



**Modelación hidrodinámica de la quebrada San Antonio para el acoplamiento del modelo de calidad de agua mediante el modelo HEC – RAS.**

Daniel Esteban Naranjo Gonzalez

Trabajo de grado presentado para optar al título de Ingeniero Sanitario

Tutor

Nora Elena Villegas, Magíster (MSc)

Co asesor: Leonardo García, Magíster (MSc)

Universidad de Antioquia

Facultad de Ingeniería

Ingeniería Sanitaria

Medellín, Antioquia, Colombia

2022

<b>Cita</b>	(Naranjo Gonzalez, 2022)
<b>Referencia</b>	Naranjo Gonzalez, D. E. (2022). <i>Modelación hidrodinámica de la quebrada San Antonio para el acoplamiento del modelo de calidad de agua mediante el modelo</i>
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	HEC – RAS. [Trabajo de grado profesional]. Universidad de Antioquia, Medellín, Colombia.



Grupo de Investigación Gestión y Modelación Ambiental (GAIA).

Corporación Académica Ambiental (CAA).



Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

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

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

**Rector:** Jhon Jairo Arboleda Cespedes

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

**Jefe departamento:** Diana Catalina Rodríguez Loaiza

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

## **Agradecimientos**

*En primer lugar quiero agradecer a la profesora Nora Elena Villegas quien con sus conocimientos y apoyo, me guio a través de cada una de las etapas de este proyecto para alcanzar los resultados esperados. Quiero agradecer a todos mis compañeros y profesores que hicieron parte de mi formación durante todos estos años. Mis padres que a pesar de las dificultades siempre me ayudaron y apoyaron incondicionalmente para poder hacer mi sueño realidad. También quiero agradecer el apoyo de mi novia que siempre estuvo durante toda mi formación ayudando y apoyando para no decaer en los momentos difíciles. Por ultimo quiero agradecer a la Universidad de Antioquia que me brindo todo para poder lograr mi formación profesional.*

## Tabla de Contenido

1. Resumen.....	9
2. Introducción .....	9
3. Objetivos.....	11
3.1 Objetivo General.....	11
3.2 Objetivo Específicos .....	11
4. Generalidades.....	12
4.1 Localización .....	12
4.2 Usos del Suelo.....	14
4.3 Caracterización Tramos de Modelación Hidráulica .....	15
4.3.1 Secciones Transversales.....	17
4.3.2 Sistemas Lagunares:.....	24
4.3.3 Perfil Longitudinal .....	27
4.3.3.1 Pendientes .....	28
4.3.3.2 Jerarquía de la Red Fluvial de la Quebrada San Antonio .....	29
4. Marco Teórico.....	30
4.1 Cuenca.....	30
4.2 Flujo de Canales Abiertos.....	30
4.2.1 Tipos de Flujos Canales Abiertos .....	31
4.2.1.1 Flujo Permanente y Flujo No Permanente .....	31
4.2.1.2 Flujo Uniforme y Flujo Variado .....	31
4.2.2 Estado de Flujo .....	31
4.2.2.1 Numero de Reynolds.....	31

4.2.2.2 Numero de Froude .....	32
4.2.3 Geometría.....	32
4.2.3.1 Parámetros Geométricos de una Sección Transversal .....	33
4.4 Ecuación de Energía .....	33
4.5 Subdivision de la Seccion Para el Calculo del Caudal .....	35
4.6 Coeficiente de Maning .....	36
4.7 Calculo de la Energia Cinetica y Coeficiente de Coriolis.....	37
4.8 Ecuación de Cantidad de Movimiento .....	39
4.8.1 Presión Hidrostática.....	41
4.9 Metodología de Cálculo de HEC – RAS, Paso Estándar.....	41
4.10 Sistemas de Información Geográficos .....	44
4.10.1 Qgis.....	44
4.10.2 RiverGis.....	44
4.10.3 PostGis y PostgreSQL.....	45
5. Metodología .....	45
5.1 Pre Proceso.....	47
5.2 procesamiento en el interfaz de HEC-RAS .....	49
5.3 Calibración del Modelo.....	51
6. Resultados.....	52
6.1 Tramos de Estudio .....	62
6.1.1 Tramo Aguas Arriba – Estacion E2.....	62
6.1.2 Tramo E2 – E4.....	62
6.1.3 Tramo E4 – E 6 -2.....	62

6.1.4 Tramo E6-2 - E8 .....	63
6.1.5 Tramo E8 – E9 .....	64
6.1.6 Tramo E9 –E 14.....	64
6.1.7 Tramo E 14 – E 15 .....	65
6.1.8 Tramo E 15 – E16 .....	65
6.1.9 Tramo E16 – E17 .....	66
6.1.10 Tramo E17 – Rio Negro.....	66
7. Conclusiones.....	68
8. Bibliografía: .....	71
9. Anexos .....	74

## Tabla de ilustraciones

<b>Ilustración 1</b> Ubicación de la Cuenca San Antonio.....	13
<b>Ilustración 2</b> Categorías POT zona rural de Rionegro .....	15
<b>Ilustración 3</b> estaciones de monitoreo del programa de seguimiento y monitoreo .....	16
<b>Ilustración 4</b> Perfil Longitudinal de la quebrada San Antonio .....	28
<b>Ilustración 5</b> Pendientes de la quebrada San Antonio .....	28
<b>Ilustración 6</b> Ordenamiento de Horton- Strahler de la quebrada San Antonio. ....	29
<b>Ilustración 7</b> Balance de energía .....	34
<b>Ilustración 8</b> Factor de transporte por subdivisiones.....	36
<b>Ilustración 9</b> Energía cinética ponderada .....	37
<b>Ilustración 10</b> Variación de la energía específica.....	39
<b>Ilustración 11</b> Variación de la energía específica.....	40
<b>Ilustración 12</b> Variación de la energía específica.....	42
<b>Ilustración 13</b> Procedimiento de cálculo seguido por HEC-RAS .....	43
<b>Ilustración 14</b> Pre Proceso de la información topológica.....	49
<b>Ilustración 15</b> interfaz de HEC RAS, Geometría de la quebrada San Antonio.....	50
<b>Ilustración 16</b> Calibración de constante de maning.....	52
<b>Ilustración 17</b> Confluencia de la Quebrada Vilachuaga y San Antonio.....	53
<b>Ilustración 18</b> Pérdidas por fricción y locales .....	54
<b>Ilustración 19</b> Caudales hidrológicos .....	55
<b>Ilustración 20</b> Caudales Históricos.....	56
<b>Ilustración 21</b> Cambio del número Froude.....	57
<b>Ilustración 22</b> Cambios de la Velocidad media en el canal.....	58

<b>Ilustración 23</b> Tiempos de viaje para los escenarios hidrológicos .....	59
<b>Ilustración 24</b> Curvas de Gasto para las estaciones de monitoreo .....	61



## **1. Resumen**

El análisis hidráulico busca implementar un modelo que permita simular, conceptualizar y simplificar fenómenos reales, para posteriormente describir y cuantificar lo que se esté analizando, este tipo de análisis es esencial para cualquier proyecto que involucre la gestión del agua. Considerando las dificultades que presenta la quebrada San Antonio asociado al crecimiento urbano y la presencia de dos sistemas lagunares artificiales que interrumpe el flujo de agua, se logró modelar y calibrar la hidrodinámica de esta corriente usando HEC-RAS y Qgis, en condiciones de flujo permanente, considerando los caudales que aporta cada uno de los tributarios de la quebrada. Se encontró que el sistema lagunar de Club Llano generan cambios que afectan la calidad del agua y la hidráulica de la quebrada principalmente aguas abajo en tiempo seco, donde, se retiene una cantidad importante del flujo disminuyendo el caudal de la corriente. Los principales resultados permitieron alimentar el modelo de calidad de agua QUAL2K que se estaba formulando para Plan de Ordenamiento del Recurso hídrico (PORH) de esta quebrada, suministrando los tiempos de viajes entre tramos y curvas de gasto en cada uno de los puntos de monitores para este modelo de calidad del agua.

## **2. Introducción**

La quebrada San Antonio se encuentra ubicada en el municipio de Rionegro Antioquia, el cual ha experimentado un crecimiento demográficos acelerado donde la tasa de crecimiento población total del municipio es 2.45%, en la zona urbana 2,87%, mientras que la zona rural 1,73% (Anuario Estadístico 2016), este crecimiento se presenta debido a que en Rionegro confluyen grandes flujos de actividades económicas por el asentamiento de grandes empresas, sumado a la presencia del segundo aeropuerto más importante de Colombia, además, de la cercanía con la ciudad de Medellín que ven en Rionegro un entorno más tranquilo para tener una mejor calidad de

vida (Rionegro 2016). El crecimiento es tan acelerado que ha puesto en riesgo la sostenibilidad de esta microcuenca generando un conflicto en torno a la quebrada San Antonio.

Las condiciones topológicas e intervenciones sobre la quebrada San Antonio representa un gran reto a la hora de realizar análisis de trasportes de contaminantes, por lo que se requieren implementar un modelo hidráulico que permitan identificar las particularidades de esta fuente con el fin de implementar modelos de calidad del agua que representen adecuadamente el transporte y transformación de contaminantes presentes en la matriz agua. La hidráulica de los causes es un elemento de gran importancia en los modelos de calidad de agua, ya que esta permite identificar los tiempos necesario para que una gota de agua recorra cierta distancia lo que recibe el nombre de tiempo de viaje. Normalmente esta información se determina con ensayos de trazadores empleando una serie de suposiciones (Alvarado, 2011), que no se ajustan a las condiciones reales de la quebrada San Antonio.

El análisis hidráulico busca implementar un modelo que permita simular, conceptualizar y simplificar fenómenos reales, para posteriormente describir y cuantificar lo que se esté analizando, este tipo de análisis es esencial para cualquier proyecto que involucre un canal o una corriente natural como es el caso de la quebrada San Antonio. Todos los modelos hidráulicos son aproximaciones a la realidad, porque se estará representando un sistema de propiedades natural constituyente a uno discreto y finito de información física estimada a partir de trabajo de campo y los modelos de elevación digital disponible.

HEC – RAS (Hydrology Engineering Center’s River Analysis System) es un modelo de código libre desarrollado por el cuerpo de ingenieros del ejército de EE. UU. HEC-RAS está diseñado para realizar cálculos hidráulicos unidimensionales y bidimensionales para una red completa de canales naturales y artificiales. La principal utilidad del programa es el cálculo

unidimensional de la elevación de la superficie de la lámina de agua para un caudal y condiciones de frontera establecidas para flujo permanente o estacionario. Esta herramienta también permite realizar otro tipo de análisis de flujo transitorios, análisis de sedimentos y calidad del agua.

Para calcular los perfiles de la superficie del agua para un flujo constante gradualmente variado el software HEC-RAS permite manejar una red completa de canales, un sistema dendrítico o un solo tramo de río. El componente de flujo constante es capaz de modelar los perfiles de la superficie del agua de regímenes de flujo mixto (resaltos hidráulicos), subcrítico y supercrítico. El modelo también permite agregar diferentes estructuras hidráulicas que se tengan en el cuerpo de agua, como los son: puentes, vertederos y box culvert, que permitiendo analizar los efectos que generen en la corriente.

### **3. Objetivos**

#### **3.1 Objetivo General**

Modelar la hidrodinámica de la quebrada San Antonio para el acoplamiento del modelo de calidad de agua usando HEC – RAS.

#### **3.2 Objetivo Específicos**

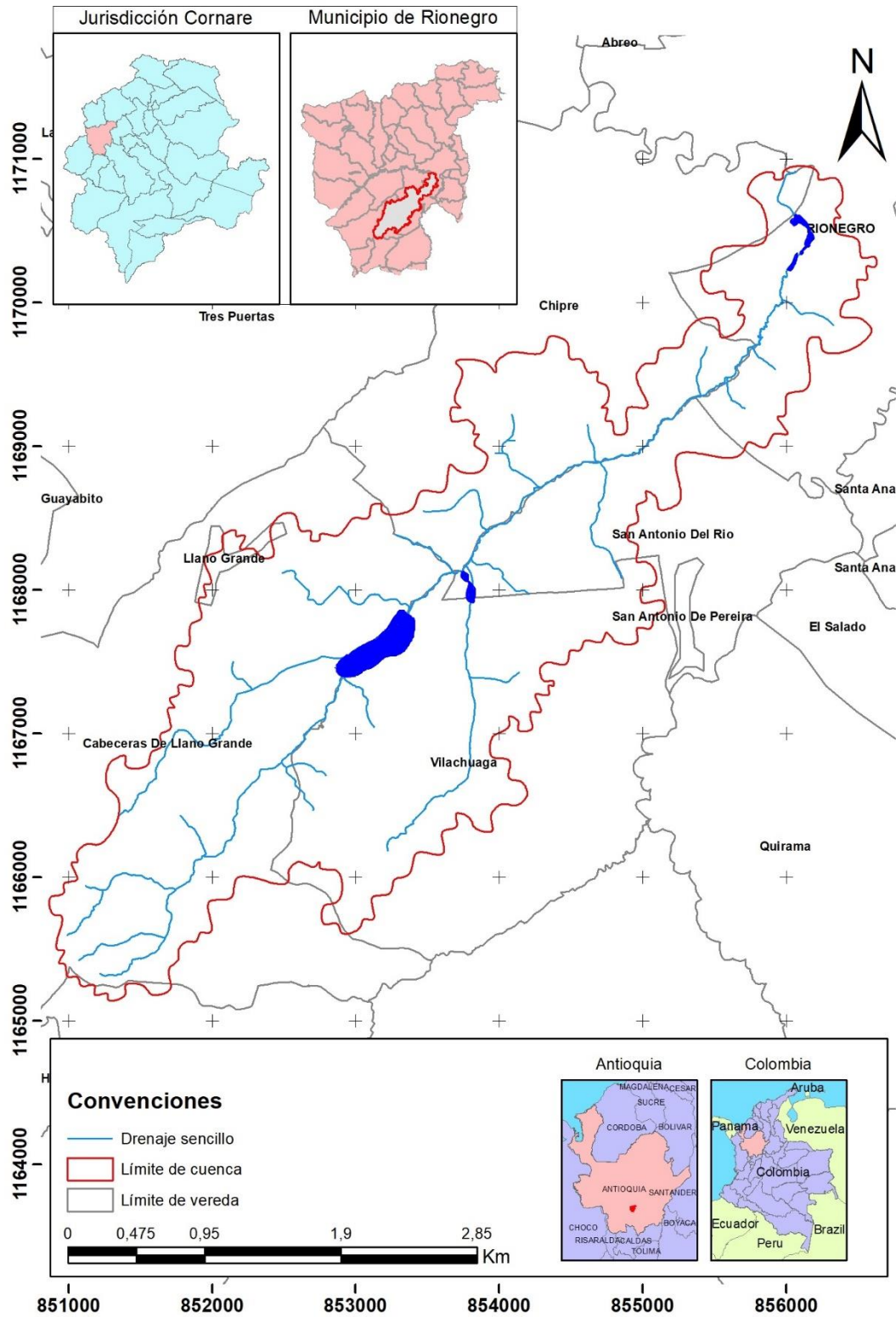
- Definir las condiciones geomorfológicas e hidrológicas de la quebrada San Antonio.
- Calibrar y validar el modelo hidráulico para garantizar que se esté representando las condiciones de la quebrada
- Evaluar la hidrodinámica de la quebrada al correr el modelo para diferentes escenarios de caudales.

## 4. Generalidades

### 4.1 Localización

La cuenca de la quebrada San Antonio se encuentra ubicada en el municipio de Rionegro, al oriente del departamento de Antioquia. Esta quebrada nace en la vereda Cabeceras, atravesando las veredas Vilachuaga, Chipre, el corregimiento de San Antonio de Pereira y el sector Somer de Rionegro hasta verter sus aguas en el Rio negro como se muestra en la **Ilustración 1**. La cuenca cuenta con un área de 10.87 Km<sup>2</sup>, nace en el centro poblado Alto del perro a 2200 msnm (Cornare), el cauce principal de la quebrada San Antonio tiene una longitud de 9 Km aproximadamente. La quebrada tiene dos afluentes principales, la quebrada Cabeceras que viertes sus aguas sobre el club campestre de llano de grande y la quebrada Vilachuaga que converge a la altura de Rincones de Llanogrande. La quebrada San Antonio – El pueblo cuenta con cuatro sistemas lagunares que embalsan la corriente por medio de estructuras hidráulicas. El primer lago se encuentra ubicado en el Club Campestre sobre la cuenca media, que es la que almacena mayor cantidad de agua. Los siguientes lagos se encuentran en serie en el parque Comfama, cerca de la desembocadura de la quebrada San Antonio.

*Ilustración 1 Ubicación de la Cuenca San Antonio*



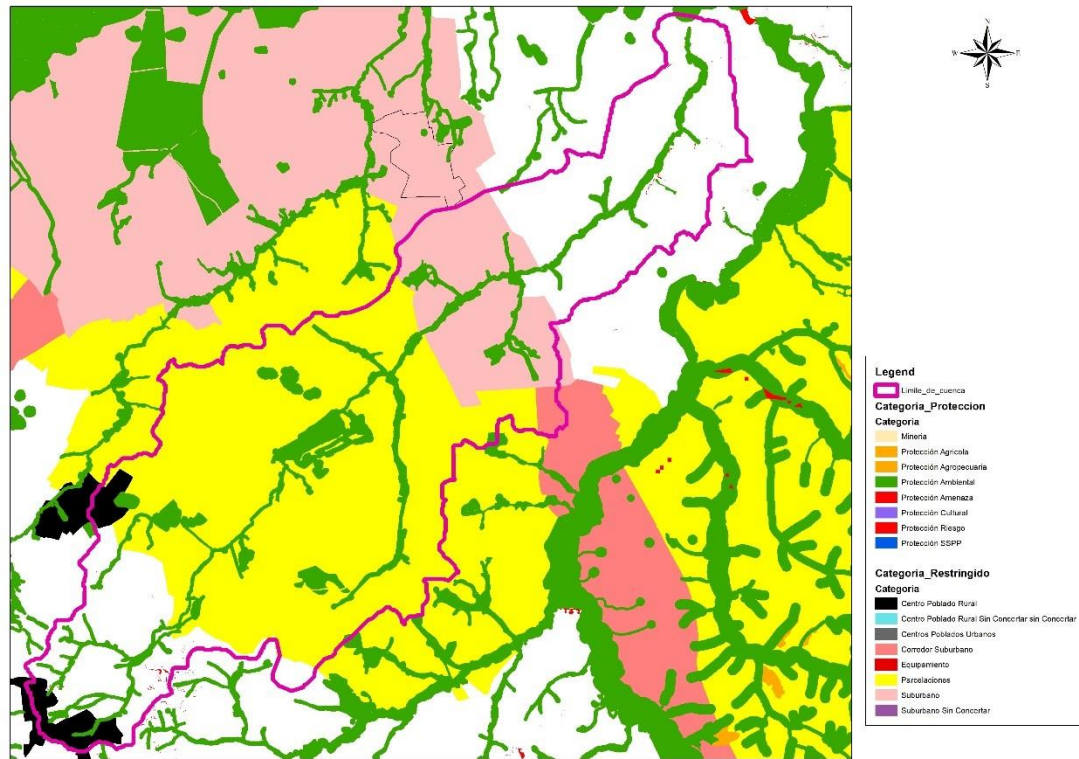
Nota. Tomado de Cornare, Informe DIAGNOSTICO PORH quebrada San Antonio, 2021.

## 4.2 Usos del Suelo

Los principales problemas y conflictos que afectan las coberturas boscosas son: la eliminación o fragmentación de las coberturas boscosas (tasa de deforestación en la cuenca (río Negro) de 202 ha/año, según IDEAM 2011); ampliación del área para uso agrícola y pecuario; el crecimiento urbanístico donde no habitan los propietarios; incremento del valor del suelo que implica el aumento de la presión para su obtención para establecer diversas figuras de propiedad incluyendo núcleos comerciales que disminuyen la vegetación boscosa, incrementan la demanda por el recurso agua; disminución de la diversidad de flora y fauna, no solo por la eliminación de la cobertura en el área intervenida sino la pérdida de funcionalidad de los ecosistemas de bosque ya que aumenta la distancia entre fragmentos; en muchas ocasiones la introducción de especies invasoras; el desplazamiento de la población local con el cambio del tipo de economía campesina y su modo de vida, además de la pérdida de la seguridad alimentaria de este sector de población que generalmente engrosa la población urbana con otras implicaciones en estas áreas (Cornare , 2018)

Según el Plan de Ordenamiento territorial vigente en el municipio de Rionegro (acuerdo 002 de 2018) , indica que la microcuenca estará atravesada por un suelo suburbano en parte media de la cuenca, donde se proyecta el desarrollo de proyectos inmobiliarios. En el artículo 30 de POT 2018 se establece el modelo de ocupación de suelo rural donde se restringe el desarrollo del suelo en los centros poblados cabeceras y alto del perro que se encuentra en el nacimiento de la quebrada San Antonio- El pueblo. A continuación se muestra en la **Ilustración 2** los usos del suelo establecidos para la cuenca

*Ilustración 2 Categorías POT zona rural de Rionegro*



Nota. Tomado de Cornare 2018

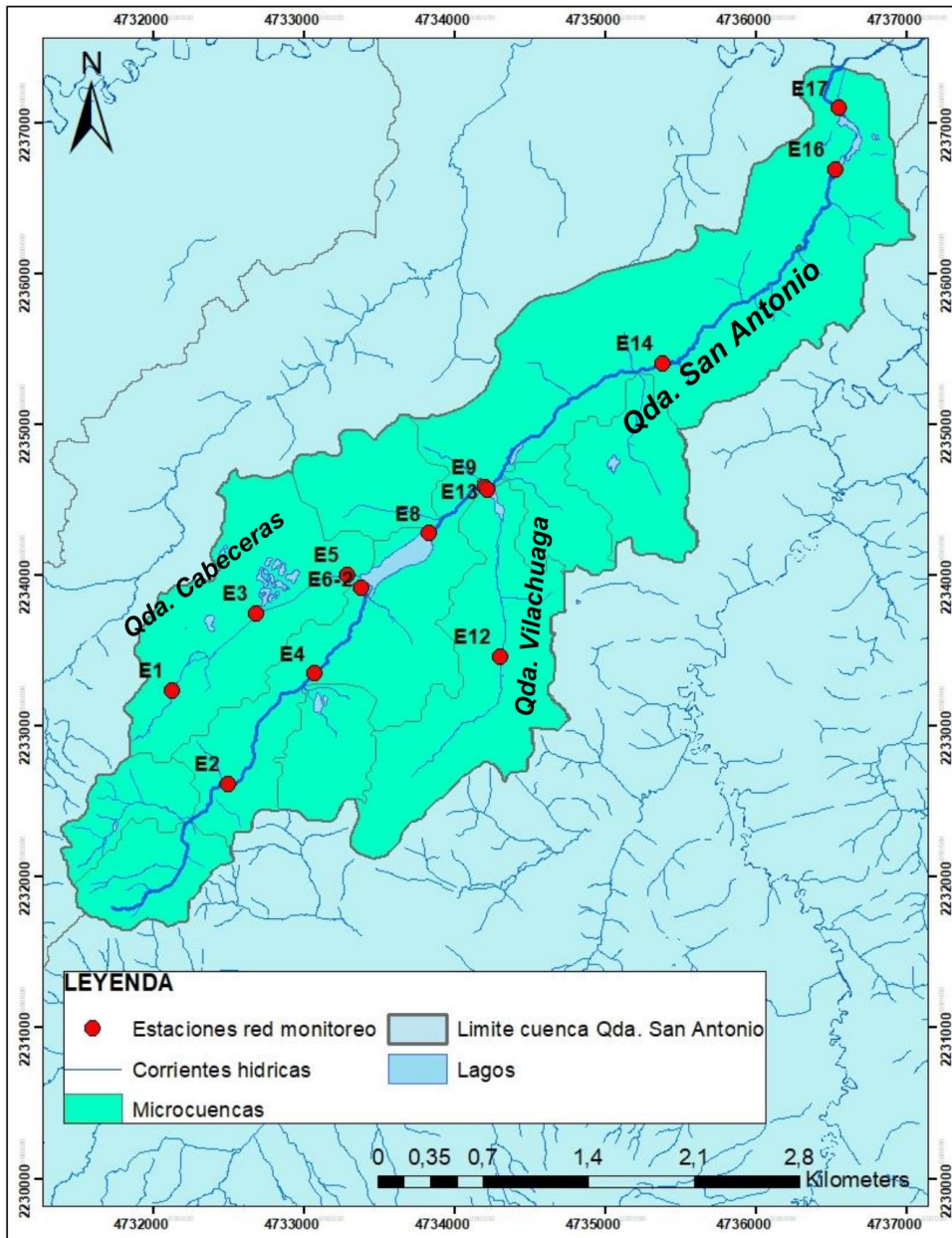
La ocupación que tendrá la cuenca muestra una tendencia de viviendas campestres, mientras que en la cuenca baja se presenta una ocupación mayor por hace parte del suelo urbano y de expansión de Rionegro. En la parte alta la construcción de los sistemas de saneamiento en los centros poblados serán elementos atractor para el aumento de los procesos de ocupación de la zona. (Cornare 2021)

### 4.3 Caracterización Tramos de Modelación Hidráulica

Sobre la quebrada San Antonio se tienen diferentes puntos de monitoreo donde se realizan diferentes mediciones para realizar controles sobre las condiciones de la quebrada las cuales se ubican como se muestran en la Ilustración 3. En estas campañas de monitoreo se realizan mediciones batimétricas, velocidades de corriente y parámetros fisicoquímicos. Las secciones

transversales no consideraban llanura de inundación, estos tenían información hasta el nivel del agua, por lo que todas las secciones se ajustaron para lograr representar la capacidad de la sección transversal incluyendo llanuras de inundación para lograr modelar los diferentes escenarios. A continuación, se presentan cada una de las secciones con sus principales características:

*Ilustración 3* estaciones de monitoreo del programa de seguimiento y monitoreo



Nota. Tomado de Cornare, Informe DIAGNOSTICO PORH quebrada San Antonio, 2021.



### 4.3.1 Secciones Transversales

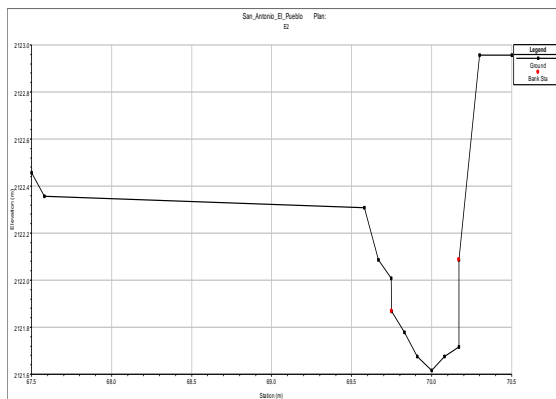
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 1

Coordenadas: X: 851620.86 Y: 1166456.94

Estación de monitoreo: E2

Cota de fondo: 2121.62 m.s.n.m

Datos ajustado de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 0.684 metros

Ancho máximo: 0.622 metros

Esta estación se encuentra ubicada unos metros aguas arriba de un box culvert ya que esta corriente es cruzada por una vía veredal. El costado izquierdo de la quebrada se encuentra un muro de contención de una finca asentada sobre este costado. La llanura derecha está consolidada por potrero.

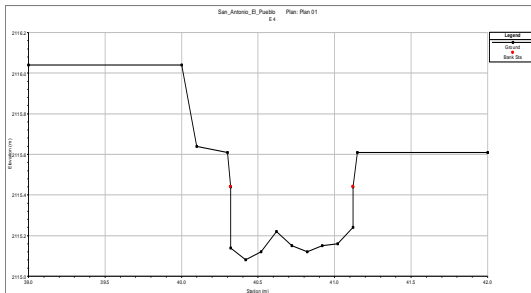
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 1

Coordenadas: X: 852187.99 Y: 1167192.67

Estación de monitoreo: E4

Cota de fondo: 2115.08 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 0.600 metros

Ancho máximo: 0.851 metros

Esta estación se encuentra ubicada cerca al cultivo de flores las Acacias. El costado izquierdo de la quebrada se ubica una vía sin pavimento, la llanura derecha está cubierta por árboles que separan la corriente de un terreno usados como potreros. Se puede establecer que el lecho de la quebrada principalmente está compuesta por arcillas

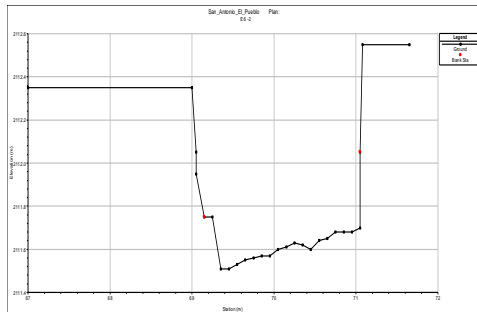
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 2

Coordenadas: X: 852502.82 Y: 1167765.57

Estación de monitoreo: E 6 -2

Cota de fondo: 2111.51 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 0.846 metros

Ancho máximo: 2.07 metros

Esta estación se encuentra ubicada dentro de Club Campestre de Llanogrande esta estación presenta una particularidad importante pues esta sección se encuentra justo antes de un sistema laguna artificial que ejerce una un cambio importante en el nivel de agua en esta sección pues el remanso que genera el represamiento genera un control hidráulico en esta sección.

Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 2

Coordenadas: X: 852948.74 Y: 1168125.20

Estación de monitoreo: E 8

Cota de fondo: 2108.7 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 0.360metros

Ancho máximo: 2.92metros

Esta estación se encuentra ubicada dentro de Club Campestre de Llanogrande está ubicada aguas abajo de la estructura hidráulica que genera el sistema de lagunas. Las profundidades en esta sección son bajas por el efecto que genera el vertedero.

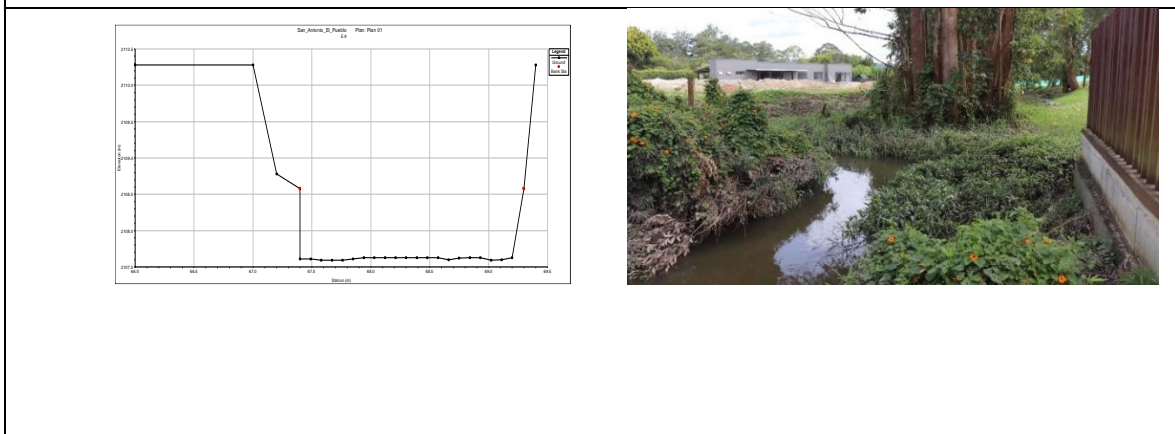
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 2

Coordenadas: X: 853320.10 Y: 1168431.86

Estación de monitoreo: **E 9**

Cota de fondo: 2107.59 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 2 metros

Ancho máximo: 2.11 metros

Esta estación se encuentra justo antes de un box culvert que esta sobre la vía de la vereda Vilachuaga, precisamente 10 metros más abajo se da confluencia de la quebrada Vilachuaga y San Antonio, en el margen derecho se encuentra la parcelación Rincones de llanogrande, la llanura de inundación principalmente está rodeada por pastos largos.

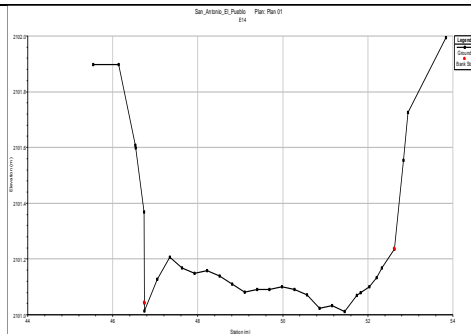
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 2

Coordenadas: X: 854498.20 Y: 1169254.90

Estación de monitoreo: **E 14**

Cota de fondo: 2101.01 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 6.35 metros

Ancho máximo: 2.11 metros

Esta estación se encuentra justo antes de un box culvert que esta sobre la vía que comunica la vía llanogrande con la vía la ceja. La margen izquierda está compuesta por

pastos largos y guaduas, mientras que la llanura derecha se encuentran pastos largos y una vía no pavimentada

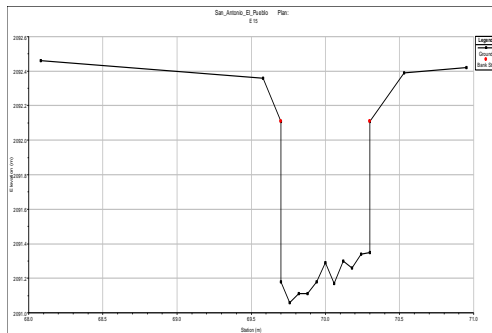
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 3

Coordenadas: X: 852948.74 Y: 1168125.20

Estación de monitoreo: **E 15**

Cota de fondo: 2091.06 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 1.31 metros

Ancho máximo: 0.590 metros

Esta estación se encuentra ubicada aguas abajo de un box culvert que cruza una vía que comunica a San Antonio con Gualanday. Sobre este punto de la quebrada actualmente se está llevando un proceso constructivo de un box culvert que cubriría una longitud importante de la quebrada. Esta sección cambiaría por los efectos que pueda generar la presencia de esta estructura hidráulica.

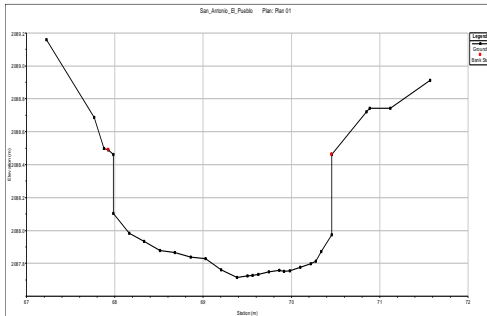
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 3

Coordenadas: X: 855640.491 Y: 1170543.551

Estación de monitoreo: E 16

Cota de fondo: 2087.71 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 0.810 metros

Ancho máximo: 2.47 metros

Esta estación se encuentra justo antes de que la quebrada se convierta en sistema lagunar del parque Comfama, las llanuras de inundación esta conformadas por pastos largos, esta estación está controlada por el nivel del agua de la laguna.

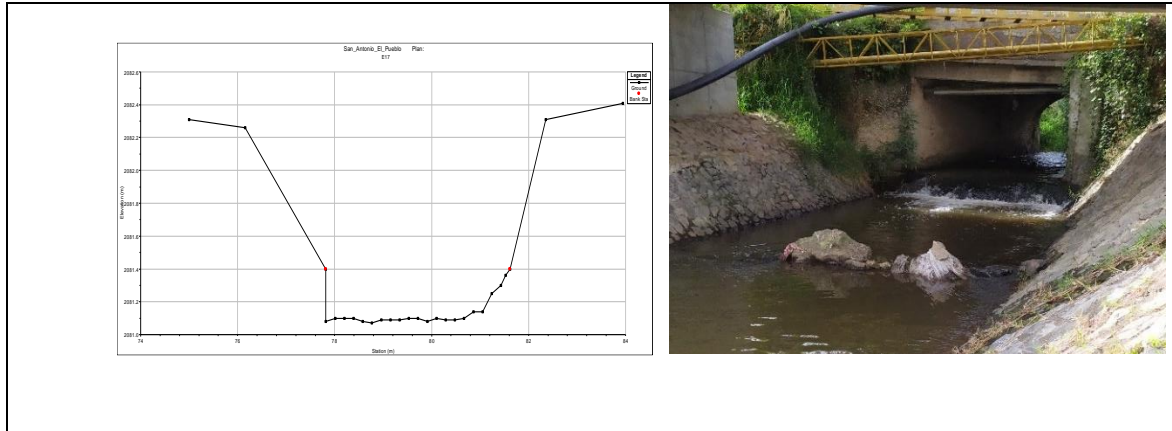
Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 3

Coordenadas: X: 855663.629 Y: 1170952.63

Estación de monitoreo: E 17

Cota de fondo: 2081.07 m.s.n.m

Datos ajustados de campaña monitoreo junio de 2020



Profundidad máxima a banca llena: 2 metros

Ancho máximo: 6.22 metros

Esta estación se encuentra aguas debajo de la descarga de los sistemas lagunares de Comfama. Es la última estación de monitoreo ubicada sobre la quebrada San Antonio, aproximadamente 400 metros aguas debajo de este punto se da la confluencia del Rio negro con la quebrada San Antonio; este tramo se encuentra canalizado por taludes de roca.

#### **4.3.2 Sistemas Lagunares:**

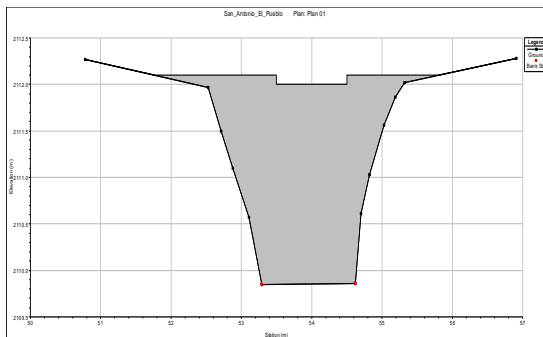
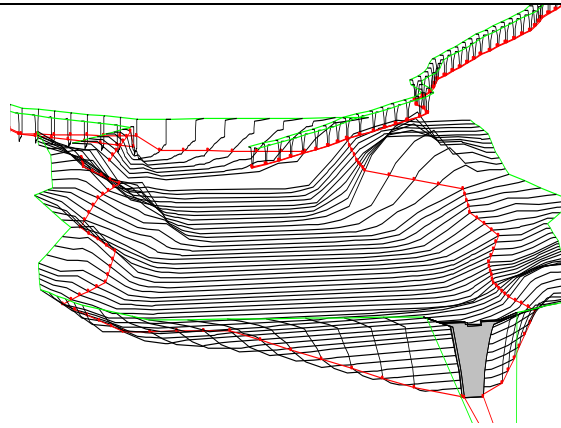
El Flujo de la quebrada San Antonio es interrumpido por la presencia de 2 lagos ubicados en 2 puntos diferentes (Cuenca media y cuenca baja) esta ocupación de cauce de la quebrada San Antonio genera un cambio muy importante en la hidrodinámica de quebrada. Para modelación hidráulica se utilizó un DEM de 10 metros proporcionado por Cornare para exportar la batimetría de los lagos. Este proceso se realizó utilizando Qgis, con su extensión RiverGis, generando un archivo compatible con HEC RAS. A continuación, se presenta la geometría utilizados para los lagos incluidas las estructuras hidráulicas.

**Quebrada San Antonio – El pueblo, Sistema Lagunar Club Campestre**

Coordenadas: Entre las estaciones E 6-2 y E 8



Datos tomados del modelo digital del terreno de 10m de Cornare

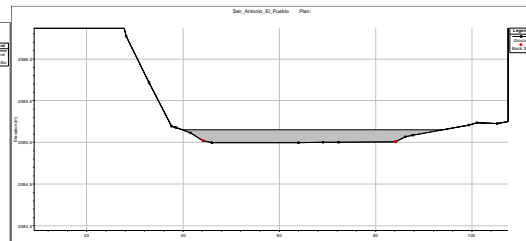
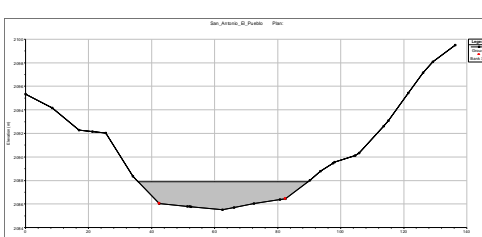
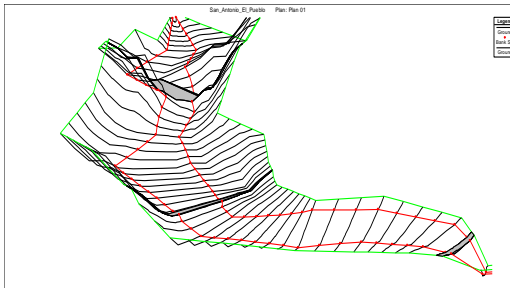


Este sistema lagunar tiene una longitud aproximada de 600 metros, ancho promedio de 130 metros y la profundidad medía 1.8 metros. Dentro de estés sistema convergen la quebrada Cabeceras y San Antonio, la unió de estas dos corrientes se ve afectadas por la presencia de los lagos donde se generan cambios importantes en las secciones próximas a el lago por los efectos de amortiguación de la distribución de velocidades.

### Quebrada San Antonio – El pueblo, Tramo 3 Lagos de Comfama

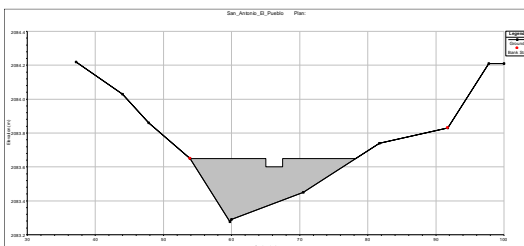
Coordenadas: Entre las estaciones E 16 y E 17

Datos tomados del modelo digital del terreno de 10m de Cornare



Primer Presa

Segunda Presa



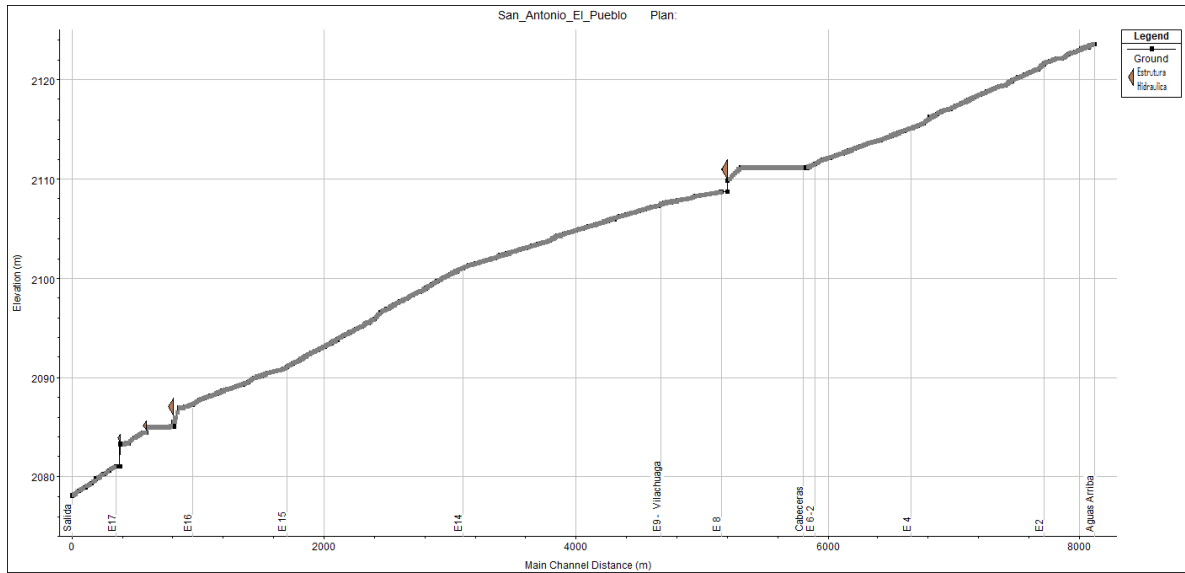
Tercera Presa, Salida Parque Comfama

Este sistema lagunar tiene una longitud aproximada de 480 metros, ancho promedio de 38 metros, su profundidad media es baja, está constituido por tres estructuras hidráulicas que forman 3 lagos conectados por vertederos. El primer lago primer lago funciona como sedimentador, ya que sobre este se depositan los sedimentos que arrastra la quebrada. El segundo Lago tiene un uso estético y tercer lago es usado para navegación de botes pequeños.

#### ***4.3.3 Perfil Longitudinal***

El perfil longitudinal es la línea obtenida al representar las diferencias de alturas desde la cota mayo hasta su desembocadura en el Rio Negro. En la **Ilustración 4** se muestra el perfil de la quebrada san Antonio, en esta se incluyen los puntos donde se tienen las estaciones de monitoreo, además de la unión de las 2 principales corrientes que drenan sobre la quebrada San Antonio, también se pueden identificar 4 estructuras hidráulicas que generan 4 lagos. Este perfil fue construido cada 50 metros horizontales cuyas cotas de fondo se extrapolaron del Modelo de elevación digital.

**Ilustración 4** Perfil Longitudinal de la quebrada San Antonio



**Nota.** Elaboración propia

### 4.3.3.1 Pendientes

La pendiente del cauce es un parámetro muy importante que influye directamente en la hidrodinámica de la quebrada, porque puede determinar la ocurrencia de ciertos fenómenos hidráulicos. En la **Ilustración 5** se muestran las diferentes pendientes de la quebrada sobre el área de influencia de los diferentes puntos de monitoreo. La pendiente media de la quebrada San Antonio es muy baja, su pendiente media es del 0.64%. La pendiente mínima es de 0.0008% justo en el tramo donde se presenta el embalsamiento de la quebrada sobre el Club Campestre y estación E4. Las pendientes mayores se presentan en la parte alta de la quebrada (centro poblado alto del perro) y sobre la zona urbana (E 15 – E 16 ) donde se tiene una pendiente del 1.93%

**Ilustración 5** Pendientes de la quebrada San Antonio

Estación	S (m/m)	S (%)
E2	0.015575	1.5575
E4	0.004121	0.4121
E6-2	0.000008	0.0008
E8	0.001338	0.1338
E9	0.003725	0.3725

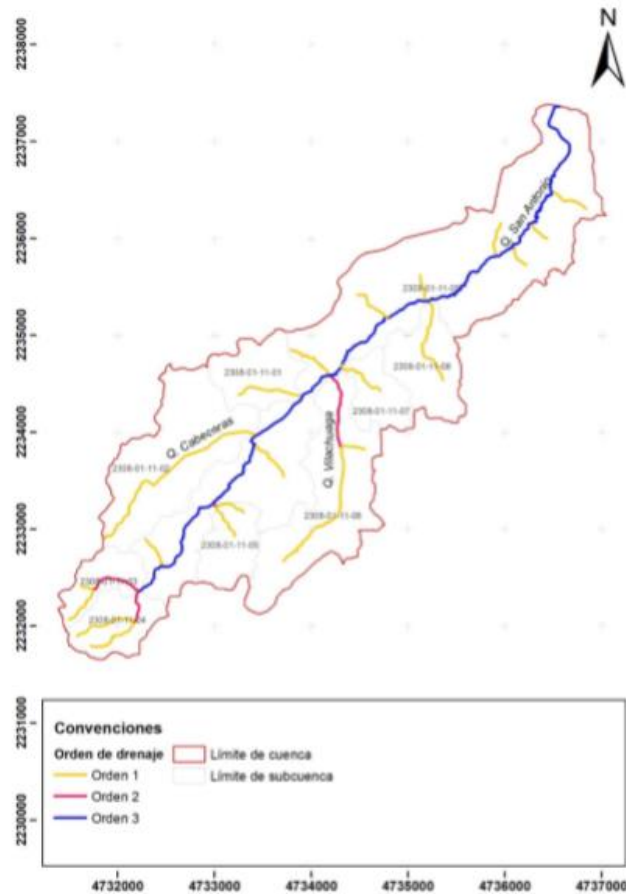
E14	0.005464	0.5464
E15	0.019264	1.9264
E16	0.000541	0.0541
E17	0.007875	0.7875

Nota. Elaboración propia

#### 4.3.3.2 Jerarquía de la Red Fluvial de la Quebrada San Antonio

La jerarquía de las corrientes permite tener conocimiento del desarrollo de la cuenca. En la **Ilustración 6** se presenta el ordenamiento de Horton – Strahler para la cuenca de la quebrada San Antonio. Donde se muestra que la quebrada San Antonio es de orden tres. En el presente trabajo se realizó la modelación hidráulica solo para el tramo donde el orden jerárquico es de tres, es decir la línea de la quebrada delimitada de color azul incluyendo sus dos principales afluentes.

*Ilustración 6* Ordenamiento de Horton- Strahler de la quebrada San Antonio.



Nota. Tomado de Cornare, Informe DIAGNOSTICO PORH quebrada San Antonio, 2021.

## **4. Marco Teórico**

Se exponen los conceptos teóricos que sustentan el desarrollo del trabajo, dando importancia al desarrollo teórico que emplea el modelo hidráulico Hec Ras y los diferentes conceptos que sustentan en el presente trabajo

### **4.1 Cuenca**

La cuenca Hidrográfica es la unidad geográfica e hidrológica formada por una corriente principal y todos sus territorios asociados entre el origen y desembocadura del cuerpo de agua (IUCN), además, la cuenca incluye áreas y diferentes ecosistemas que interactúan con los cuerpos de agua, tanto en su cantidad como en su calidad. Las corrientes que hacen parte de la cuenca se caracterización de acuerdo a la jerarquía, patrón de alineamiento y densidad de drenaje que es posible definir mediante el orden de Horton, sinuosidad y densidad de drenaje, respectivamente (Delgadillo y Páez, 2008).

### **4.2 Flujo de Canales Abiertos**

Los flujos con superficie libre que discurren en terrenos naturales que comúnmente conocemos como ríos, tienen secciones transversales irregulares y variables en el tiempo (Duarte 2009), por tanto los tipos de suelo que se encuentre en su eje principal y llanura de inundación (arcillas, limos, arenas y piedras), definen la hidrodinámica de esta. En la práctica a veces algunos procesos como son efectos de irregularidades en el fondo del cauce del río, vegetación, cambios de pendiente repentinos; entre otros, que sí son relevantes se obvian por la falta de información, pero, se consideran su efecto a través de un único parámetro como por ejemplo el valor de la rugosidad en la fórmula de Manning (Morvan et al., 2008). En una modelación unidimensional lo habitual es considerar el río como una línea, con una serie de puntos de cálculo que son las secciones transversales, de manera que la geometría del cauce es una propiedad de cada punto de cálculo o sección.

#### ***4.2.1 Tipos de Flujos Canales Abiertos***

El flujo en canales se puede clasificar de acuerdo al cambio en las profundidad de flujo con respecto al tiempo y al espacio

##### **4.2.1.1 Flujo Permanente y Flujo No Permanente**

El criterio más importante es el tiempo, se considera permanente cuando la profundidad del flujo es constante en un intervalo de tiempo definido, en otras palabras se considera que el flujo es continuo en el tiempo. Mientras que no permanente se refiere a que se genera un cambio de la profundidad con el tiempo. Este tipo flujo se presenta principalmente en crecientes donde la profundidad cambia en cada instante de tiempo

##### **4.2.1.2 Flujo Uniforme y Flujo Variado**

El criterio más importante es el espacio, es uniforme si la profundidad del flujo es la misma en cada sección del canal, estos flujo pueden ser permanentes y no permanentes según los cambios con respecto al tiempo. El flujo variado se considera cambios en la profundidad de la corriente a lo largo de canal y también se puede clasificar con respecto al tiempo.

#### ***4.2.2 Estado de Flujo***

El estado o comportamiento de flujo está gobernado por la viscosidad y gravedad en relación con las fuerzas inerciales del flujo. El efecto de la viscosidad se pueden presentar flujo laminar, turbulento y mixto en relación con la inercia, de igual manera los efectos gravitaciones donde el flujo puede ser crítico, supercrítico o subcrítico.

##### **4.2.2.1 Numero de Reynolds**

Los efectos de la viscosidad con relación a la inercia se representan por el número de Reynolds, que permite predecir el carácter del flujo laminar o turbulento. Este parámetro se calcula en función de la viscosidad del agua que cambia con respecto a la temperatura. El flujo es laminar

si las fuerzas viscosas son más fuertes con relación a las fuerzas inerciales donde el agua se mueve suaves en líneas de corriente, el valor de Reynolds es menor a 2000. El flujo es turbulento cuando las fuerzas viscosas son débiles con relación a las inerciales, donde las partículas de agua se mueven irregulares sin trayectoria fija, el valore de Reynolds es mayor a 4000. Los valores intermedios entre laminar y turbulento se conocen con transicional o mixto. (Ven Te Chow)

#### **4.2.2.2 Numero de Froude**

El número de Froude representa los efectos de la gravedad sobre el flujo, este es la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas gravitacionales. La clasificación recibida de acuerdo a este parámetro es en función de la gravedad. De acuerdo a valor de Froude se puede establecer si el flujo es crítico, supercrítico y subcritio. El flujo crítico se presenta cuando Froude es igual a uno, por lo que se habla de un flujo inestable de las fuerzas. El flujo subcritico se presenta cuando las fuerzas inerciales son sobrepasadas por las gravitacionales, donde la velocidad del flujo es baja, en este estado el número de Froude es menor a uno. El flujo supercrítico se presenta porque las fuerzas inerciales son dominantes sobre las fuerzas gravitaciones, su velocidad es al alta, donde se presentan condiciones propicias para la formación de resaltos hidráulicos donde el número de Froude es mayo a uno (Ven Te Chow)

#### **4.2.3 Geometría**

La geometría transversal de un canal natural es irregular y en ocasiones con tendencias a formas regulares, por lo que en el análisis hidráulico se simplifican para facilitar los cálculos y poder establecer los diferentes parámetros geométricos del canal. En el caso del Software HEC RAS este no simplifica la sección, porque tiene la capacidad de trabajar con la geometría regular o irregular representados en un plano cartesiano, donde el eje “Y” representa la elevación con respecto al mar y el eje “X” el desplazamiento horizontal sobre la sección.



#### 4.2.3.1 Parámetros Geométricos de una Sección Transversal

La geometría es un parámetro tan importante que esta define completamente la dinámica de un canal, los elementos más importantes según el libro de Ven Te Chow se mencionan a continuación:

**Profundidad ( $y$ ):** representa la distancia vertical desde el punto mas bajo de la sección hasta el nivel del agua.

**Ancho Superior ( $T$ ):** Es el ancho de la superficie libre de la sección transversal.

**Área Mojada ( $A_m$ ):** es el área de la sección transversal ocupada por el flujo y es perpendicular al flujo del canal.

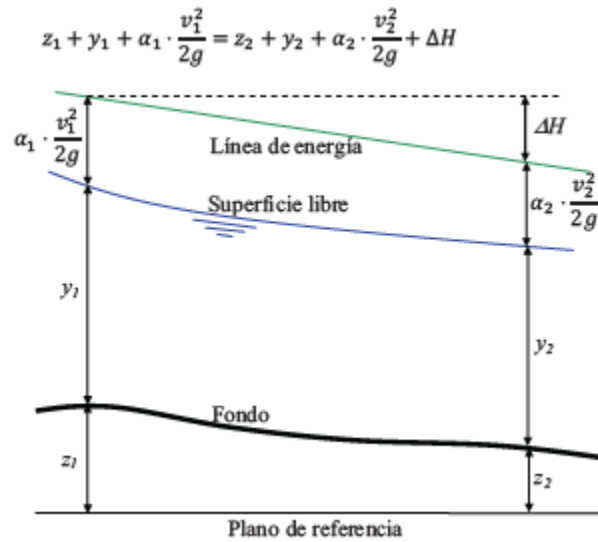
**Perímetro Mojado ( $P_m$ ):** Es la longitud del canal ocupado por el flujo.

**Radio Hidráulico ( $R_h$ )** este parámetro relaciona el área mojada con respecto al perímetro mojado de la sección.

**Profundidad Hidráulica ( $D_h$ ):** Es la relación entre el área mojada y el ancho de la superficie.

#### 4.4 Ecuación de Energía

La ecuación básica para la estimación del nivel del agua en régimen permanente es la ecuación de balance de energía, conocida como el trinomio de Bernoulli (Ven Te Chow). HEC RAS resuelve mediante un proceso iterativo esta ecuación, llamado el método de paso Estándar. Si la sección uno está ubicada aguas arriba y sección dos aguas abajo, se considera el balance de energía entre secciones transversales como se muestra en la **Ilustración 7**: calculados a partir de las condiciones fronteras establecidas previamente

**Ilustración 7 Balance de energía**


Nota. Tomado del manual de HEC- RAS , 2002

Donde:

- $z_1$  y  $z_2$  son la cota de la sección con respecto a un plano de referencia. Esta cota corresponde al punto más bajo de la sección transversal.
- $y_1$  e  $y_2$  son los calados en cada una de las secciones consideradas desde el punto más bajo hasta la superficie libre
- $v_1$  y  $v_2$  corresponden a la velocidad media de cada sección.
- $\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son los coeficientes de Coriolis estimados en cada sección,
- $\Delta H$  pérdidas de energía entre las dos secciones

Las pérdidas están compuestas por pérdidas por fricción y pérdidas locales por contracción o expansión, estas pérdidas esta expresadas por la siguiente ecuación

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

Donde el primer termino representa las pérdidas por fricción, siendo  $L$  la longitud ponderada del tramo del cauce,  $S_f$  la pendiente de fricción o pendiente media de la línea de energía

en el tramo y C es un coeficiente de pérdidas por expansión y contracción que depende si es un cambio suave o brusco.

La longitud pondera de un tramo es calculada considerando las diferencias de longitud entre el cauce principal y ambas llanuras de inundacion, ponderadas por los caudales que transitan por cada una de estas secciones,por lo tanto se tiene:

$$L = \frac{L_{lob}\bar{Q}_{lob} + L_{ch}\bar{Q}_{ch} + L_{rob}\bar{Q}_{rob}}{\bar{Q}_{lob} + \bar{Q}_{ch} + \bar{Q}_{rob}}$$

Donde:

- Llob, Lch, Lrob corresponden a la longitud del tramo correspondientes a la llanura de inundacion izquierda, canal principal y llanura de inundacion derecha, respectivamente.
- Qlob, Qch, Qrob corresponde al caudal medio correspondiente a la llanura de inundacion izquierda, canal principal y llanura de inundacion izquierda, respectivamente.

#### 4.5 Subdivision de la Seccion Para el Calculo del Caudal

El caudal total y factor de transporte para una seccion requiere de la subdivision del flujo. HEC RAS utiliza este enfoque utilizando los puntos donde cambia el numero de maning . El caudal se calcula usando la ecuacion de maning (Ven Te Chow)

$$Q = KS_f^{1/2}$$

$$K = \frac{1.486}{n} AR^{2/3}$$

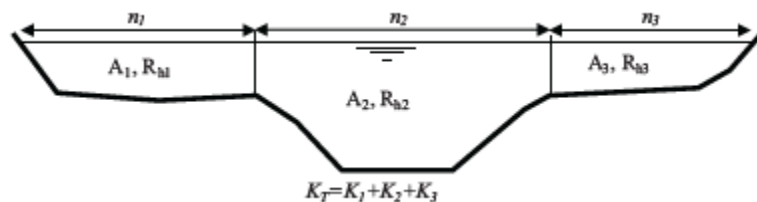
Donde:

- K es el factor de tranporte

- n el coeficiente de rugosidad de Maning
- A el area de flujo
- R el radio hidraulico
- Sf pendiente de la linea de energia

Para determinar el caudal HEC-RAS calcula el caudal correspondiente a cada una de la llanura y el canal principal donde posteriormente la sumatorio será el caudal total de la sección como se muestra en la **Ilustración 8**

*Ilustración 8 Factor de transporte por subdivisiones*



*Nota. Tomado del manual HEC-RAS, 2002*

#### 4.6 Coeficiente de Maning

El coeficiente de maning experimental donde su evaluacion genera un grado muy grande de incertidubre. Existen muchos metodos para estimar este parametro, donde en corrientes naturales este depende de los obstaculos, pendientes irregulares, cursos sinuosos, vegetacion, entre otros (Ven Te Chow)

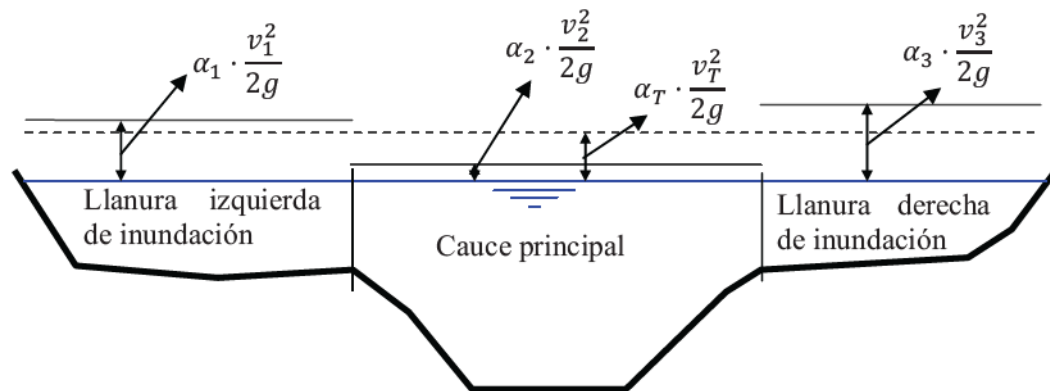
En esta investigacion se calculo este parametro a partir de la ecuacion de maning que esta en funcion de diferentes variables, como el radio hidraulico, la pendiente, el area y el caudal, los cuales se pudieron establecer a partir de los aforos disponibles. Conociendo todas las variables de la ecuacion de Maning se despejo el coeficiente, quedando la ecuacion asi:

$$Q = \frac{1}{n} * A * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{0.5} \leftrightarrow n = \frac{A * R_h^{\frac{2}{3}} * S^{0.5}}{Q}$$

#### 4.7 Calculo de la Energia Cinetica y Coeficiente de Coriolis

La distrucion de velocidad en un canal depende de factores como la rugosidad y curvas. Como resultado de la distribucion no uniforme de la velocidad en una seccion la carga de velocidad generalmente es mayo al valor calculado por lo que aparece el coeficiente de Coriolis que corigue la carga de velocidad. HEC RAS usa una aproximacion de este parametro donde se pondera la energia cinetica en una seccion. Para ello resulta necesario establecer las subdivisiones del canal principal y cada una de las llanura de inundacion como se muestra en la **Ilustración 9**

*Ilustración 9 Energía cinética ponderada*



*Nota. Tomado de libro de hidráulica Blade*

El calculo de este parametro se basa en la siguiente ecuacion

$$\alpha_T = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{K_i^3}{A_i^2}}{\frac{K_T^3}{A_T^2}}$$

Donde:

- K1, K2 y K3 corresponden al factor de transporte de la llanura de inundación y canal principal
- A1, A2 y A3 son las áreas mojadas que corresponde a cada una de la zonas
- KT es el factor total de transporte

- AT es el área mojada total

De la ecuación de Bernoulli se define el concepto de energía específica que relaciona la profundidad y la carga de velocidad con el factor de Coriolis, como se muestra en la siguiente ecuación

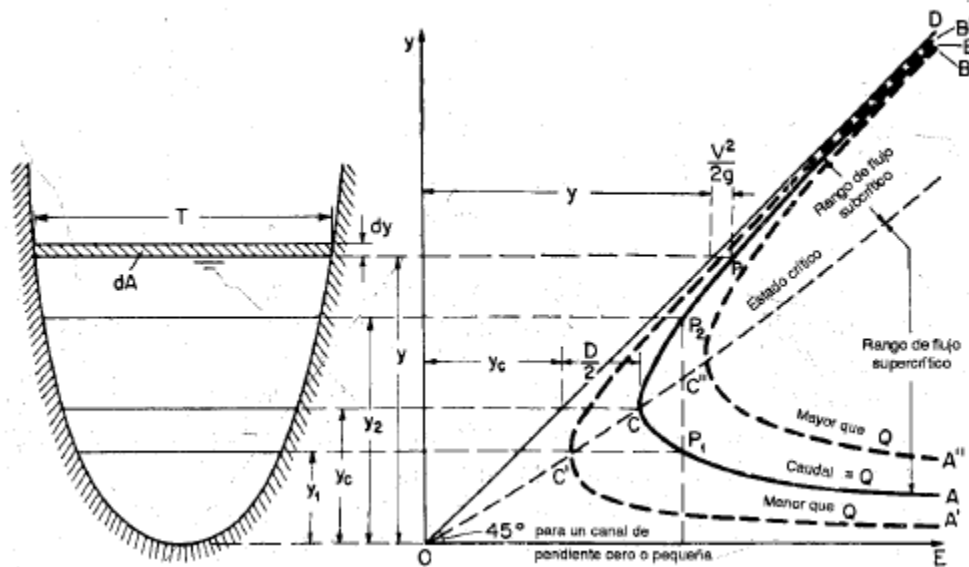
$$E = y + \alpha \cdot \frac{v^2}{2g}$$

Escribiendo la energía en función del caudal y área mojada, se observa que la energía específica depende del caudal y el calado

$$E = y + \alpha \cdot \frac{Q^2}{2 \cdot A^2(y) \cdot g}$$

Si el caudal es constante se puede estudiar como varía la energía específica en función del calado del agua. Esta curva es asintótica al eje horizontal, es decir, que para calados cercanos a cero, la energía tiende a infinito, mientras que para calados muy grandes la energía específica es asintótica a la bisectriz del primer cuadrante, es decir que la velocidad del flujo tiende a cero por lo que la energía será igual al propio calado como se observa en la **Ilustración 10**, Dicha tendencia implica la existencia de un calado al cual corresponde la energía específica crítica y calado crítico ( Sanches,, Blade ,2005)

**Ilustración 10** Variación de la energía específica



*Nota. Tomado del libro de Ven Te Chow*

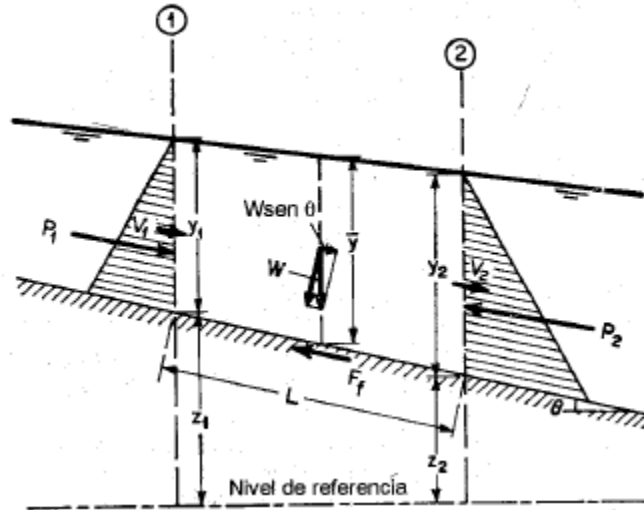
El número de Froude de la energía específica mínima es igual a uno por lo que se termina definiendo que para calados mayores al la calado crítico le corresponden números de Froude menor a la unidad, es decir flujo subcrítico, Mientras que para valores menor al calado crítico el número de froude será mayor a la unidad por lo que corresponde a flujo supercrítico (Puertas & Sánchez, 2000)

#### 4.8 Ecuación de Cantidad de Movimiento

En el caso que el flujo pase por condiciones críticas, este deja de ser gradualmente variado y pasa a ser rápidamente variado. En dicha situación la ecuación de energía deja de ser aplicada. Este tipo de cambio se presenta en ciertos cambios de pendientes, contracciones bruscas provocadas por ejemplos por la presencia de puentes o confluencias de flujos (Ven Te Chow). Para estos casos HEC RAS utiliza la ecuación empírica llamada ecuación de momentum, esta ecuación se obtiene al aplicar la segunda ley de Newton aplicada en dirección del flujo, utilizando un volumen de control entre dos secciones definidas como se muestra en la **Ilustración 11**

$$P_{2x} - P_{1x} + W_x - F_f = \rho \cdot Q \cdot (\beta_2 \cdot v_2 - \beta_1 \cdot v_1)$$

*Ilustración 11 Variación de la energía específica*



*Nota. Tomado del libro de Ven Te Chow*

Donde:

- $P_{1x}$  y  $P_{2x}$  son las componentes de la dirección de movimiento del distribución de la presión hidrostática
- $W_x$  es la componente del peso del volumen de control.
- $F_f$  es la fricción del flujo
- $Q$  es el caudal que transita
- $\rho$  es la densidad del agua en función de la temperatura
- $V_1$  y  $V_2$  la velocidad para cada una de las secciones
- $\beta_1$  y  $\beta_2$  son respectivamente los coeficientes de Boussinesq

El coeficiente de Boussinesq se calcula dividiendo las secciones y realizando un promedio ponderado aplicando la siguiente ecuación



$$\beta_T = \frac{\sum_{i=1}^3 \frac{K_i^2}{A_i}}{\frac{K_1^2}{A_1}}$$

#### 4.8.1 Presión Hidrostática

La componente resultante de la presión hidrostática en dirección del flujo se define por:

$$P_{ix} = \gamma \cdot A_i \cdot \bar{Y}_i \cdot \cos \theta \text{ donde } i = 1,2$$

Donde:

- A corresponde al área mojada
- Y es la profundidad media de la sección
- $\gamma$  el peso específico del agua
- $\theta$  es el ángulo del canal con el eje horizontal

Esta hipótesis de distribución hidrostática de presiones solo es validad para pendientes menores de  $10^\circ$ , donde el valor de  $\theta$  sea aproximadamente uno, por lo que el empuje hidrostático de la presión será:

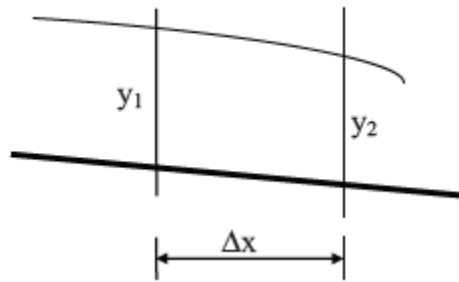
$$P_1 = \gamma \cdot A_1 \cdot \bar{Y}_1$$

$$P_2 = \gamma \cdot A_2 \cdot \bar{Y}_2$$

#### 4.9 Metodología de Cálculo de HEC – RAS, Paso Estándar

El proceso de calculo del modelo hidráulico HEC-RAS se basa en el desarrollo del balance de energías a partir del trinomio de Bernoulli dado dos secciones separadas una distancia  $\Delta x$ , como se muestra en la **Ilustración 12**

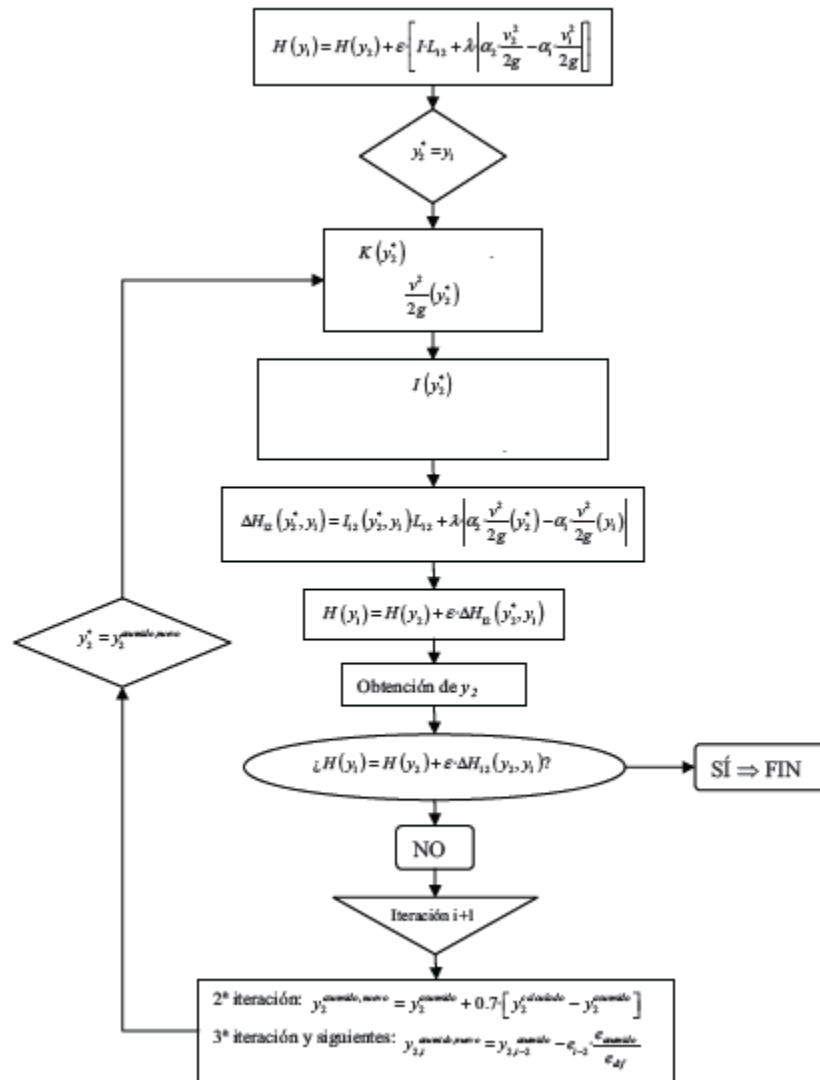
**Ilustración 12** Variación de la energía específica



*Nota. Tomado del libro hidráulica de Bladé*

A partir de este punto, el software valida las condiciones de frontera ingresados en la sección ( $y_1$ ) pretendiendo calcular el perfil de la superficie libre aguas abajo, se inicia con el calado conocido ( $y_1$ ) asumiendo un valor  $y_2^*$ , para este valor se calcula el área mojada, velocidad media, radio hidráulico y factor de transporte, después de este cálculo se procede a calcular las pérdidas entre las dos secciones. Substituyendo cada uno de los elementos en la ecuación de energía, se verifica si el balance de energía se cumple, si ambos miembros de la ecuación son iguales el proceso iterativo termina. En caso que sea diferentes es necesaria una nueva iteración, determinando un nuevo valor  $y_2$  para poder continuar con el proceso iterativo. En la **Ilustración 13** se muestra el proceso iterativo usado por HEC-RAS para la resolución de la ecuación de balance de energía.

**Ilustración 13** Procedimiento de cálculo seguido por HEC-RAS



Nota. Tomado del Libro de Bladé

La primera iteración que realiza el algoritmo diseñado por HEC-RAS parte de la proyección del calado conocido en la primera sección sobre la siguiente, esto permite calcular un primer valor que tendrá un error asociado. La segunda iteración inicia aumentando el 70% el valor de error calculado en la iteración anterior. La tercera y siguiente iteraciones se realizan mediante la aplicación del método de la secante que consiste en proyectar una proporción de la diferencia obtenida entre los niveles de agua calculados y asumidos de las primeras dos iteraciones (Bladé).

HEC-RAS esta limitado en las iteraciones, por defecto el programa realiza 20 iteraciones, pudiendo modificarse por 40 iteraciones. Si el algoritmo completa las iteraciones establecidas y no se encuentra convergencia, el programa determina que el valor de la lámina será la del menor error entre los valores asumidos previamente y los calculados. Este valor es llamado en el software como “lámina de agua de mínimo error”.

#### **4.10 Sistemas de Información Geográficos**

Los sistemas de información geográfico permiten analizar, gestionar y manipular datos espaciales georeferenciados, para la planificación de información que busque solucionar un problema (Buitagro, 2018). Los SIG no son en principio un instrumento para la simulación del modelo matemático, ya que no se prestan con facilidad a estudios dinámicos al no disponer de representación explícita de la variable tiempo (ecuación diferenciales que gobiernan la hidráulica) (Molero & Hernández 2021), sin embargo es una herramienta que facilita el pre y pos proceso de la información espacial que maneja el modelo HEC RAS.

##### **4.10.1 Qgis**

Qgis es un sistema de información Geográfico libre y de código abierto, donde se puede visualizar, gestionar, editar y analizar datos. Qgis es un proyecto oficial del Open Source Geospatial Foundation (OSGeo). Este Software admite datos raster y vectoriales (Qgis)

##### **4.10.2 RiverGis**

Es una extensión para Qgis diseñada para la creación e importación de geometría para el modelo HEC-RAS, de forma que se puedan importar las secciones creadas a partir de Modelos Digitales del terreno. Esta extensión es gratuita y cumple la misma función que el complemento de Arcgis llamado GeoHecRas. RiverGis crea un archivo para importar a HEC-RAS que incluye la geometría del terreno el cauce del río, georeferenciando cada uno de los puntos.

#### ***4.10.3 PostGis y PostgreSQL***

Es un módulo que añade soporte de objetos geográficos a las bases de datos PostgreSQL convirtiéndolas en una base de datos espacial para el uso con los sistemas de información geográfica.

### **5. Metodología**

Para cumplir los objetivos propuestos se plantearon cuatro fases que permitieron el desarrollo del presente trabajo.

# FASES DE LA INVESTIGACIÓN



## FASE 1: RECONOCIMIENTO

Se realizaron salidas de campo con el objetivo de conocer la quebrada objeto de estudio, se identificaron los puntos de interés y las particularidades de la quebrada, además de los tipos de suelo que esta compuesto su lecho

## FASE 2: BUSQUEDA DE INFORMACIÓN

Se realizó una búsqueda en las bases de datos con el fin de recopilar información bibliográfica de diferentes modelaciones hidráulicas. Además de organizar la información suministrada por el equipo del PORH de la quebrada San Antonio, Comare.



## FASE 3: CONSTRUCCIÓN

Se ingreso la información que requiere el modelo HEC-RAS, como la geometría, estructuras hidráulicas, condiciones de fronteras, caudales definidos, entre otros parámetros. Finalmente se corrió el modelo y se reviso que los resultados obtenidos sean acordes a la dinámica de la corriente

## FASE 4: ANÁLISIS DE RESULTADOS

En esta fase se analizaron los resultados y se identificaron los principales cambios que se generaron en la dinámica de la quebrada por la presencia de los lagos del club llano grande y Comfama.



Después de cumplir las dos primeras fases, donde se hizo el reconocimiento de la quebrada y se organizó el material requerido para la modelación, se inició la fase de construcción de la modelación. El esquema de trabajo consta de tres pasos:

- Un **PREPROCESO** (trabajo previo con Qgis y RiverGis), para generar un archivo de importación en HEC-RAS que va contener la información geométrica de la quebrada y la georreferenciación de la misma.
- **PROCESO** dentro de la interfaz de HEC-RAS, para ingresar los caudales y condiciones de frontera.
- **POSTPROCESO** que consiste en exportar los resultados arrojados en la modelación

### 5.1 Pre Proceso

Los sistemas de información Geográfico son una herramienta que facilita el pre proceso de la información espacial que maneja el modelo hidráulico HEC RAS. Esta conexión SIG con el modelo HEC RAS permitió conectar directamente la geometría de la quebrada San Antonio con el DEM, donde los puntos más importantes de esta conexión estaban en obtener la batimetría de los sistemas lenticos que se tiene sobre la quebrada San Antonio y el perfil longitudinal de toda la corriente. La geometría de las secciones transversales correspondio a la información obtenida del

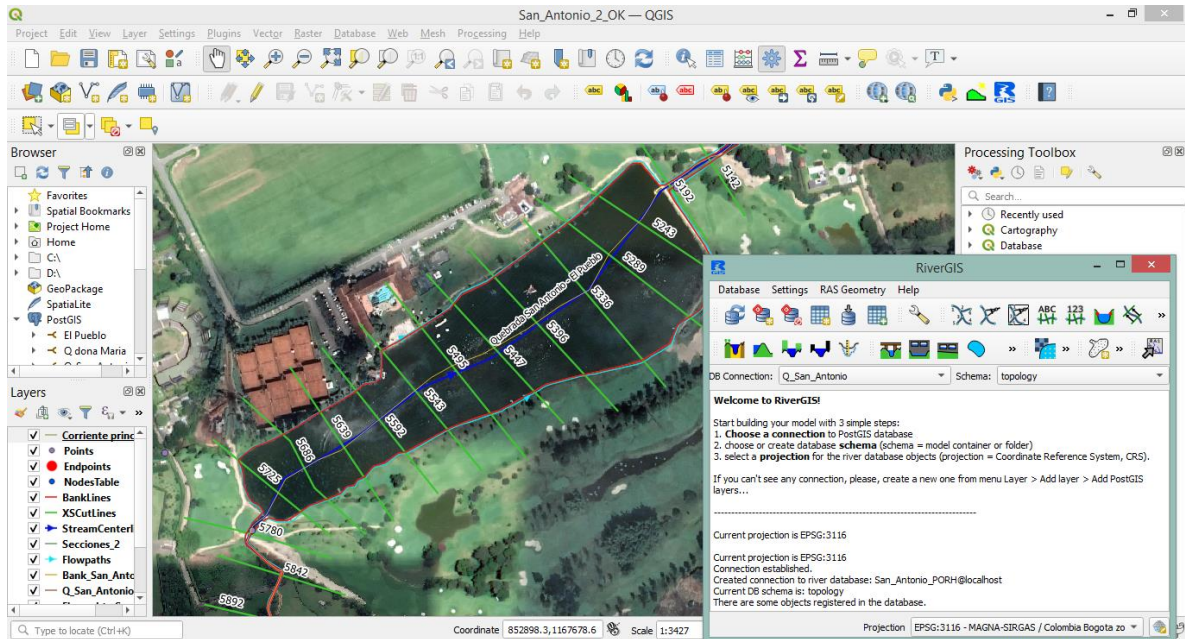
procesamiento del Modelo de Elevación Digital, pero claramente eran secciones transversales que no se ajustaban a la realidad por las dimensiones de la quebrada y el tamaño de pixel del DEM (10m), por lo que estas secciones se modificaron de acuerdo a la información batimétrica recolectadas en la campaña de monitoreo desarrollada el seis de octubre de 2020, usando las cotas de fondo obtenidas del DEM. La geometría de los lagos se conservó de acuerdo a la extrapolación obtenida.

Toda la información necesaria fue suministrada por Cornare, como el DEM con un tamaño de pixel de 10 metros, mapas de la cuenca con sus drenajes y puntos de monitoreo además de los aforos históricos disponibles de la red de monitoreo de esta quebrada; se dispusieron de 4 aforos para periodos de tiempo diferentes (20/Nov/2018, 18/Feb/2019, 06/Oct/2020, 06/Jul/2021). Esta información fue necesaria el procesamiento de la información e implementación del modelo hidráulico.

Inicialmente se creó una base de datos espacial en PostgreSQL la cual se conectó con QGis creando una capa PostGis. Una vez creada esta conexión se carga la base de datos en la extensión RiverGis y se genera la conexión con la base de datos quedando activa la opción de RiverGis que permitió iniciar el modelo donde se realizaron diferentes líneas como el cauce principal, bancas, secciones transversales y centroide del flujo. En la **Ilustración 14** se muestra el proceso mencionado, donde se observan las diferentes capas y la conexión de RiverGis con la base de datos espacial lista para exportar el archivo que es compatible con HEC-RAS



*Ilustración 14 Pre Proceso de la información topológica*



*Nota. Elaboración propia*

## 5.2 procesamiento en el interfaz de HEC-RAS

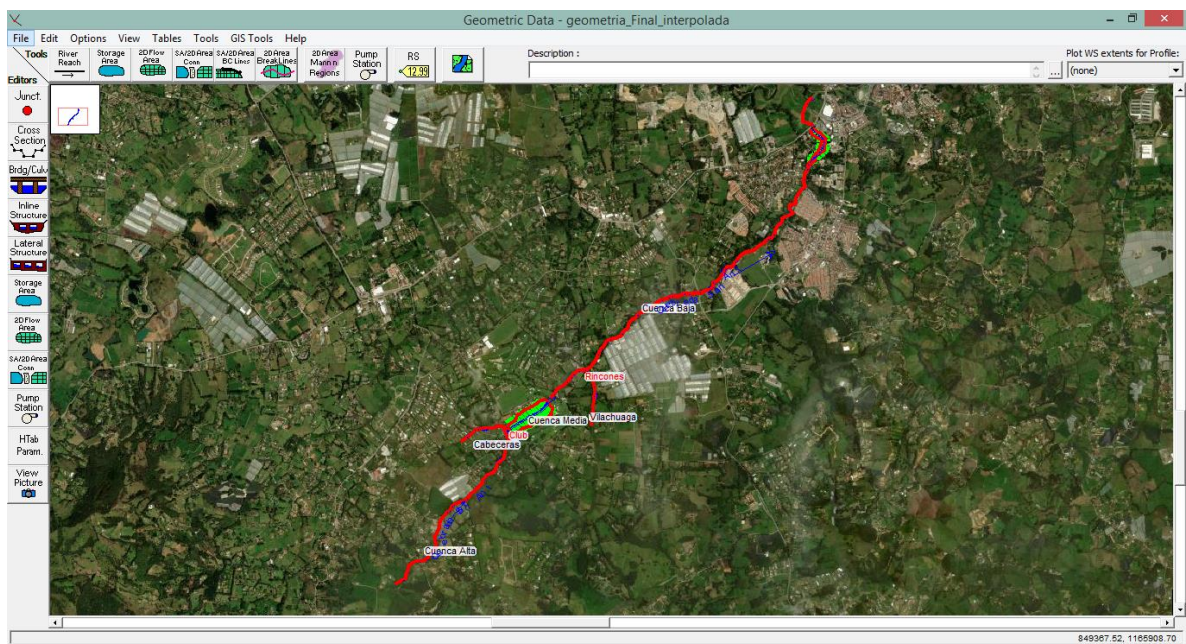
Al momento de realizar la conexión de HEC RAS con la información topológica de la quebrada y modificación respectivas a las secciones transversales de los puntos de aforos, se procedió a realizar interpolaciones de la geometría entre cada una de los puntos medidos en campo, esto se realizó para garantizar que el modelo represente adecuadamente las condiciones de la quebrada disminuyendo errores, porque el modelo matemática realiza los cálculos de sección a sección. El modelo HEC RAS permite también Incluir estructuras hidráulicas como las presas de los diferentes lagos, como se muestra en la **Ilustración 15**, permitiendo de esta manera representar adecuadamente las condiciones actuales de la quebrada San Antonio y sus dos principales afluentes. Para garantizar que la información geometría fuera apropiada para la modelación se generó secciones intermedias por medio de la herramienta interpolar de HEC-RAS cada 10 metros.

La simulación se realizó en flujo permanente por lo que se requiere seleccionar la cantidad de perfiles a ensayar, en este caso se tendrán siete perfiles diferentes asociados a datos obtenidos

en campañas de monitoreo y establecidos a partir del modelo Hidrológico suministrado por Cornare. Estos Caudales se ingresaron al modelo HEC RAS teniendo en cuenta balances de masas, determinando los puntos donde drenan las corrientes menores. Estos puntos se identificaron usando el mapa de la cuenca completa, donde se observan los drenajes de toda la cuenca de la quebrada San Antonio.

Las condiciones de contorno se necesitan para establecer la superficie de agua inicial en el extremo del sistema, aguas arriba y aguas abajo. El modelo permite agregar diferentes opciones, pero de acuerdo a la información disponible la condición de frontera seleccionada fue la profundidad normal, donde se introduce la pendiente aguas arriba y aguas abajo de la corriente. Como la modelación se realizó en condiciones de flujo mixto es necesario las dos condiciones de frontera para el modelo poder validar un cambio de régimen de flujo. Finalmente, ingresada toda la información necesaria en el modelo se hace correr el modelo utilizando la herramienta para el cálculo de flujo permanente.

*Ilustración 15 interfaz de HEC RAS, Geometría de la quebrada San Antonio*



*Nota. Elaboración Propia*

### 5.3 Calibración del Modelo

La constante de Manning es una forma de expresar la cantidad de resistencia al movimiento del agua en cauces naturales o artificiales. Este coeficiente de resistencia al flujo es muy variable porque depende de una serie de factores como la vegetación, irregularidad, obstrucciones, nivel, caudal, régimen de circulación, entre otros. (Córdova Webster et al., 2018). Por lo que esta constante permitirá ajustarse de tal manera que se modelen las condiciones reales de la fuente. El procedimiento para la calibración del modelo se realizó variando el coeficiente de Manning de cada una de las estaciones de monitoreo. Para establecer el valor de “n” que permitan que los niveles del agua simulados coincidan con los valores de la lámina de agua obtenidos en el aforo del 2021. Para tener una primera aproximación al coeficiente de rugosidad se utilizó la ecuación Manning que utiliza datos como el caudal, área mojada, perímetro mojado y pendiente del tramo, los cuales fueron datos conocidos teniendo como una variable incógnita, la constante “n”, esto para encontrar un primer valor que se acerque a la realidad de la quebrada. Al encontrar este valor se procedió a establecer diferentes valores cercanos al inicial hasta encontrar el valor que cumplan la condición del nivel de agua para el caudal de aforo de calibración, esto implicó correr el modelo en varias ocasiones hasta encontrar este valor. El valor encontrado en cada una de las estaciones se estableció para cada uno de los tramos. En el caso de los lagos se encontró que el número de Manning no es un valor relevante porque el nivel de lago está establecido por la estructura de control. Cumplido este proceso el modelo se encuentra calibrado por lo que se procede a validar que la variación de niveles y caudales no sean significativas para otros escenarios, en este caso se usaron los aforos realizados por Cornare el 10 de junio de 2021, porque es un escenario diferente del cual se tomó la geometría de cada una de las secciones, además, este aforo es el más reciente

además, se encontró que la geometría de este aforo no varía demasiado con respecto al realizado el 6 de octubre de 2020. Con respecto a los aforos del 20 de noviembre de 2018 y 18 de Febrero de 2019; la geometría presenta cambios muy marcados por lo que se descartó para la calibración. La calibración realizada permitió definir que el error asociado fue de ( $\pm 3$  Cm) lo que permitió establecer que el error en el calado arrojado por el modelo no varía demasiado con respecto a los niveles medidos en Campo.

## 6. Resultados

El Coeficiente de rugosidad de la ecuación de Maning no se debe definir exclusivamente por la rugosidad de la superficie que posee el lecho del canal que compone el perímetro mojado. Como ya se mencionó este coeficiente está influido por diversos factores. Para la quebrada San Antonio, se encontró que los números de Maning hallados a partir de los aforos (caudal y forma del perímetro mojado) no se ajustan a los valores típicos de literatura.

En *Ilustración 16* se presentan los valores de Maning obtenidos a partir de los aforos disponibles, donde para los diferentes monitores se observa un cambio representativo entre cada una de las mediciones realizadas en diferentes periodos de tiempo. Estos permiten identificar que en la corriente se presentan fenómenos físicos de sedimentación que pueden disminuir el valor  $n$  o socavación que por los contrarios aumentan este valor. Pero también el incremento de radio hidráulico puede aumentar o disminuir este parámetro (Ven Te Chow).

*Ilustración 16* Calibración de constante de maning

Estación	n Aforo 2018	n Aforo 2020	n Aforo 2021	n calibrado
E2	0.0517	0.1310	0.0243	0.1371
E4	0.0662	0.0574	0.0720	0.0577
E6-2	0.0344	-	-	0.0577
E8	0.0231	0.0373	0.0138	0.0247
E9	0.6259	0.3000	-	0.3086
E14	0.0473	0.0555	0.0945	0.1733
E15	0.1917	0.1183	0.1596	0.0970

E16	0.0173	0.0536	0.0115	0.0536
E17	0.0759	0.0547	0.0344	0.0550

*Nota. Elaboración propia*

La estación E9 es un punto crítico que se ven reflejados en el valor de Maning, porque es el valor más elevado, esto se presentan por las particularidades que afectan el flujo del agua en este tramo. Unos pocos metros aguas abajo de esta sección se presenta la confluencia de la quebrada San Antonio con la quebrada Vilachuaga que vierte sus aguas por medio de una estructura hidráulica de una empresa de flores, que genera una caída o chorro de 2 metros aproximadamente, este vertedero tiene una dirección de descarga que genera un contraflujo en la corriente principal lo que afecta la dinámica de la corriente, incrementando también el coeficiente de maning. Esta misma sección también está afectada por un box culvert que representa una obstrucción en el flujo como se muestra en la **Ilustración 17**, este es un factor que influyen sobre el número de Maning (Ven Te Chow).

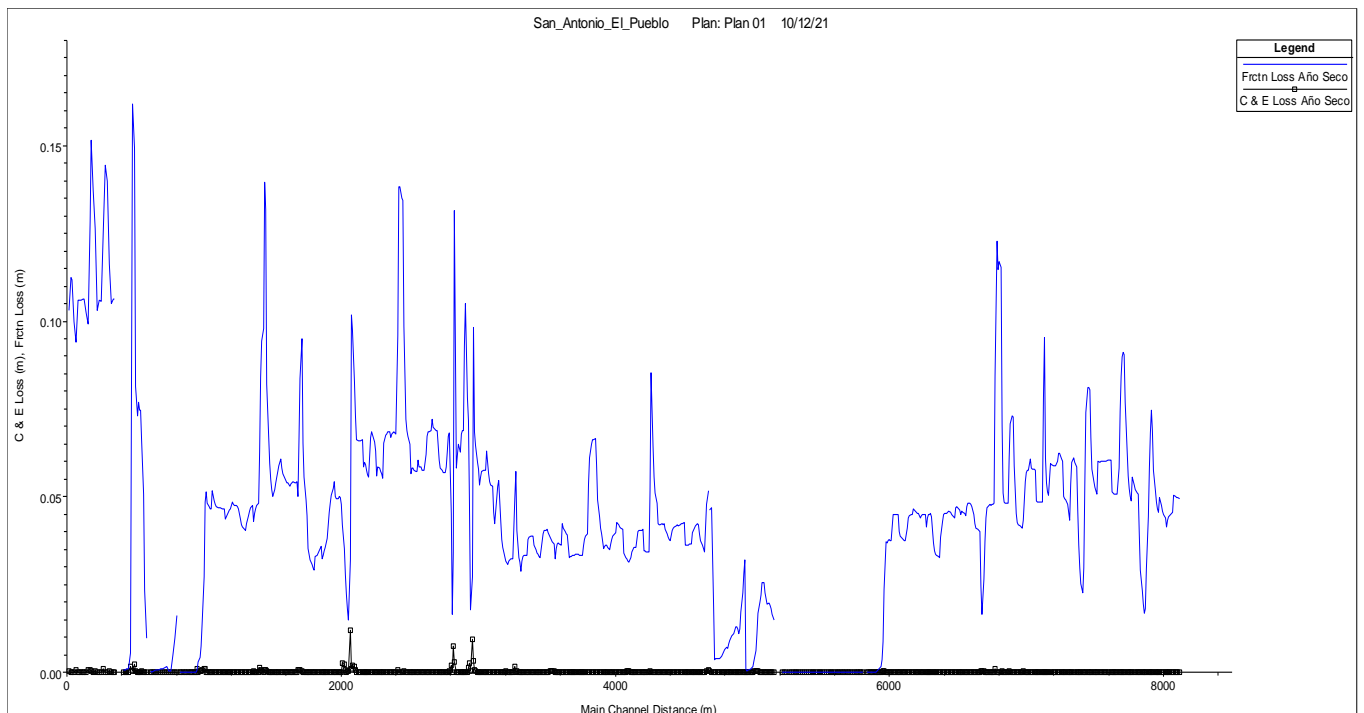
*Ilustración 17* Confluencia de la Quebrada Vilachuaga y San Antonio



*Nota. Salida de campo 6 de julio de 2021, imágenes tomadas por Ing Leonardo Garcia.*

Las pérdidas presentes en la corriente esta representadas por las pérdidas por fricción asociadas al número de maning y las pérdidas locales que se relacionan con las contracciones y expansiones entre dos secciones transversales. Según los resultados de la modelación las perdidas más importantes están asociadas a las perdidas por fricción como se muestra en la **Ilustración 18** donde las perdidas locales son menos importantes. También se observa que en los tramos donde se presentan los sistemas lagunares las pérdidas son cero; esto se debe al control que ejerce el vertedero en cada uno de los sistemas lenticos. Solo se muestran las pérdidas para condiciones secas ya que el comportamiento para los diferentes escenarios no muestra variaciones significativas, porque cambian en función del caudal, es decir a mayor flujo el incremento es mayor sin afectar las tendencias con respecto al escenario de caudal seco.

**Ilustración 18** Pérdidas por fricción y locales

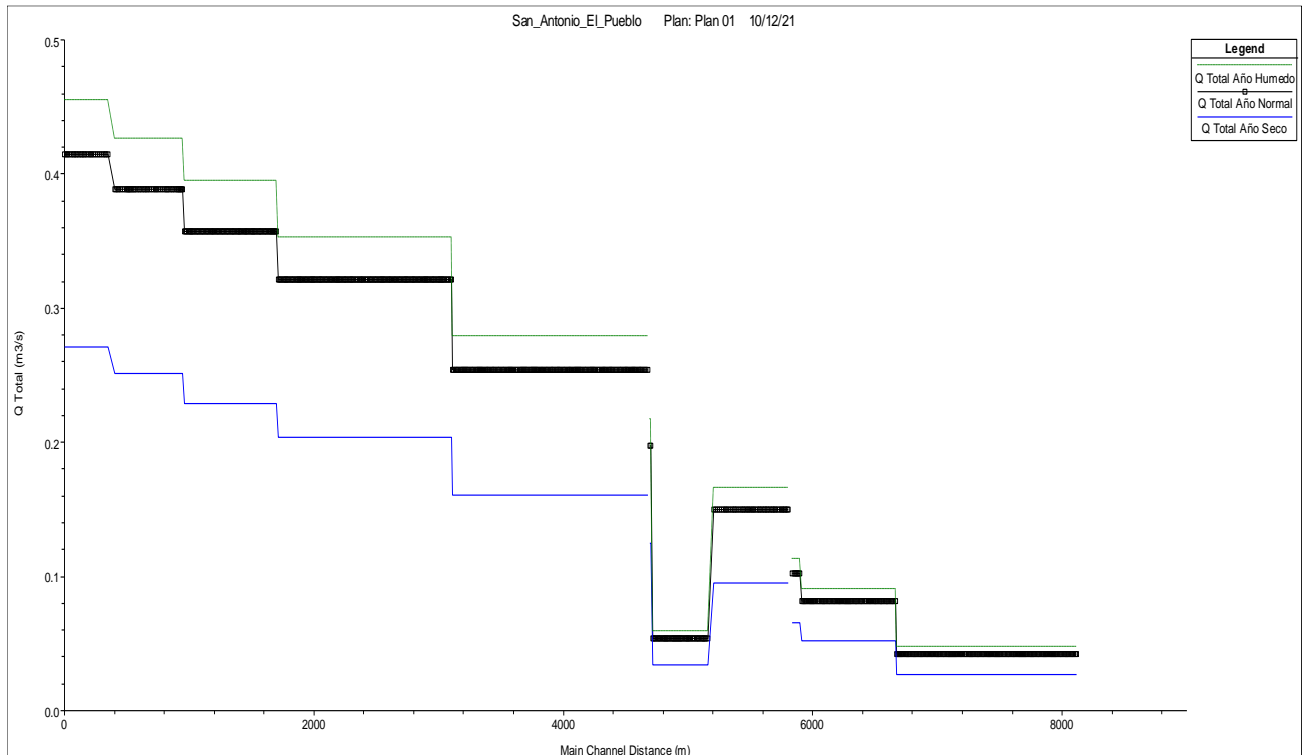


**Nota. Elaboración propia**

Los picos que se muestran en la imagen están relacionados con cambio de caudal sobre la quebrada San Antonio, al ser cruzada la **Ilustración 18** con la **Ilustración 19** se puede observar que en

los puntos donde el caudal aumenta las pérdidas aumenta. Esto se debe a que en la unión de dos corrientes se presentan pérdidas que posteriormente tiende a estabilizarse. Las pérdidas mayores se observan en el tramo final de la corriente, esto se presenta por la influencia del vertedero de ultimo lago de Comfama y las características físicas de este tramo que se encuentra canalizado.

**Ilustración 19** Caudales hidrológicos



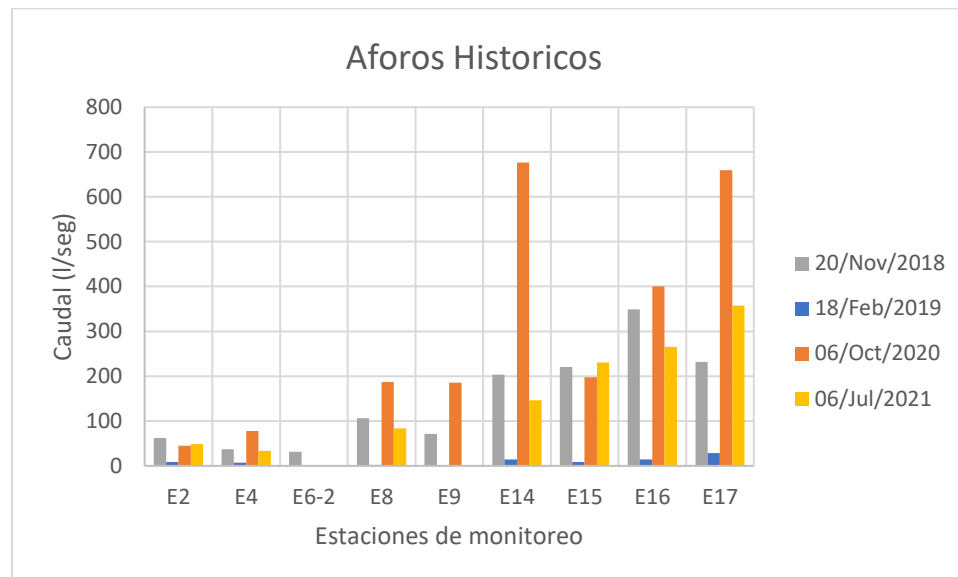
*Nota. Elaboración Propia con Informe DIAGNOSTICO PORH quebrada San Antonio, 2021.*

En la **Ilustración 19** se presentan los cambios de caudales en función de la longitud de la quebrada donde el cero es el cierre de la quebrada y el valor mayor la parte alta de la quebrada expresada en metros. Se observan que el caudal aumenta en medida que el agua discurre, pero se observa una disminución en el caudal en la parte media, este fenómeno ocurre por el vertedero del Club Llanogrande que controla la cantidad de agua que sale del lago, por lo que se genera una retención importante de flujo, para garantizar los niveles de agua del lago. Las líneas rectas representan flujo permanente en un tramo, es decir caudal constante, los cambios de caudal

representan los balances de masas realizados por aportes de fuentes menores, donde el caudal aumenta o disminuye si se presentan aportes y retiros de agua de la quebrada.

Los aforos realizados muestran los efectos que se mencionaron anteriormente donde el caudal de la quebrada tiene una disminución entre las estaciones 8 y 9 como se puede evidenciar en la **Ilustración 20**. El año más crítico de la quebrada en términos de cantidad de agua fue el año 2019, donde los caudales están muy por debajo de las demás mediciones. El año donde se presentó mayores caudales fue el 2020 donde la gráfica de color naranja muestra un aumento grande en la estación 14 y disminución considerable en la siguiente estación, estos desde el punto de vista teórico no es correcto porque no se encontraron captaciones en este tramo. Por lo que este valor se asocia a un error experimental.

**Ilustración 20** Caudales Históricos



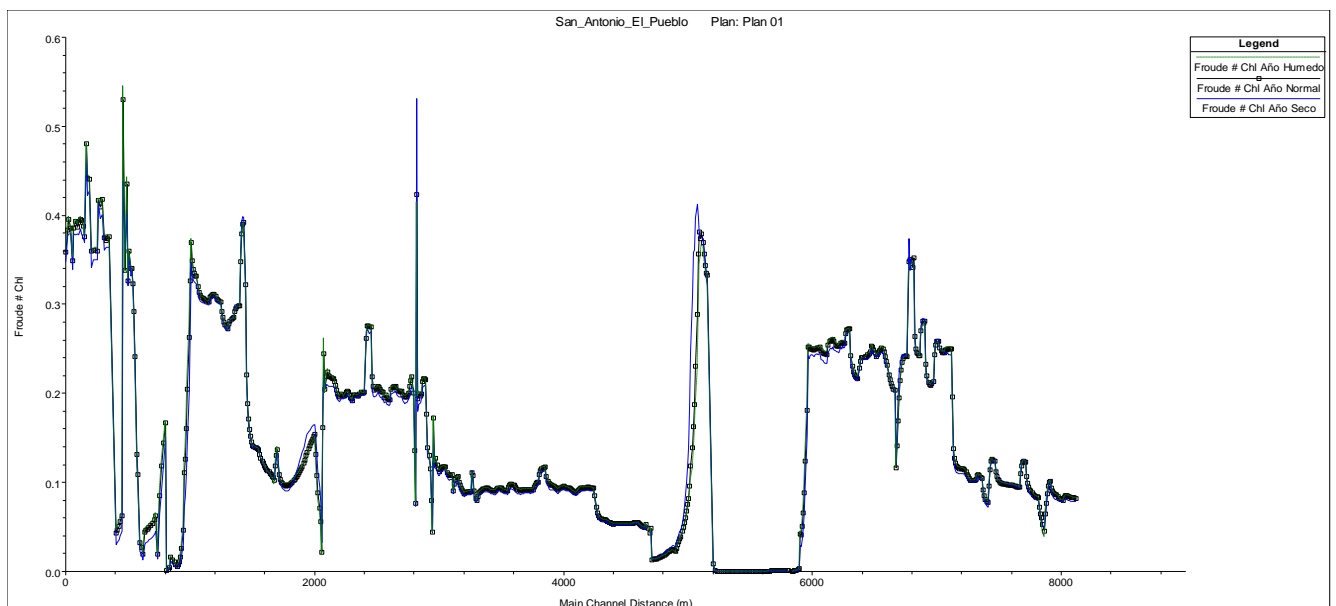
**Nota.** *Elaboración propia con información de la red de monitoreo suministrada por Cornare*

Las corrientes naturales tienen clasificaciones especiales que relacionan las fuerzas inerciales (movimiento) con las fuerzas gravitacionales (Duarte C. 2009), donde el flujo puede ser crítico, subcrítico o supercrítico esta clasificación se establece a partir de un parámetro adimensional llamado número de Froude. La modelación de la quebrada San Antonio se encontró



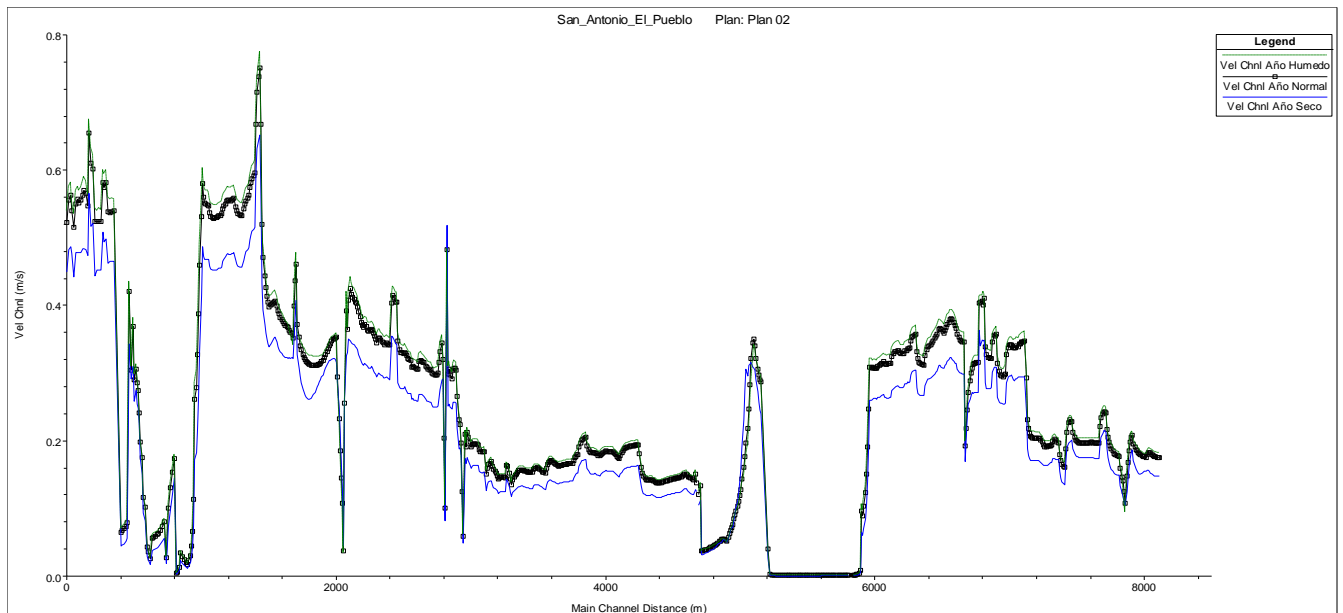
que el flujo de la quebrada es Subcrítico en todo su recorrido como se observa en la **Ilustración 21**, porque el número de Froude es menor a 1, lo que permite identificar que son aguas tranquilas, es decir, la velocidad media de estas secciones son relativamente bajas. Las ilustraciones de número de Froude y velocidad media se relacionan entre si ya que este número se calcula en función de la velocidad media de canal como se observa en la **Ilustración 21** y **Ilustración 22** Estos resultados permiten identificar posibles puntos de aireación hidráulica de la quebrada, donde se observan picos en la velocidad media y Froude asociados a los aumentos de caudal, estos eventos no logran generar un cambio en el régimen de flujo que no favorece aireación hidráulica en la quebrada. La caída de agua en cada una de las estructuras hidráulicas genera un aumento rápido del valor de Froude, pero rápidamente la velocidad disminuye lo que no favorece que este proceso se prolongue. Este fenómeno se observa claramente en la salida del lago del club campestre, donde dentro de este sistema la velocidad es cero, después se observa un pico que corresponde a la salida del club y posteriormente la velocidad cae rápidamente al igual que el valor Froude.

**Ilustración 21** Cambio del número Froude



**Nota.** Elaboración propia, resultados de la modelación

**Ilustración 22** Cambios de la Velocidad media en el canal



**Nota.** *Elaboración propia, resultados de la modelación*

Los cauces naturales transportan nutrientes, metales pesados, sedimentos, sólidos suspendidos, entre otras sustancias, este desplazamiento de sustancias dependen de la hidrodinámica de la corriente. Cuando un soluto es transportado, la concentración máxima del soluto se reduce debido a la dispersión del compuesto en el agua (Jaramillo y Camacho, 2005). La implementación de modelos de calidad del agua es una forma de determinar si el agua es apta para un determinado uso, o establecer límites de vertimientos sobre una fuente de agua (Santamaría, 2015). Para poder implementar estos modelos es necesario conocer el comportamiento de la quebrada para transportar un soluto de un punto a otro. Este parámetro comúnmente se determina con ensayos de trazadores, pero este parámetro también puede ser determinado mediante modelación Hidráulica (ANLA 2013).

Para establecer los tiempos de viajes inicialmente se desarrollaron ensayos de trazadores con sal, pero dadas las características lenticas de la corriente estos no correspondieron a un tramo lo suficientemente largo, para considerarlo representativo. Además de esto se realizaron ensayos

de flotadores, que usualmente son usados para conocer el caudal aproximado de una corriente en ausencia de instrumentos, pero el objetivo principal de este ensayo fue precisamente determinar los tiempos de viaje superficiales. Pero no fue posible obtener información porque la boya lanzada quedaba atrapada cerca al punto de inicio del recorrido. Por lo tanto, se opta por considerar más adecuado los valores arrojados por el modelo HEC-RAS.

Al desarrollar la Modelación hidráulica de la quebrada San Antonio se encontraron los tiempos acumulados que se demora una gota de agua para llegar a la última sección del modelo. Se definieron ocho tramos entre las estaciones de monitoreo, sin tener en cuenta la presencia de los lagos ya que estos aumentan el tiempo de retención del agua, estos resultados se presentan en la **Ilustración 23** donde los tiempo de viajes para cada uno de los tramos se definen entre secciones. Hec Ras brinda dos valores del tiempo de viaje diferentes. Tiempo de viaje basado en la velocidad promedio de toda la sección transversal (tiempo AVG) y la sección transversal principal (tiempo Chl).

*Ilustración 23* Tiempos de viaje para los escenarios hidrológicos

Escenarios hidrológicos									
Tramo	Año normal			Año seco			Año Húmedo		
	tiempo AVG (min)	Tiempo Chl (min)	Q (l/seg)	tiempo AVG (min)	Tiempo Chl (min)	Q (l/seg)	tiempo AVG (min)	Tiempo Chl (min)	Q (l/seg)
Naci - E2	36.6	37.8	42.4	44.4	44.4	26.94	35.4	37.2	47.16
E2 - E4	71.4	72.6	81.93	84	84	51.26	68.4	70.2	90.84
E4 - E6-2	42.6	42.6	102.12	51.6	52.2	65.25	40.8	40.8	113.19
E8 - E9	101.4	103.2	197.44	108	108.6	125.19	100.8	103.2	217.46
E9 - E 14	154.2	165.6	321.06	186.6	196.8	203.36	148.8	160.2	352.84
E14 - E 15	72.6	82.2	357.48	85.2	94.2	228.76	69.6	80.4	393.39
E15 - E 16	25.8	26.4	388.41	31.2	31.2	250.72	25.2	25.2	426.84
E17 - salida	10.2	10.2	414.44	12	12	271.26	10.2	10.2	455.24

Nota. Elaboración propia, resultados de la modelación

Estos parámetros se calcularon para diferentes escenarios hidrológicos encontrando los tiempos para tres escenarios de caudales diferentes. Como se observa en la **Ilustración 23** entre más bajo sea el caudal mayor el tiempo de viaje entre dos secciones, siendo los periodos secos los escenarios más críticos para la dilución de los contaminantes y transporte de los mismo, que bajo estas condiciones se demora 10.22 horas en llegar a al cierre de la cuenca San Antonio sin considerar la retención que se generan en los sistemas lagunares, recorriendo una distancia aproximada de 8.1 Km, que equivalen aproximadamente a 1.26 horas por kilómetro recorrido. El tramo E8 – E9 tiene una distancia 500 metros, donde los tiempos de viajes encontrados sobrepasan los 100 minutos lo que coincide con las condiciones actuales de la quebrada ya que este es el tramo más crítico desde el punto de vista hidráulico por las diferentes razones que se mencionaron anteriormente.

Las curvas de calibración o gasto son herramientas hidráulicas que definen la relación existente entre diferentes variables de una sección transversal como por ejemplo el nivel del agua – caudal ò velocidad – Caudal. Esta relación es expresada de forma general como una ley potencial, que permiten deducir caudales medios diarios a partir de un registro in situ de niveles (León, Seyler & puerta, 2011). Estas relaciones se deducen a partir de datos obtenido en campo mediante la realización de aforos (OMM, 1994).

Del modelo Hidráulico se obtuvieron las relaciones hidráulicas de altura lámina de agua- Caudal y Velocidad – Caudal. Estas curvas permiten estimar la velocidad y caudal de la quebrada en los diferentes puntos de monitoreo sin necesidad realizar aforos entendiendo los errores asociados a este de mediciones linimetricas. En la **Ilustración 24** se presentan las relaciones hidráulicas mencionadas expresadas como una ley potencial, estas son representadas por la siguiente ecuación (Rantz et al. 1982)

$$H = \alpha Q^\beta$$

$$U = aQ^b$$

Donde Q es el caudal (m<sup>3</sup>/seg) H el nivel del agua (m), U la velocidad promedio (m/seg),  $\beta$ ,  $\alpha$ , a y b son constantes de la diferente sección de interés.

*Ilustración 24* Curvas de Gasto para las estaciones de monitoreo

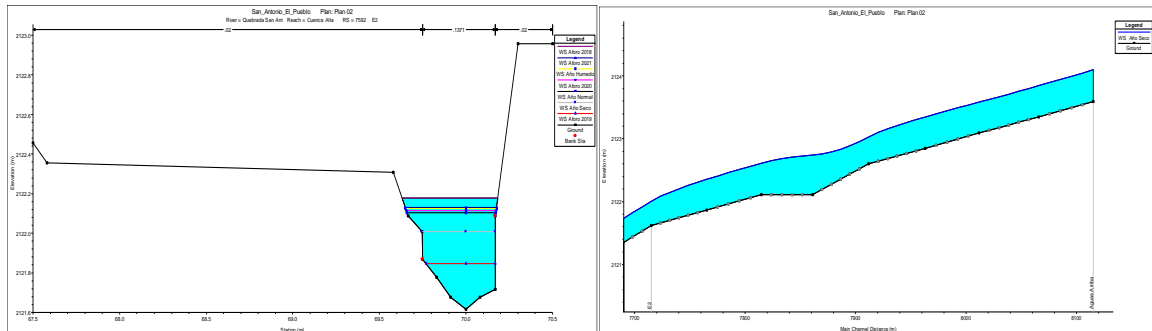
Estación	RELACION Q y u		RELACION Q y H	
	a	b	$\alpha$	$\beta$
2	0.6276	0.301	2.1392	0.4721
4	0.7841	0.3267	1.0267	0.4224
6 - 2	0.7643	0.9091	0.766	0.0731
8	0.6737	0.2931	0.3354	0.341
9	0.2151	0.337	2.1318	0.5561
14	0.2668	0.3424	0.5801	0.3721
15	0.6072	0.269	2.1352	0.4707
16	0.6663	0.9861	0.6979	0.0114
17	0.7508	0.3726	0.3858	0.4841

*Nota. Elaboración propia, resultados de la modelación*

Estas curvas caracterizan adecuadamente las variables hidráulicas requeridas para los modelos de calidad de agua (Chapra, 2008). El modelo de calidad QUAL2K permite definir las condiciones hidráulicas de un sección a partir de las constantes de la curvas de gasto presentadas, estos resultados contribuyeron en la modelación de calidad de agua en el marco de la formulación PORH de la quebrada San Antonio. Estos resultados también permiten instrumentalizar la corriente porque se pueden instalar regletas linimétricas que permiten estimar los caudales de tránsito en un instante dado sin el uso de instrumentos de aforo.

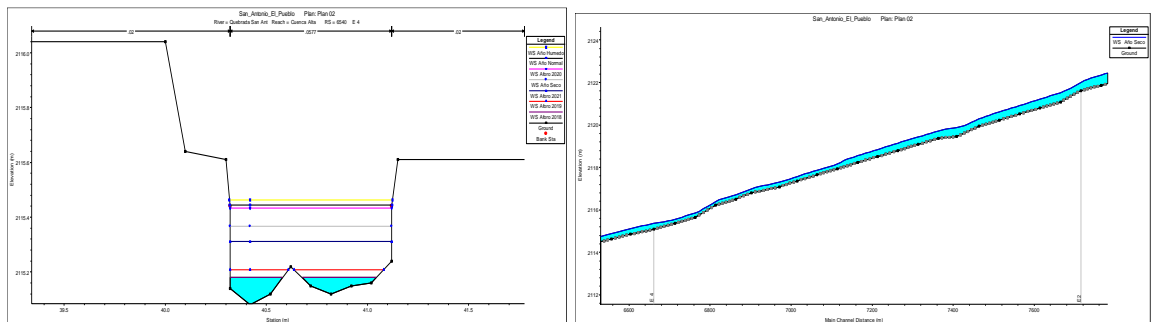
## 6.1 Tramos de Estudio

### 6.1.1 Tramo Aguas Arriba – Estacion E2



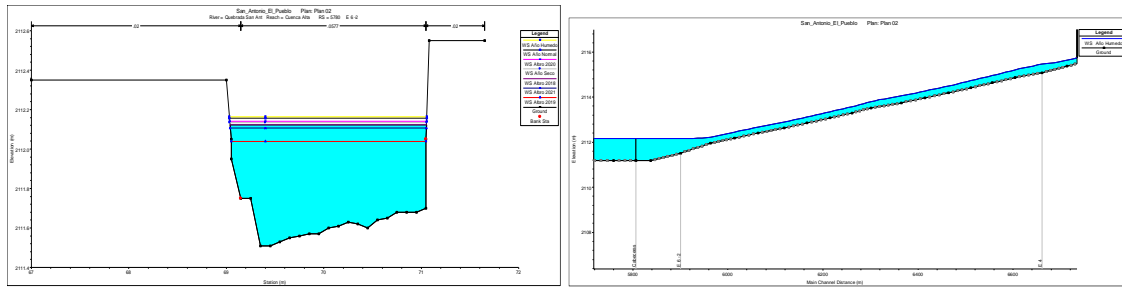
La modelación muestra que la sección transversal de la estación tiene la capacidad para el transporte de los caudales de los escenarios hidrológicos para épocas de lluvias normales. En el perfil se muestran un punto en el cual se da un cambio de pendiente que genera una variación en el perfil de flujo. De acuerdo a las características de la corriente este tramo fue la que mayor pendiente tiene por lo que los cambios de pendiente generan cambios en el perfil de flujo como se evidencia en este tramo.

### 6.1.2 Tramo E2 – E4



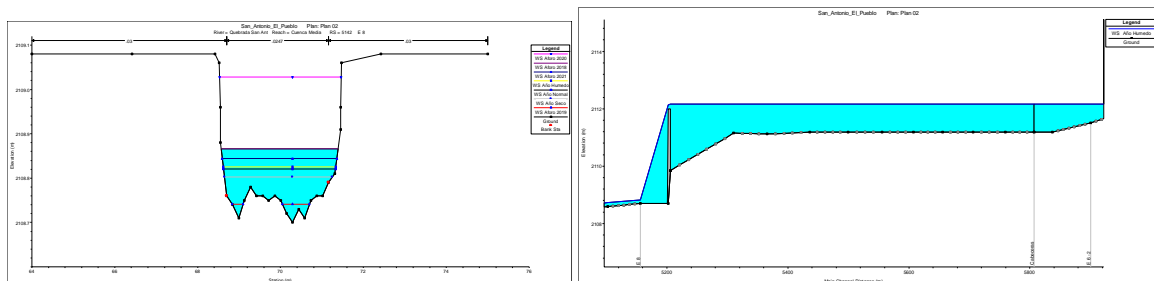
Para este tramo también se encuentra que la sección es capaz de transportar los diferentes caudales sin presentar desbordamiento. En perfil se encuentra cambios en el perfil debidos a cambios pequeños de la pendientes.

### 6.1.3 Tramo E4 – E 6-2



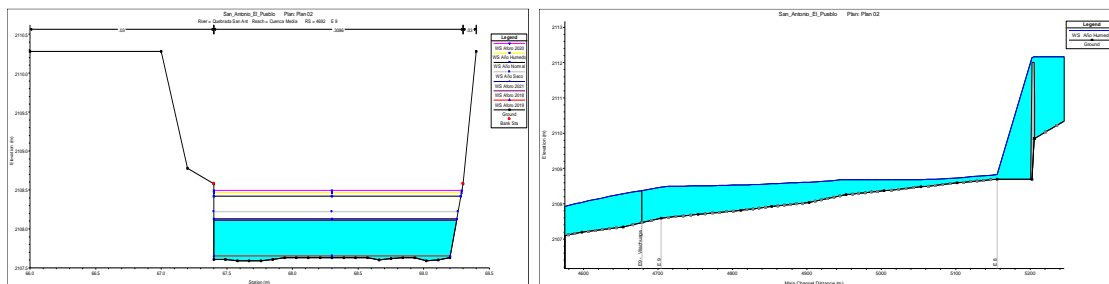
Los niveles del agua en la estación E 6-2 muestran que, para los diferentes caudales, el calado no varía significativamente. Como se observa en la sección transversal el nivel del agua está afectado por la presencia de la estructura hidráulica que genera el cambio del sistema lotica al lentic. El perfil demuestra que este fenómeno se presenta unos metros aguas arriba de la estación E6-2 donde se presenta una curva de remanso que cambia dependiendo las condiciones de caudal y abertura de la compuerta. En condiciones de tiempo húmedo este cambio se presento 65 metros aguas arriba de la Estación E 6-2, esto permite definir que esta sección puede ser considerada como parte del sistema lentic, por lo que las mediciones realizadas en este punto no corresponden a un punto de monitoreo importante desde el punto de vista hidráulico, porque las velocidades de la sección no permiten cuantificar la cantidad de agua que circula por la quebrada. Este punto de medición se debe redefinir porque es un punto que permitirá conocer la cantidad y calidad del agua que ingresa al sistema lagunar. Por lo tanto se propone que esta estación de monitoreo se traslade 100 metros aguas arriba de la actual, para garantizar que este punto no se vea afectado por la influencia del lago y se puedan realizar mediciones que representen la realidad de la quebrada.

#### 6.1.4 Tramo E6-2 - E8



En este tramo se presenta el sistema lagunar de Club Campestre, donde se muestra completamente el efecto del control hidráulico en la lámina de agua. El nivel del agua en la estación E8 va depender no solo del ingreso de agua de la quebrada San Antonio y Cabeceras, sino también el ajuste que tengan en la compuerta de salida del Club, que es un aspecto operacional del vertedero. Esta particularidad afecta directamente la calidad del agua, porque la quebrada pierde capacidad para transporta y diluir los contaminantes.

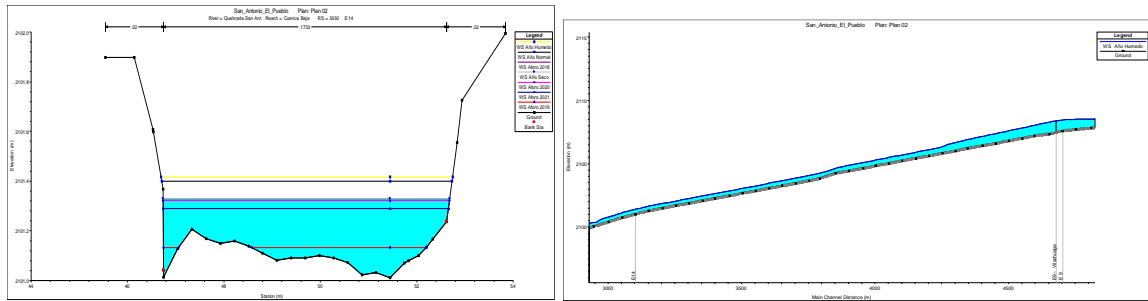
### 6.1.5 Tramo E8 – E9



En el perfil de este tramo se observa el efecto del vertimiento de las aguas de la quebrada Vilachuaga donde se genera un remanso que se desplaza aguas arriba. Para los escenarios modelados no se encontró inundación, sin embargo este efecto en condiciones de caudales altos presentan inundación, donde se ve afectada la parcelación Rincones de Llanogrande. Este efecto también depende del ajuste del vertedero que se tenga en la salida de sistema lenticio del Club Campestre. La sección E9 muestra la capacidad para transportar los diferentes caudales esto se debe a que el modelo HEC-RAS no tiene cuenca flujo bidireccionales, que es una particularidad que se presenta en este tramo.

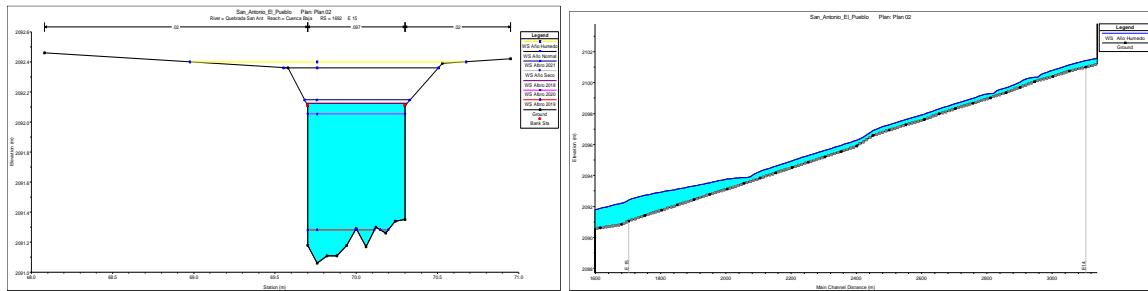
### 6.1.6 Tramo E9 –E 14





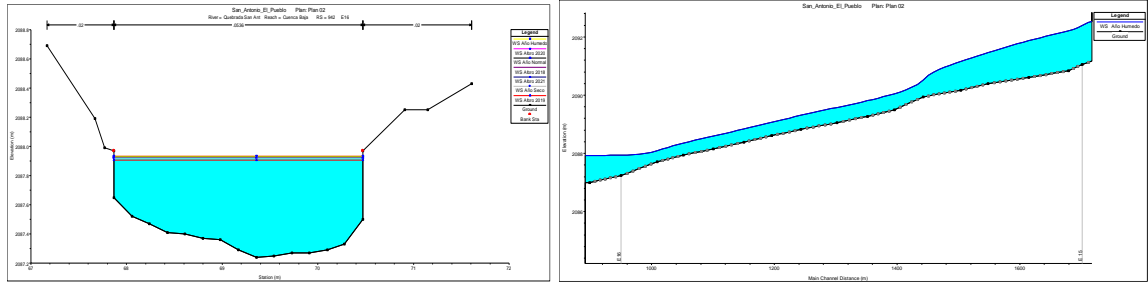
En este tramo las secciones transversales son más anchas por lo que el nivel del agua disminuye este se puede observar en el perfil. Aguas abajo de la confluencia de la quebrada Vilachuaga y San Antonio se observa que el perfil tiende a estabilizarse generando un pequeño desnivel unos metros aguas debajo de la unión.

### 6.1.7 Tramo E 14 – E 15



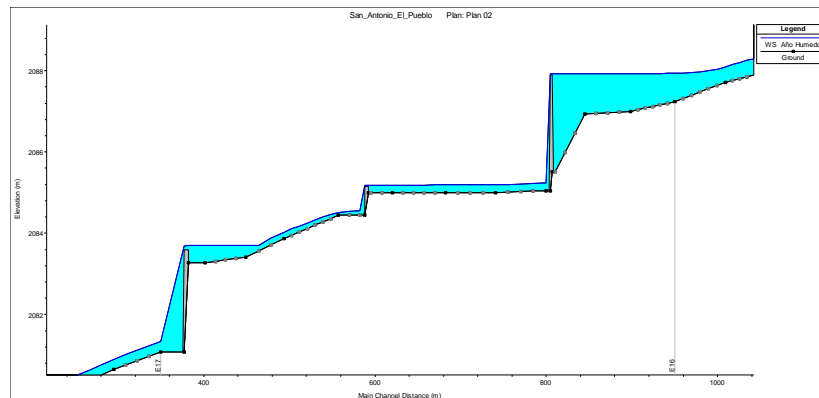
Sobre la estación E15 actualmente se está desarrollando una obra vial en la cual se realizarán una modificación de la quebrada donde se está construyendo un box Culvert. Este tramo es uno de los tramos de mayor pendiente, por lo que se presenta una sobre elevación cerca a la estación E15 por el cambio de pendiente en el tramo y por el estrechamiento del cauce principal. Para el escenario de condiciones húmedas (línea amarilla), se observa que la sección no tiene la capacidad para transportar el caudal respectivo, porque el flujo sobrepasa el canal principal, discurriendo por la llanura de inundación. Los efectos que puedan generar el box Culvert se deberán verificar concluidas las obras, porque las condiciones de la quebrada cambian aguas arriba y abajo del área de influencia de esta estructura.

### 6.1.8 Tramo E 15 – E16



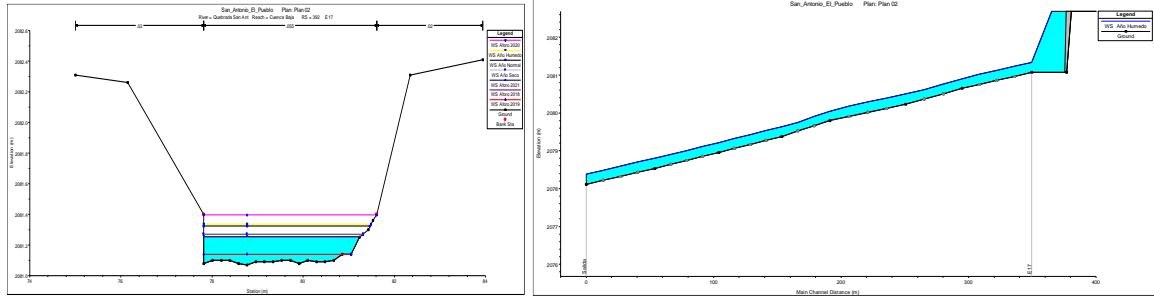
La Estación E16 presenta condiciones similares a las que presento E6.2, porque ambas están justo antes de que se genere el cambio al sistema lentico, para los diferentes periodos se observa que el cambio en los niveles no es representativos. El perfil permite establecer nuevamente que el sección transversal nuevamente es más amplia por lo que el nivel tiende a disminuir a medida que se aproxima a E 16.

### 6.1.9 Tramo E16 – E17



En este tramo se forman los tres sistemas lenticos de Comfama, cada uno con su estructura de control respectiva. El primer lago actualmente es el que más problemáticas porque se presenta depósito de sedimentos generados por la hidrodinámica de la quebrada y vertimientos asociados a la actividad inmobiliaria. Este lago es dragado para retirar el sedimento cada determinado tiempo por lo que la geometría cambia activamente.

### 6.1.10 Tramo E17 – Rio Negro



Este tramo está constituido por un canal artificial con lecho natural y taludes en piedra de forma trapezoidal. Las secciones transversales tienen la capacidad de transportar los caudales modelados, sin embargo, no se tuvieron en cuenta los efectos que pueda generar los niveles del Rio Negro sobre este tramo.

## 7. Conclusiones

Se logró definir y establecer la geomorfología a partir de la aplicación de los sistemas de información geográfico, que proporciono las pendientes y batimetría de los sistemas lagunares que se presenta sobre la quebrada San Antonio, permitiendo la modelación hidráulica de la corriente de orden tres en flujo permanente, logrando representar las condiciones reales de la cuenca manifestados en la corriente principal a partir de balances de masas en los puntos de confluencia de los afluentes menores que generaban un aumento en el caudal.

La calibración del modelo se realizó variando el coeficiente de Manning de cada una de las estaciones de monitoreo, estableciendo el valor de este parámetro que permitiera que los niveles del agua simulados coincidieran con los valores de la lámina de agua obtenido en el aforo del 6 de julio de 2021. Esto permitió identificar que las pérdidas en las corrientes están asociadas a diferentes factores, como los sedimentos, obstrucciones y vegetación que se ve reflejado en los valores de la constante de Maning que están muy alejado a los valores establecidos en la literatura

La confluencia de la quebrada Vilachuaga que vierte sus aguas por medio de una estructura hidráulica, con una caída de 2 metros genera contraflujo sobre la corriente principal afectando la dinámica de la quebrada, incrementando las pérdidas de carga y tiempos de viajes el cual se encontró que para el año seco el tiempo de viaje fue de 100 min en una distancia aproximada de 500 metros, entre las secciones E8 – E9, tardándose el triple del tiempo promedio que tarda la quebrada en recorrer la misma distancia en otros tramos, disminuyendo la capacidad de dilución y velocidad de transporte de los contaminantes que se vierten sobre la quebrada, siendo el tramo más crítico desde el punto vista hidráulico. En el área de influencia de este tramo también se evidencio que el vertedero del Club Campestre que controla la cantidad de agua que sale del lago, genera retención importante del flujo, que afectan los caudales aguas abajo de la estación E8, donde se

evidencio un aumento rápido del valor de Froude y velocidad que genera re aireación hidráulica en este punto, el cual no se prolonga porque rápidamente la velocidad disminuye lo que no favorece que el proceso de aireación continúe y por el contrario se presente posibles bajones de oxígeno porque en el sistema lagunar no se genera aireación suficiente en la masa de agua. Todo esto evidencia que las reglas de operación del club llanogrande afectan la hidráulica de este sector y por ende los procesos de transformación de contaminantes.

Se encontró que la estación E6-2 es afectada por el sistema lagunar del Club Campestre, donde se presenta una curva remanso que en periodos húmedos se presentan hasta 65 metros aguas arriba de estación donde el nivel y flujo dependerá del nivel de la estructura hidráulica. Por tanto esta estación no permite cuantificar la cantidad de agua que ingresa al Club campestre porque la distribución de velocidades tiende a cero, por lo tanto se recomienda que esta estación de monitoreo se traslade 100 metros aguas arriba, para garantizar que este punto no se vea afectado por la influencia del lago, para garantizar que las campañas de monitoreo representen las condiciones reales de la quebrada antes de convertirse en un sistema lenticio.

Los resultados de la modelación de la hidrodinámica de la corriente contribuyo en la modelacion de calidad de agua en el marco de la formulacion PORH de la quebrada San Antonio, con las curvas de gasto de cada una de estaciones y tiempos de viaje entre tramos para los diferentes escenarios de caudales para alimentar el modelo QUAL2K. Las curvas de gasto tambien permiten instrumentalar la corriente con la instalacion de regletas linimetricas que permitiria estimar los caudales transitorio en un instante, siendo una gran herramienta para el control ambiental por parte de la autoridad ambiental.

El tramo entre las estaciones E14 – E15 actualmente se está desarrollando una obra vial en la cual realizaran cambios en la geomorfología de la quebrada de aproximadamente 100 metros,

que cambia las dinámicas de la corriente, por tanto los efectos que puedan generar el box Culver se deberán verificar concluidas las obras, porque las condiciones de la quebrada cambian aguas arriba y abajo del área de influencia de esta estructura.

## 8. Bibliografía:

- Alvarado, D. A (2011). Aplicación de un modelo de transporte de solutos en el análisis de la hidrodinámica y el transporte de las concentraciones contaminantes en un hidrosistema urbano en Bogotá. [Tesis de maestría, Universidad Javeriana.]. Repositorio Institucional Pontificia Universidad Javeriana. <http://hdl.handle.net/10554/1463>
- ANLA (2013). Metodología para la definición de la longitud de influencia de vertimientos sobre corrientes de agua superficial, Ministerio de Ambiente. [https://www.anla.gov.co/documentos/ciudadania/03\\_partic\\_ciudadana/con-pub/Metodologia\\_-\\_Longitud\\_de\\_Influencia\\_de\\_Vertimientos.pdf](https://www.anla.gov.co/documentos/ciudadania/03_partic_ciudadana/con-pub/Metodologia_-_Longitud_de_Influencia_de_Vertimientos.pdf)
- Buitrago Puerta, (2018) . Propuesta de implementación de un SIG para la administración y gestión del sistema de acueducto del municipio de Bahía Solano – Choco. [Tesis de pregrado Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/18099/BuitragoPuertaSergioAntonio2018.pdf?sequence=2&isAllowed=y>
- Córdova Webster et al., (2018) Influencia del método de estimación en el coeficiente de Manning para cauces naturales. *riha*, vol.39, n.1, pp.17-31. ISSN 1680-0338.
- Cornare (2021, Octubre), Informe DIAGNOSTICO PORH quebrada San Antonio – El Pueblo . <https://www.cornare.gov.co/>
- Duarte Carlos (2009). Introducción a la hidráulica de canales. Universidad Nacional de Colombia. Editorial Universidad Nacional de Colombia
- Hec Ras (2020). Cuerpo de ingenieros de la armada de Estados Unidos. (s.f.). Obtenido de Engineerings, US Army Corps: <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/>

- Hec- Ras User's (2018) Hydrology Engineering Center's River Analysis System. Hec- Ras User's Manual, Hydraulic reference manual. <https://www.hec.usace.army.mil/software/hecras/documentation/HEC-RAS%205.0%20Reference%20Manual.pdf>
- Jaramillo, J., & Camacho, L. (2005). Estudios de inyección instantánea de trazadores en ríos de montaña. [Tesis de pregrado Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Universidad de los Andes. <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/22506/u270678.pdf?sequence=1>
- Leon J. , Seyler F. & Puerta A, (2011, Diciembre ) Rating curve estimation using Envisat virtual stations on the main Orinoco River. Scielo. [http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0120-56092011000300010&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-56092011000300010&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Molero E. & Hernández J. (2021). Curso de Estudios hidrológicos y estudios de inundación con Qgis y HEC-RAS. Ingeoexpert <https://ingeoexpert.com/cursos/curso-de-estudios-hidrologicos-y-estudios-de-inundabilidad-con-qgis-y-hec-ras/>
- Morvan H., Knight D., Wright N., Tang X., Crossley A., (2008), "The Concept of Roughness in Fluvial Hydraulics and its Formulation in 1D, 2D and 3D Numerical Simulation Models", Journal of Hydraulic. Journal of Hydraulic research volume 46 <https://doi.org/10.1080/00221686.2008.9521855>
- OMN (1994) Organización Meteorológica Mundial. Guía de prácticas hidrológicas. Quinta edición, OMM No 168., 1994, pp. 147-173. [https://library.wmo.int/doc\\_num.php?explnum\\_id=10038](https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=10038)



- Puertas & Sanchez. (2000) Apuntes de hidráulica de canales. Edición Colegio de Ingenieros de Caminos, canales y puertos. Dialnet  
[https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=324882&info=openlink&codigo\\_url=31221](https://dialnet.unirioja.es/servlet/autor?codigo=324882&info=openlink&codigo_url=31221)
- Rantz, S. (1982) Measurement and computation of streamflow., Measurement of Stage and Discharge, US Geological Survey Water Supply Paper, vol. 1, p. 284.  
<https://pubs.er.usgs.gov/publication/wsp2175>
- Sanchez – Juny, M, E. Blade, I J Puertas (2005). Hidráulica. Barcelona: edición UPC. ISBN: 9788498801484. <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.3/36802>
- Santamaría J, (2015) Modelación del transporte de solutos en un río andino de montaña. [Tesis de pregrado Universidad de los Andes]. Repositorio Institucional Universidad de los Andes  
<https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/17957/u729528.pdf?sequence=1>
- Ven Te Chow. (2004) Hidráulica de Canales abiertos. Santa Fé de Bogotá.: Mc Graw Hill Interamericana S.A. ISBN: 958-600-228-4

## 9. Anexos

Estación de Monitoreo	Perfil	Velocidad Media	Área Mojada	Ancho Húmedo	Numero de Froude
		(m/s)	(m <sup>2</sup> )	(m)	
E2	Año Normal	0.24	0.17	0.51	0.12
	Año Seco	0.21	0.13	0.42	0.12
	Año Húmedo	0.25	0.18	0.52	0.12
E4	Año Normal	0.35	0.24	0.8	0.2
	Año Seco	0.3	0.17	0.8	0.2
	Año Húmedo	0.36	0.25	0.81	0.21
E 6-2	Año Normal	0.1	1.06	2.02	0.04
	Año Seco	0.06	1.02	2.02	0.03
	Año Húmedo	0.11	1.08	2.03	0.05
E8	Año Normal	0.29	0.19	2.7	0.33
	Año Seco	0.24	0.14	2.6	0.32
	Año Húmedo	0.3	0.2	2.71	0.33
E9	Año Normal	0.13	1.48	1.88	0.05
	Año Seco	0.11	1.11	1.86	0.05
	Año Húmedo	0.14	1.57	1.89	0.05
E14	Año Normal	0.18	1.74	6.02	0.11
	Año Seco	0.15	1.32	5.94	0.1
	Año Húmedo	0.19	1.84	6.04	0.11
E15	Año Normal	0.46	0.73	0.95	0.14
	Año Seco	0.41	0.56	0.64	0.13
	Año Húmedo	0.48	0.78	1.7	0.14
E16	Año Normal	0.26	1.48	2.6	0.11
	Año Seco	0.17	1.46	2.6	0.07
	Año Húmedo	0.29	1.49	2.6	0.12
E17	Año Normal	0.54	0.77	3.65	0.38
	Año Seco	0.46	0.58	3.5	0.36
	Año Húmedo	0.56	0.82	3.67	0.38

*Anexo I Variables hidráulicas*

Estación de Monitoreo	Perfil	Profundidad Hidráulica	Radio Hidráulico	Máxima Elevación en el Canal	Cabeza de Velocidad
		(m)	(m)	(m)	(m)
E2	Año Normal	0.33594	0.00125	0.49	0.00318
	Año Seco	0.2985	0.00172	0.39	0.00231
	Año Húmedo	0.34915	0.00277	0.51	0.00365
E4	Año Normal	0.29522	0.00156	0.36	0.00611
	Año Seco	0.21831	0.00471	0.29	0.00456
	Año Húmedo	0.31229	0.00207	0.38	0.00663
E 6-2	Año Normal	0.52542	0.00319	0.65	0.00047
	Año Seco	0.50312	0.00248	0.62	0.00021
	Año Húmedo	0.53088	0.00336	0.65	0.00057
E8	Año Normal	0.07118	0.01881	0.12	0.00417
	Año Seco	0.05478	0.00598	0.1	0.00294
	Año Húmedo	0.07532	0.02222	0.13	0.00445
E9	Año Normal	0.78679	0.09173	0.83	0.00091
	Año Seco	0.59697	0.06958	0.63	0.00065
	Año Húmedo	0.83212	0.09661	0.88	0.00098
E14	Año Normal	0.28828	0.0454	0.39	0.00184
	Año Seco	0.22219	0.02608	0.32	0.00122
	Año Húmedo	0.30383	0.05008	0.4	0.00201
E15	Año Normal	0.77028	0.08003	1.3	0.01466
	Año Seco	0.87252	0.01068	1.08	0.00846
	Año Húmedo	0.46008	0.06947	1.34	0.01497
E16	Año Normal	0.57086	0.04446	0.69	0.00349
	Año Seco	0.56193	0.04034	0.68	0.00151
	Año Húmedo	0.57398	0.04591	0.69	0.00417
E17	Año Normal	0.21043	0.00344	0.25	0.01486
	Año Seco	0.16659	0.02023	0.2	0.01102
	Año Húmedo	0.22264	0.00427	0.27	0.01582

*Anexo 2 Variables Hidráulicas*

Estación	Campañas de Aforo				Escenarios Hidrológicos		
	2018	2019	2020	2021	Q Normal	Q Seco	Q húmedo
	Q (L/seg)	Q (L/seg)	Q (L/seg)	Q (L/seg)	Q (L/seg)	Q (L/seg)	Q (L/seg)
E2	61.95	8.86	45.022	48.311	42.4	26.94	47.16
E4	37.41	7.37	77.678	33.615	81.93	51.26	90.84
E6-2	31.55	-	-	-	102.12	65.25	113.19
E8	106.62	1.97	186.861	83.668	54.18	34.02	59.42
E9	71.05	-	185.372	-	197.44	125.19	217.46
E14	203.68	14.13	676.473	145.926	321.06	203.36	352.84
E15	220.58	8.2	197.309	230.215	357.48	228.76	393.39
E16	348.61	13.98	400.089	265.379	388.41	250.72	426.84
E17	232.19	28.83	659.328	357.744	414.44	271.26	455.24

Anexo 3 Caudales hidrológicos y aforos