estudio.

The screenshot shows a software window titled "Breaklines - Layer Properties (HECRAS2D)". It has three tabs: "Visualization and Information", "Features", and "Source Files". The "Source Files" tab is active, showing a source path: "C:\CANAL\2D\HECRAS\HECRAS.g01.hdf". Below the source path is a table with the following data:

FID	Name	Near Spacing	Near Repeats	Far Spacing	Enforce 1 Cell Protection Radius
0	Matute	1	3	10	<input checked="" type="checkbox"/>
1	CalicantoViejo	1	2	10	<input checked="" type="checkbox"/>
2	Lacayo	1	2	15	<input checked="" type="checkbox"/>
3	CalicantoMatute	1	3	10	<input checked="" type="checkbox"/>
4	SimonBolivar	1	3	10	<input checked="" type="checkbox"/>
5	MatuteMid	1	3	10	<input checked="" type="checkbox"/>
6	MatuteCienaga	1	4	15	<input checked="" type="checkbox"/>

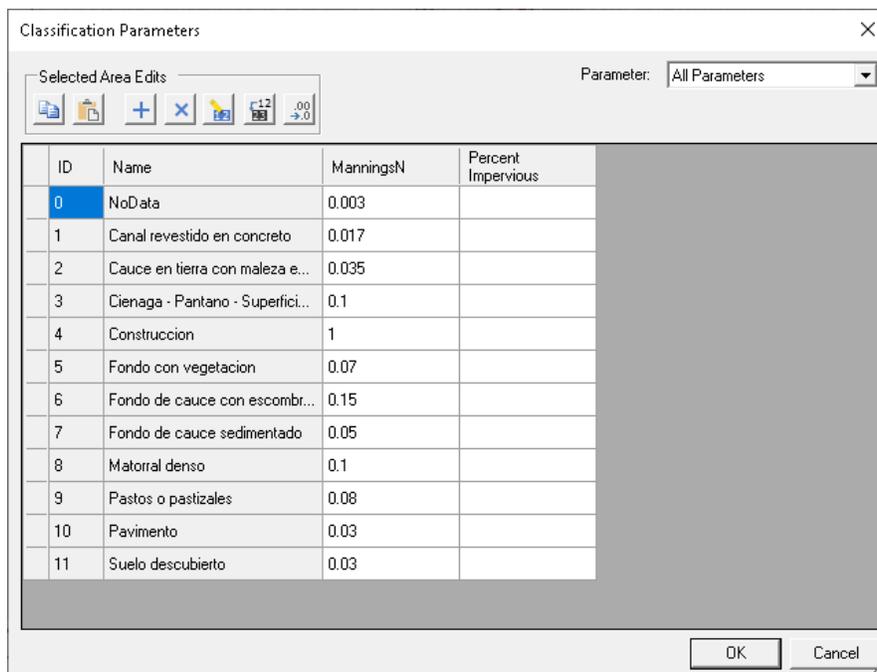
At the bottom of the window, there are several controls: "Zoom to Selected", a checkbox for "Only Show Selected", and buttons for "Add Column", "Delete Column", and "Import Features".

Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Coefficiente de rugosidad de Manning asociado

La clasificación del modelo de terreno en diferentes zonas de uso y su asociación respectiva a coeficientes de rugosidad se realizó a partir de una ortofoto que permitió asignar valores a cada celda, permitiendo así aplicar masivamente los valores requeridos y utilizados en la etapa de evaluación de los canales de estudio; como resultado se asignan 11 coeficientes de Manning incluyendo las celdas sin datos a la cual se le da un valor de 0.003.

Figura 14 Coeficientes de Manning definidos en las celdas de ortofoto.



ID	Name	ManningsN	Percent Impervious
0	NoData	0.003	
1	Canal revestido en concreto	0.017	
2	Cauce en tierra con maleza e...	0.035	
3	Ciénaga - Pantano - Superfici...	0.1	
4	Construcción	1	
5	Fondo con vegetación	0.07	
6	Fondo de cauce con escombr...	0.15	
7	Fondo de cauce sedimentado	0.05	
8	Matorral denso	0.1	
9	Pastos o pastizales	0.08	
10	Pavimento	0.03	
11	Suelo descubierto	0.03	

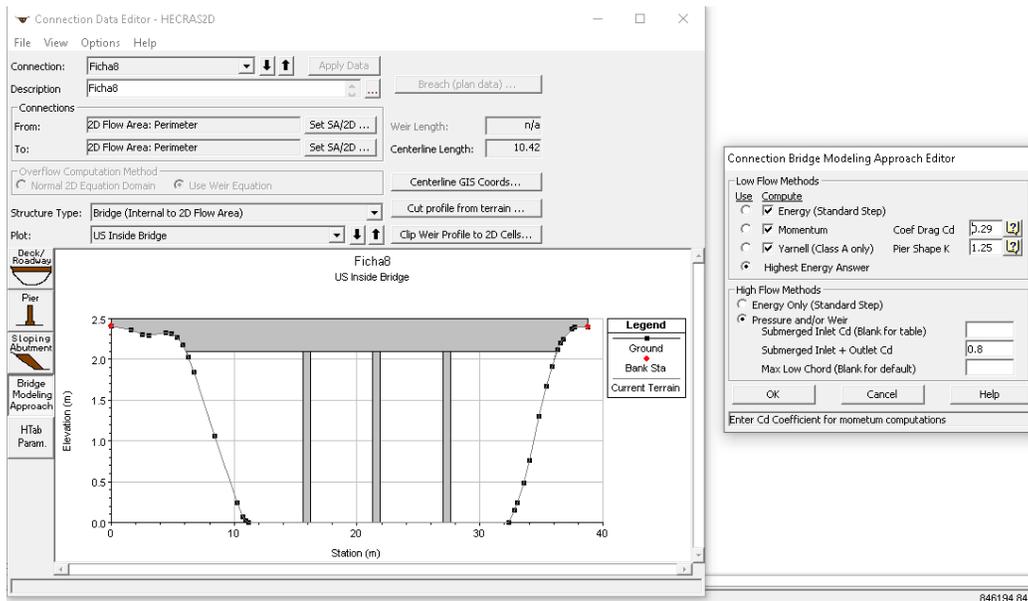
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Geometría de puentes y box

Dentro de los canales se cuenta con un total de 36 estructuras de estudio entre puentes y box culvert; la geometría que se le asignó a cada estructura fue un insumo tomado de la consultoría realizada por la EPA (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019). Para datos generales de cada estructura tipo puente se asumió:

1. Coeficiente de Manning interno y extremo de 0.013 ya que todas las estructuras tipo puente son de concreto con acabado en llana de madera.
2. Coeficiente de vertedero 1.4 teniendo en cuenta que en condiciones de flujo libre el coeficiente de descarga C , oscila entre 1,38 - 1,71 para el sistema métrico para los vertederos de cresta ancha, dependiendo principalmente de la altura bruta en la cresta (US Army Corps of Engineers, 2021).
3. Máxima sumergencia 0.98
4. Las ecuaciones de uso en situación donde la lámina de agua es menor que el tablero del puente se define la Ecuación de Energía. Cuando el puente cuenta con pilas se usan las ecuaciones: Energía, Momento con un C_d de 0.29 (Elíptica pila con 8:1 longitud y ancho) y Yarnell con un K de 1.25 (nariz y alto cuadrado). Caso contrario, cuando la lámina de agua supera la altura del tablero y la estructura funciona como vertedero se define el método de presión y/o vertedero (US Army Corps of Engineers, 2021).

Figura 15 Ejemplo geométrico y método de evaluación para puentes.



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Dentro de los datos de la consultoría de la EPA (2021) por cada una de las estructuras se describe fuera de la geometría el estado de la estructura, que en muchos casos en las pilas se generaba depósito de material de escombros o maleza que el modelo permite involucrar como bloques que modifican el paso del flujo.

Figura 16 Detalle de pila con bloques asemejando escombros o maleza.

Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

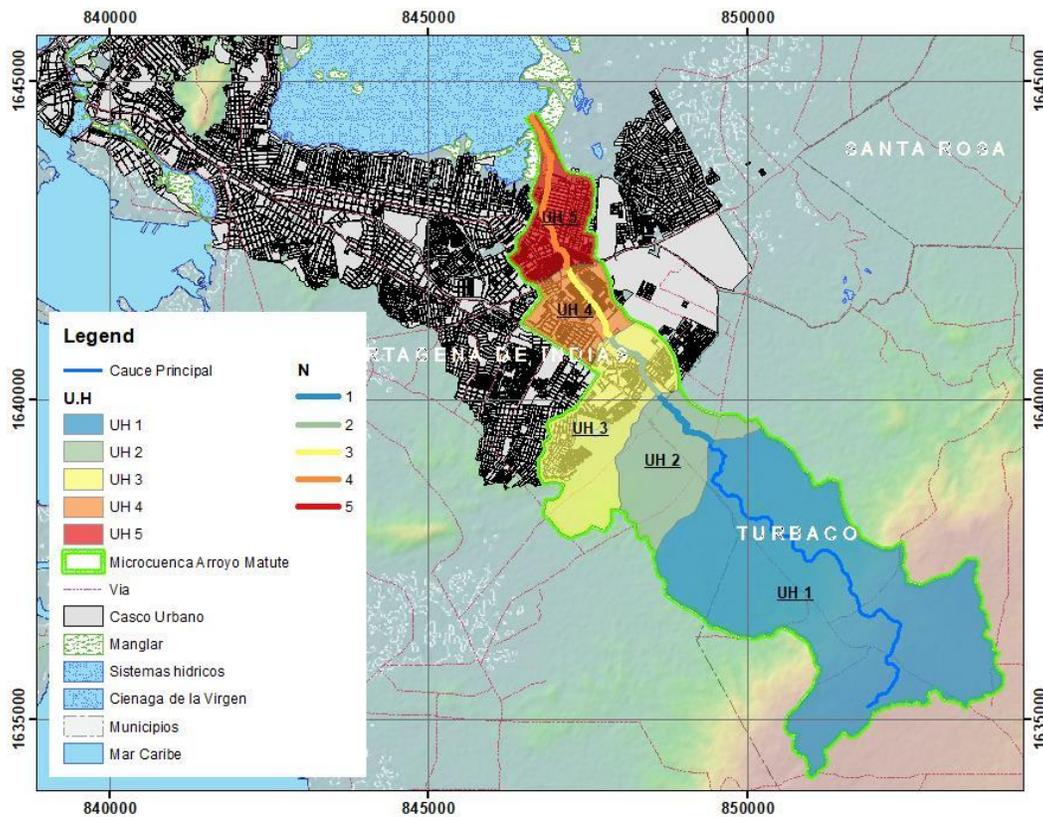
Teniendo en cuenta la cantidad de estructuras de análisis, la condición de box culvert no es estable para el modelo matemático; cuando se simula más de una estructura configurada como box se dispara el error de análisis, es por lo que los boxes se simularon como puentes y su geometría se definió bajo este comportamiento.

Datos y condiciones de contorno para flujo no permanente

Teniendo en cuenta los datos hidrológicos suministrados por la consultoría de la EPA, este realizó un análisis de lo macro a lo micro del área de estudio: Primero sobre la subdivisión de la microcuenca Arroyo Matute Chanpundun como se visualiza en la Figura 17 de la cual se evaluaron diferentes características como el sistema de drenaje, sinuosidad del cauce, densidad del drenaje, longitud y pendiente del cauce principal, entre otros datos que permitieron obtener los hidrogramas de flujo partiendo de datos de la estación climatológica Apto Rafael Núñez (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019); segundo la evaluación de los canales tributario de Matute se realiza mediante el método

racional teniendo en cuenta que estas unidades son pequeñas comparadas con el área de la cuenca general del Arroyo Matute-Chanpundun, por lo que se considera apropiada la aplicación de modelos directos que faciliten la estimación de caudales máximos.

Figura 17 Subdivisión de la microcuenca del Arroyo Matute-Chanpundun



Nota. Tomado de Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, ubicados en la jurisdicción del Establecimiento Público Ambiental de la ciudad de Cartagena (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Figura 18 Canales tributarios Matute



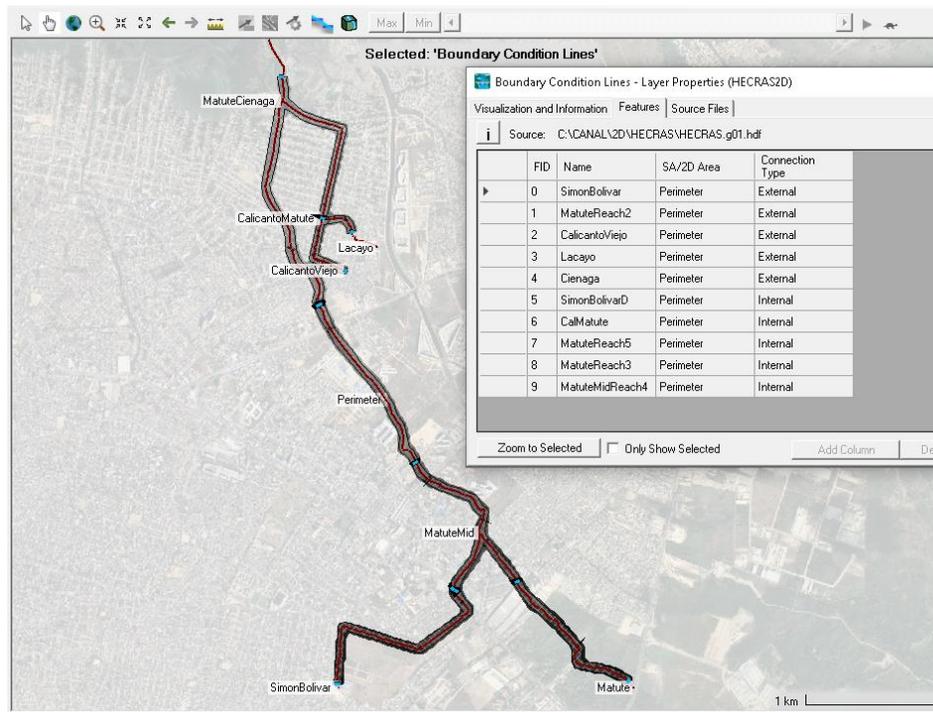
Nota. Tomado de Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos Matute, Simón Bolívar, La Princesa, Isla Belén, Calicanto Viejo, Nuevo Paraíso y Lacayo, ubicados en la jurisdicción del Establecimiento Público Ambiental de la ciudad de Cartagena (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

A partir de esto se definen múltiples condiciones de contorno, externas e internas, que permiten involucrar hidrogramas de entrada (ver Figura 19). Para modelos 2D, HEC RAS especifica condiciones de flujo no permanente para incluir los datos de las condiciones de contorno, teniendo en cuenta que se tienen datos de hidrograma y caudales máximos, estos datos se involucran de la siguiente manera (ver anexo 2):

1. Para condiciones etiquetadas como MatuteReach2, MatuteReach3, MatuteMidReach4 y MatuteReach5 se asocian hidrogramas con un caudal y tiempo establecido.

2. Para condiciones etiquetadas como Simón Bolívar, Simón Bolívar D, Lacayo, Calicanto viejo y Calicanto Matute se involucró un caudal máximo como resultado del método racional para el mismo tiempo de los hidrogramas del numeral anterior.
3. Los canales de estudio desembocan en la Ciénaga la Virgen, por lo que este dato de nivel de agua es analizado por los niveles de marea el cual se encuentra en el orden de 0.9 m.s.n.m. (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019).

Figura 19 Condiciones de contorno interno y externo Matute.



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Capítulo 6 Análisis de resultados

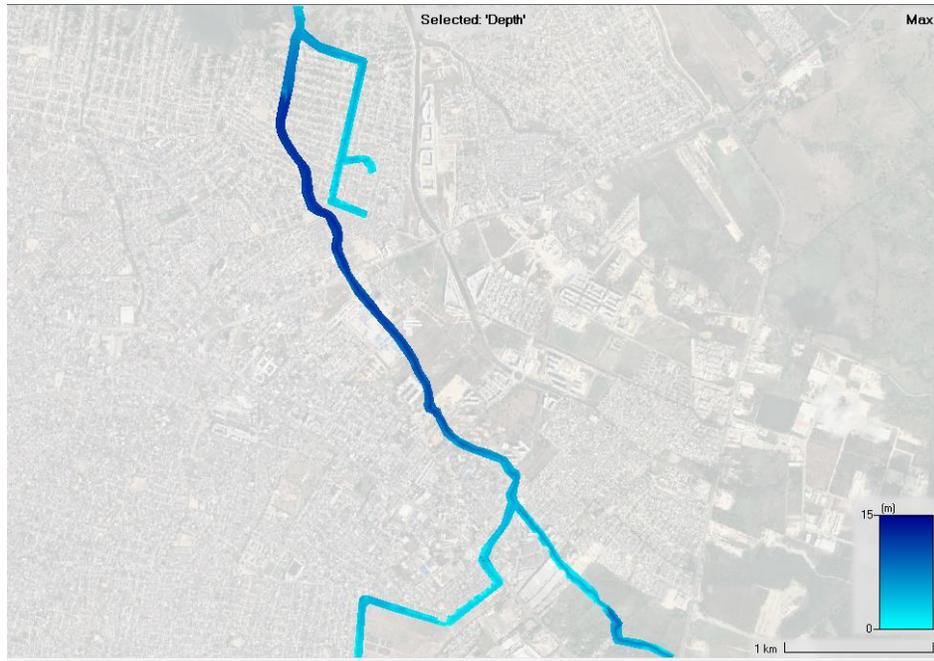
Una vez se ha procesado la simulación para los canales de estudio con la geometría y características de las estructuras hidráulicas es posible analizar la profundidad, elevación de la superficie del agua y la velocidad. Siguiendo los lineamientos para la acotación de rondas hídricas (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019) se evalúan condiciones para un periodo de retorno T_r de 2.33 y 100 años para analizar el comportamiento de las estructuras.

El análisis en el software Hec Ras se realizó desde diferentes comparaciones; en primera instancia sin ningún tipo de estructura hidráulica en los canales de estudio, esto con el fin de comparar y evaluar las implicaciones de las estructuras dentro de los corredores; segundo una comparación de estructuras desde el punto de vista de una estructura obstruida y una estructura con paso de flujo sin obstrucción.

Canales sin estructuras hidráulicas

Para la simulación hidráulica se utilizaron para los periodos de retorno T_r de 2.33, y 100 años los datos de la cota máxima de marea establecida para la Ciénaga de la Virgen siendo así condición de frontera aguas abajo de 0.18 m.s.n.m. y 0.9 m.s.n.m. para los periodos respectivos. Partiendo de esto es posible observar (ver Figura 28) que para datos picos de caudal se presentan desbordamientos acentuados en las zonas de aguas abajo, canales que poseen las pendientes más bajas, por lo tanto, se facilitan los aumentos de tirante; este comportamiento es igual para los dos periodos de retorno de análisis y realmente los niveles de inundación entre los dos periodos para las zonas aguas abajo no varían mucho para caudales máximos.

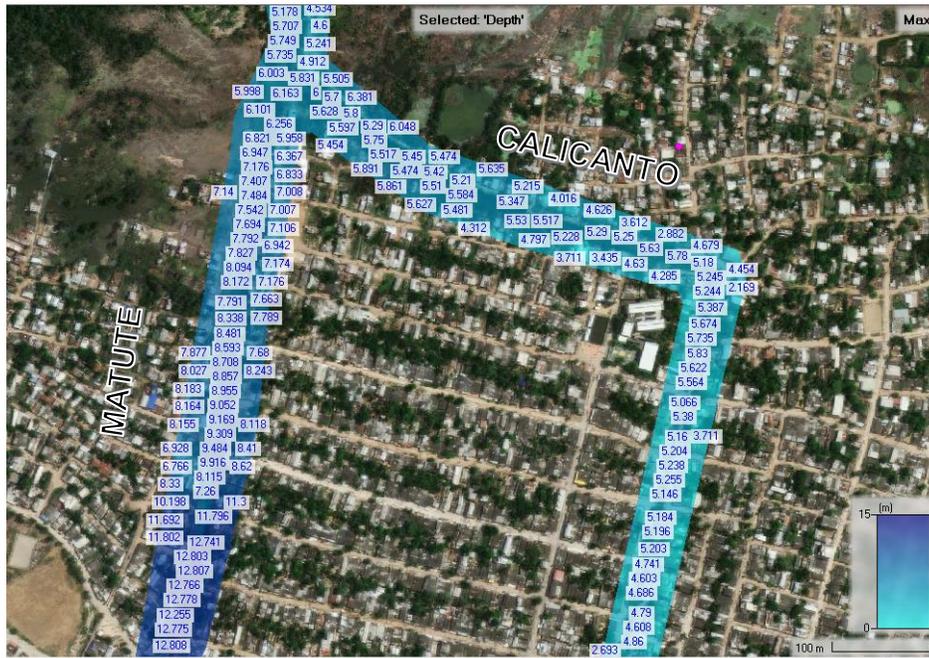
Figura 20 Profundidad de lámina de agua en los canales de análisis



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

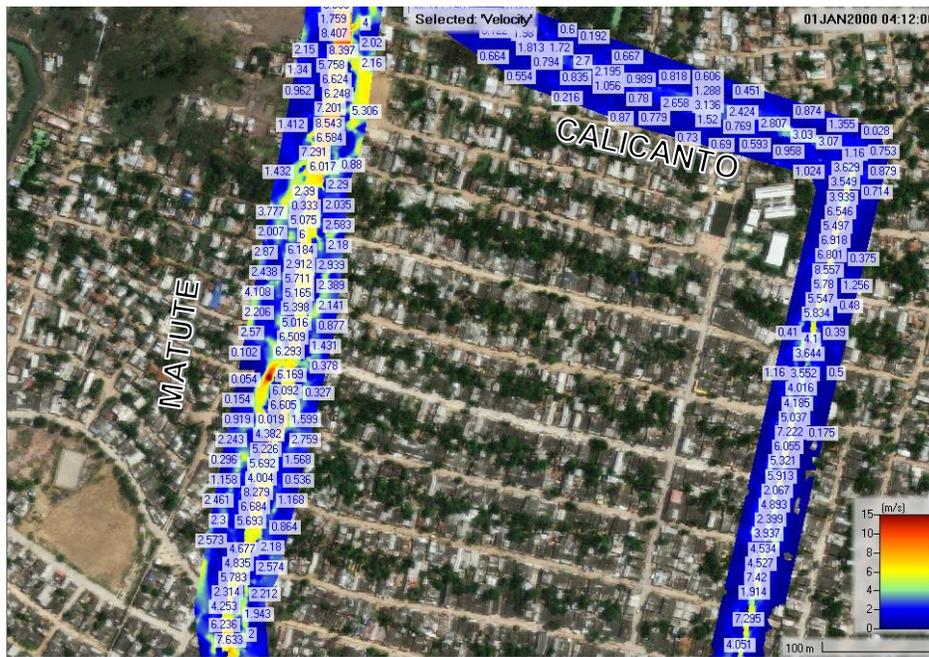
En la Figura 21 y se puede visualizar la zona con mayor desbordamiento y así mismo mayores alturas en la lámina de agua; desafortunadamente esta zona presenta bastante población que a lo largo de los años han invadido las zonas inundables para eventos micro y macro climáticos. La altura de la lámina de agua puede llegar hasta alturas de 5 metros para el canal Calicanto y de hasta 12 metros en el canal principal matute. Debe de tenerse en cuenta que el canal principal corresponde a un canal natural y esto permite que por sus características se presenten mayores caudales, velocidades y mayores tirantes (ver Figura 22).

Figura 21 Zona aguas abajo con mayores valores de lamina de agua Tr 2.33 años



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

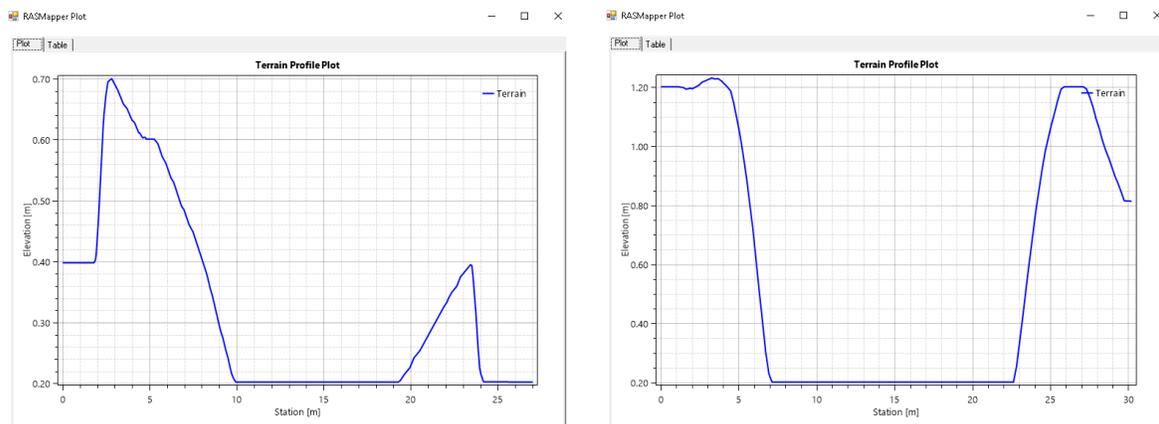
Figura 22 Zona aguas abajo con mayores valores de lámina de agua Tr 2.33 años



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Matute, de acuerdo con la simulación para un periodo de retorno de 2.33 años, aguas abajo puede llegar a presentar velocidades de hasta 6 m/s, sin embargo, el canal Calicanto puede llegar a tener las mismas velocidad o mayores pero sus características geométricas no están diseñadas para estas situaciones teniendo en cuenta que es un canal artificial trapezoidal de menores dimensiones.

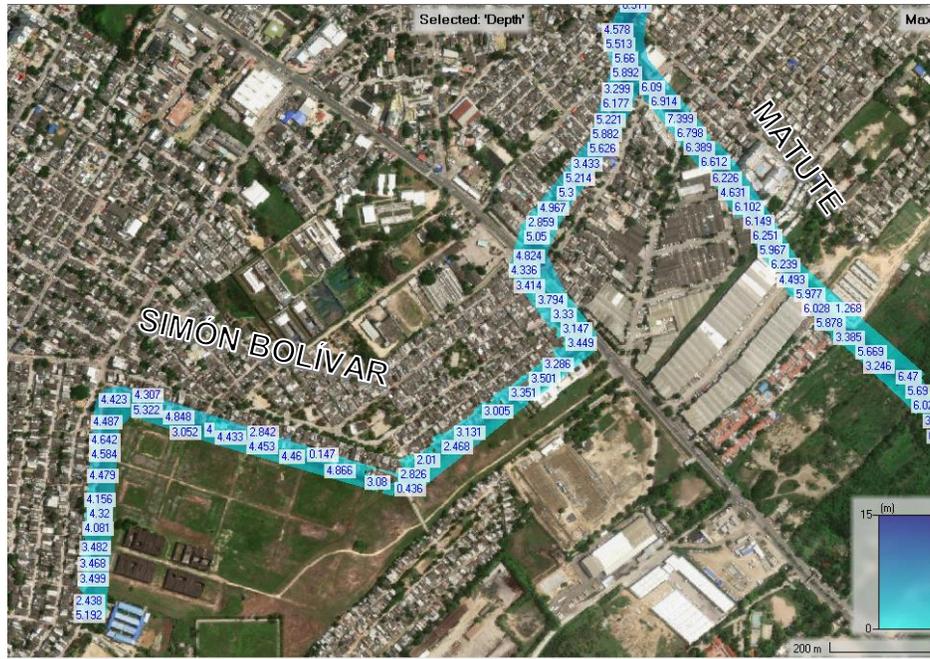
Figura 23 Geometría de canales aguas abajo



Nota. Imagen de la izquierda canal Calicanto. Imagen de la derecha canal principal Matute. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

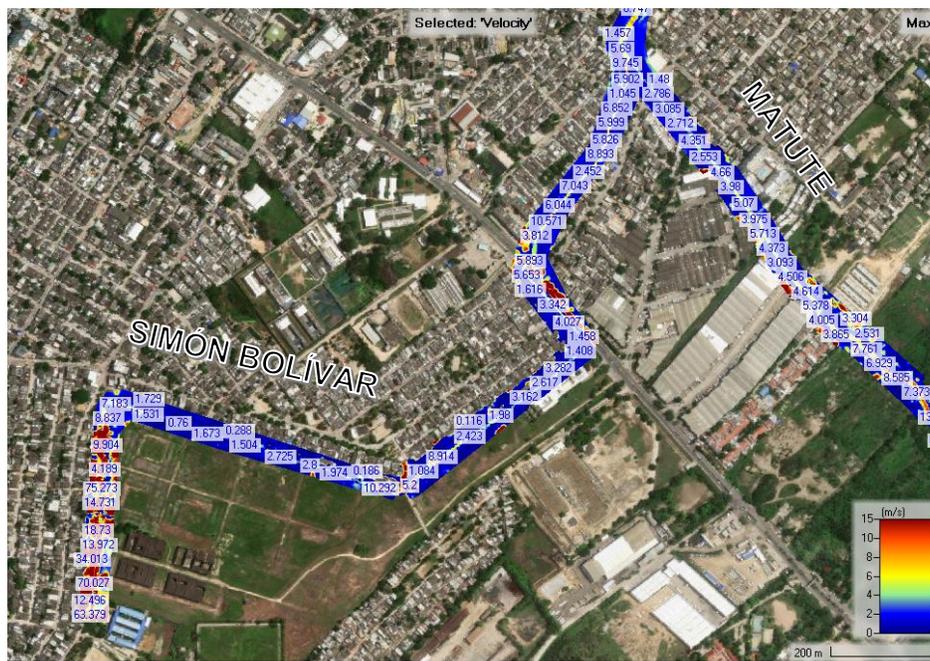
Otra zona de gran preocupación es la ubicada hacia el canal Simón Bolívar que desemboca en el canal principal Matute. Este canal está presentando alturas de lámina de agua de hasta 5 m para un Tr de 2.33 años y 100 años, velocidades de hasta 5 m/s en la desembocadura hacia Matute y de 3 m/s a 4 m/s en el canal Simón Bolívar.

Figura 24 Lámina de agua en canal Simón Bolívar Tr 2.33 años



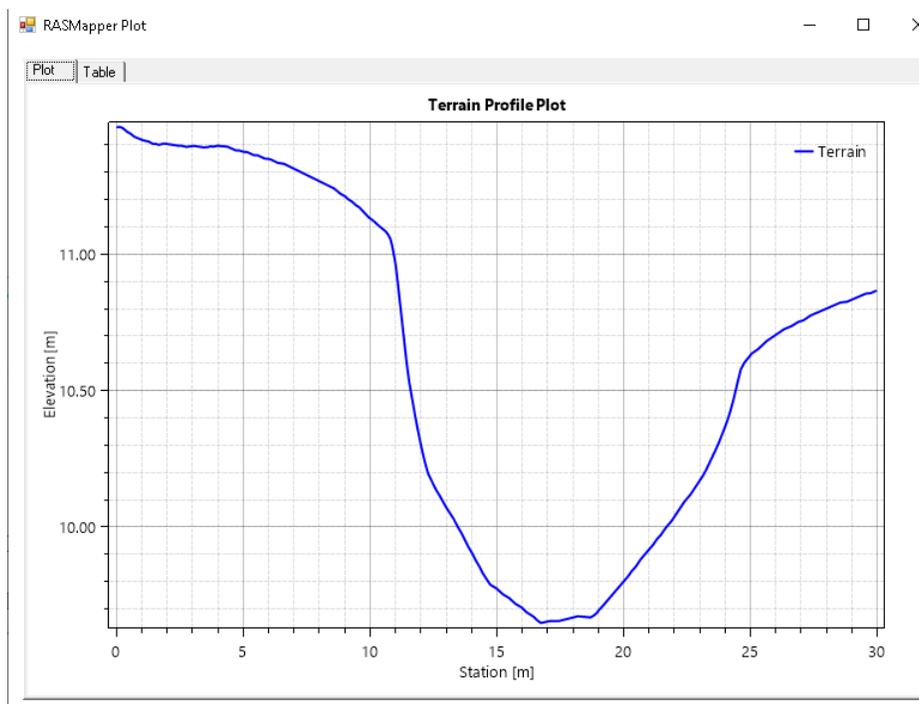
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 25 Velocidad de agua en canal Simón Bolívar Tr 2.33 años



Este canal dentro de lo datos históricos (Establecimiento Público Ambiental EPA, 2019) ha registrado desbordamiento del canal Simón Bolívar bajo las características geométricas que este presenta (ver Figura 26) lo que ha repercutido en pérdida de enseres y bienes materiales.

Figura 26 Geometría de canal Simón Bolívar



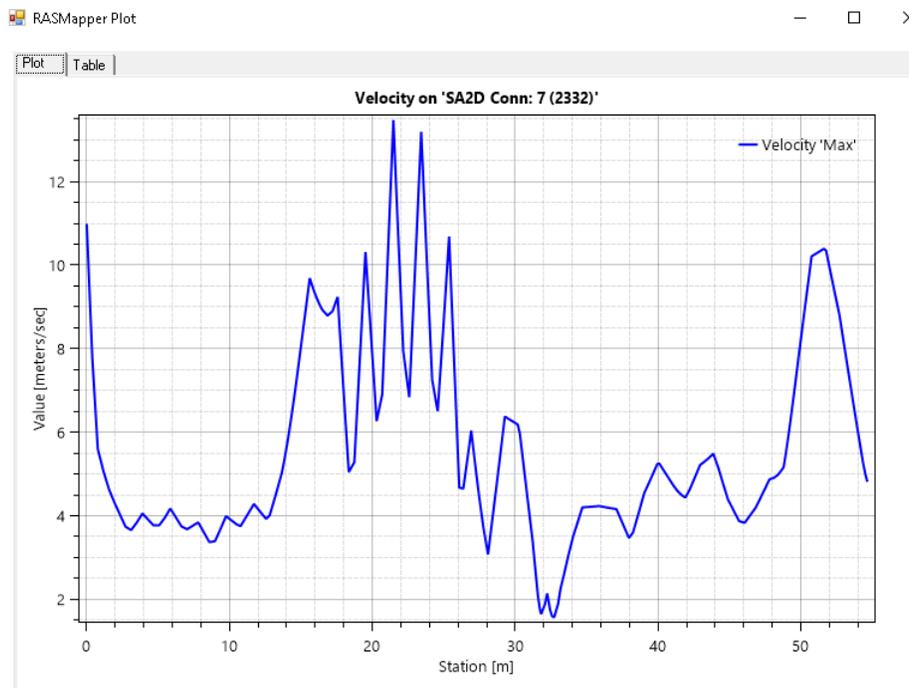
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Estructuras hidráulicas sin obstrucción

Uno de los parámetros que deterioran las pilas de puentes generan socavación dentro de los boxes culvert son las altas velocidades. En las Figura 27 se visualiza la velocidad que se está generando dentro de una de las estructuras tipo puente con 15 m/s siendo el valor más alto en comparación con las otras estructuras (Tr 2.33 años); se encuentra en una de las secciones de tramos de Matute sección media el cual a su vez posee las velocidades

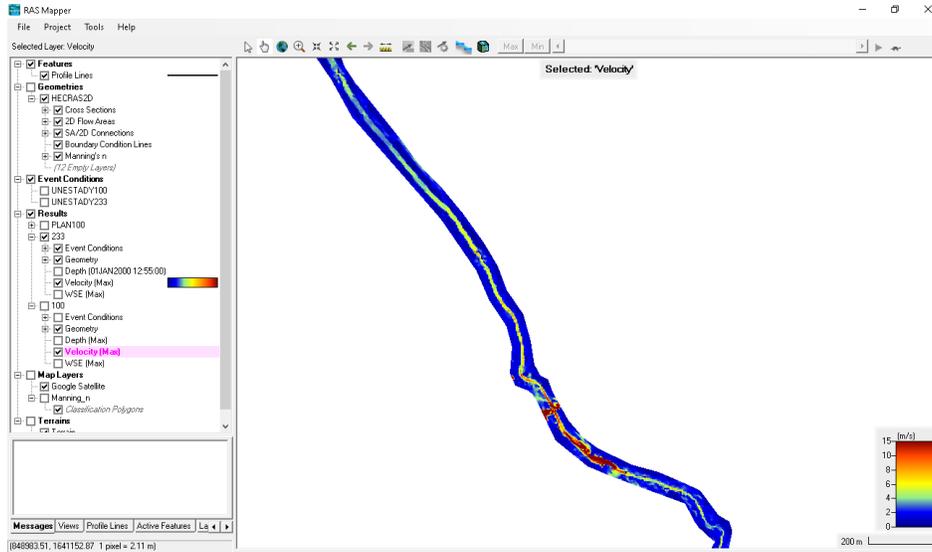
más altas de todos los canales (ver Figura 28). Este mismo comportamiento se presenta para un Tr de 100 años donde el pico de velocidad dentro de la estructura se presenta con un valor de 21 m/s (ver Figura 29) y se confirma con las velocidades altas de esta sección de canal (ver Figura 30).

Figura 27 Velocidad estructura tipo puente (Conexión 7) Tr 2.33 años



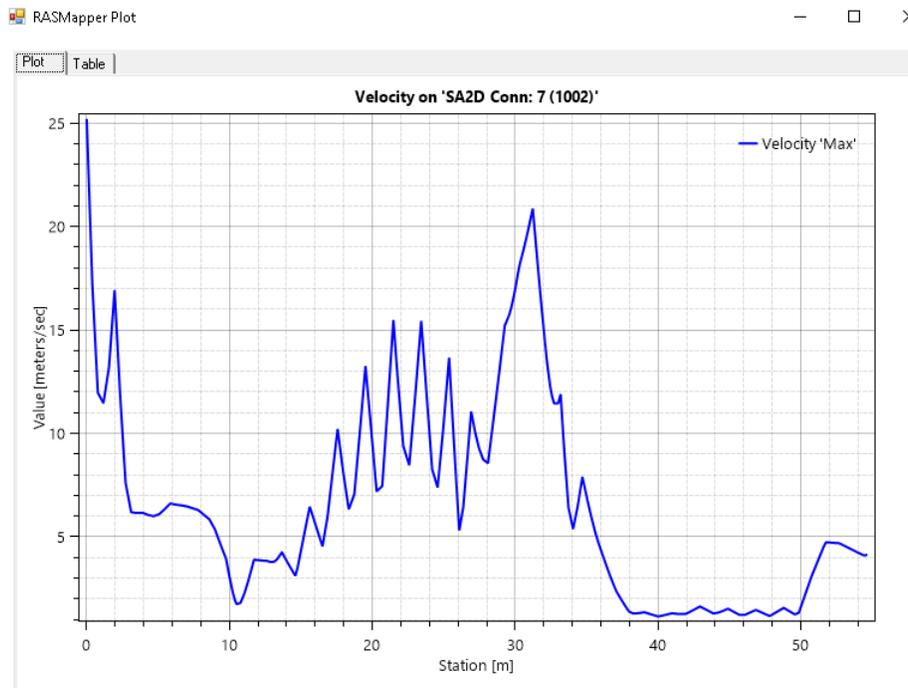
Nota. La conexión 7 corresponde a la etiqueta utilizada en el modelo. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 28 Velocidad tramo medio Tr 2.33 años



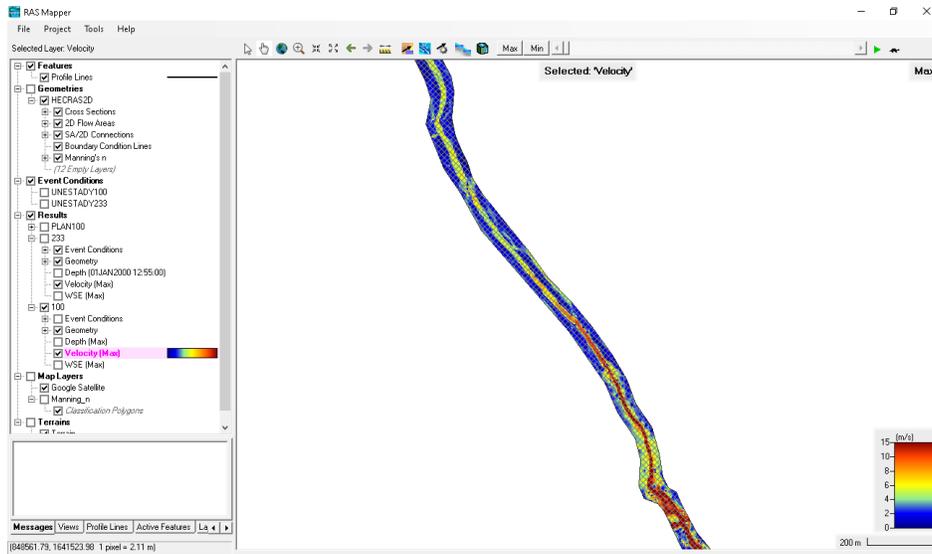
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 29 Velocidad estructura tipo puente (Conexión 7) Tr 100 años



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

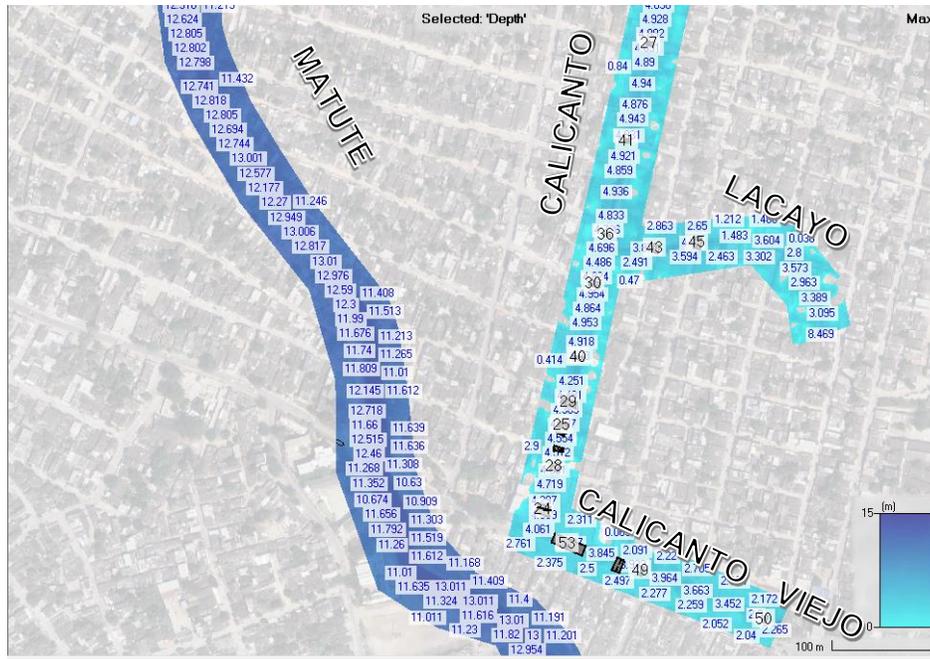
Figura 30 Velocidad estructura tipo puente (Conexión 7) Tr 100 años



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

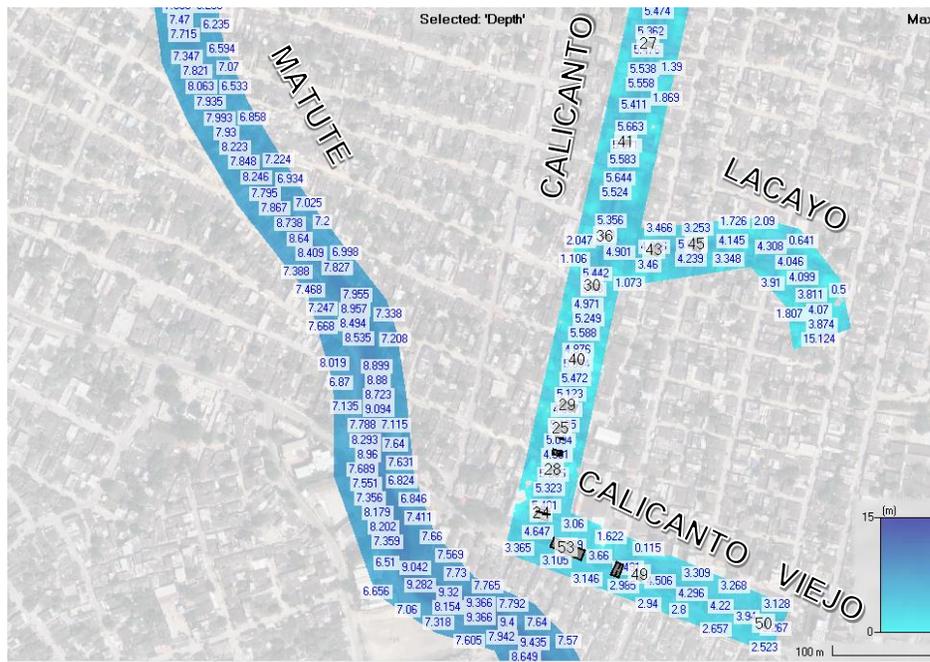
La altura de la lámina de agua es desfavorable cuanto supera el tablero de los puentes o boxes cambiando su comportamiento a vertederos. Hec Ras permite evaluar la altura del flujo a través del tiempo para cada una de las estructuras, teniendo en cuenta esto las estructuras que se ubican en los canales Lacayo, Calicanto viejo y Calicanto presentan aumento en el tirante de agua ante pendientes y velocidades bajas alcanzando alturas de hasta 1.5 m por encima del tablero de estas estructuras para los picos de los hidrogramas asociados para un Tr de 2.33 años y hasta 2 m para un Tr 100 años teniendo en cuenta la geometría de estas estructuras.

Figura 31 Elevación de la lámina de agua Tr 2.33 años Calicanto Viejo



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

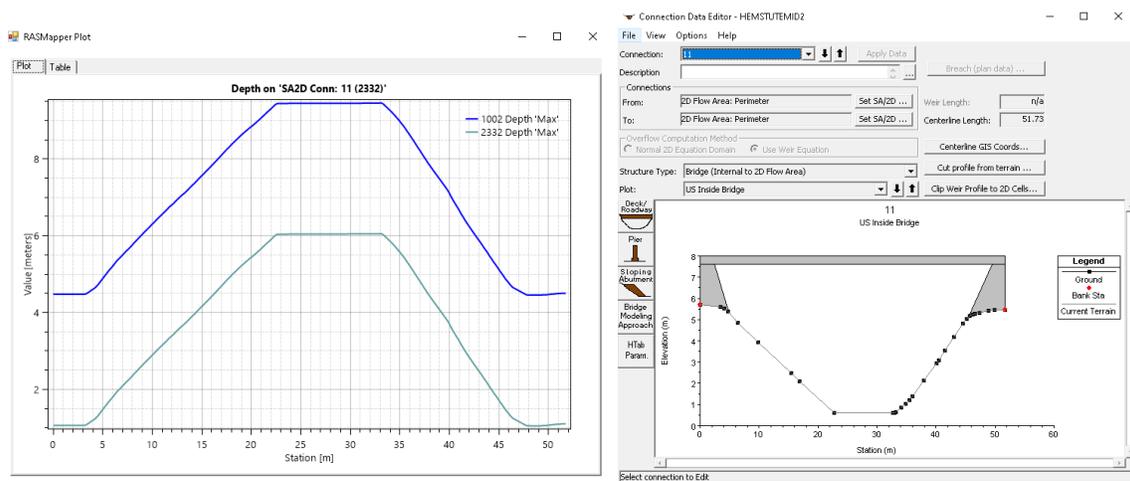
Figura 32 Elevación de la lámina de agua Tr 100 años Calicanto Viejo



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

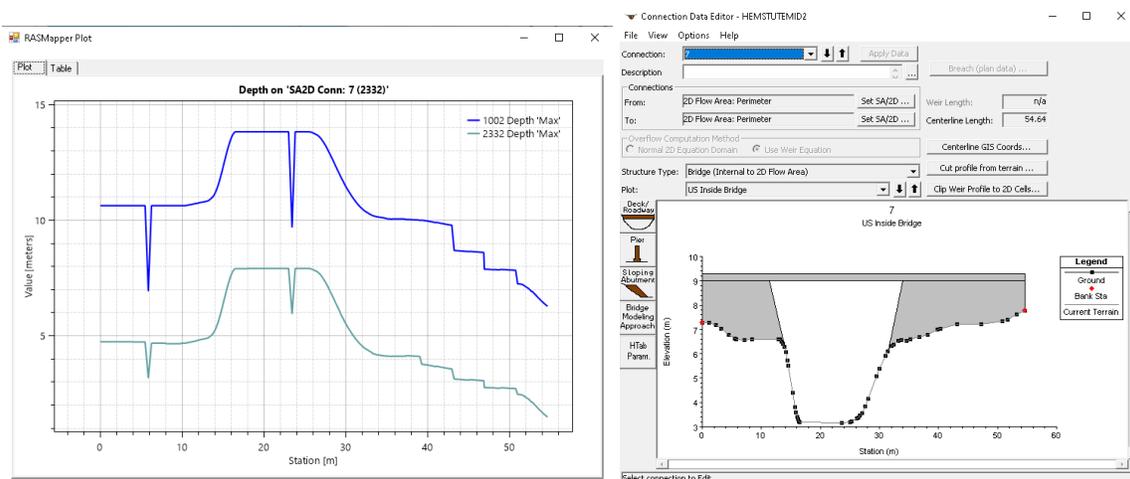
Para la sección media del canal Matute se encuentran ubicados los puentes de mayor dimensionamiento y cumplen con el paso de agua para un Tr de 2.33, sin embargo, para un Tr de 100 años la lámina de agua supera el gálibo de los puentes.

Figura 33 Elevación de la lámina de agua estructura 11.



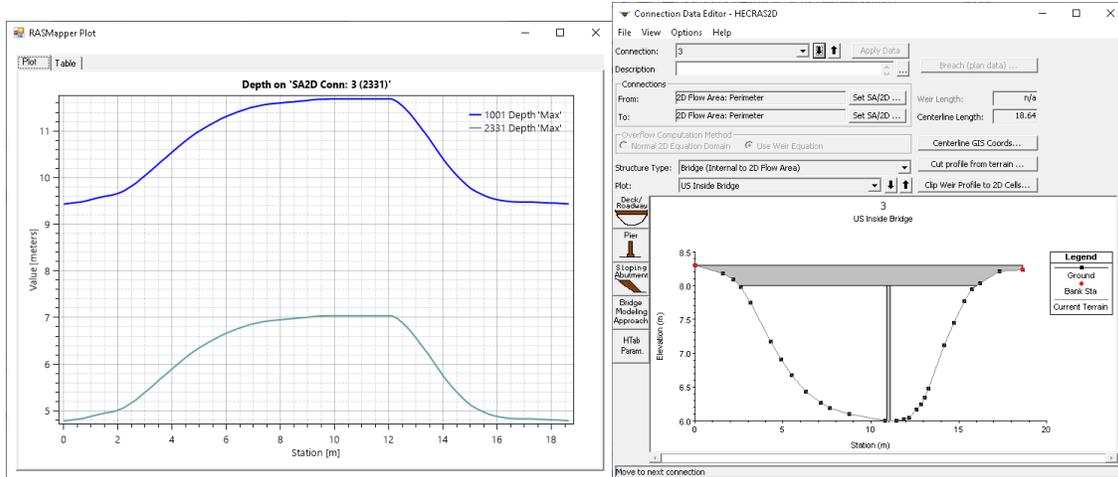
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 34 Elevación de la lámina de agua estructura 7.



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

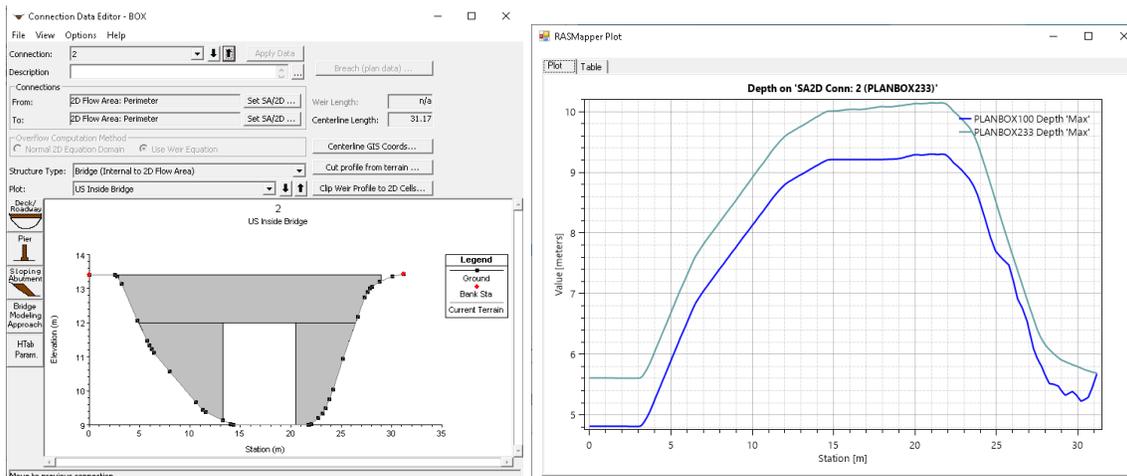
Figura 35 Elevación de la lámina de agua estructura 3.



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Para las estructuras establecidas como box, se simulan mediante geometría de puentes para no disparar el error de extrapolación. Teniendo en cuenta los resultados de la simulación, solo una estructura permite su flujo través del orificio para los dos periodos de retorno de análisis.

Figura 36 Elevación de la lámina de agua estructura 2 Box.

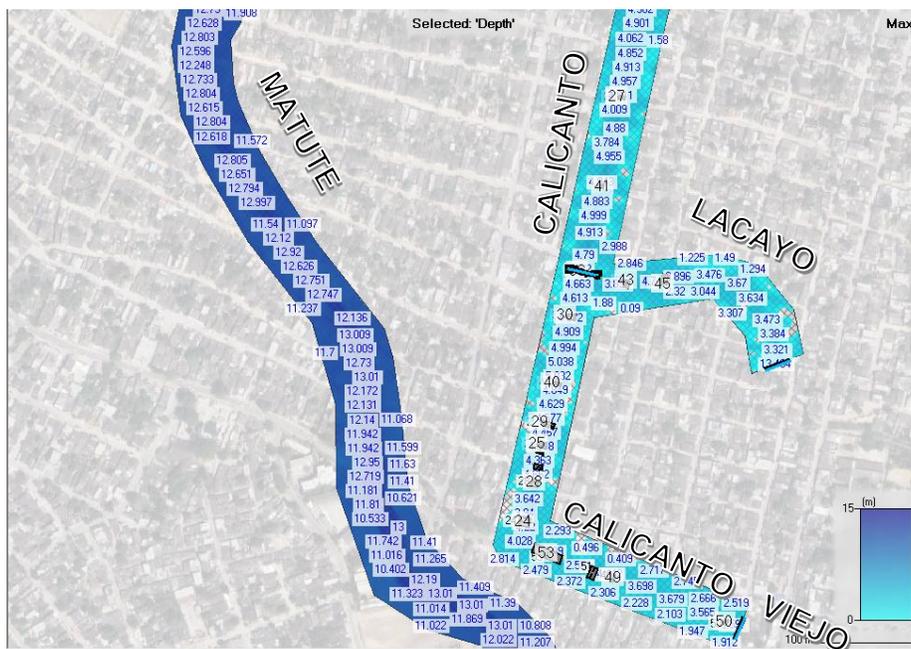


Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Estructuras hidráulicas con obstrucción

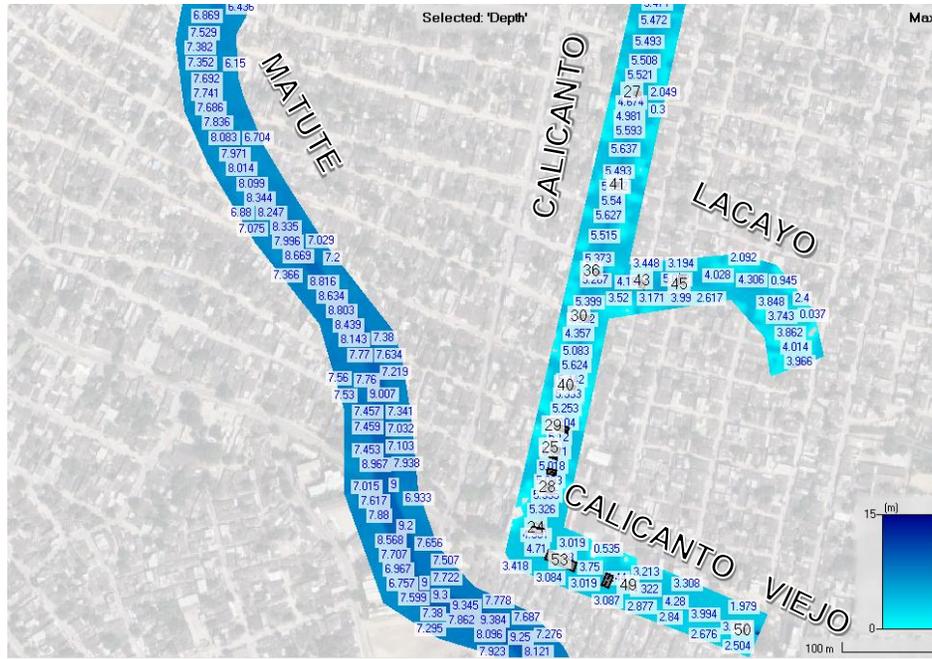
Una vez se incorporan datos que simulen las basuras y maleza acumulada en forma de sólidos en las estructuras de puentes y box culvert en caño Matute y tributarios se evidencia el desbordamiento de los canales aguas abajo acentuándose mayores profundidades de lámina de agua en comparación a cuando se presentan estructuras hidráulicas a flujo libre sin obstrucción presentado aumentos de tirante de hasta 0.20 m. Los canales Calicanto y Lacayo bajo circunstancia en que las estructuras de análisis presentan obstrucción presentan tirantes entre 5 m y 3.7 m para Tr 2.33 años y de hasta 5.6 m en Tr de 100 años (ver Figura 37 y Figura 38). El canal natural Matute presenta los valores de mayor profundidad, pero es consecuente con la naturaleza del canal, sin embargo, si se presentan altas importantes de desbordamiento.

Figura 37 Elevación de la lámina de agua Calicanto Tr 2.33 años



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 38 Elevación de la lámina de agua Calicanto Tr 100 años



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

La sección del canal principal Matute presenta los valores de mayor profundidad del agua como se evidenció para los análisis anteriores. En circunstancia donde los puentes de mayores dimensiones se encuentran con solidos alcanza tirantes entre 3 m y 6 m para Tr 2.33 años y puede llegar hasta 6..5 m para los picos en un Tr de 100 años (ver Figura 39 y Figura 40).

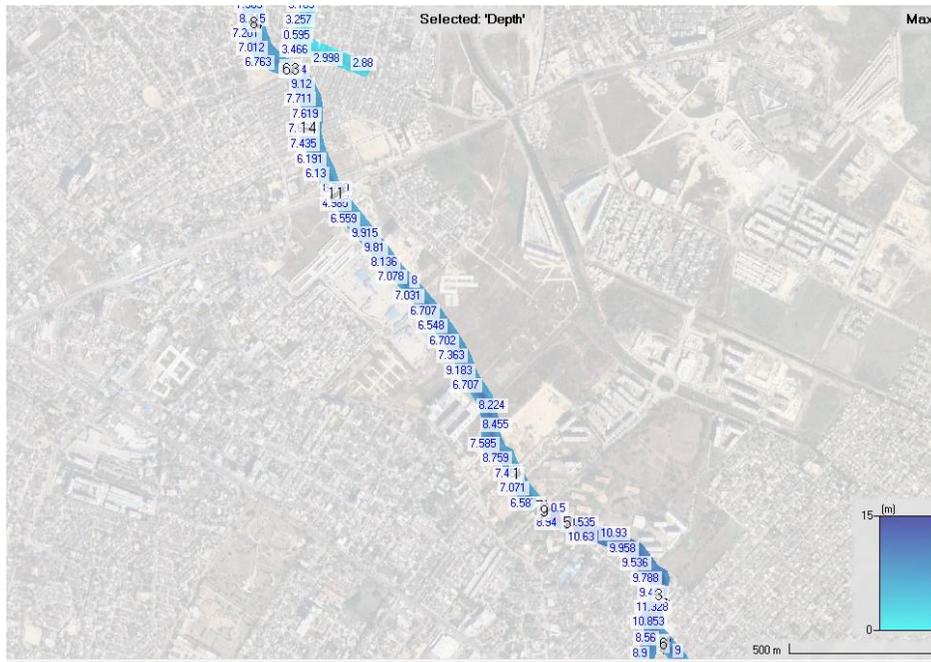
Al igual que el análisis con obstrucción las estructuras cumplen con el paso de agua para un Tr de 2.33, sin embargo, para un Tr de 100 años la lámina de agua supera el gálibo de los puentes (ver Figura 41 Figura 42 Figura 43).

Figura 39 Elevación de la lámina de agua Matute Tr 2.33 años



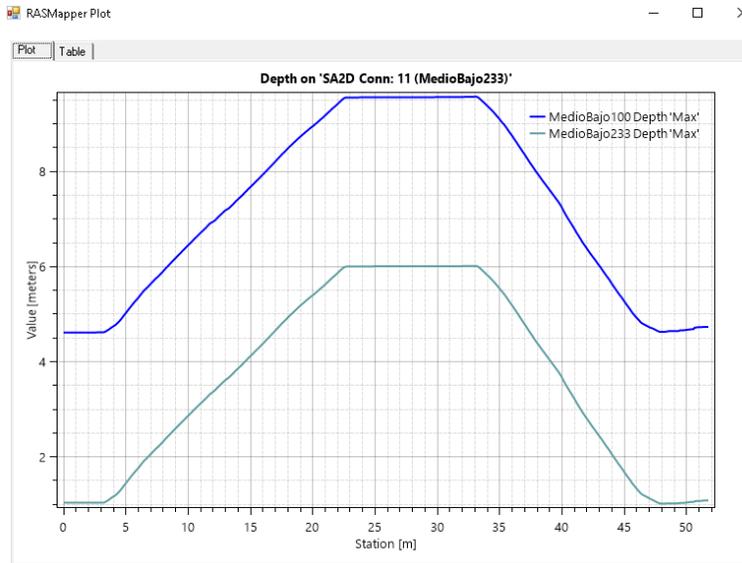
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 40 Elevación de la lámina de agua Matute Tr 100 años



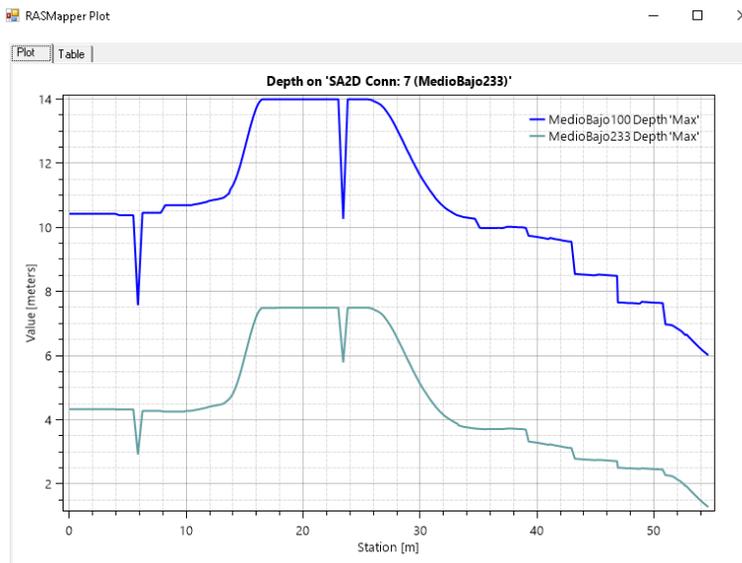
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 41 Elevación de la lámina de agua estructura 11.



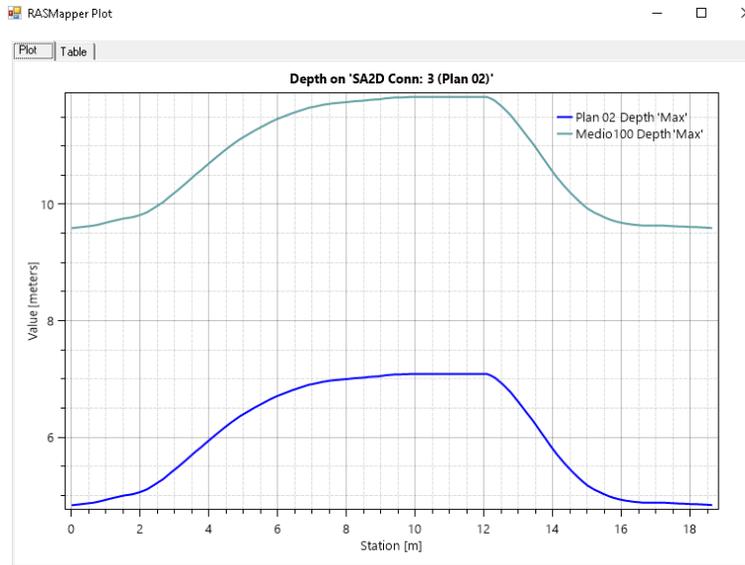
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 42 Elevación de la lámina de agua estructura 7.



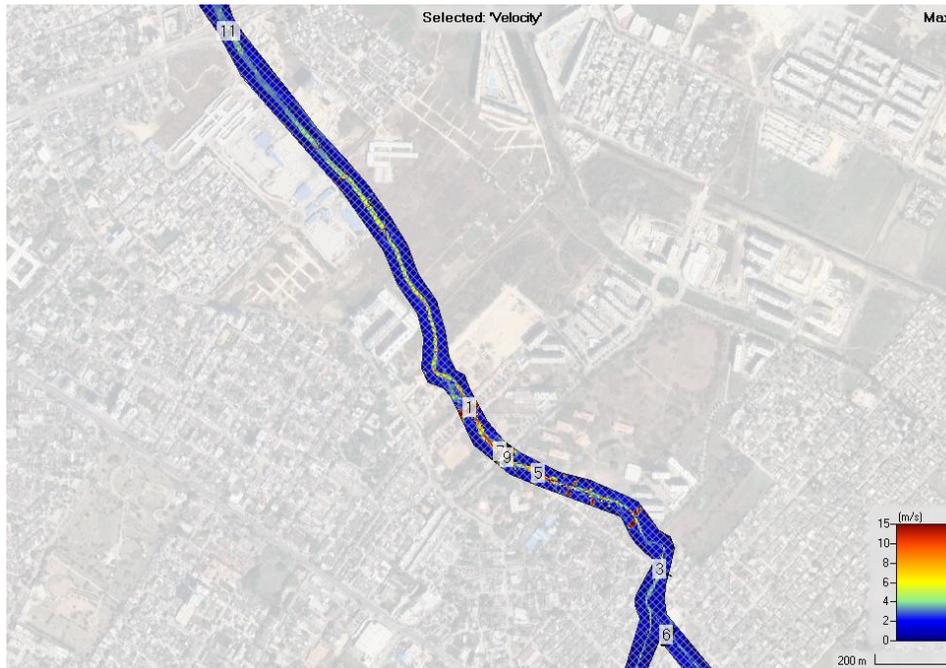
Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 43 Elevación de la lámina de agua estructura 3.



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Figura 44 Velocidad en cauce principal Matute.



Nota. Fuente el autor mediante uso del software libre Hec Ras.

Los parámetros característicos de la red de drenaje indica evidencia que el cauce principal Matute es muy corto y relativamente sinuoso a poco sinuoso, asociado a una pendiente del cauce suave, lo cual indica que se presenta bajo peligro de sometimiento a grandes velocidades en el desplazamiento del agua (ver Figura 44), este comportamiento se evidencia en los análisis anteriores.

Conclusiones

La invasión hacia la ronda hidráulica Matute es consecuencia de los asentamientos humanos que hoy en día se conocen como barrios de invasión. La población de estos sectores en muchos casos es la más vulnerable y ha sufrido las crecidas en temporada de lluvia y por ende pérdida de bienes y/o servicios. La problemática ambiental producto de las actividades antrópicas afecta las condiciones fisicoquímicas del corredor y este a su vez impacta negativamente a la población.

La falta de cultura ambiental debería ser un trabajo de las entidades públicas; el mal manejo de residuos sólidos y líquidos genera altas tasas de contaminación que repercute en problema de salud pública. Si no se realizan programas de educación ambiental, una recuperación del corredor no será la solución para los impactos negativos que se están evidenciando actualmente en los canales. La desembocadura hacia la Ciénaga la Virgen debe ser de interés para las entidades y la población teniendo en cuenta que el arrastre de sólidos y baja calidad hídrica desemboca directamente.

Implementar un proceso de conectividad entre los canales naturales y artificiales, y la población teniendo en cuenta el comportamiento de cada uno, impactaría positivamente en la fauna, flora, el recurso hídrico y la población.

En general, la pendiente del Arroyo Matute a la desembocadura de la Ciénaga de la Virgen es baja, lo que, junto con las condiciones de contorno y la geometría de los canales, produce bajas velocidades que aumentan la profundidad del agua y por ende las áreas inundables. En este sentido, se alcanzan alturas de desbordamiento de 1.1 m a 1.5 m.

Una vez analizado el comportamiento de las estructuras hidráulicas se puede concluir que para eventos extremos se genera una obstrucción por la elevación de la lámina de agua ya que se supera el gálibo de los puentes, este comportamiento se acentúa hacia las estructuras ubicadas hacia los canales Lacayo y Calicanto. La altura de la lámina de agua está sujeta a factores como la rugosidad tanto de la estructura como la rugosidad e irregularidades del cauce, así mismo la obstrucción en las pilas de puentes.

El comportamiento del box se está viendo afectado teniendo en cuenta que la geometría de estos se convierte en una obstrucción para la corriente de agua originando una elevación del perfil; la contracción y expansión que se está generando presenta condiciones desfavorables para a estructura y así mismo es otro factor que modifica el tirante hidráulico.

Las condiciones estructurales de muchas de las estructuras hidráulicas no son las óptimas para su operación, en muchas situaciones son estructuras de paso peatonal implementadas por la población local sin ningún análisis hidráulico y estructural; sumado a esto la falta de mantenimiento deja en evidencia en muchos casos el acero de la estructura, lo que se convierte en un punto de alta probabilidad de accidentes.

Es evidente que la necesidad de mantenimiento en las estructuras hidráulicas permite un mejor flujo de agua bajo estas; se observa que la lámina de agua y velocidades del flujo aumenta considerablemente para los periodos de retorno de 2.33 años y 100 años. Sería de gran importancia que se mantuviera condiciones del cauce limpio evitando que escombros y residuos sólidos obstruyan las estructuras hidráulicas, impidiendo que el agua pase de

manera eficiente, lo que genera un resalto o una sobre elevación que ocasiona un desbordamiento del canal.

Referencias

- Alcalde Mayor de Cartagena de Indias. (2020). *Plan de desarrollo Cartagena 2020/2023*.
<https://www.cartagena.gov.co/Documentos/2020/Transparencia/TyALaIP/Planeacion/PlanesDeDesarrollo/2020-2023/1.Diagnostico.pdf>
- Blackman, A. (2009). Colombia's discharge fee program: Incentives for polluters or regulators? *Journal of Environmental Management*, 90(1), 101–119.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.08.010>
- Botero Pareja, C., Guardo Castaño, G., Nieto Parra, G., & Castaño Rodríguez, G. (2008). *Caracterización hidrológica de la cuenca del arroyo matute como el elemento para considerar un posible ordenamiento territorial* [Estudio Técnico].
- Carrero, D. E. (2022). *¿Escasez de agua en Latinoamérica?* LA Network.
<https://la.network/escasez-de-agua-en-latinoamerica/>
- Departamento Administrativo Nacional de Estadística. (n.d.). *Departamento Administrativo Nacional de Estadística*. <https://www.dane.gov.co>
- Establecimiento Público Ambiental EPA. (2019). *Consultoría para la elaboración de los estudios, análisis y mediciones necesarias relacionadas con el acotamiento de las rondas hídricas correspondientes a los canales urbanos matute, simón bolívar, la princesa, Isla belén, calicanto viejo, nuevo paraíso*.
- León Castro, R. M., & Rocha, V. (2010). El problema de las basuras en Bogotá-diseño de una idea de negocio para la creación de una empresa de reciclaje. Las empresas de reciclaje: ¿solución a la problemática de la contaminación ambiental en Bogotá?

Cuadernos Latinoamericanos de Administración, VI, 77–102.
<https://www.redalyc.org/pdf/4096/409634363005.pdf>

Niño C., Y. (2002). Metodo de los Volumenes finitos. In *Universidad de Chile* [Modelación Numérica en Ingeniería Hidráulica y Ambiental]. https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2008/2/CI71D/1/material_docente/bajar?id=200975

Ochoa Rubio, T. (2011). *Hidráulica de ríos y procesos morfológicos* (Primera). Ecoe Ediciones.
https://books.google.com.co/books?id=Qt03DgAAQBAJ&dq=MODELO+MATEMATICOS+HIDRAULICA&source=gbs_navlinks_s

Organización Panamericana de la salud (OPS). (n.d.). *Vectores: Manejo integrado y entomología en salud pública*. Retrieved November 10, 2022, from <https://www.paho.org/es/temas/vectores-manejo-integrado-entomologia-salud-publica>

Romero Iriarte, D. (2022, July 1). Desde Las Palmeras le piden al Distrito realizarle limpieza al caño Matute. *El Universal*.
<https://www.eluniversal.com.co/cartagena/desde-las-palmeras-le-piden-al-distrito-realizarle-limpieza-al-cano-matute-FH6768340>

Sánchez Londoño, Y. A., & Torres Forero, J. E. (2022). *Evaluación de impactos ambientales corredor ronda hidráulica Matute*.

Schall, J. D., Thompson, P. L., Zerges, S. M., Kilgore, Morris, R. T., & L., J. (2012). HYDRAULIC DESIGN OF HIGHWAY CULVERTS. In *U.S. Department of*

Transportation Federal Highway Administration (Third, Vol. 5).
<https://www.fhwa.dot.gov/engineering/hydraulics/pubs/12026/hif12026.pdf>

UNESCO. (2019). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2019. In *Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura*. <http://www.unwater.org/publications/world-water-development-report-2019/>

US Army Corps of Engineers. (n.d.). *HEC-RAS*. Retrieved May 1, 2021, from <https://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

US Army Corps of Engineers. (2021). *HEC-RAS Hydraulic Reference Manual* (6.0; p. 546).

Vázquez, J. L. (2004). La ecuación de Navier-Stokes. Un reto físico-matemático para el siglo XXI. *Monografías de La Real Academia de Ciencias de Zaragoza*, 26, 31–56.
<https://dialnet.unirioja.es/ejemplar/136757>

Xamán, J., & Gijón-Rivera, M. (2015). *Dinámica de Fluidos Computacional para Ingenieros*. Palibrio.
https://play.google.com/store/books/details?id=dwIDDAAAQBAJ&rdid=book-dwIDDAAAQBAJ&rdot=1&source=gbs_vpt_read&pcampaignid=books_booksearch_viewport

Anexos