

**IMPLEMENTACION DE UN MODELO DE TRANSPORTE DE METALES PESADOS  
DEL RIO SURATÁ, JURISDICCIÓN DE LA CORPORACIÓN AUTÓNOMA PARA LA  
MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB), SANTANDER.**

**WUENDY VANESA BAEZA NAVARRO**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER**

**2019**

**IMPLEMENTACION DE UN MODELO DE MODELO DE SIMULACIÓN DE  
TRANSPORTE DE METALES PESADOS DEL RIO SURATÁ, JURISDICCIÓN DE LA  
CORPORACIÓN AUTÓNOMA PARA LA MESETA DE BUCARAMANGA (CDMB),  
SANTANDER.**

**WUENDY VANESA BAEZA NAVARRO**

**TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO AMBIENTAL**

**DIRECTORES:**

**FIDEL ANTONIO CARVAJAL SUAREZ**

**Ing. M.Sc en Ingeniería Ambiental**

**MARÍA ESTHER RIVERA**

**Lic. Ph.D en Hidrología**

**UNIVERSIDAD DE PAMPLONA**

**FACULTAD DE INGENIERIAS Y ARQUITECTURAS**

**PROGRAMA DE INGENIERIA AMBIENTAL**

**PAMPLONA, NORTE DE SANTANDER**

**2019**

## **DEDICATORIA**

A Dios por llenarme de fortaleza y sabiduría para permitirme cumplir este logro y ayudarme a derrotar las adversidades durante mi carrera.

A mi madre, Doribet Navarro por su apoyo económico y amor incondicional, por ayudarme en momentos de dificultad, por ser mi confidente y mejor amiga

A mi padre, Jeremías Baeza por su apoyo económico y emocional. Por ser un hombre excepcional, ejemplar y de corazón humilde.

A mis hermanos, Gian Carlos, Juan David Y Camilo Andrés, por siempre estar ahí cuando los necesito para tener un momento de felicidad.

A Dubis Baeza, Por guiarme con amor y paciencia para cumplir mis sueños. Gracias por la educación que me brindaste esa siempre será la mejor herencia.

A Kevin Guerrero, por su apoyo incondicional, cariño, comprensión y acompañamiento durante este proceso

## **AGRADECIMIENTOS.**

Agradezco a la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), por darme la oportunidad de trabajar con ellos en modalidad de trabajo de investigación.

A mis directores Msc. Fidel Antonio Carvajal Suarez y PhD. María Esther Rivera por haberme dado la oportunidad de trabajar con ustedes, por guiarme durante este proceso con disposición y paciencia. Gracias por sus enseñanzas, consejos y orientaciones para llevar a cabo este proyecto.

Agradezco al programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Pamplona, en especial a los docentes de mi formación como futuro profesional.

---

Nota de aceptación

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del Jurado

## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1.</b> .....	<b>1</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN.</b> .....	<b>X</b>
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION. ....	1
2.2 OBJETIVOS.....	3
2.2.1 GENERAL .....	3
2.2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	3
<b>CAPITULO 2</b> .....	<b>4</b>
<b>2. MARCO REFERENCIAL</b> .....	<b>4</b>
2.1. MARCO CONTEXTUAL .....	4
2.1.1. <i>Descripción y ubicación geográfica.</i> .....	4
2.1.1.1. Descripción.....	4
2.1.1.2. Ubicación Geográfica.....	6
2.1.2. <i>Aspectos generales</i> .....	6
2.1.3. <i>Población</i> .....	7
2.2 MARCO TEÓRICO .....	8
2.2.2 <i>Modelos de calidad de agua</i> .....	10
2.2.3 <i>Modelo de Simulación Empleado</i> .....	12
2.2.3.1 Software HEC-RAS.....	12
2.2.3.2 Capacidades del Modelo .....	13
2.2.3.3 Modelo de Advección dispersión ADZ .....	14
2.2.3.4 Análisis de Incertidumbre .....	15
2.2.3.4 Metales a modelar .....	15
2.2.5 ANTECEDENTES .....	21
2.3 MARCO CONCEPTUAL .....	26
2.3.1. <i>Calidad de agua</i> .....	26
2.3.2. <i>Calidad del agua: impacto y modelación</i> .....	28
2.3.3. <i>Metales pesados en el medio ambiente</i> .....	29
2.3.4. <i>Efectos de metales en la salud.</i> .....	31
2.3.5 <b>ASPECTOS AMBIENTALES DE LA ZONA</b> .....	32
2.3.5.1 Calidad del agua del río Suratá .....	33
2.3.5.2 Fuentes de contaminación.....	33
2.3.5.3 Fauna.....	34
2.4. MARCO LEGAL .....	34
<b>CAPÍTULO 3.</b> .....	<b>35</b>
<b>3. METODOLOGÍA.</b> .....	<b>35</b>
3.1. VISITA DE CAMPO A LA SUBCUENCA SURATÁ .....	36
3.2 ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN.....	36

3.3 ANÁLISIS DE NORMATIVIDAD AMBIENTAL .....	36
3.4. MODELO HIDRÁULICO HEC-RAS .....	37
3.5. MODELO ADZ .....	38
3.5.1. <i>Variables de la ecuación del modelo de metales</i> .....	41
3.5.2 <i>Calibración del modelo</i> .....	44
<b>CAPÍTULO 4. ....</b>	<b>46</b>
<b>4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN. ....</b>	<b>46</b>
4.1. ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE LA INFORMACIÓN .....	46
4.2. ANÁLISIS DE NORMATIVIDAD AMBIENTAL .....	50
4.3 MODELACIÓN DE LAS SECCIONES TRANSVERSALES EN HEC-RAS .....	58
4.4 MODELO DE ZONA MUERTA AGREGADA ADZ .....	64
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>69</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>70</b>
<b>BIBLIOGRAFÍA.....</b>	<b>71</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>74</b>
ANEXO 1 .....	74
ANEXO 2 .....	75
ANEXO 3 .....	76
ANEXO 4 .....	77
ANEXO 5 .....	78
ANEXO 6 .....	80
ANEXO 7 .....	81
ANEXO 8 .....	82
ANEXO 9 .....	83
ANEXO 10 .....	85
ANEXO 11 .....	85
ANEXO 12 .....	87
ANEXO 13 .....	88
ANEXO 14 .....	89
ANEXO 15 .....	90
ANEXO 16 .....	91

## LISTA DE GRÁFICAS.

Pag

Grafica 1 Subcuenca, Surata Santander Fuente: Baeza, N 2019 .....	5
Grafica 2comparativos de índice de calidad de agua Fuente: CDMB 2019 .....	8
Grafica 3Hidráulica de un cuerpo de agua aplicando la ecuación de Bernoulli Fuente: Dinámica de Fluidos pág. 105.....	13
Grafica 4Minería en California, Santander Fuente: Sociedad minera de Santander .....	30
Grafica 5 Red de monitoreo Fuente: Baeza N, (2019) editado en Google Earth.....	39
Grafica 6. Primera campaña de la de monitoreo 2019 Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019).....	46
Grafica 7 Segunda campaña de la de monitoreo 2019 Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019).....	47
Grafica 8 Tercera campaña de la de monitoreo 2019 Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019) .....	48
Grafica 9 Dispersión según diferentes parámetros Fuente: Baeza, N y CDMB 2019 .....	48
Grafica 10 Cajas y bigotes Fuente Baeza, N y CDMB 2019 .....	49
Grafica 11 Grafico de modelo ajustado Fuente: Baeza N, y CDMB 2019.....	50
Grafica 12 Modelo de Mercurio Fuente: Baeza, N 2019 .....	65
Grafica 13Modelo del Cianuro Fuente: Baeza N 2019.....	66
Grafica 14Modelo Hierro Fuente: Baeza N 2019 .....	66
Grafica 15Modelo Cromo Fuente: Baeza N 2019 .....	67
Grafica 16Modelo de Cadmio Fuente: Baeza N 2019 .....	67
Grafica 17Modelo de Manganeso Fuente: Baeza N 2019 .....	68
Grafica 18Modelo de Aluminio Fuente: Baeza N 2019 .....	68

## LISTA DE TABLAS.

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Modelos de calidad de agua Fuente: Baeza, N 2019	10
Tabla 2 Características química y físicas del Cianuro Fuente: Baeza N 2019	16
Tabla 3 Características química y físicas del Arsénico Fuente: Baeza N 2019	16
Tabla 4 Características química y físicas del Cobre Fuente: Baeza N 2019	17
Tabla 5 Características química y físicas del Cadmio Fuente: Baeza N 2019	17
Tabla 6 Características química y físicas del Zinc Fuente: Baeza N 2019	18
Tabla 7 Características química y físicas del Hierro Fuente: Baeza N 2019	18
Tabla 8 Características química y físicas del Plomo Fuente: Baeza N 2019	19
Tabla 9 Características química y físicas del Aluminio Fuente: Baeza N 2019	19
Tabla 10 Características química y físicas del Níquel Fuente: Baeza N 2019	20
Tabla 11 Características química y físicas del Níquel Fuente: Baeza N 2019	21
Tabla 12 Características química y físicas del Cromo Fuente: Baeza N 2019	21
Tabla 13 Límite de concentración de metales pesados en el agua por del decreto único compilatorio 1076 del 2015.	31
Tabla 14 Tramos modelados en HEC-RAS Fuente: Baeza, N 2019	38
Tabla 15 Método de determinación de metales pesados Fuente: CDMB 2019	39
Tabla 16 Posición geográfica de cada uno de los puntos de la red de monitoreo a modelar Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019).	40
Tabla 17. Distancia entre puntos de Monitoreo de los tramos a modelar Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)	40
Tabla 18 Tabla de constante de destino de metal (Constante de decaimiento) para 1 metro de distancia Fuente: Baeza, N 2019	43
Tabla 19 Resultados de las mediciones de hierro en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.	51
Tabla 20 Resultados de las mediciones de aluminio en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.	52
Tabla 21 Resultados de las mediciones de cromo en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.	54
Tabla 22 Resultados de las mediciones de plomo en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.	55
Tabla 23 Resultados de las mediciones de cianuro en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.	56
Tabla 24 Sección transversal del río Vetás en el punto RV-05 en HEC-RAS. Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)	60
Tabla 25 Sección transversal del río Vetás en el punto RV-01. Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)	62
Tabla 26 Sección transversal del río Vetás en el punto SA-05. Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)	63

## **RESUMEN**

Modelar de transporte de metales pesados en la subcuenca Surata, constituye una premisa de innovación para la Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB), Dado que en la zona de estudio hasta el presente trabajo investigativo no se habían empleado modelos de transporte para este tipo de contaminante.

En constante, se utilizó el modelo de zona muerta agregada de advección y dispersión ADZ, donde se hizo necesario conocer parámetros específicos de la zona de estudio, entre ellos las concentraciones de los metales pesados, tiempo de recorrido de soluto, tiempo de advección, constantes de destino de los metales y características hidráulicas y geométricas del cauce.

Modelar el transporte de solutos aumenta la competitividad de la CDMB, teniendo en cuenta la misión de monitorear los cuerpos de aguas que se encuentran dentro de su jurisdicción, específicamente los vertimientos líquidos que causen afectaciones sobre él mismo.

Este es un proceso esencial para demostrar el estado de la calidad del agua de la Subcuenca ya que es el en gran medida abastece a parte de la población del área metropolitana de Bucaramanga, porque esta fuente hídrica es captada por la planta de Bosconia del acueducto de Bucaramanga AMB específicamente en los puntos RT-01 y SA-03 ubicados en los Ríos Tona y Surata respectivamente.

## **ABSTRACT**

Modeling of transport of heavy metals in the Suratá sub-basin constitutes an innovation premise for the Regional Autonomous Corporation for the Defense of the Bucaramanga Plateau (CDMB), given that in the study area until the present research works no models had been used of transport for this type of pollutant.

In constant terms, the ADZ aggregate dead zone for advection and dispersion was used, where it became necessary to know specific parameters of the study area, including heavy metal concentrations, solute travel time, advection time, constants of destination of the metals and hydraulic and geometric characteristics of the channel.

Modeling the transport of solutes increases the competitiveness of the CDMB, taking into account the mission of monitoring the bodies of water that are within its jurisdiction, specifically the liquid discharges that affect it.

This is an essential process to demonstrate the status of the water quality of the Sub-Basin as it is largely supplied to the population of the Bucaramanga metropolitan area, because this water source is captured by the Bosconia plant of the aqueduct of Bucaramanga AMB specifically at points RT-01 and SA-03 located in the Tona and Suratá Rivers respectively.

# INTRODUCCIÓN

Las fuentes hídricas generan beneficios a la población humana, flora y fauna silvestre, por lo tanto, se considera como uno de los elementos más importantes y centrales para la supervivencia de cualquier forma de vida; el agua es necesaria y útil en un sinnúmero de formas para seguir reproduciendo la vida en el planeta Tierra. Sin embargo, la insistencia del hombre en el crecimiento poblacional, invasión territorial y masificación industrial, ha conllevado a la producción de innumerables problemas ambientales. De ese modo, para que un ecosistema acuático proporcione agua de buena calidad y cantidad, debe ser cuidado y conservado, debido a que la contaminación se produce en mayor medida a la falta de educación ambiental, gestión y tratamientos inadecuados de los residuos agrícolas, humanos, e industriales.

Por esta razón, en cumplimiento con la Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico, la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB), se ha encargado de adelantar estudios acerca de modelación de la calidad del agua en las principales fuentes hídricas del departamento de Santander, monitoreando aquellas que se encuentran dentro de su jurisdicción en el departamento, entre las cuales se encuentran las subcuencas del Río Suratá, evidenciando así su comportamiento a través del tiempo, lo que constituye una herramienta de planificación que permite en la actualidad y a futuro, la identificación y preservación del recurso hídrico.

Particularmente, la modelación matemática del comportamiento de metales pesados en el río Suratá, fue el objetivo principal de esta investigación, con el fin de brindar un aporte a la problemática ambiental que se ha venido presentando en este cuerpo hídrico. El modelo implementado fue el ADZ, al cual tiene en cuenta variables como son el caudal, concentración de metales pesados, conductividad, fracción dispersiva y el tiempo medio de viaje, entre otros, etc. generando información que servirá para la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB); Además, este cuerpo hídrico es de gran importancia para el departamento de Santander dado que abastece la planta de Bosconia del acueducto del área

metropolitana de Bucaramanga, el cual recibe vertimientos de metales pesados aguas arriba provenientes de la explotación minera ubicada en el municipio de California, Santander.

Por otra parte, se tuvo en cuenta dos procesos claves como son el transporte y la difusión del contaminante en el cuerpo hídrico estudiado, por ello se planteó la identificación del comportamiento de los contaminantes en el agua. Por lo cual, se buscó la obtención de una aproximación a la realidad existente de los parámetros hidráulicos para la simulación de escenarios de saneamiento y recuperación del río Suratá, Santander.

La realización de este estudio se desarrolló en conjunto con la Corporación autónoma regional para defensa de Bucaramanga (CDMB).

# CAPÍTULO 1

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACION.

Las afectaciones a las fuentes hídricas es una problemática global que crece con el pasar de los días. Según Guadrón (2016), desde la revolución industrial, el recurso hídrico ha sufrido importantes alteraciones, debido a múltiples factores que contribuyen a la contaminación biológica, física, y química del agua. La Revolución Industrial impulsada por Inglaterra en el siglo XIX es considerada como uno de los hitos que generó los mayores cambios tecnológicos, económicos, sociológicos y culturales en la historia de la humanidad, pero con ello alteraciones del paisaje, incremento de sedimentos en los sistemas hídricos, degradación de las cuencas hidrográficas y deforestación de bosques asociados a cuerpos de agua, viéndose alteradas las propiedades naturales de esta.

En Colombia, se realiza un informe nacional sobre la gestión del agua y referente a esto la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), indican que las fuentes que contribuyen al deterioro del agua y al incremento constante de la contaminación en el país son diferentes, siendo los sectores agropecuario, industrial y doméstico los principales responsables, ya que en conjunto generan cerca de 9 mil toneladas de materia orgánica contaminante, alrededor del 70%-75% de la contaminación marina global es producto de las actividades humanas que tienen lugar en la superficie terrestre, un 90% de los contaminantes es transportado por los ríos al mar. Los contaminantes presentes en las fuentes industriales son por lo general nutrientes, metales pesados, compuestos orgánicos específicos, en especial los metales pesados son originados alrededor de los centros industriales, mineras, asentamientos humanos y actividades militares, estos por otro lado con la modificación del cauce de los ríos que drenan al mar y la alteración del flujo de agua que escurre en dichos ríos, a causa de la construcción de represas, extracción de áridos o encauzamientos, también ha afectado los ecosistemas y ambientes asociados. Aunque la mayoría de los problemas por contaminación son de naturaleza local, muchos de ellos adquieren dimensiones transnacionales al traspasar fronteras, por lo que su contaminación importa tanto a un país, grupos de países y a la cuenca marina o fluvial como un

todo. En el caso de la contaminación por metales pesados, esta es por lo general local, sin embargo, algunos han alcanzado una importancia regional o inclusive global.

En el ámbito local, el río Suratá se ha visto afectado de forma negativa a lo largo del tiempo debido a la presencia de explotación minera en la zona alta de la cuenca y a los vertimientos de aguas servidas e industriales y disposición de residuos sólidos que han ocasionado el deterioro de este recurso, teniendo en cuenta la información suministrada por la CDMB proveniente de la red de monitoreo en donde se ha detectado presencia de metales pesados.

¿De qué manera se pueden generar estrategias de conservación, uso y aprovechamiento del recurso en la subcuenca Suratá, Santander?

El Río Suratá, abastece el acueducto de Bucaramanga y este a su vez el Área metropolitana la cual presenta una población aproximada de 1.160.272 habitantes. La calidad de vida de una población depende del acceso a los bienes necesarios para su supervivencia y el agua potable es fundamental para impedir y reducir la propagación de enfermedades relacionadas con la falta de saneamiento y la salud. Por medio de este trabajo se pretende determinar la calidad del agua de esta fuente, el nivel de contaminación por metales pesados y el comportamiento de los mismos a lo largo del Río a través de un modelo de zona muerta agregada de advección dispersión ADZ para determinar si se encuentra dentro de los estándares establecidos por la normatividad

La corporación Autónoma Regional para la defensa de la Meseta de Bucaramanga (CDMB) a partir de esta investigación puede proponer planes para la conservación, preservación y redención del recurso hídrico, que permitan a la comunidad servirse de un agua de buena calidad. Este modelo hidrológico puede brindar una percepción de la contaminación por metales pesados que presenta la subcuenca y se puede utilizar como herramienta de planificación para otros estudios que se le realicen al cauce; lo que permite la evaluación de escenarios de recuperación a futuro del río Suratá en Santander, Colombia.

## **1.2 OBJETIVOS**

### **1.2.1 General**

- Implementar un modelo en estado estable de agua superficial para observar y analizar el transporte de metales pesados, en la subcuenca Suratá, Santander.

### **1.2.2 Objetivos específicos**

- Realizar el análisis estadístico descriptivo de los datos de la red de monitoreo de calidad de agua suministrados por la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB).
- Aplicar el modelo ADZ para modelar, calibrar, validar y simular la contaminación por metales pesados en el Rio Suratá, Santander.
- Modelar la hidráulica de la Subcuenca Suratá en el software HEC-RAS
- Evaluar la calidad del agua del rio Suratá con la normatividad.
- Proponer alternativas de gestión del recurso hídrico.

# CAPITULO 2

## 2. MARCO REFERENCIAL

### 2.1. MARCO CONTEXTUAL

#### 2.1.1. Descripción y ubicación geográfica.

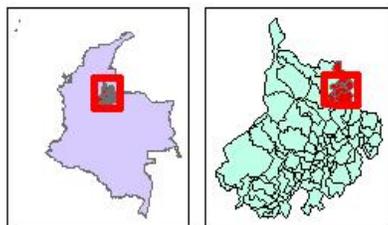
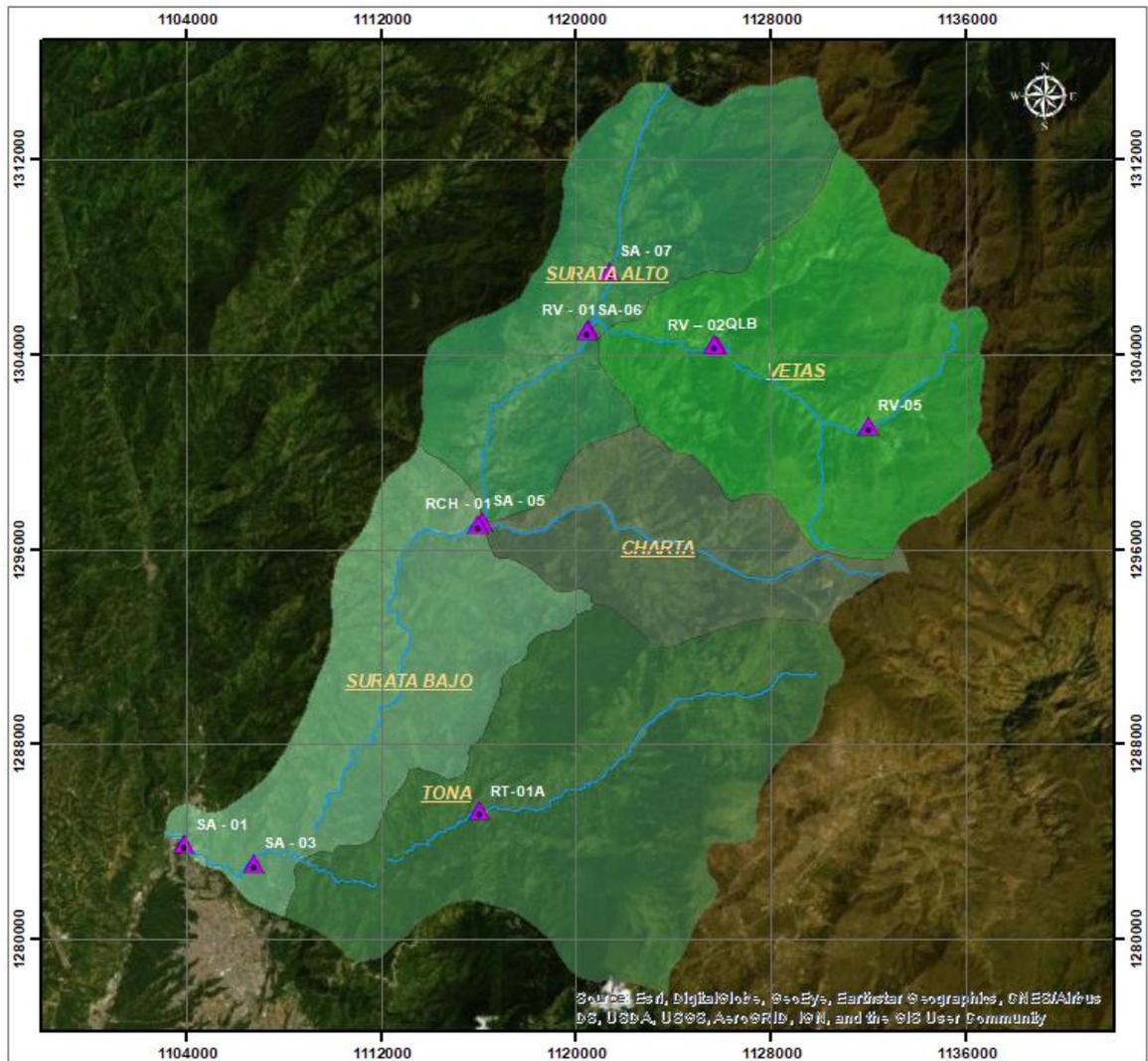
##### 2.1.1.1. Descripción.

La Subcuenca Río Suratá, Se encuentra ubicada en el Departamento de Santander, este efluente recorre varios municipios entre ellos California, Vetas, Charta, Matanza, Tona y Surata. En el área de jurisdicción de la CDMB, representa un porcentaje del 76.64% y cuenta con una extensión de 68.461 Has.

En el municipio de California y Vetas, hay presencia de minería y durante los procesos de exploración y explotación de los minerales se generan diferentes impactos en el medio ambiente que pueden llegar a afectar la salud de los habitantes de la zona.

En la Grafica 1 se muestra el río Suratá y los distintos afluentes que se adhieren a lo largo del Departamento de Santander antes de ser captado por el acueducto metropolitano de Bucaramanga para su potabilización en la planta de tratamiento Bosconia.

En aspectos climáticos, la cuenca tiene una precipitación media anual que varía entre 66 y 2065 mm, con un ciclo anual de tendencia bimodal, con dos periodos lluviosos y dos secos. El rango de variación de la temperatura instantánea se estima entre valores muy cercanos a cero y 35° C. la humedad relativa media multianual asciende a 81%. El brillo solar anual varía entre 1.472 y 1.913 horas. La evaporación media multianual varía entre 700 y 1.500 mm/año. (CDMB, 2007)



Sistema de coordenadas: WGS 1984  
 Proyección: Mercator Auxiliary Sphere  
 Datum: WGS 1984  
 False Easting: 0.0000  
 False Northing: 0.0000  
 Central Meridian: 0.0000  
 Standard Parallel 1: 0.0000  
 Auxiliary Sphere Type: 0.0000  
 Unidades: Meter



**Grafica 1 Subcuenca, Surata Santander Fuente: Baeza, N 2019**

### **2.1.1.2. Ubicación Geográfica**

La subcuenca Río Suratá forma parte de la Cuenca superior del Río Lebrija, la cual se encuentra localizada en el sector noroccidente y centro norte del área de Jurisdicción. Posee una extensión total de 372.759 hectáreas y representa el 76.64% del área de jurisdicción de la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB).

La subcuenca Limita al sur con la Subcuenca del Río de Oro y la Subcuenca Lebrija Alto en la entrega de aguas del Río Suratá al Río Lebrija; Al Occidente con la Subcuenca Rionegro y la Subcuenca Lebrija Alto en la divisoria de aguas de la microcuenca el Aburrido; Al Norte con la Subcuenca Cáchira del sur y con la Subcuenca del Río Chitagá; Al Oriente con la Subcuenca Río de Oro y con la Subcuenca del Río Chitagá compartida con el Departamento del Norte de Santander. En aspectos climáticos, la cuenca tiene una precipitación media anual que varía entre 66 y 2.065 mm, con un ciclo anual de tendencia bimodal, con dos periodos lluviosos (Marzo – Mayo y Septiembre – Noviembre) y dos secos (dic.- febrero y junio – agosto). El rango de variación de la temperatura instantánea se estima entre valores muy cercanos a cero y 35° C. la humedad relativa media multianual asciende a 81%. El brillo solar anual varía entre 1.472 y 1.913 horas. La evaporación media multianual varía entre 700 y 1.500 mm/año. En la cuenca las formaciones vegetales comprenden el Páramo, Subpáramo, Bosque altoandino, bosque Subandino, bosque Andino, Bosque inferior y vegetación xerofítica, las cuales se localizan desde la parte alta de páramo en los Municipios de Tona, California, Suratá, Vetas, hasta las zonas más bajas de vegetación xerofítica en los Municipios de Piedecuesta, Girón, Bucaramanga. (CDMB, 2007)

### **2.1.2. Aspectos generales**

La subcuenca del Río Suratá, tiene una extensión de 68.461 hectáreas, ocupa relieves moderados fuertemente escarpados o empinados, con pendientes desde 7 -12 %, 1225%, 25 - 50%, 50-75%, la altura mínima parte desde 550 m.s.n.m. que corresponde a la entrega de aguas del río Suratá al río Lebrija y la cota de elevación máxima es de 4.200 m.s.n.m. está localizada en la parte alta de la Microcuenca río Vetas. Esta cuenca hidrográfica es abastecedora de agua para Área metropolitana de Bucaramanga. Su ubicación es al norte de la ciudad de Bucaramanga

y se comunica por la vía a los Municipios de la provincia Soto Norte, vía en regulares condiciones que va paralela a la corriente del río Suratá. (CDMB, 2007)

La subcuenca está conformada por las zonas de vida de bosque inferior tropical, bosque Subandino, andino, alto andino y zona de páramo. Sobre el territorio de la Subcuenca se observan procesos de remoción en masa y deslizamientos. La cuenca tiene forma ovalada, con tendencia a crecidas torrenciales. Hidrológicamente está conformada por cinco microcuencas: Río Vetas, Río Suratá alto, Río Charta, río Tona y río Suratá bajo, todos afluentes principales del Río Suratá. El rendimiento hídrico de la Subcuenca se considera bajo 10 – 20 lps/km y el índice de escasez en la subcuenca en general se clasifica de acuerdo a la metodología del IDEAM en la categoría de demanda baja, no existiendo problemas de cantidad de agua y presentando algunos problemas de calidad debido a la contaminación por sedimentos de las explotaciones auríferas producto de las actividades socioeconómicas que se registran en la parte alta de la Subcuenca, especialmente en la microcuenca del Río Vetas. (CDMB, 2007)

### **2.1.3. Población**

La población de la Subcuenca Suratá es de 13.072 habitantes distribuidos en las cinco microcuencas Así:

En la Microcuenca Suratá Bajo la población total es de 2.979 habitantes, de los cuales 1.325 corresponden a las veredas de Charta, 1.019 a las veredas de Matanza y 635 a las veredas de Bucaramanga. El total de viviendas de la microcuenca es de 496 lo cual representa un número de 6 habitantes por vivienda. (CDMB, 2007)

La microcuenca río Tona cuenta con una población de 3.978 habitantes, con 2.824 en las veredas de Tona y 1.154 en las Veredas de Bucaramanga. El total de familias es de 883 para un promedio de 4.5 personas por familia, las cuales habitan en 951 viviendas. En el área urbana hay 140 viviendas. (CDMB, 2007)

La población de la microcuenca río Vetas es de 2.476 habitantes distribuidos 1.278 en las veredas del municipio de Vetas, 917 en las Veredas de California y 281 en las veredas de Suratá. El número de viviendas de la microcuenca es de 677 para un promedio de 3.65 habitantes por vivienda. (CDMB, 2007)

La población de la microcuenca Charta es de 2.250 habitantes distribuidos en las 9 veredas del municipio de Charta que conforman la microcuenca. La población de la microcuenca conforma 647 familias con un promedio de 3.48 personas por familia, dichas familias habitan en 619 viviendas para un promedio de 1.05 familias por vivienda. En la microcuenca Suratá Alto hay una población total de 1.389 habitantes, distribuidos 658 en las veredas de Suratá y 731 en las Veredas de Matanza. El total de familias es de 377 con 188 en Suratá y 189 en el municipio de Matanza. En total existen 409 viviendas, 227 en Suratá y 182 en Matanza. (CDMB, 2007)

## 2.2 MARCO TEÓRICO

La calidad del agua es un factor esencial en el suministro de agua potable en una población, ya que esta determina el comportamiento de la salud en la misma y en la eficacia y rendimiento en relación costo beneficio de las diferentes actividades económicas de las cuales esta sea un componente principal en la producción. Los informes obtenidos a partir del análisis de las fuentes hídricas que se encuentran dentro de la jurisdicción de la CDMB, han demostrado la variación del índice de calidad de agua para las diferentes categorías en un periodo de análisis multianual como se observa en el grafico 1, donde, el aumento de la categorías pésima e inadecuada presenta un aumento considerado en el presente año con respecto a los anteriores.



**Grafica 2**comparativos de índice de calidad de agua Fuente: CDMB 2019

La importancia de un estudio de modelación de la calidad de las aguas consiste en conocer la cantidad, calidad y tipo de sustancias que son arrojadas a un cuerpo receptor. Con base a su calidad se pueden fijar condiciones particulares de descarga, acciones encaminadas a la conservación del recurso, ayudando así a mantener la flora y fauna de los cuerpos receptores, el recurso del agua y promover la conservación del medio natural e impulsar a sectores en los cuales se necesita del recurso hídrico para poder desarrollarse (SARH, 1980).

El primer paso en el modelado del sistema es subdividirlo en tramos o segmentos que tienen características hidráulicas uniformes. Cada tramo se divide a su vez en elementos computacionales de igual longitud. Los tramos del río, que se representan como conjuntos de elementos, son la base de la entrada de datos. Para todos los elementos computacionales dentro de un tramo, tanto los datos hidráulicos como los coeficientes de velocidad de reacción, condiciones iniciales e incrementos de flujo, se consideran constantes. (MONTELONGO CASANOVA, y otros, 2008).

El uso de modelos de calidad de agua tiene por finalidad simular los fenómenos que ocurren en la realidad. No obstante, a pesar de los recientes avances en ciencia y tecnología, no existe un modelo que simule a la perfección los complejos procesos que involucra la hidrología debido a que este es un sistema estocástico, es decir que es incierto o cambiante a la presencia de errores por diferente origen.

Estos errores pueden ser minimizados mediante un adecuado proceso de calibración, en este trabajo se presenta una metodología para la calibración del modelo hidráulico mediante el uso del programa informático Excel que permite la calibración y el análisis de los resultados mediante la herramienta solver que se encuentra en el software, la calibración se obtiene mediante la comparación de los datos experimentales de las concentraciones de metales pesados presentes en la fase acuosa - sólida y los resultados arrojados en el modelo buscando el ajuste de las constantes de destino.

La metodología propuesta sugiere que los parámetros del modelo ADZ calibrados objetivamente a la escala de un tramo de río, para representar con precisión procesos de transporte de solutos en dicho tramo.

## 2.2.2 Modelos de calidad de agua

En la actualidad existe un sin número de modelos matemáticos, desarrollados con la finalidad de estudiar el comportamiento de un determinado contaminante o un grupo de éstos a lo largo de una corriente natural. A continuación, se presentan software para la modelación de la calidad del agua:

**Tabla 1 Modelos de calidad de agua Fuente: Baeza, N 2019**

Modelo	Características
<p style="text-align: center;"><b>Software QUAL2Kw</b></p>	<p><b>Descripción:</b> es un modelo gratuito de calidad el agua que tiene la capacidad de simular una corriente principal y tres corrientes secundarias</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Conductividad, sólidos suspendidos inorgánicos, oxígeno disuelto, DBO rápida, DBO lenta, nitrógeno orgánico disuelto, nitrógeno amoniacal, nitratos, fósforo orgánico disuelto, fósforo inorgánico, fitoplancton, detritus, patógenos, alcalinidad, carbono orgánico total, algas de fondo, temperatura y caudal</p> <p><b>Desarrollado:</b> Chapra y Pelletier para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) en el 2008</p>
	<p><b>Descripción:</b> Es un software gratuito, que modela hidráulicamente cauces de drenaje naturales y artificiales mediante la solución de la ecuación general de la energía obteniendo</p>

<p><b>Software HEC-RAS</b></p>	<p>las láminas de agua y parámetros hidráulicos</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Geometría del terreno incluyendo el cauce del río, las secciones transversales, las líneas de flujo (velocidad, pendiente, rugosidad de Manning, y caudal)</p> <p><b>Desarrollado:</b> por el Hydrologic Engineering Center del US Army Corps of Engineers</p>
<p><b>Software QUASAR</b></p>	<p><b>Descripción:</b> Es un software que modela un río en una serie de tramos definidos por confluencias de tributarios, vertederos, tomas públicas de abastecimiento de agua o descargas de efluentes, y puede ser corrido en dos modos diferentes: modo planificación y modo dinámico.</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> Son caudales, amoníaco, pH, nitratos, temperatura, E. Coli, demanda bioquímica de oxígeno, oxígeno disuelto, contaminante conservativo o trazador</p> <p><b>Desarrollado:</b> Whitehead, P.E., William, R.J. and Lewis, D.R., 1997</p>
<p><b>Software MIKE 11</b></p>	<p><b>Descripción:</b> Este modelo simula los procesos de reacción de sistemas multi compuestos incluyendo la degradación de la materia orgánica, la fotosíntesis y respiración de las plantas, la nitrificación y el intercambio de oxígeno con la atmósfera.</p> <p><b>Parámetros modelados:</b> son temperatura, oxígeno disuelto, materia orgánica (DBO),</p>

	<p>amoníaco/amonio, fósforo, nitratos, coliformes totales y fecales.</p> <p><b>Desarrollado:</b> Instituto de Calidad del Agua de Dinamarca (DHI), 1999</p>
--	---

## 2.2.3 Modelo de Simulación Empleado

### 2.2.3.1 Software HEC-RAS

Hec - Ras es un sistema integrado diseñado para un uso interactivo en un ambiente multitarea y multiusuario. El sistema comprende una interfase gráfica, componentes hidráulicos separados, capacidad de manejo, almacenamiento de datos y facilidades de reportes.

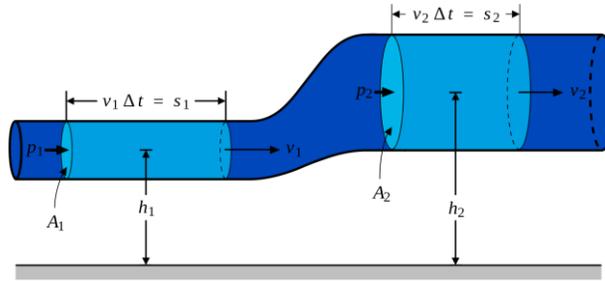
El sistema está compuesto actualmente por dos componentes de análisis hidráulico unidimensional: Cálculo de perfiles superficiales en flujo permanente y simulación de flujo no permanente.

Todos los componentes utilizan una representación geométrica común y comparten las mismas rutinas de cálculo. Adicionalmente, el sistema contiene varias rutinas de diseño hidráulico, que pueden ser utilizadas una vez calculado el perfil superficial del agua.

Este software está diseñado para el modelamiento hidráulico de cauces de drenaje naturales y artificiales mediante la solución de la ecuación general de la energía obteniendo las láminas de agua y parámetros hidráulicos de las secciones que se introducen mediante el siguiente procedimiento:

Entre una sección y otra, se resuelve la ecuación de la energía (Bernoulli) como se observa en la ecuacion1 para obtener las alturas de escurrimiento

$$Y_2 + Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} = Y_1 + Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} + h_e \quad \text{Ecu. 1}$$



**Grafica 3 Hidráulica de un cuerpo de agua aplicando la ecuación de Bernoulli Fuente: Dinámica de Fluidos pág. 105**

Dónde:

- Y1, Y2 = Altura de agua en las secciones transversales 1 y 2
- Z1, Z2 = Cota de terreno las secciones transversales 1 y 2
- V1, V2 = velocidades promedio de la sección
- $\alpha_1, \alpha_2$  = coeficientes de ajuste de velocidades
- g = aceleración de la gravedad
- he = pérdida de carga

### 2.2.3.2 Capacidades del Modelo

HEC - RAS puede modelar perfiles superficiales en régimen permanente, donde el componente permite calcular los perfiles superficiales del agua en flujo permanente gradualmente variado. También, puede manejar sistemas completos de ríos o canales, dendríticos o de un solo cauce. Además, evalúa las pérdidas de energía mediante la ecuación de Manning, el coeficiente de contracción y expansión.

Para modelar un flujo rápidamente variado utiliza la ecuación de conservación de cantidad de movimiento, la cual ha sido diseñada para ser aplicado en estudios de planicies inundables y tiene la capacidad de incorporar los efectos de diques marginales o limpieza y mejoramiento de cauces. También incorpora la posibilidad de evaluar el comportamiento del fondo del río en cuanto a la socavación local o general, así como la capacidad de transporte de sedimentos del tramo considerado.

Finalmente, para simular flujos no-permanentes unidimensionales lo ejecuta través de una red completa de canales, desarrollada inicialmente para flujos subcríticos.

### 2.2.3.3 Modelo de Advección dispersión ADZ

El modelo ADZ simplifica el fenómeno dispersivo en una zona de almacenamiento simple con un volumen definido y con un tiempo de residencia asociado. Este modelo se desarrolló para representar los efectos de dispersión en una zona muerta o zonas de almacenamiento en un tramo de un río. Todos los procesos de dispersión que un soluto sufre en un tramo de un río se agrupan en un término que se conoce como  $T_r$ , tiempo de residencia de la zona muerta agregada.

Los principales parámetros de formulación del modelo son los siguientes:

- Tiempo de residencia ( $T_r$ ): representa el componente del tiempo de viaje global asociado con la dispersión.
- Retraso advectivo ( $\tau$ ): representa el componente del tiempo de viaje global asociado con la advección.
- Tiempo de viaje del soluto ( $t$ ): define el tiempo total que el soluto permanece el tramo siendo sometido a Advección y dispersión.

$$T = T_r + t$$

La fracción dispersiva (DF) es una proporción que representa que tanto volumen total, de un tramo se encuentra completamente mezclado.

$$DF = \frac{T_r}{T}$$

Presentaciones completas y claras del modelo ADZ se encuentran en Young y Wallis, (1993) y Lees et al (2000). El modelo de dispersión longitudinal agregado en un tramo corto de un río de montaña, para solutos conservativos, y flujo permanente sin aportes de caudal lateral, está dado por:

$$\frac{d_c(t)}{d_t} = \frac{1}{t - \tau} (C_u(t - \tau) - c(t))$$

Donde,

C: Concentración conservativa del soluto aguas abajo a la salida del tramo agregado del estudio del río.

$C_u$ : Concentración conservativa del soluto agua arriba a la entrada del tramo de estudio.

t: Tiempo de viaje del soluto en promedio en el tramo.

$\tau$ : Tiempo de primer arribo, o retraso advectivo entre la entrada y la salida del tramo.

El modelo agregado permite representar desde dispersión.

#### **2.2.3.4 Análisis de Incertidumbre**

En modelos ambientales ocurren eventos indeseables que pueden resultar de una acción particular cuando las decisiones de ordenación van a basarse en estimados cuantitativos, es deseable que la incertidumbre sea cuantificada y utilizada para calcular la probabilidad de lograr el objetivo deseado y de incurrir en eventos indeseables.

Los siguientes tipos de errores pueden ser considerados al momento de determinar la incertidumbre:

- a. Error del modelo.
- b. Error en las variables de entrada (variables dependientes y
- c. Condiciones iniciales.
- d. Error en los datos de entrada usados para correr el modelo.
- e. Errores de parámetros (constantes de velocidad, coeficientes y variables independientes).

Cabe resaltar que el error del modelo puede ser causado por procesos incluidos u omitidos impropriamente o una mala descripción de las variables de estado para detallar el ecosistema.

#### **2.2.3.4 Metales a modelar**

Los metales pesados son un grupo de elementos químicos que poseen una densidad alta y tóxico o venenoso en concentraciones bajas. El incremento de concentración en las aguas de

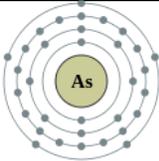
estos compuestos se debe principalmente a contaminación puntual de origen industrial o minero. ((Fasca), 2017)

Los metales a los cuales se les va a analizar el comportamiento de la concentración y simulación del transporte son los siguientes con algunas características químicas y físicas:

**Tabla 2 Características química y físicas del Cianuro Fuente: Baeza N 2019**

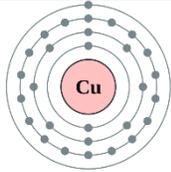
$[\text{:C}\equiv\text{N:}]^-$	<b>CIANURO</b>
<b>Símbolo químico</b>	CN-
<b>Punto de Fusión</b>	563,7 °C
<b>Punto de Ebullición</b>	1496 °C
<b>Densidad</b>	1,60 g/cm <sup>3</sup>
<b>Aspecto natural</b>	Incoloro

**Tabla 3 Características química y físicas del Arsénico Fuente: Baeza N 2019**

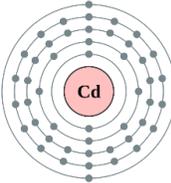
	<b>Arsénico</b>
<b>Símbolo químico</b>	As
<b>Numero atómico</b>	33
<b>Punto de Fusión</b>	817 °C

<b>Punto de Ebullición</b>	613 °C
<b>Densidad</b>	5727 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	74.92160 u
<b>Aspecto natural</b>	Gris

**Tabla 4** Características química y físicas del Cobre Fuente: Baeza N 2019

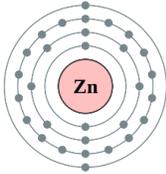
	<b>Cobre</b>
<b>Símbolo químico</b>	Cu
<b>Numero atómico</b>	29
<b>Punto de Fusión</b>	1084,62°C
<b>Punto de Ebullición</b>	2562 °C
<b>Densidad</b>	8960 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	63,546 u
<b>Aspecto natural</b>	Rojizo

**Tabla 5** Características química y físicas del Cadmio Fuente: Baeza N 2019

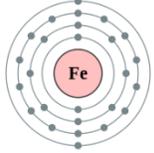
	<b>Cadmio</b>
---	---------------

<b>Símbolo químico</b>	Cd
<b>Numero atómico</b>	48
<b>Punto de Fusión</b>	321 °C
<b>Punto de Ebullición</b>	768 °C
<b>Densidad</b>	8650 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	112.411 u
<b>Aspecto natural</b>	Blanco azulado

**Tabla 6 Características química y físicas del Zinc Fuente: Baeza N 2019**

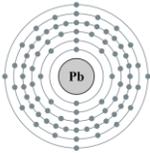
	<b>Zinc</b>
<b>Símbolo químico</b>	Zn
<b>Numero atómico</b>	30
<b>Punto de Fusión</b>	420 °C
<b>Punto de Ebullición</b>	907 °C
<b>Densidad</b>	7140 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	65,38 u
<b>Aspecto natural</b>	Blanco azulado

**Tabla 7 Características química y físicas del Hierro Fuente: Baeza N 2019**

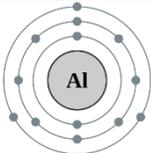
	<b>Hiero</b>
<b>Símbolo químico</b>	Fe

<b>Numero atómico</b>	26
<b>Punto de Fusión</b>	1.538 °C
<b>Punto de Ebullición</b>	2.862 °C
<b>Densidad</b>	7,874 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	55,845 u
<b>Aspecto natural</b>	Gris plateado

**Tabla 8 Características química y físicas del Plomo Fuente: Baeza N 2019**

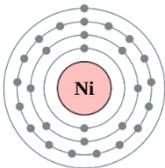
	<b>Plomo</b>
<b>Símbolo químico</b>	Pb
<b>Numero atómico</b>	82
<b>Punto de Fusión</b>	327°C
<b>Punto de Ebullición</b>	1749 °C
<b>Densidad</b>	11.340 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	207.2 u
<b>Aspecto natural</b>	Gris azulado

**Tabla 9 Características química y físicas del Aluminio Fuente: Baeza N 2019**

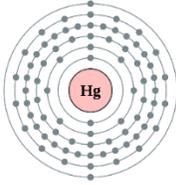
	<b>Aluminio</b>
<b>Símbolo químico</b>	Al

<b>Numero atómico</b>	13
<b>Punto de Fusión</b>	660°C
<b>Punto de Ebullición</b>	2519 °C
<b>Densidad</b>	2698,4 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	26.98153 u
<b>Aspecto natural</b>	Grisáceo

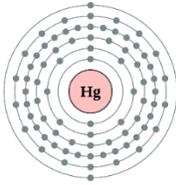
**Tabla 10 Características química y físicas del Níquel Fuente: Baeza N 2019**

	<b>Níquel</b>
<b>Símbolo químico</b>	Ni
<b>Numero atómico</b>	28
<b>Punto de Fusión</b>	1455°C
<b>Punto de Ebullición</b>	2457 °C
<b>Densidad</b>	8908 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	58.71 u
<b>Aspecto natural</b>	Blanco plateado

**Tabla 11 Características química y físicas del Níquel Fuente: Baeza N 2019**

	<b>Mercurio</b>
<b>Símbolo químico</b>	Hg
<b>Numero atómico</b>	80
<b>Punto de Fusión</b>	-39°C
<b>Punto de Ebullición</b>	357 °C
<b>Densidad</b>	13534 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	200.59 u
<b>Aspecto natural</b>	Blanco

**Tabla 12 Características química y físicas del Cromo Fuente: Baeza N 2019**

	<b>Cromo</b>
<b>Símbolo químico</b>	Cr
<b>Numero atómico</b>	24
<b>Punto de Fusión</b>	1857°C
<b>Punto de Ebullición</b>	2672 °C
<b>Densidad</b>	7140 g/cm <sup>3</sup>
<b>Masa atómica</b>	51.9961 u
<b>Aspecto natural</b>	Blanco gris brillante

### 2.2.5 Antecedentes

La CDMB es un ente corporativo autónomo creado por la ley 99 de 1993, de carácter público, integrado por las entidades territoriales que por sus características constituyen geográficamente

un mismo ecosistema o conforman una unidad geopolítica, biogeográfica o hidro geográfica. Está dotada de autonomía administrativa y financiera, patrimonio propio y personería jurídica, siendo la encargada por la ley de administrar dentro del área de su jurisdicción, el medio ambiente y los recursos naturales renovables, y propender por su desarrollo sostenible, de conformidad con las disposiciones legales.

A lo largo del tiempo, se han hecho una gran cantidad de estudios al agua con diferentes métodos evaluando diferentes componentes, en cuando a modelación la corporación cuenta con investigaciones de contaminación de fuentes hídricas por parámetros biológicos, pero en la zona estudiada no se ha realizado una modelación del transporte de metales pesados por ende, se hizo necesario basarse en artículos científicos investigativos referentes en este trabajo los cuales se encuentran explicados a continuación

Ingrid Keupers y Patrick Willems (2017) en el estudio ‘‘Desarrollo y prueba de un modelo de calidad del agua del río conceptual rápida ‘’ se realizó un modelo basado en la gestión de calidad de los ríos depende en gran medida de los modelos de calidad del agua del río para simular la evolución temporal y espacial de las concentraciones de contaminantes en la masa de agua. Tales modelos se construyen típicamente mediante la extensión de modelos hidrodinámicos detalladas con un componente de la descripción de los procesos de transformación de advección-difusión y la calidad del agua de una manera detallada, de base física. Identificaron un método para establecer un modelo de calidad del agua del río conceptual ha sido desarrollado. En lugar de calcular las concentraciones de la calidad del agua en cada nivel del agua y el nodo de descarga, el brazo del río se divide en depósitos conceptuales basados en la información del usuario, como la ubicación de interés y entradas de contorno. Estos depósitos se modelan como Reactor de Flujo Pistón (PFR) y se agita continuamente reactor de tanque (CSTR) para describir los procesos de advección y difusión.

Rubert (2013), En la investigación ‘‘Microorganismos indicadores de la calidad del agua potable en cuba’’, estudiaron los agentes patógenos transmitidos por el agua analizar el enfoque actual existente a nivel nacional e internacional, en relación con los indicadores microbiológicos empleados para la evaluación del agua potable, como elementos clave, y a partir de estos, propusieron un esquema de monitoreo en Cuba. Los resultados reflejaron, la alternativa de

considerar, la aplicación de un esquema para monitoreo complementario en Cuba, que incluya como indicadores de contaminación del agua potable además de las bacterias, algunos agentes biológicos no considerados en la norma, como los virus y los parásitos. Asimismo, indicaron la necesidad de establecer un valor de referencia y definir los microorganismos a emplear en los monitores de validación, operativo o verificación. Esta propuesta aportó importante información para la actualización de la norma cubana sobre la base del conocimiento de los estándares internacionales más reconocidos.

Barrero (2015), “Evaluación de la calidad del agua en el humedal la conejera, localidad 11 de suba, Bogotá D.C”, se realizó un diagnóstico ambiental del humedal la Conejera de Bogotá, mediante la fracción del mismo, en donde se ubicaron seis puntos críticos en términos de la calidad del agua y su previa caracterización sociocultural, se realizó un muestreo puntual y posteriormente se analizaron muestras en el laboratorio para determinar diferentes parámetros físicos, químicos y microbiológicos. Con los datos obtenidos y los proporcionados por la Empresa de Acueducto de Alcantarillado de Bogotá (EAAB), se realiza un análisis integral, a través del cual se puede evidenciar los cambios en la calidad del agua que se encuentra en el Humedal la Conejera, que en términos generales a comparación con los muestreos realizados anteriormente sigue una correcta actividad fotosintética en su interior esto evidenciado en los resultados del parámetro de pH, sin embargo parámetros como conductividad, temperatura, sólidos sedimentables, coliformes totales, nitrógeno total, entre otros. A partir de esto, determinaron que el Humedal la Conejera presenta impactos ambientales que contribuyen en la alteración de las propiedades físico-químicas y microbiológicas del agua, como el uso inadecuado del suelo que constituye la zona de ronda con ubicación de viviendas de invasión, botaderos de residuos sólidos de tipo orgánico e inorgánico, vertimientos de aguas residuales haciendo que se presente un alto contenido en NMP de Coliformes Totales y fecales.

Según Gutiérrez (2014) en la investigación “Evaluación de la cinética de oxidación y remoción de materia orgánica en la auto purificación de un río de montaña”, en los cuerpos hídricos del Área Metropolitana de Bucaramanga: Suratá, Tona, Oro, Frío y Lato, ubicados en las cabeceras de los Municipios: Lebrija, Girón, Bucaramanga, Floridablanca, y Piedecuesta, respectivamente, presentaron contaminación por materia orgánica y metales pesados,

convirtiéndose en una emergencia ambiental. Realizaron una evaluación la cinética de la oxidación de dicha carga orgánica y de las tasas de desoxigenación, aireación, sedimentación y decaimiento, teniendo en cuenta estudios preliminares hidrológicos, hidráulicos e hidrográfico y la estimación de las tasas cinéticas de oxidación donde se evaluaron las concentraciones de parámetros que evidencian la cantidad de materia orgánica disuelta y particulada en cada uno de los (7) tramos escogidos en el río y para determinar la calidad del agua se realizaron una serie de inspecciones y muestreos desde el 2008 al 2012, en época de estiaje y húmedas, cumpliendo con la normas del Ministerio del Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial.

Granial, Carrillo (2004), en el estudio “Calidad del agua del río Zanatenco en el estado de Chiapas, México”, determinaron la calidad de agua del Río Zanatenco recolectando muestras de agua en el cauce del río en noviembre del 2003. Los sitios de muestreo los seleccionaron de acuerdo a las condiciones del lugar, su accesibilidad y las actividades que se desarrollan en la zona circundante al punto de muestreo. Determinaron parámetros de coliformes totales y fecales determinados en las muestras de agua rebasaron el límite máximo permisible por la NOM, presentándose los valores más altos en la parte alta de la cuenca y disminuyendo hacia la parte más baja. Con base en los resultados de este estudio y considerando el Índice de Calidad del Agua (ICA), el río Zanatenco se encuentra contaminado y no debe usarse para consumo humano, y de utilizarse, se requiere de un tratamiento de agua que reduzca las sustancias contaminantes.

En constante Hashemi (2017) en su trabajo investigativo “Planificación de la calidad del agua en ríos: la capacidad de asimilación y dilución de flujo” centran que las concentraciones y la distancia en que la contaminación está en contacto con el agua del río son características necesarias para determinar la capacidad de asimilación y el flujo de dilución del mismo. Además, demuestran que la variación de la descarga de caudal de los ríos en las diferentes estaciones puede modificar la capacidad de asimilación de hasta 97%. Se concluye, que, al aumentar la velocidad del flujo de agua, la duración del contacto de la contaminación se reduce y el tiempo de decaimiento de la contaminación y la dispersión también se reduce. Los picos de las chemographs contaminantes aumentan en la posición de aguas abajo y el modelo se ve obligado a reducir la entrada de contaminación para alcanzar el límite permisible. Para este fin, el

movimiento de la contaminación en el río se ha simulado en el software MATLAB y el óptimo flujo de agua, lo que causa un daño mínimo al medio ambiente.

Según Wu (2017) en la investigación “Evaluación de la calidad del agua del río mediante el índice de calidad del agua en la Cuenca del Lago Taihu, China”, determinaron que La calidad del agua de este lago presenta variaciones estacionales distinta, con los valores más altos del ICA en otoño, seguido de la primavera y el verano, y los valores más bajos en invierno. Con el modelo matemático realizado, los resultados mostraron que la mayoría de los parámetros variaron significativamente entre los seis sistemas de río evaluados con la excepción de la temperatura del agua y NO<sub>3</sub>-N. También se infiere que este tipo de modelo podrían ser utilizados para una evaluación de bajo costo, solo si se tiene en cuenta los parámetros ambientales y las evaluaciones de la calidad del agua cuando se utiliza el ICA ya que presentó un alto estándar de aplicabilidad.

Según Hernández y Venkatesh (2012) en su investigación “Evaluación de las características de asignación y de asimilación de residuos de carga óptima en el Arroyo cuenca del Río Colorado, TX largo de la frontera entre Estados Unidos y México” determinaron que la capacidad de asimilación del río no es suficiente para llevar a los flujos de corriente en sus concentraciones permitidas de descarga que implica una desigualdad entre las altas con respecto a la carga de los costos de tratamiento y los análisis de sensibilidad indicaron que la capacidad de carga se ve más afectada por las decisiones políticas hechas por los estándares de calidad del agua a continuación, donde iban a ser forzada (es decir, lugares de cumplimiento). Las áreas urbanas actualmente cubren 13% de la cuenca, pero contribuyen casi el 45% de los no-total de puntos las sub-cuencas más aguas arriba y abajo en la actualidad más estresados y necesitan reducir sus cargas.

Sin embargo, Novo (2017) en el estudio de “Contabilización de la capacidad de asimilación de los Sistemas de Agua en Escocia”, insiste en tener relevancia con respecto a una serie de contaminantes, y sugieren que elementos como el arsénico, el plomo y el mercurio pueden representar una amenaza para la sostenibilidad y la salud de los ecosistemas. Pero, poca investigación se ha hecho en términos de su capacidad de asimilación y su impacto en las evaluaciones de la huella hídrica gris. Además, los resultados indican que las condiciones de

fondo podrían ser relevantes al realizar el análisis de sostenibilidad a diferentes escalas espaciales. El estudio también plantea cuestiones relevantes en relación con la gestión del territorio enfoques frente a los enfoques tradicionales de tratamiento de agua 'de fin de tubería', y la definición de las concentraciones máximas y de fondo. En este sentido, se necesitan más estudios para comprender las ventajas y desventajas entre los diferentes servicios de los ecosistemas en función de cómo estas concentraciones son definidas.

Yoshiaki Tsuzuki (2015), en la investigación “relaciones entre la descarga de contaminantes y la calidad del agua en los ríos de mejor y peor calidad del agua” Para la estimación de la descarga de contaminantes procedentes de fuentes difusas en base a datos de uso de la tierra, las descargas de contaminantes en la década de 1970 y en la década de 2010) de la cuenca del río Brisbane se estimaron cuando los datos de uso de la tierra y la tasa de carga. datos de la descarga de contaminantes incluidos en NPI eran en su mayoría a partir de 2000. Las descargas de contaminantes procedentes de fuentes puntuales antes de 2000 y después de 2012 se supone que ser constante usando cinco promedios año en 2000-2004 y 2008-2012. Las descargas de contaminantes para TN y TP se calcularon como el total de las descargas de contaminantes de las fuentes difusas y puntuales. Las relaciones de las descargas de contaminantes y la calidad del agua fueron investigadas por los datos medios anuales y los datos diarios de TN y TP. Se investigaron a largo de relaciones a término entre las descargas de contaminantes estimados, con y sin los efectos de la precipitación anual, y los datos representativos de calidad agua anual.

## **2.3 MARCO CONCEPTUAL**

### **2.3.1. Calidad de agua**

Para cualquier proceso de modelación del recurso hídrico, ya sea por contaminación biológica, o metálica debe existir una relación directa con la calidad de agua, estas condiciones están establecidas por el uso del agua a través de las normas de utilización, uso y aprovechamiento del recurso. La calidad del agua es una construcción social que depende de los usos y valores atribuidos al líquido ((WRI), 2001), los cuales, a su vez, influyen en la percepción de los

usuarios. La problemática del agua en relación con su contaminación por orígenes diversos como son los desechos sólidos, la minería y las aguas residuales que son acarreados directamente a sus cursos, como los principales causantes del deterioro de la calidad de las aguas de los ríos y arroyos. Barba (2001)

El termino calidad del agua se refiere a las características químicas, físicas, biológicas y radiológicas del agua. Es una medida de la condición del agua en relación con los requisitos de una o más especies bióticas o a cualquier necesidad humana o propósito. Se utiliza con mayor frecuencia por referencia a un conjunto de normas contra los cuales puede evaluarse el cumplimiento. Los estándares más comunes utilizados para evaluar la calidad del agua se relacionan con la salud de los ecosistemas, seguridad de contacto humano y agua potable. (Instituto de Hidrología, 2014)

Para explicar el estado en cuanto a la cantidad y calidad del agua en Colombia, se desarrolló el "Sistema de Indicadores Hídricos" que pretenden responder a los cuestionamientos sobre la disponibilidad del recurso y las restricciones por afectaciones a la oferta o a la calidad. Estos índices están asociados al régimen natural (Índice de Aridez - IA, Índice de Regulación Hídrica - IRH) y a la intervención antrópica (Índice de Uso del Agua - IUA, Índice de Vulnerabilidad al desabastecimiento- IVH, Índice de Amenaza Potencial por Afectación a la Calidad del Agua - IACAL e Índice de Calidad del Agua - ICA).

El índice de calidad del agua ICA (2018) es un valor que se asigna (entre 0 y 1) a un cuerpo de agua para cuantificar es estado en que se encuentra referido al uso o propósito con que se ha definido el índice, ya sea para asistir en la toma de decisiones o en procesos de divulgación del estado de los cuerpos de agua. El valor se calcula en base a parámetros previamente seleccionados que han sido medidos en muestras del cuerpo de agua. Este número es una agregación de las condiciones físicas, químicas y en algunos casos microbiológicas del cuerpo de agua, el cual da indicios de los problemas de contaminación. Toma en cuenta una gama de factores ambientales a través de variables simples que permiten el análisis de los principales orígenes de la contaminación: oxígeno disponible, materia orgánica, sólidos, mineralización, acidez, entre otros, y características claves de la columna de agua como la temperatura. Sin embargo, el alcance de este indicador no es capaz de integrar la complejidad de los fenómenos naturales y la variabilidad climática de forma minuciosa y diferencial, impidiendo identificar de forma específica si el origen de los aportes a la muestra es natural o antrópico, aunque algunas

veces puede inferirse intuitivamente el origen principal de dichos aportes. (Colombia C. N., 2008)

Existen variables pertenecientes al ciclo hidrológico como son la precipitación y la escorrentía las cuales influyen al arrastre de articulas contaminantes provenientes de procesos antrópicos realizados cerca de los cuerpos de agua. Para el grupo GESAMP (Group of Experts on the Scientifics Aspects of Marine Pollution), la contaminación se define como "Introducción por el hombre en el ambiente acuático de sustancias o energía que puedan causar o causen, efectos dañinos o tóxicos que perjudiquen los recursos vivos, constituyan un peligro para la salud humana, obstaculicen las actividades marítimas, comprendida la pesca, menoscaben la calidad del agua y disminuyan los valores estéticos o de recreación" (GESAMP, 2002). En algunos casos los cuerpos de agua tienen capacidad de asimilación a los contaminantes vertidos en él, pero a esto influyen variables hidrometeorológicas y morfológicas de la cuenca. La calidad de la misma, puede medirse a través de sus características físico-químicas y biológicas, cada una de ellas puede a su vez ser caracterizado por distintos parámetros que muestran detalladamente los componentes reales del agua. (MONTELONGO CASANOVA, y otros, 2008)

### **2.3.2. Calidad del agua: impacto y modelación**

El agua constituye un recurso vital, es en sí misma el origen de la vida, el deterioro de la misma se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial con el crecimiento de la población humana, la expansión de la actividad industrial y agrícola y la amenaza del cambio climático como causa de importantes alteraciones en el ciclo hidrológico.

A nivel global, el principal problema relacionado con la calidad del agua lo constituye la eutrofización, que es el resultado de un aumento de los niveles de nutrientes (generalmente fósforo y nitrógeno) y afecta sustancialmente a los usos del agua. Las mayores fuentes de nutrientes provienen de la escorrentía agrícola y de las aguas residuales domésticas (también fuente de contaminación microbiana), de efluentes industriales y emisiones a la atmósfera procedentes de la combustión de combustibles fósiles y de los incendios forestales.

La baja calidad del agua afecta directamente la cantidad de agua de diversas maneras porque que no puede utilizarse para consumo, para la industria o la agricultura y reduce de forma

efectiva la cantidad de agua disponible en una determinada zona. (Departamento de Asuntos Economicos y Sociales de las Naciones Unidas (ONU-DAES), 2014)

La modelación es una herramienta fundamental en el estudio de áreas contaminadas con metales pesados. En la actualidad, con el empleo de estudios hidrológicos e hidráulicos se pueden manejar hipótesis realistas para la prevención de desastres ambientales y la toma de decisiones ingenieriles correctas en áreas de riesgo. En este trabajo se ejecutó una modelación hidráulica a través del modelo hidrodinámico unidimensional HEC-RAS y el Modelo de Zona Muerta Agregada de advección y dispersión ADZ en tres tramos de la subcuenca Surata para solutos conservativos y flujo permanente sin aportes de caudal lateral. (Castro, 2015)

### **2.3.3. Metales pesados en el medio ambiente**

La actividad industrial y minera arroja al ambiente metales tóxicos como plomo, mercurio, cadmio, arsénico, cromo entre otros, los cuales son dañinos para la salud humana y para la mayoría de formas de vida. Además, los metales originados en las fuentes de emisión generadas por el hombre (antropogénicas), incluyendo la combustión de gasolina con plomo, se encuentran en la atmósfera como material suspendido que respiramos. Por otro lado, las aguas residuales no tratadas, provenientes de minas y fábricas, llegan a los ríos, mientras los residuos industriales contaminan las aguas subterráneas. Cuando se abandonan metales tóxicos en el ambiente, contaminan el suelo y se acumulan en las plantas y los tejidos orgánicos. La peligrosidad de los metales pesados es mayor al no ser química ni biológicamente degradables. Una vez emitidos, pueden permanecer en el ambiente durante cientos de años. (Roja, 2019).

En la zona de estudio hay presencia de actividad minera, por un proyecto de la Sociedad Minera de Santander Minesa, está localizado cerca de los municipios de California y Suratá en el departamento de Santander, A 60 Km de Bucaramanga por fuera de los límites del Páramo como se observa en la Figura 2, el mineral que se extrae es oro en una extensión de 379 hectáreas y su método de explotación es subterráneo. (Minesa, 2019).



**Grafica 4 Minería en California, Santander Fuente: Sociedad minera de Santander**

Los metales pesados son en general tóxicos para los seres humanos, y por ser bioacumulativos no puede ser eliminados por el cuerpo, lo que provoca que las concentraciones permitidas en el agua de consumo sean muy bajas. Cabe señalar que la presencia de estos elementos es muy poco habitual y de aparecer lo hacen mediante trazas, es decir, en concentraciones muy por debajo del límite estipulado para aguas de consumo humano. Como fuente de abastecimiento se utilizan, siempre que sea posible, captaciones que en origen cumplen con el límite de concentración establecido. Sin embargo, existen zonas en la que esto no puede hacerse, debido a la presencia generalizada de una concentración elevada de algún metal pesado en las aguas subterráneas/superficiales de esa área. En esos casos se realiza un tratamiento secundario permitido por la autoridad sanitaria que elimine el metal. ((Fasca), 2017)

Los límites fijados para la presencia de metales pesados en el agua de consumo humano por el Decreto único compilatorio 1076 del 2015 son las siguientes

**Tabla 13 Límite de concentración de metales pesados en el agua por del decreto único compilatorio 1076 del 2015.**

<b>Metal pesado</b>	<b>Concentración en el cuerpo (Mg/l)</b>
Mercurio	0,002
Níquel	0,2
Cobre	1
Plomo	0,05
Cromo	0,05

#### **2.3.4. Efectos de metales en la salud.**

##### **Plomo**

El plomo es un metal pesado que se ha utilizado durante muchos años debido a su resistencia a la corrosión, ductilidad, maleabilidad y facilidad para formar aleaciones. El plomo es absorbido por inhalación, ingestión y a través de la piel (Singh, 2003). Cada metal y cada elemento químico contaminante tiene un mecanismo de acción y un lugar de acumulación preferido. El más conocido es el plomo que afecta varios sistemas, tal como el sistema nervioso donde puede dañar las neuronas del cerebro, la médula ósea y el riñón.

La intoxicación por plomo puede simular otras enfermedades, como la esclerosis, que es una enfermedad incurable muy complicada en cuanto a sus síntomas, y la intoxicación por plomo puede simular y afectar al sistema nervioso con la misma sintomatología, como parestesias y fatiga. La problemática para eliminar estos metales del cuerpo es que se eliminan en muy baja escala, entonces, este efecto es más bien acumulativo, como son metales pesados justamente, de peso molecular muy alto, no son metabolizados para empezar y los que están diluidos en la sangre, siempre se encuentran en alguna parte dañando, pueden llegar a eliminarse por el riñón y por otras vías. (Revilla, 2009).

##### **Cadmio**

El cadmio que ingresa por vía respiratoria o por vía oral, se transporta a la sangre y se concentra en el hígado y el riñón. El cadmio tiene la capacidad de acumularse en estos órganos

vitales lo que produce daños irreversibles aún para concentraciones reducidas. De otra parte, el tiempo de permanencia en estos órganos puede ser muy elevado. Así, el tiempo de vida media del cadmio en el riñón puede alcanzar los 30 años. Al cadmio se le reconoce como uno de los metales pesados con mayor tendencia a acumularse en las plantas. El cadmio causa severos desequilibrios en los procesos de nutrición y transporte de agua en las plantas (Singh & Tewari, 2003). La favorabilidad de acumulación de cadmio en las plantas ha llevado a considerarlas como potenciales candidatos para tareas de fitorremediación de este metal. (Singh, 2003).

### **Mercurio**

El Mercurio es un metal líquido a temperatura ambiente, que además de encontrarse en su estado elemental, se puede hallar como derivados inorgánicos y derivados orgánicos. El Mercurio elemental es poco soluble y por lo tanto poco tóxico al ingerirse, pero puede emitir vapores tóxicos a cualquier temperatura y ocasionar intoxicaciones agudas y crónicas por su inhalación (Sarmiento, 1999). La toxicidad que exhibe el mercurio depende drásticamente de la fase química en la que se encuentre. El metilmercurio es una de las formas con elevada toxicidad y es muy fácilmente incorporado en la cadena alimenticia y bio-acumulado en seres vivos. Afecta principalmente al sistema nervioso y puede producir graves daños en el cerebro en estado fetal. Es activamente perjudicial para el sistema cardiovascular y puede ser cancerígeno.

### **Aluminio**

El proceso de inhalación de este metal afecta a las personas que trabajan con el mismo porque respiran cantidades altas de polvo de aluminio pueden desarrollar problemas respiratorios tales como tos o alteraciones que se detectan en radiografías de tórax. El uso de máscaras para respirar y el control de los niveles de polvo en fábricas han eliminado este problema en gran parte. De igual manera, las personas que sufren de enfermedad renal acumulan una gran cantidad de aluminio en sus cuerpos. La enfermedad de riñón impide la eliminación de aluminio en la orina. Algunas veces, estas personas desarrollaron enfermedades de los huesos o del cerebro que los doctores atribuyeron al exceso de aluminio. (ATSDR, 2008)

## **2.3.5 ASPECTOS AMBIENTALES DE LA ZONA**

### **2.3.51 Calidad del agua del río Suratá**

El río Suratá es un cauce natural abierto, en gran parte está deteriorado por el uso indiscriminado y la contaminación del recurso hídrico generado por la disposición de aguas residuales de consumo humano, minero y de actividades agropecuarias, así como la ocupación de los cauces para asentamientos subnormales y explotación artesanal minera, ha conllevado a que se generen conflictos entre los habitantes de la población en la microcuenca Río Vetas Wolff (2001). De igual forma en la microcuenca Suratá Bajo (Quebradas La Capilla, Peña de Arco y el Tuno), se presenta apropiación por parte de algunos habitantes, generando conflicto de uso para el resto de habitantes de este sector, en la actualidad la DBO 1.622 MgO<sub>2</sub>/L en la desembocadura es de (CDMB, 2007)

La CDMB como autoridad ambiental encargada de la administración de los recursos naturales, debe autorizar el aprovechamiento del recurso hídrico con criterios de sostenibilidad y equidad; que conduzca a un aprovechamiento racional del recurso previniendo la generación de conflictos.

### **2.3.5.2 Fuentes de contaminación**

La actividad minera es la primera fuente productiva de la microcuenca Río Vetas la cual desemboca en el Río Suratá, y esta ha ocasionado problemas ambientales, como vertimientos de cianuro y el uso de mercurio en procesos de separación. En la actualidad existen 21 empresas con titulaciones en el municipio de Vetas, de las cuales siete están activas, una tiene actividades interrumpidas y una se encuentra en mantenimiento, y en el municipio de California existen un total de treinta y una empresas mineras, de las cuales solamente diez y siete (17) laboraron continuamente durante los dos años anteriores. Adicionalmente, en la zona minera de La Baja se encuentran alrededor de sesenta (60) microempresarios de la minería, denominados localmente barrileros, de los cuales treinta trabajan de manera continua en el beneficio de oro. ((Fasca), 2017)

La minería practicada en el distrito minero de Vetas – California es más de tipo artesanal, con muy baja tecnología y, por lo tanto, alta ineficiencia económica y ambiental; aunque en la zona se presentan grandes empresas como la Greystar que está actualmente en etapa de exploración. En general los procedimientos utilizados tanto en la extracción de materiales en mina, como en la

planta de beneficio no han sufrido variaciones importantes en el desarrollo histórico de esta labor, cuyos orígenes se remontan a la época de la colonia Wolff (2001).

### **2.3.5.3 Fauna**

La fauna en la región se encuentra amenazada por la cacería (en algunos sectores de las microcuencas del río Charta y río Suratá Alto) y la pérdida de los ecosistemas boscosos, que actualmente es el refugio de estas especies, producto de la tala y el avance de la frontera agropecuaria. En la zona alta del cuerpo de agua no se aprecia ningún tipo de animal acuático debido a que el cauce no ostenta las condiciones de subsistencia debido a la contaminación por vertimientos domésticos ya que la comunidad no cuenta con servicio de acueducto y alcantarillado, también por las principales actividades económicas de la zona como son de actividades la minería y la ganadería (CDMB, 2007)

## **2.4. MARCO LEGAL**

La versión integrada con sus modificaciones del Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible es el rector de la gestión del ambiente y de los recursos naturales renovables, encargado orientar y regular ordenamiento ambiental del territorio y de definir las políticas y regulaciones a las que se sujetarán la recuperación, conservación, protección, ordenamiento, manejo, uso y aprovechamiento sostenible de los recursos naturales renovables y del ambiente de la Nación, a fin de asegurar el desarrollo sostenible, perjuicio de funciones asignadas a otros sectores.

Así mismo, la Resolución 0631 de 2015, la cual reglamenta el artículo 28 del Decreto 3930 de 2010 y actualiza el Decreto 1594 de 1984, Esta Resolución es de obligatorio cumplimiento para todas aquellas personas que desarrollen actividades industriales comerciales o de servicios y que en el desarrollo de las mismas generen aguas residuales, que serán vertidas en un cuerpo de agua superficial o al alcantarillado público.

En constante, la Resolución 2115 del 2007, Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Internacionalmente se tuvo en cuenta la norma oficial mexicana para consumo humano de calidad de agua para consumo humano (NOM-127-SAA1-1994), "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"

En este trabajo se utilizó esta normatividad colombiana y mexicana, con el fin de realizar la comparación de los valores máximos permisibles descritos en las mismas en cuanto a metales pesados registrados en la red de monitoreo de calidad de agua de la subcuenca Suratá.

## **CAPÍTULO 3.**

### **3. METODOLOGÍA.**

Para llevar a cabo la metodología de la modelación de metales pesados en la Subcuenca río Suratá, Santander por metales pesados en el software HEC-RAS, se desarrollaron las siguientes actividades:

### **3.1. Visita de campo a la subcuenca Suratá**

Se Realizó un reconocimiento de campo, en la zona de estudio de la Subcuenca Surata, Santander para identificar los principales factores antropogénicos que inciden a la contaminación por metales pesados en la zona de estudio y conocer los puntos de la toma de muestra de la red de monitoreo de calidad de agua realizada por la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga (CDMB)

### **3.2 Análisis estadístico de la información**

Los datos de la red de monitoreo de calidad de agua del año 2019 de la subcuenca Suratá fueron suministrados por la Corporación Autónoma Regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga CDMB. El análisis estadístico se realizó en el software Statgraphics y el programa informático Excel, con fin de analizar el comportamiento de la concentración de los metales pesados a lo largo del tiempo de estudio y para establecer puntos críticos de contaminación en la fuente hídrica.

Este análisis se realizó en una serie de tiempo de un año y se graficaron las concentraciones en unidades de mg/l de los siguientes metales pesados: Cianuro (CN<sup>-</sup>), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Aluminio (Al), Arsénico (As), Mercurio (Hg), Cobre (Cu), Cromo (Cr<sup>+6</sup>), Cadmio (Cd), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn)

### **3.3 Análisis de normatividad ambiental**

Se realizo una recopilación de la normatividad ambiental referente a calidad de agua, donde se decidió utilizar el Decreto único compilatorio 1076 de 2015 Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible enfatizando en el decreto 1594 del 1984 donde se encuentran establecidos los criterios

de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico , la Resolución 2115 del 22 de junio del 2007, Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano y la Resolución 0631 del 2015 por la cual se reglamentan los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Esta última se utiliza teniendo en cuenta que, en el municipio de California, Santander hay actividad minera y que este proceso antrópico genera vertimientos aguas arriba de los puntos de muestreo de calidad de agua y ha traído consigo la contaminación de metales pesados en la zona de estudio. Se realizó un comparación con una normativa internacional oficial de Mexico para consumo humano de calidad de agua para consumo humano (NOM-127-SAA1-1994), "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"

### **3.4. Modelo hidráulico HEC-RAS**

La subcuenca Surata, se dividió en tres tramos como se observa en la tabla 6, para modelar la hidráulica de los ríos, este software requiere de los siguientes parámetros:

- Rugosidad del terreno: Se determinó a través de la tabla de rugosidades del HEC-RAS, teniendo en cuenta el tipo de suelo y vegetación observada en la visita a la zona de estudio
- Pendiente: Se realizó la medición por medio del sistema de información geográfica ArcGIS teniendo en cuenta las curvas de nivel
- Caudal y batimetría: Suministrado por las secciones de aforo en cada punto realizados por la CDMB en la red de monitoreo

**Tabla 14 Tramos modelados en HEC-RAS Fuente: Baeza, N 2019**

<b>Tramo 1</b>		
<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Distancia (m)</b>
Río Vetas	RV - 05	0
Río Vetas	RV - 02	7908.16
Quebrada la Baja	QLB-01	8015.3
Río Vetas	RV-01	13966.02
<b>Tramo 2</b>		
<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Distancia (m)</b>
Río Suratá	SA - 07	0
Río Suratá	SA-06	2685.5092
Río Suratá	SA - 05	13243.79
Río Charta	RCH-01	13407.27
Río Suratá	SA-03	36149.95
Río Suratá	SA-01	40234.29
<b>Tramo 3</b>		
<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Distancia (m)</b>
Río Tona	RT -01A	0
Río Suratá	SA - 03	12221.272

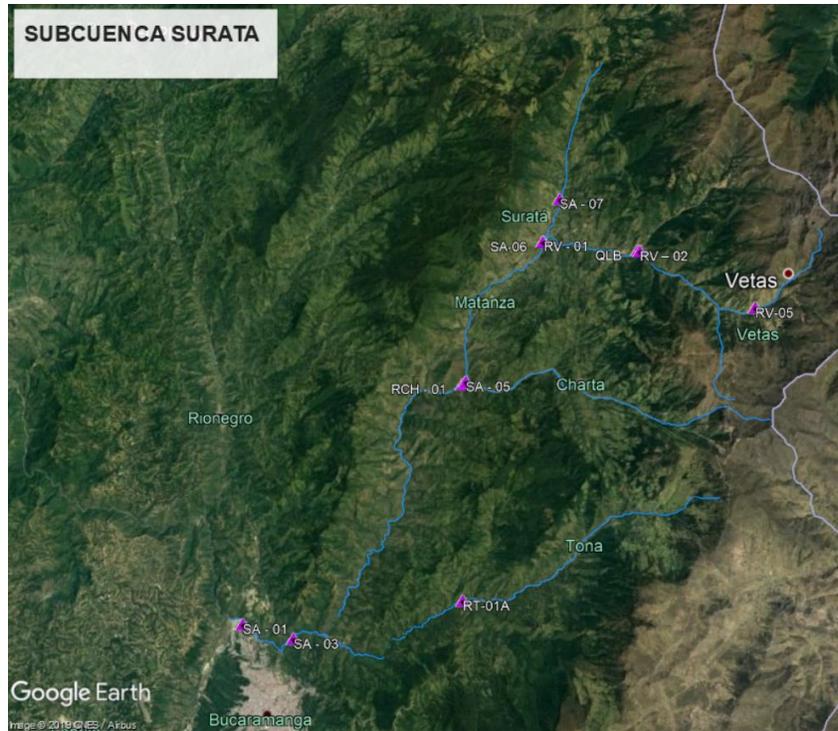
### 3.5. Modelo ADZ

En el modelo de zona muerta agregada de advección y dispersión se simuló el comportamiento de los siguientes metales: Cianuro (CN-), Hierro (Fe), Plomo (Pb), Níquel (Ni), Aluminio (Al), Arsénico (As), Mercurio (Hg), Cobre (Cu), Cromo (Cr <sup>+6</sup>), Cadmio (Cd), Zinc (Zn) y Manganeseo (Mn). El método utilizado por la CDMB para medir las concentraciones de los metales en la red de monitoreo de calidad de agua se encuentra descritos en la tabla 7.

Para modelar el transporte de estos solutos, el modelo ADZ está fundamentado en los siguientes datos de la zona de estudio, los cuales fueron registrados en el programa informático Excel

- Concentraciones de metales pesados en unidades mg/l en cada punto de la campaña de la red de monitoreo de calidad de agua (Figura 3) realizada por la CDMB a lo largo del año 2019
- Definición de los tramos a modelar con su ubicación geográfica (tabla 8)
- Distancia de los puntos de muestreo de la red de monitoreo de calidad de agua las cuales tengan mediciones de metales pesado (tabla 9)

- Constantes teóricas de decaimiento: Sedimentación y absorción de la fracción sólida (Tabla 10)



**Grafica 5 Red de monitoreo Fuente: Baeza N, (2019) editado en Google Earth**

**Tabla 15 Método de determinación de metales pesados Fuente: CDMB 2019**

METAL	METODO
Hierro	STANDARD METHODS 3030 F
Cobre	STANDARD METHODS 3030 F
Cadmio	STANDARD METHODS 3030 F
Cromo	STANDARD METHODS 3030 F
Manganeso	STANDARD METHODS 3030 F
Plomo	STANDARD METHODS 3030 F
Aluminio	STANDARD METHODS 3030 F
Zinc	STANDARD METHODS 3030 F
Níquel	STANDARD METHODS 3030 F
Mercurio	STANDARD METHODS 3112 B
Arsénico	STANDARD METHODS 3114 C
Cianuro	STANDARD METHODS 4500 CN- C, F

**Tabla 16** Posición geográfica de cada uno de los puntos de la red de monitoreo a modelar  
**Fuente:** Baeza N, Y CDMB (2019).

SUBCUENCA	MUNICIPIO	CODIGO	Latitud	Longitud
Río Vetás	Vetas	RV-05	7°19'2.10"N	72°52'51.41"O
Río Vetás	California	RV - 02	7°20'50.97"N	72°56'16.34"O
Q. La Baja	California	QLB-01	7°20'52.39"N	72°56'20.08"O
Río Suratá	Suratá	SA - 07	7°22'29.96"N	72°58'40.89"O
Río Suratá	Suratá	SA - 06	7°21'11.62"N	72°59'11.98"O
Río Vetás	Suratá	RV - 01	7°21'12.11"N	72°59'10.11"O
Río Suratá	Matanza	SA - 05	7°16'56.96"N	73° 1'32.02"O
Río Charta	Charta	RCH-01	7°16'52.31"N	73° 1'38.21"O
Río de Oro	Tona	RT-01A	7°10'28.55"N	73° 1'35.73"O
Río Suratá	Bucaramanga	SA - 03	7° 9'20.15"N	73° 6'39.26"O
Río Suratá	Bucaramanga	SA - 01	7° 9'45.35"N	73° 8'11.55"O

**Tabla 17.** Distancia entre puntos de Monitoreo de los tramos a modelar **Fuente:** Baeza N, Y CDMB (2019)

<b>Tramo 1</b>		
<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Distancia (m)</b>
Río Vetás	RV - 05	0
Río Vetás	RV - 02	7908.16
Quebrada la Baja	QLB-01	8015.3
Río Vetás	RV-01	13966.02
<b>Tramo 2</b>		
<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Distancia (m)</b>
Río Suratá	SA - 07	0
Río Suratá	SA-06	2685.5092
Río Suratá	SA - 05	13299.9869
<b>Tramo 3</b>		
<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>Distancia (m)</b>
Río Tona	RT -01A	0
Río Suratá	SA - 03	12221.272

### 3.5.1. Variables de la ecuación del modelo de metales

Para el montaje del modelo de transporte de soluto, y de metales en la hoja electrónica Excel, se debe despejar cada una de las variables de la ecuación de modelo de transporte de solutos (1), y luego remplazarla en la ecuación del modelo para metales (10).

$$S(k) = a_1 S(k-1) + b_0 S_u(k-\delta) \quad (1)$$

Donde los coeficientes:

$S(k)$  = Concentración aguas arriba

$S_u$  = Concentración aguas abajo

$k$  = Instante de tiempo

$\delta$  = Retraso Advectivo en múltiplos de  $\Delta t$

$$\delta = \frac{\tau}{\Delta t} \quad (2)$$

$$a_1 = -\exp\left(\frac{\Delta t}{T_r}\right) \quad (3)$$

$$b_0 = 1 + a_1 \quad (4)$$

$$T_r = \frac{\Delta t}{\log_e(-a_1)} \quad (5)$$

$$\bar{t} = \frac{\sum_{t=0}^{n-1} (C_i t_i + C_{i+1} t_{i+1})}{\sum_{t=0}^{n-1} (C_i + C_{i+1})(t_{i+1} - t_i)} \quad (6)$$

$$\bar{C} = \sum_{t=0}^{n-1} \frac{(C_i t_i + C_{i+1} t_{i+1})(t_{i+1} - t_i)}{2(t_n - t_0)} \quad (7)$$

$$Q = \frac{M}{\int_0^t c dt} = \frac{M}{2(t_n - t_0)} \quad (8)$$

$$S_t^2 = \frac{\sum_{t=0}^{n-1} (C_i t_i^2 + C_{i+1} t_{i+1}^2)(t_{i+1} - t_i)}{\sum_{t=0}^{n-1} (C_i + C_{i+1})(t_{i+1} - t_i)} \quad (9)$$

A continuación, se muestra la ecuación de modelo para metales donde se van a reemplazar las variables

$$\frac{dM(t)}{dt} = \frac{1}{Tr} \left( e^{-k \cdot \tau} * U(t - \tau) - M(t) \right) - k * M(t) \quad (10)$$

Donde:

$M(t)$  = concentración de metal, mg/L

$U(t)$  = concentración del metal aguas arriba, mg/L

$k$  = constante de destino del metal día<sup>-1</sup> – (constante de decaimiento)

$Tr$  = tiempo de residencia de la fracción dispersiva del tramo, días

Resolviendo esta ecuación diferencial, podemos llegar a una solución que depende del tiempo, como queremos elaborar un modelo que represente las condiciones de estado estable, fijamos el tiempo en el límite al infinito, esto equivale al anular el término de la izquierda en la ecuación (10) es decir el diferencial del tiempo, una vez se resuelve esta ecuación en estado estable, como aparece en la ecuación (11) de este capítulo, se procede a implementar el modelo en una hoja de cálculo. Pero antes de seguir con la elaboración del modelo es necesario hacer algunas precisiones sobre la anterior ecuación en que este se basa.

**Tabla 18 Tabla de constante de destino de metal (Constante de decaimiento) para 1 metro de distancia Fuente: Baeza, N 2019**

<b>Metal</b>	<b>Unidades</b>	<b>Tramo 1: Valor</b>	<b>Tramo 2: Valor</b>	<b>Tramo 3: Valor</b>
Mercurio	1/día	-1.81487E-05	2.5023E-07	8.21076E-08
Cianuro	1/día	0.005862011	2.7816E-05	0.000304204
Hierro	1/día	196.7054598	-1.7374E-09	3.716900566
Cobre	1/día	0.012109261	0.00464297	0.000571126
Cromo	1/día	0.00676253	0.00249769	0.00249803
Cadmio	1/día	2.5176E-05	2.5E-05	6.91053E-07
Plomo	1/día	0.001254282	0.00249977	0.00249803
Níquel	1/día	0.002517603	0.0025	0.00249803
Zinc	1/día	0.613614828	6.1985E-05	-0.066841719
Manganeso	1/día	0.505862542	-0.00374549	-0.051295999
Aluminio	1/día	24.21305327	-0.22209155	25.38799494
Arsénico	1/día	0.0045	-3.5789E-08	9.99212E-07

El modelo así planteado, es un modelo simplificado de calidad del agua para metales. Empleando la base de datos anterior se procedió a llevar a cabo la modelación usando para ello una sencilla hoja electrónica de cálculo (EXCEL), inicialmente las constantes o parámetros de destino de los metales (k) se les busca un valor tal que correlacione los datos hallados experimentalmente con las respuestas arrojadas por el modelo, pero primero se les da un valor para cada uno de los parámetros de destino de cada metal y enseguida se puede aprovechar las herramientas de la hoja de cálculo, como lo es la función solver, esta función optimiza los parámetros a encontrar efectuando operaciones en las cuales se establecen una serie de desigualdades en forma de restricción.

$$M(t) = \frac{\left(\frac{1}{Tr}\right)(e^{-k*\tau} * u(t))}{\left(\frac{1}{Tr} + K\right)} \quad (11)$$

Donde

M(t)= Concentración del metal modelado

Tr = Tiempo de residencia

τ= Retraso advectivo

k= Constante de destino del metal

$U(t)$ = concentración del metal aguas arriba, mg/L

Para determinar las constantes de destino de los metales descritas en la tabla 7, fue necesario establecer la siguiente información en los tres tramos modelados:

- velocidad media ( $\bar{V}$ )y máxima ( $V_{\text{máx}}$ ): La cual se obtuvo a partir de la información de los aforos por un tipo de sensor de velocidad-profundidad realizados en cada punto de muestreo por la CDMB.
- Longitud (L): Medida en el sistema de información geográfica ArcGIS (tabla 6).
- Tiempo medio de viaje (t): se realiza teniendo en cuenta la longitud del tramo y la velocidad promedio del mismo.
- Fracción dispersiva (DF): es una proporción que representa que tanto volumen total, de un tramo se encuentra completamente mezclado, se calcula teniendo en cuenta la velocidad media y máxima en el tramo.

$$DF = 1 - \frac{\bar{V}}{V_{\text{máx}}}$$

- Retraso advectivo ( $\tau$ ): Representa el componente del tiempo de viaje global asociado con la advección, se realiza teniendo en cuenta la fracción dispersiva y el tiempo medio aplicando en la siguiente ecuación

$$\tau = 1 - DF * t_{\text{med}}$$

- Tiempo de residencia: Se calcula teniendo en cuenta la fracción dispersiva y el tiempo medio

$$Tr = t_{\text{med}}(\text{días}) * DF$$

- Concentración del soluto en unidades de mg/L aguas arriba y aguas abajo en cada tramo

### 3.5.2 Calibración del modelo

Para calibrar el modelo se utilizó la herramienta Solver que se encuentra en programa Excel, la calibración se obtiene mediante la comparación de los datos experimentales de las concentraciones de

metales pesados presentes en la fase acuosa - sólida y los resultados arrojados en el modelo buscando el ajuste de las constantes de destino.

El Solver es una herramienta para resolver y optimizar ecuaciones mediante el uso de métodos numéricos. Solver se puede utilizar para optimizar funciones de una o más variables, con o sin restricciones, forma parte de una serie de comandos a veces denominados herramienta de análisis. Con Solver se puede buscar el valor o los valores óptimos para una celda, en una hoja de cálculo. Solver trabaja con el grupo de celdas que estén relacionadas, directamente o indirectamente con la fórmula de la celda, esta ajusta los valores de la celda variable que se especifique, denominadas celda ajustable. Para obtener el resultado especificado en la fórmula de la celda, pueden aplicarse restricciones que limiten el problema tipo a celdas ajustables o de destino que estén directa o indirectamente relacionadas con las celdas de origen.

# CAPÍTULO 4.

## 4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

### 4.1. Análisis estadístico de la información

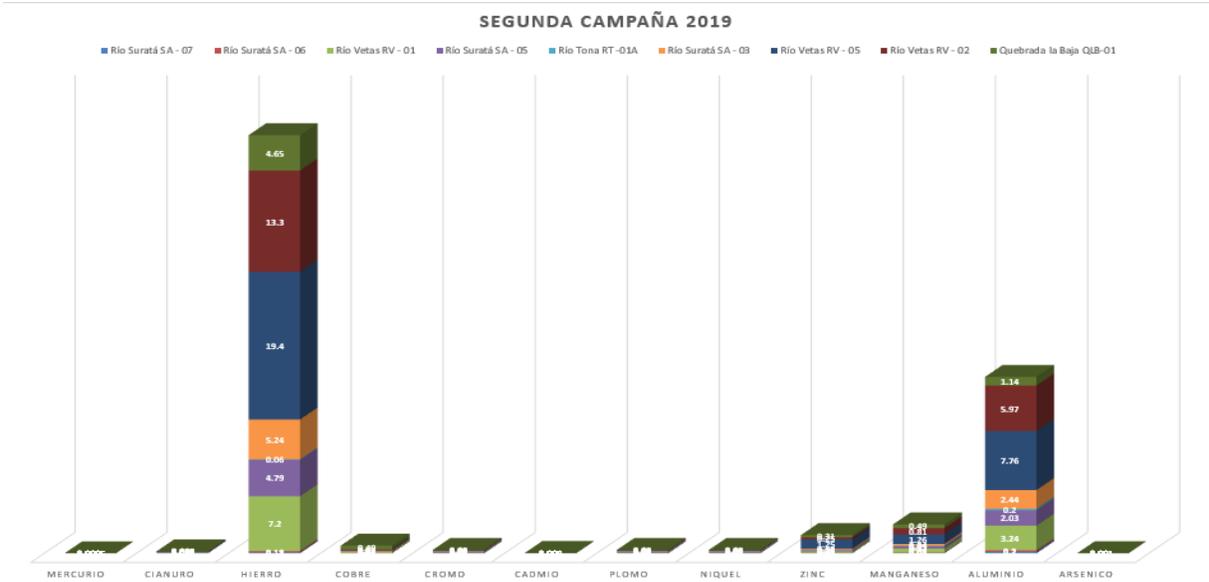
Se realizó un análisis estadístico de la información con la finalidad de observar el comportamiento de la concentración de los metales pesados a lo largo del tiempo en la subcuenca Suratá, Santander. El primer análisis se realizó en el programa informático Excel como se muestra a continuación:

El siguiente es una análisis de las tres campañas de la red de monitoreo del presente año, donde se observa en la gráfica 1 que la concentración de hierro y aluminio se presenta en mayor proporción en el rio Vetas en el punto RV-05 resaltando que este se encuentra en la parte alta de la subcuenca Suratá en el municipio de Vetas Santander y que la causa de la contaminación del cauce puede deberse a que las principales actividades económicas son la minería y ganadería; sin descartar que estas concentraciones de hierro pueden ser propias del suelo de la zona. El rio Suratá en el punto SA-05, también presenta altas concentraciones de hierro, este se encuentra ubicado en el municipio de Matanza, Santander donde sus principales actividades económicas son agricultura y ganadería.



Grafica 6. Primera campaña de la de monitoreo 2019 Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)

En la segunda campaña de la red de monitoreo realizada por la corporación autónoma regional para la defensa de la meseta de Bucaramanga CDMB, se puede inferir de la gráfica 2 que el rio Vetás en los puntos RV-05 Y RV-02, presenta los índices de concentración más altos de hierro y aluminio



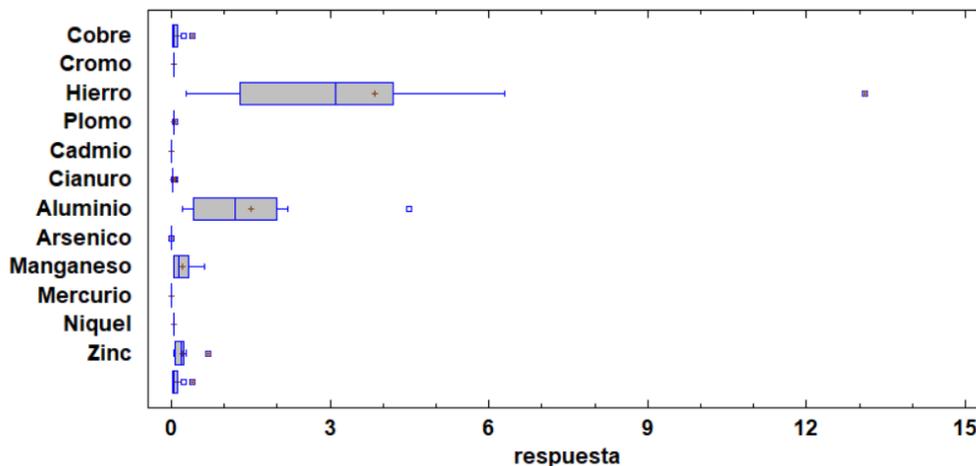
**Gráfica 7 Segunda campaña de la de monitoreo 2019 Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)**

En la tercera campaña de la red de monitoreo se sigue presentando los niveles altos de las concentraciones de hierro y aluminio, pero en particular se puede apreciar en la gráfica 3 el incremento de las concentraciones de cromo, plomo, cianuro y níquel.

En particular en la quebrada la baja en el punto QLB-01, hay concentraciones de elevadas de cianuro, seguido el rio Vetás en el punto RV-01



El Hierro y Mercurio presentan una alta concentración en comparación con la media de las demás variables estudiadas en la gráfica 11, así mismo sus valores atípicos. Es decir los valores se encuentran fuera del rango, lo cual puede ser causa de la actividad antrópica en zona, resaltando que durante estos dos metales predominaron en la red de monitoreo de calidad de agua en la subcuenca Suratá.



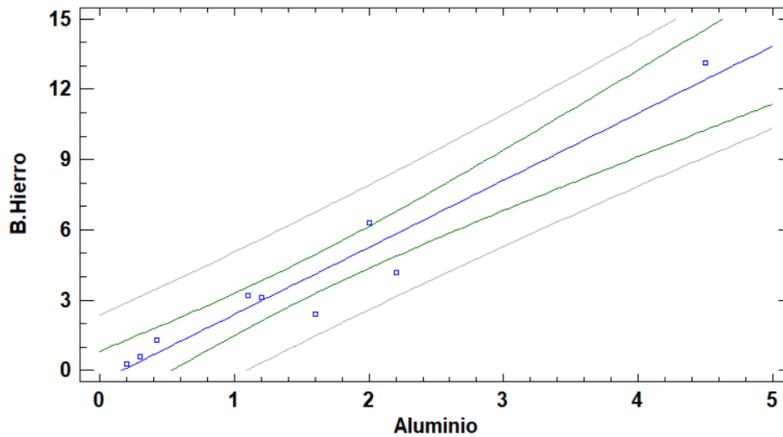
**Grafica 10 Cajas y bigotes Fuente Baeza, N y CDMB 2019**

Como se observa en la imagen 11, la salida muestra los resultados de ajustar un modelo lineal para describir la relación entre Aluminio y Hierro. La ecuación del modelo ajustado es

$$\text{Aluminio} = 0.245846 + 0.32794 * \text{Hierro}$$

Existe una relación estadísticamente significativa entre Aluminio y Hierro con un nivel de confianza del 95.0%. El estadístico R-Cuadrada indica que el modelo ajustado explica 93.7171% de la variabilidad en Aluminio.

El coeficiente de correlación es igual a 0.968076, indicando una relación relativamente fuerte entre las variables y el error estándar del estimado indica que la desviación estándar de los residuos es 0.358215.



**Grafica 11 Grafico de modelo ajustado Fuente: Baeza N, y CDMB 2019**

## 4.2. Análisis de normatividad ambiental

Siguiendo los lineamientos estipulados en la metodología 4.3 se realizó una comparación de los resultados de la red de monitoreo del presente año, con el decreto único compilatorio 1076 de 2015, enfatizando en el decreto 1594 del 1984 donde se encuentran establecidos los criterios de calidad admisibles para la destinación del recurso para consumo humano y doméstico, la Resolución 2115 del 22 de junio del 2007 y la Resolución 0637 del 2015 por la cual se reglamentan los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones e internacionalmente la norma oficial mexicana para consumo humano de calidad de agua para consumo humano (NOM-127-SAA1-1994), "Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización"

Se utiliza esta resolución teniendo en cuenta que en la subcuenca Suratá existen vertimientos aguas arriba en el municipio de California por actividades como minería y ganadería.

La concentración de Hierro y Aluminio en las muestras de agua se compararon con los límites determinados NOM-127-SAA1-1994 y en las resoluciones 0631 del 2015 y la 2115 de 2007

respectivamente como se indica en las Tablas 8 y 9. En todos los cuerpos de agua se encontraron concentraciones elevadas de estos metales, incluyendo el punto SA-03 el cual se encuentra fuera de la zona de influencia de la actividad minera ya que se encuentra ubicado en el área metropolitana de Bucaramanga, Santander.

**Tabla 19 Resultados de las mediciones de hierro en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.**

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)	RESULTADO DE HIERRO (mg/L)	CONCEPTO	0631 del 2015 art. 10 Actividad mineras
Río Suratá	SA - 07	1	0.6	cumple	2.0
		2	0.12	cumple	2.0
		3	0.2	cumple	2.0
Río Suratá	SA - 06	1	1.3	cumple	2.0
		2	0.18	cumple	2.0
		3	0.2	cumple	2.0
Río Vetás	RV-01	1	3.1	no cumple	2.0
		2	7.2	no cumple	2.0
		3	1.99	no cumple	2.0
Río Suratá	SA - 05	1	6.3	no cumple	2.0
		2	4.79	no cumple	2.0
		3	0.2	cumple	2.0
Río Tona	RT-01A	1	0.28	cumple	2.0
		2	0.06	cumple	2.0
		3	0.201	cumple	2.0
Río Suratá	SA - 03	1	2.4	no cumple	2.0
		2	5.24	no cumple	2.0
		3	0.2	cumple	2.0
Río Vetás	RV-05	1	13.1	no cumple	2.0
		2	19.4	no cumple	2.0
		3	5.6	no cumple	2.0
Río Vetás	RV-02	1	4.2	no cumple	2.0
		2	13.3	no cumple	2.0
		3	2.64	no cumple	2.0
Quebrada la	QLB-01	1	3.2	no cumple	2.0

<b>Baja</b>	2	4.65	no cumple	2.0
	3	0.2	cumple	2.0

Basado en el análisis estadístico de la información en la gráfica 1, se puede ratificar en la tabla 8 que el río Vetás, no presenta cumplimiento de los valores máximos permisibles por la resolución 0631 del 2015, específicamente en los puntos RV-01, RV-05 y Rv-02, por consiguiente en el Río Suratá en los puntos SA-05 y SA-03 en las dos primeras campañas de la red de monitoreo del presente año tampoco está cumpliendo con dicha normativa la cual establece los valores máximos permisibles para vertimientos puntuales, la normativa mexicana NOM-127-SAA1-1994 establece un valor máximo permisible de 0.3 mg/l, dentro de este rango los puntos SA-07, SA-05 SA-03 Y RT-01A en la tercera campaña de toma de muestra. Las concentraciones de este metal en la zona pueden ser causa de los vertimientos de las actividades mineras y ganadera aguas arriba de la zona de estudio.

**Tabla 20 Resultados de las mediciones de aluminio en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.**

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE ALUMINIO (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>RESOLUCION 2115 DEL 2007. Art 7</b>
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.3	no cumple	0.2
		2	0.2	cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.42	no cumple	0.2
		2	0.2	cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	1.2	no cumple	0.2
		2	3.24	no cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	2	no cumple	0.2
		2	2.03	no cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2

<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.2	cumple	0.2
		2	0.2	cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	1.6	no cumple	0.2
		2	2.44	no cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	4.5	no cumple	0.2
		2	7.76	no cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	2.2	no cumple	0.2
		2	5.97	no cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	1.1	no cumple	0.2
		2	1.14	no cumple	0.2
		3	1.0	no cumple	0.2

Lo valores de las concentraciones de Aluminio tomadas en la red de monitoreo de calidad de agua a lo largo del presente año, presentaron un valor elevado en los puntos de muestreo que se encuentran cerca del municipio minero de la zona, específicamente en los Río Vetás y Suratá los cuales según la normatividad colombiana y mexicana cumplen con los valores máximos permisibles de 0.2 mg/l en los puntos SA-07, SA-06 y RT-01A en la segunda campaña de toma de muestra.

De los resultados del análisis estadístico de la información en la gráfica 3, se infiere que los valores elevados de cromo, plomo, cianuro y níquel, en este análisis de normatividad ambiental se comparan las concentraciones de estos metales con los valores máximos permisibles por la Resolución 0631 del 2015 y el decreto único compilatorio 1076 de 2015 y la normativa mexicana NOM-127-SAA1-1994, como se indica en las tablas de 10 a 12.

**Tabla 21 Resultados de las mediciones de cromo en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.**

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE CROMO (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>DECRETO UNICO COMPILATORIO. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84</b>
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05

En la tercera campaña de la red de monitoreo se puede observar el incremento de las concentraciones de cromo en todos los puntos de muestreo y el incumplimiento que se presenta en la misma con respecto a los valores máximos permisibles por el Decreto único compilatorio

1076 del 2015 y la normativa mexicana NOM-127-SAA1-1994, con respecto al agua de consumo humano, con respecto a la resolución 0631 del 2015 cumple con los parámetros establecidos en cuanto vertimiento referente a actividades mineras

**Tabla 22 Resultados de las mediciones de plomo en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.**

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)	RESULTADO DE PLOMO (mg/L)	CONCEPTO	DECRETO UNICO COMPILATORIO. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	0.05	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.06	no cumple	0.05
		2	0.05	no cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.05	cumple	0.05
		2	80.65	cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05

<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.06	no cumple	0.05
		2	0.05	no cumple	0.05
		3	0.1	no cumple	0.05

La concentración de plomo presenta un valor de 0.1 mg/l en todos los puntos de la red de monitoreo en la tercera campaña e incumplen los valores máximos permisibles impuestos por el Decreto único compilatorio 1076 del 2015. Sucede lo contrario con respecto a la resolución 0631 del 2015 ya que se muestra un cumplimiento con los parámetros establecidos en cuanto vertimiento referente a actividades mineras a excepción del punto RV-05 ubicado en el Río Vetas, que en la segunda campaña presenta el valor más elevado de la concentración de este metal en el cuerpo de agua.

**Tabla 23 Resultados de las mediciones de cianuro en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.**

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE CIANURO (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>DECRETO UNICO COMPILATORIO. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84</b>
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.025	cumple	0.2
		2	0.025	cumple	0.2
		3	0.025	cumple	0.2
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.025	cumple	0.2
		2	0.025	cumple	0.2
		3	0.025	cumple	0.2
<b>Río Vetas</b>	<b>RV-01</b>	1	0.04	cumple	0.2
		2	0.025	cumple	0.2
		3	0.218	no cumple	0.2
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.025	cumple	0.2
		2	0.025	cumple	0.2
		3	0.025	cumple	0.2
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.025	cumple	0.2
		2	0.025	cumple	0.2
		3	0.025	cumple	0.2
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.025	cumple	0.2

		2	0.025	cumple	0.2
		3	0.033	cumple	0.2
<b>Río Vetas</b>	<b>RV-05</b>	1	0.068	cumple	0.2
		2	0.068	cumple	0.2
		3	0.025	cumple	0.2
<b>Río Vetas</b>	<b>RV-02</b>	1	0.025	cumple	0.2
		2	0.025	cumple	0.2
		3	0.025	cumple	0.2
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.025	cumple	0.2
		2	0.025	cumple	0.2
		3	1.96	no cumple	0.2

Los puntos RV-01 ubicado en el río Vetás, y QLB-01 ubicado en Quebrada la Baja no cumplen con el valor máximo permisible estipulado por el Decreto único compilatorio 1076 del 2015 y la normativa mexicana NOM-127-SAA1-1994 en la tercera ronda de la red de monitoreo. Este último punto tampoco también excede la concentración permisible por la resolución 0631 del 2015.

La concentración de Mercurio en los cuerpos de agua medidas en la red de monitoreo de calidad de agua en la subcuenca Suratá presenta un cumplimiento con los valores permisibles por la resolución 0631 del 2015 y con respecto a los valores máximos por el Decreto único compilatorio, el único punto que excede la concentración de este metal es RV-01 ubicado en el Río Vetás y con respecto a normativa mexicana NOM-127-SAA1-1994 solo está en cumplimiento los punto SA-07, SA-06 y RT-01 A por no exceder el valor de 0.001 mg/l (Anexo 2)

En el anexo 3 se puede observar una tabla con las concentraciones de Cobre, comparadas con los valores máximos permisibles por el Decreto único compilatorio 1076 del 2015, en donde el punto RV-05 ubicado en el Río Vetás en la tercera campaña de la red de monitoreo presenta un incremento de la concentración de este metal e incumple con el valor máximo permisible por la normativa Colombiana, pero según la norma NOM-127-SAA1-1994 cumplen todos los puntos ya que el valor permisible por la misma es de 2mg/l

Se compararon los valores de las concentraciones de Cadmio, Níquel, Zinc, Manganeso y Arsénico con los límites determinados por el Decreto único compilatorio 1076 del 2015 y la resolución 0631 del 2015 como se indica en los Anexos 4 a 8. En todos los cuerpos de agua no se excede el valor estipulado por la normatividad, dando un total cumplimiento en todos los puntos de muestreo de la red de monitoreo de calidad de agua. De acuerdo con la NOM-127-SAA1-1994 los valores máximos permisibles para Cadmio (0.005mg/l), Zinc (5 mg/l), Manganeso (0.15mg/l), y Arsénico (0.05mg/l)

En la tercera campaña en todos los puntos se excede el valor permisible de Cadmio y para el Manganeso solo se encuentran dentro del rango los SA-07 y SA-06 en todas las campañas de muestreo, con respecto a manganeso y cadmio al igual que la normativa colombiana todos están dentro del rango establecido.

#### **4.3 Modelación de las secciones transversales en HEC-RAS**

Se modelaron 11 secciones transversales de los puntos de la red de monitoreo los cuales se encuentran descritos a continuación:

**Punto 2. RV-02:** Ubicado en el río Vetas en el municipio de California Santander, la zona es de vegetación densa, el cauce presenta sedimento y rocas de diámetros de 1m aproximadamente y el agua tiene un color gris, es inolora y no se observa vida acuática. En el anexo 9 se muestra la sección trasversal del punto RV-02, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, esta sección se modela a un caudal de 1.479 m<sup>3</sup>/s y la lámina de agua se encuentra en la línea punteada roja indicando un flujo crítico

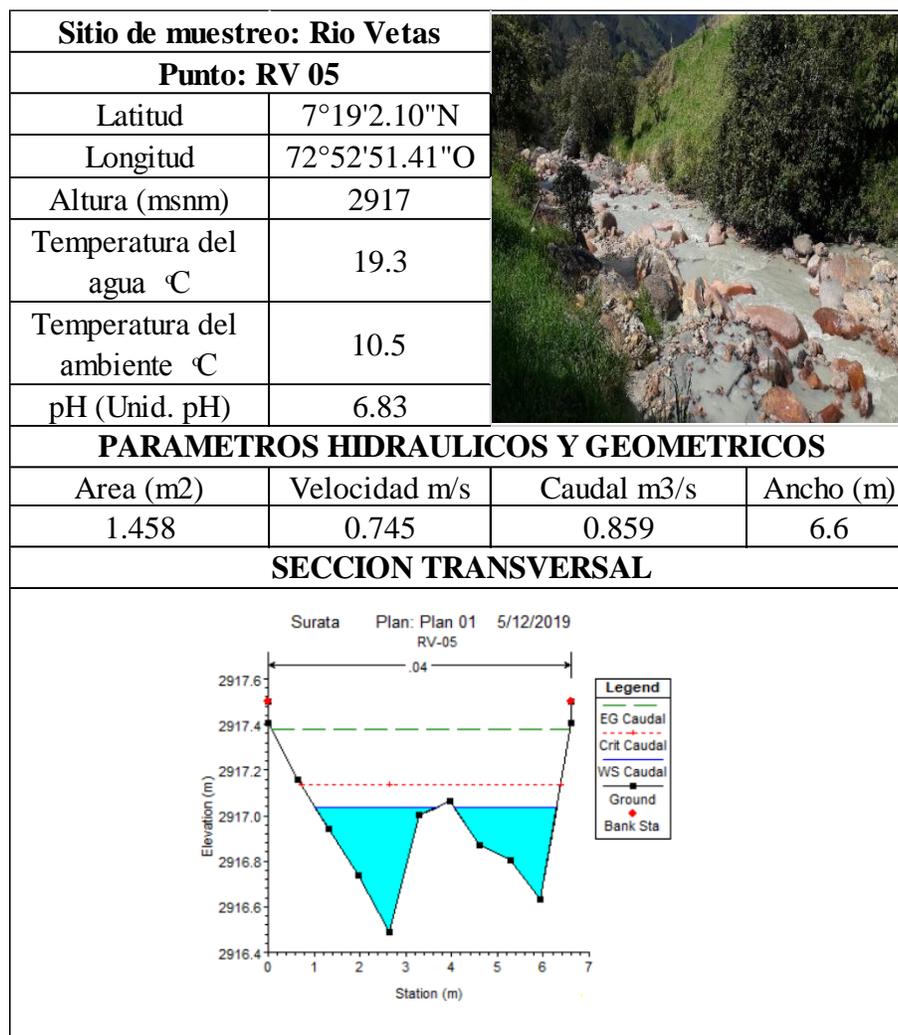
**Punto 4. QLB-01:** Ubicado en Quebrada la baja en el municipio de California Santander, el cauce es fluvio torrencial, el agua tiene un color verde grisoso, es inoloro y no hay presencia de vertimientos directos en la zona del punto de muestreo. En la Anexo 10 se observa la sección trasversal del punto QLB-01, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, esta sección se modela a un caudal de 0.849 m<sup>3</sup>/s y la lámina de agua se encuentra en la línea punteada roja indicando un flujo crítico

**Punto 3. SA-07:** Ubicado en el río Suratá en el municipio de Suratá Santander, se encuentra en el puente pánaga, el agua tiene un color verde grisoso, es inoloro y no hay presencia de vertimientos directos en la zona del punto de muestreo, también que el nivel del cauce era de 40cm medidos por una regleta que se encuentra en el punto. En la Anexo 11 se observa la sección transversal del punto SA-07, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, donde se puede apreciar que la lámina de agua se encuentra por debajo de la línea punteada roja (Flujo crítico), lo que significa que el tipo de flujo modelado con un caudal de 2.867 m<sup>3</sup>/s es un flujo supercrítico

**Punto 1. RV-05:** Ubicado en el río Vetas en el municipio de Vetas Santander, la zona es de vegetación densa, el agua tiene un color gris, es inoloro y no se observa vida acuática, el cauce es fluvio torrencial ya que transporta volúmenes considerables de sedimento y escombros lo cual es estándar en cuencas de montaña. En la zona hay presencia de ganado vacuno, puesto que es una de las principales actividades económicas de la zona. También, se puede apreciar sobre la lámina de agua un color planteado brillante tal como se puede observar en el Anexo 8.

En la tabla 2 se muestra la sección transversal del punto RV-05, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, donde se puede apreciar que la lámina de agua se encuentra por debajo de la línea punteada roja (Flujo crítico), lo que significa que el tipo de flujo modelado con un caudal de 0.896 m<sup>3</sup>/s es un flujo supercrítico

**Tabla 24** Sección transversal del río Vetás en el punto RV-05 en HEC-RAS. Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)



**Punto 6: SA-06:** Se encuentra ubicado en el río Suratá en el municipio de California Santander, la vegetación en la zona es densa, el agua no presenta olor y no se observan vertimientos directos en la zona del punto de muestreo. En el anexo 12 se observa la sección transversal del punto SA-06, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, donde se puede apreciar que la lámina de agua se encuentra por debajo de la línea punteada roja (Flujo crítico), lo que significa que el tipo de flujo modelado con un caudal de 4.142 m<sup>3</sup>/s es un flujo supercrítico

**Punto SA-01:** Se encuentra ubicado en el área metropolitana de Bucaramanga, el cauce se encuentra canalizado, el agua es inolora de color arena y no se observan sedimentos ni vertimientos a la fuente hídrica.

En el anexo 13 se observa la sección transversal del punto SA-01, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, esta sección se modelo a un caudal de 24.52 m<sup>3</sup>/s y la lámina de agua se encuentra en la línea punteada roja indicando un flujo crítico

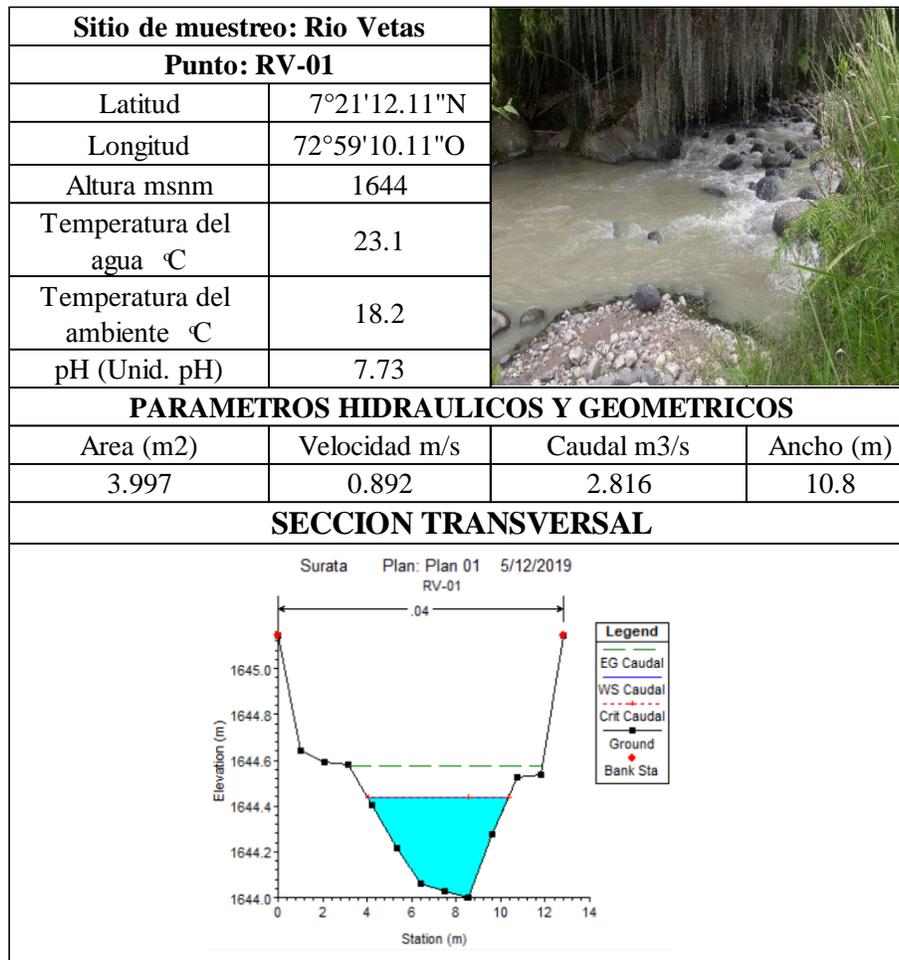
**Punto RT-01A:** Se encuentra ubicado en el municipio de Tona Santander, el agua es inolora, y no se observan sedimentos, en la orilla del cauce se observan rocas con diámetro aproximado de 2m y no se observan vertimientos directos a la fuente hídrica.

En el anexo 14 se observa la sección transversal del punto RT-01A, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, donde se puede apreciar que la lámina de agua se encuentra por debajo de la línea punteada roja (Flujo crítico), lo que significa que el tipo de flujo modelado con un caudal de 2.586 m<sup>3</sup>/s es un flujo supercrítico

**Punto RCH-01:** Se encuentra ubicado en el municipio de Charta, el agua es inolora, hay presencia de rocas sobre el cauce debido a una excavación por parte de la alcaldía del municipio para evitar las inundaciones de los asentamientos de viviendas que se encuentran a menos de 10 metros del mismo, y no se observan vertimientos directos a la fuente hídrica. En el Anexo 15 se observa la sección transversal del punto RCH-01, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, esta sección se modelo a un caudal de 0636 m<sup>3</sup>/s y la lámina de agua se encuentra en la línea punteada roja indicando un flujo crítico

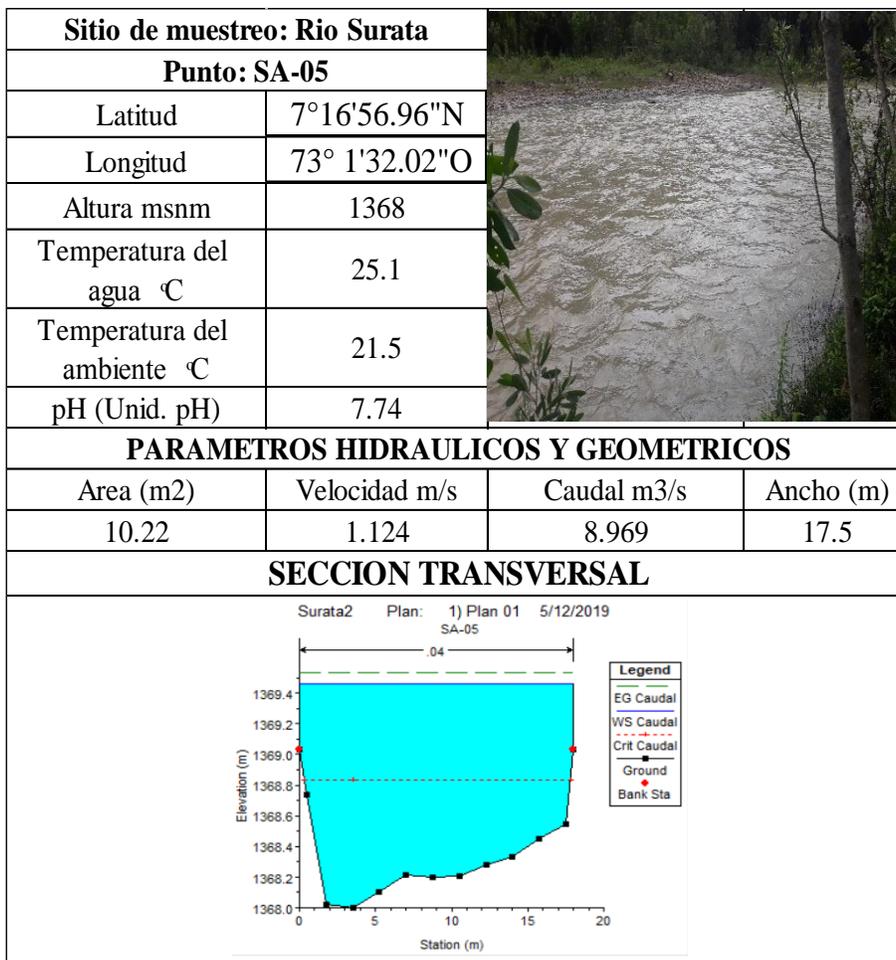
**Punto 5. RV-01:** Ubicado en el río Vetás en el municipio de Suratá Santander, la zona presenta vegetación densa, el punto está ubicado en una zona de baja pendiente, el agua presenta un color verde, es inoloro. En la tabla 3 se observa la sección transversal del punto RV-01, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce., esta sección se modelo a un caudal de 2.816 m<sup>3</sup>/s y la lámina de agua se encuentra en la línea punteada roja indicando un flujo crítico

**Tabla 25 Sección transversal del rio Vetas en el punto RV-01. Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)**



**Punto SA-05:** Se encuentra ubicado en el municipio de Matanza Santander, el agua es inolora, y no se observan sedimentos la zona donde está ubicado el punto es de baja pendiente y no se observan vertimientos directos a la fuente hídrica. En la tabla 6 se observa la sección transversal del punto SA-05, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce., esta sección se modelo a un caudal de 8.969 m<sup>3</sup>/s y la lámina de agua se encuentra por encima de en línea punteada roja indicando un flujo subcrítico

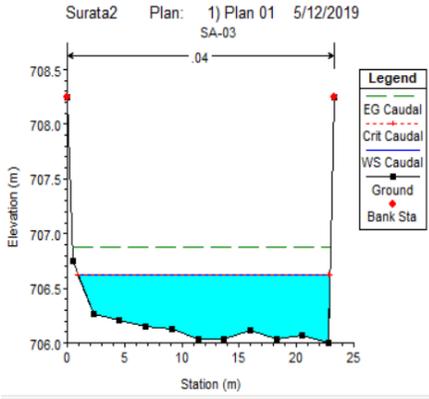
**Tabla 26 Sección transversal del río Vetas en el punto SA-05. Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)**



**Punto SA-03:** Se encuentra ubicado en el área metropolitana de Bucaramanga antes de la estación hidroeléctrica en esta zona se encuentra el cauce canalizado, el agua es inolora, y no se observan sedimentos ni vertimientos a la fuente hídrica.

En la tabla 5 se observa la sección transversal del punto SA-03, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce, esta sección se modelo a un caudal de 21.24 m<sup>3</sup>/s y la lámina de agua se encuentra en la línea punteada roja indicando un flujo crítico

**Tabla 27 Sección transversal del río Suratá en el punto SA-03. Fuente: Baeza N, Y CDMB (2019)**

<b>Sitio de muestreo: Río Surata</b>			
<b>Punto: SA-03</b>			
Latitud	7° 9'20.15"N		
Longitud	73° 6'39.26"O		
Altura msnm	706		
Temperatura del agua °C	26.2		
Temperatura del ambiente °C	24.3		
pH (Unid. pH)	7.91		
<b>PARAMETROS HIDRAULICOS Y GEOMETRICOS</b>			
Area (m2)	Velocidad m/s	Caudal m3/s	Ancho (m)
22.25	1.125	21.24	22.8
<b>SECCION TRANSVERSAL</b>			
			

#### **4.4 Modelo de zona muerta agregada ADZ**

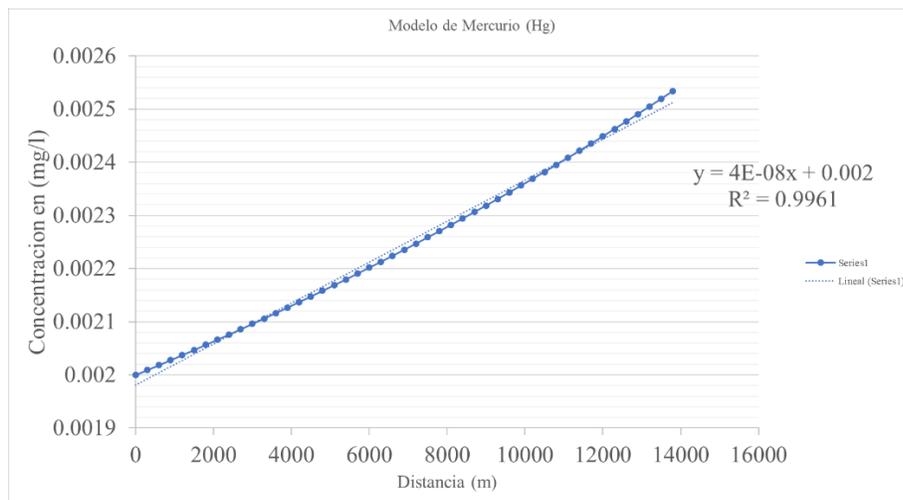
Partiendo de la distribución de concentraciones se puede obtener el tiempo de viaje promedio, el tiempo de decaimiento  $\tau$ , constante de destino del metal y los demás parámetros del modelo de transporte ADZ, esta tarea se desarrolló en una hoja electrónica de cálculo, en la tabla 27 se muestran los resultados que proporciona el ADZ. Los valores numéricos correspondientes a esta modelación se encuentran en el anexo 16

**Tabla 27 Datos de entrada del modelo ADZ Fuente: Baeza, N 2019**

Datos	Tramo 1	Tramo 2	Tramo 3
<b>V prom</b>	0.4577	0.5966	0.6856
<b>V máx.</b>	1.1388	1.3320	1.4930
<b>DF</b>	0.5980	0.5521	0.5408
<b>L(m)</b>	13966.02	13275.00	12221.27
<b>tmed (seg)</b>	30512.10	22250.87	17824.81
<b>tmed (días)</b>	0.3531	0.2575	0.2063
<b><math>\tau</math></b>	0.1419	0.1153	0.0947
<b>Tr(días)</b>	0.2112	0.1422	0.1116

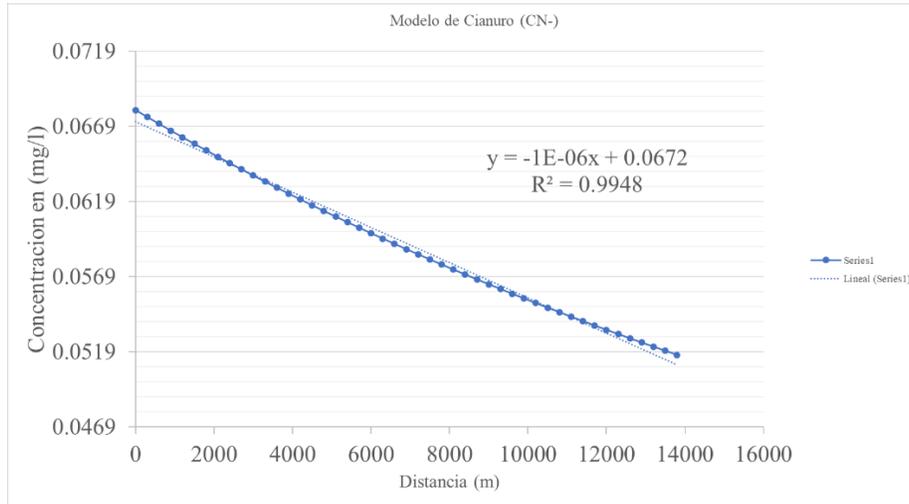
Se observa que la fracción dispersiva es menor que la unidad por lo tanto se puede decir que existe predominio de transporte advectivo en los tramos de los ríos, el valor de la fracción dispersiva se incorpora en las ecuaciones del ADZ para metales, en la parte de decaimiento advectivo, este valor se relaciona con el tiempo de arribo con el tiempo total de viaje de la sustancia dentro de los tramos estudiados.

En la gráfica 12 se observa que el comportamiento del mercurio se asemeja a los datos tomados en campo, la calibración realizada da un valor de 0.996 indicando así la confiabilidad del modelo



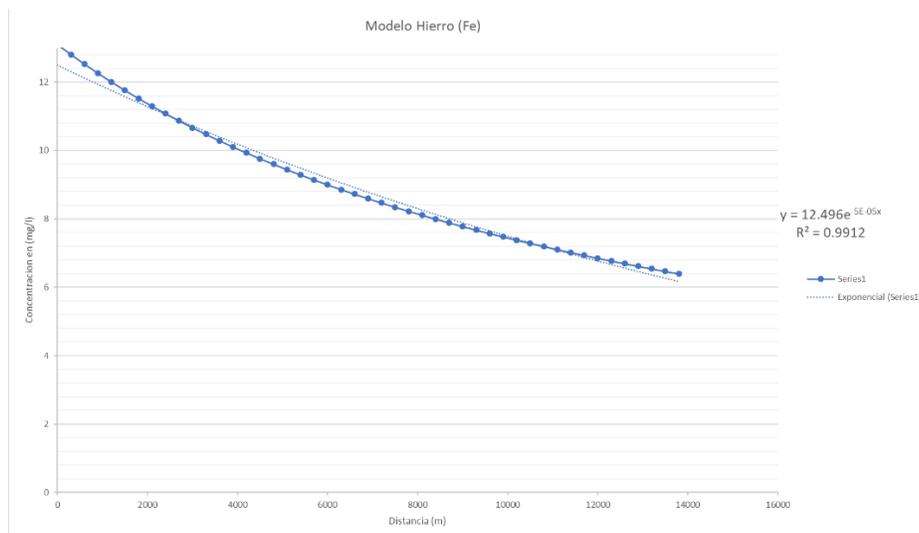
**Gráfica 12 Modelo de Mercurio Fuente: Baeza, N 2019**

En la gráfica 11 se observa que el comportamiento del cianuro se asemeja a los datos tomados en campo, la calibración realizada da un valor de 0.9948 indicando así la confiabilidad y ajuste del modelo ADZ



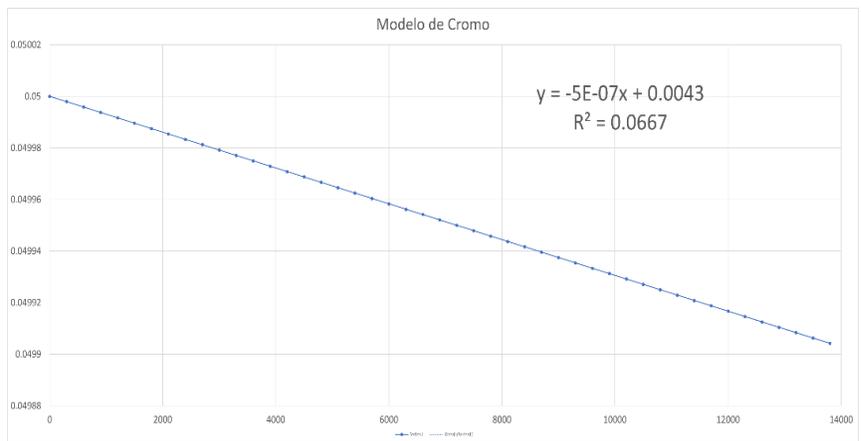
**Grafica 13 Modelo del Cianuro Fuente: Baeza N 2019**

En la gráfica 14 se observa que el comportamiento del Hierro se asemeja a los datos tomados en campo, la calibración realizada da un valor de 0.9691 indicando así la confiabilidad y ajuste del modelo ADZ



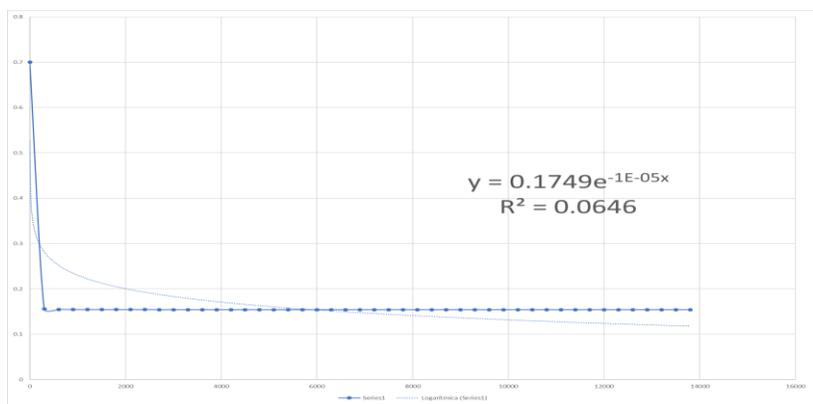
**Grafica 14 Modelo Hierro Fuente: Baeza N 2019**

En la gráfica 15 se observa que el comportamiento del Cromo, no se ajusta a los datos tomados en campo, en el proceso de calibración realizada genera un valor de 0.4365 indicando la insuficiencia del modelo AZD aplicado para este contaminante.



**Gráfica 15 Modelo Cromo Fuente: Baeza N 2019**

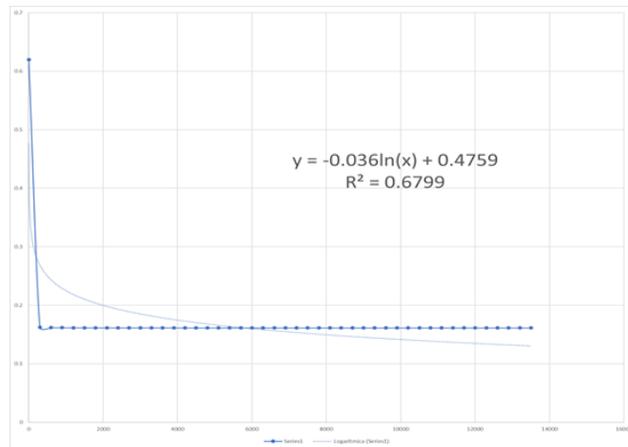
En la gráfica 16 se observa que el comportamiento del Zinc, no se ajusta a los datos tomados en campo, en el proceso de calibración realizada genera un valor de 0.4303 indicando la insuficiencia del modelo AZD aplicado para este contaminante



**Gráfica 16 Modelo de Zinc Fuente: Baeza N 2019**

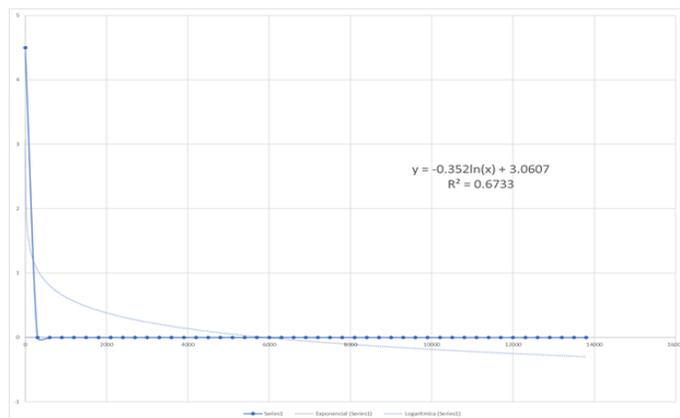
El comportamiento del cadmio, plomo, níquel y arsénico no se ajusta a los datos tomados en campo, dispersivo y en el proceso de calibración realizada da un valor de 0.4286 indicando la insuficiencia del modelo AZD aplicado para este contaminante Anexo 17

En la gráfica 17 se observa que el comportamiento del Manganeso, no se ajusta a los datos tomados en campo, en el proceso de calibración realizada genera un valor de 0.5015 indicando la insuficiencia del modelo AZD aplicado para este contaminante



**Gráfica 17 Modelo de Manganeso Fuente: Baeza N 2019**

En la gráfica 18 se observa que el comportamiento del Aluminio, no se ajusta a los datos tomados en campo, en el proceso de calibración realizada genera un valor de 0.50 indicando la insuficiencia del modelo AZD aplicado para este contaminante



**Gráfica 18 Modelo de Aluminio Fuente: Baeza N 2019**

## Conclusiones

En la red de monitoreo de calidad de agua realizada en el presente año se observó que los contaminantes que más predominaron en las tres campañas fue el Hierro (Fe) y el Aluminio (Al), en los Ríos Vetas y Suratá, en cuanto a normatividad ambiental colombiana se presenta un cumplimiento de los parámetros máximos permisibles de hierro según la Resolución 0631 del 2015 art. 10 referente a actividad minera en los puntos SA-07, SA-06 Y RT-01, este último es una fuente de captación de la planta de Bosconia de acueducto de Bucaramanga AMB y en la normativa mexicana NOM-127-SAA1-1994 solo se encuentran dentro de este rango los puntos SA-07, SA-05 SA-03. El Aluminio, presenta un cumplimiento de acuerdo con la normatividad colombiana y mexicana al valor máximo permisible de 0.2 mg/l en los puntos SA-07, SA-06 y RT-01A en la segunda campaña de toma de muestra.

En un modelo de metales es necesario contar con las concentraciones no solo en la fracción acuosa sino en los sedimentos, toda vez que los metales como el mercurio o cromo se pueden encontrar en las dos fases, además es importante en otros estudios referente a este tema, entender el comportamiento del metal en su trayectoria y la concentración real presente en los lodos que guíen en la predicción de posibles eventos que estén asociados al transporte tóxicos de en un cuerpo de agua.

Los Contaminantes mercurio, cianuro, cobre y hierro son los que mejor se ajustan ya que presentan un comportamiento parecido a los datos tomados en campo, además que en su proceso de calibración tuvieron un resultado cercano a la unidad indicando que el modelo es confiable, es decir se asemeja a la realidad.

Es importante anotar, el fuerte impacto ambiental generado por actividad antropogénica tomando como punto de referencia, la situación que presenta el río Vetas y Surata en los primeros kilómetros frente a su biodiversidad de ecosistemas y que es impactado aguas abajo, en tan solo un recorrido de 25 Kilómetros.

## **Recomendaciones**

En la red de monitoreo de calidad de agua que se realiza en la subcuenca Surata, Santander se debería tomar muestras de los sedimentos presente en el fondo del cauce, debido a que el muestreo se realiza de manera superficial sobre la lámina de agua y no se tiene en cuenta el suelo el cual es un factor importante en cuanto a la contaminación de un cauce ya que almacena y arrastra los contaminantes.

La corporación debe mejorar el modelo teniendo en cuenta variables meteorológicas e hidrológicas como precipitación, temperatura y escurrimiento superficial.

Para estudios posteriores se recomienda que para una mejor efectividad y certeza del modelo de zona muerta agregada de advección y dispersión ADZ, se realice un ensayo de trazadores el cual permite determinar el coeficiente de dispersión longitudinal del contaminante en el cuerpo hídrico

En la determinación de la constante de destino del metal. Se debe tener especial cuidado en el proceso de iteración ya que causa alteraciones en la modelación del transporte del soluto.

## Bibliografía

World Resources Institute/Instituto de Recursos Mundiales (WRI), 2001, Guía de Recursos Mundiales 2000–2001, La gente y los ecosistemas: Se deteriora el tejido de la vida, Washington, D. C.

Grupo Conjunto de Expertos sobre los Aspectos Científicos de la Protección del Medio Marino (GESAMP), 2002, Cuidando el mar: logros, actividades y futuro del GESAMP de las Naciones Unidas

Ciclo integral del agua (Fasca), 2017, Límites establecidos de Metales pesados en el agua de consumo humano.

Pamela, Karla, 2009 Contaminación por metales pesados, entrevista a Dr. Carlos Pedro Eróstegui Revilla, Médico Fisiólogo, revista científica ciencia médica.

Singh, P. K., & Tewari, R. K. (2003). Cadmium toxicity induced Changes in plant water relations and oxidative metabolism of Brassica Juncea L. plants. *Journal of Environmental Biology*, 24(1), 107-112

Sarmiento, M.I. et al., (1999). Evaluación del Impacto de la Contaminación del Embalse del Muña Sobre la Salud Humana. *Revista De Salud Pública*, 1(2) (February), pp.159–171.

Bedoya, J (2007), Modelo de simulación de transporte de metales pesados en la cuenca baja del río Tunjuelo”, Universidad de la Selle, pp. 50-183.

Montelongo, Rosalba; Gordillo, Alberto J.; Otazo, Elena M.; Villagómez, José R.; Acevedo, Otilio A.; Prieto, Francisco. Modelación de la calidad del agua del río tula, Estado de Hidalgo, México 2008

Chapra Steve and Pelletier Greg. (2008). QUAL2Kw theory and documentation (version 5.1). A modeling framework for simulating river and stream water quality.

Chapra, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Modelling*, The McGraw-Hill Companies. Inc., New York.

Camacho y Díaz (2003). Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y calidad del agua en ríos – caso río Bogotá, Seminario Internacional La Hidroinformática en la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, Universidad del Valle.

Rientjes y Boekelman (1998). *Hydrological models*. Section of Hydrology and Ecology, Delf University of Technology, TU Delft, CT443.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga, PORH, POA y POMCA de río oro y su afluente río frío. 2014.

Organización Mundial de la Salud. Lucha contra las enfermedades transmitidas por el agua en los hogares. Ginebra: Organización Mundial de la Salud. 2007, pp 11.

Frost, F.; Muller, T.; Petersen, H.; Thomson, B.; Tollestrup, K. Identifying US populations for the study of health effects related to drinking water arsenic. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*. 2003,13, pp 231-239.

David L. Alonso, D.; Latorre, S.; Castillo, E.; Brandão, P. Environmental occurrence of arsenic in Colombia: A review. *Environmental Pollution*. 2014,186, pp 272-281.

Rodado, C.; El sector Minero Colombiano fuente de oportunidades. Ministerio de Minas y Energías; Feria internacional minera. Medellín, Octubre 6,2010. pp 65-70.

Wolff, E. Proyecto río Suratá: líneas de acción para reducir contaminación proveniente de la pequeña minería aurífera en vetas y califonia (departamento de Santander, Colombia). Jornada Internacional sobre el Impacto Ambiental del Mercurio Utilizado por la Minería Aurífera Artesanal en Iberoamérica. Lima, septiembre 26–28,2.001. Bucaramanga.2001.

García, S; Hidroarsenicismo Crónico Regional Endémico: Ministerio de la salud de la nación. Buenos Aires. 2011. pp 60.

Mukherjee, A.; Sengupta, M.; Hossain, M.; Ahamed, S.; Das, B.; Nayak, B.; Lodh, D.; Rahman, M.; Chakraborti, D. Arsenic Contamination in Groundwater: A Global Perspective with Emphasis on the Asian Scenario. *Health popul nutr*. 2006, 24, pp 142-163.

Bundschuh, J; Pérez, A; Litter M. Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana. *Ciencia y tecnología para el desarrollo*. 2006. pp 137.

Corporación Autónoma Regional para la Defensa de la Meseta de Bucaramanga. Plan de ordenación y manejo de la subcuenca río suratá. 2012.

Barba, L. Conceptos básicos de la contaminación del agua y parámetros de medición. Universidad del Valle. Santiago de Cali, Colombia, 2001. pp 15.

Goyer,R.; Golub, M.; Choudhury, H.; Hughes,M. Human health effects of metals. Environmental Protection Agency, 2004. pp 1-36.

Erraguntla, N.K.; Grant, R. Arsenic and Inorganic Arsenic Compounds. Texas commission on environmental quality, 2009. pp1-40

Environmental Protection Agency. Ambient water quality criteria for Arsenic. Water Regulations and Standards Criteria and Standards, Washington, 1980.

Okieimen, F.E.; Wuana, R.A. Heavy Metals in Contaminated Soils: A Review of Sources, Chemistry, Risks and Best Available Strategies for Remediation. International Scholarly Research Network, 2011.pp 1-20.

Frankenberger, W. Environmental Chemistry of Arsenic. 2002. Marcel Dekker. United States of America. pp 54.

Flores, E.R.; Pérez, J.E. Determinación de arsénico por absorción atómica, en agua de consumo humano proveniente de SEDEPAL, de cisterna y de pozo del distrito de Puente Piedra. Tesis Título Profesional Químico Farmacéutico. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. 2009. Perú.

Contreras, M. Especiación de arsénico en alimentos de origen marino: efectos del cocinado y su consumo en el metabolismo humano. tesis doctoral. Universidad de Huelva. 2014. pp 71-73.

Bundschuh, J; Pérez, A; Litter M. Distribución del arsénico en las regiones ibérica e iberoamericana. Ciencia y tecnología para el desarrollo. 2006. pp 14.

Ralph, S.J. Arsenic-Based Antineoplastic Drugs and Their Mechanisms of Action. Hindawi Publishing Corporation, 2007. pp 1-13.

Martinez, V. Biomonitorización genotóxica de poblaciones humanas expuestas ambientalmente al arsénico. Tesis Doctoral. Universidad Autonoma de Barcelona. 2005. pp 11-12.

Ng, J; Shraim, A.; Wang J. A global health problem caused by arsenic from natural sources. Chemosphere. 2003. Vol 52. pp 1356.

Mella, S. Estudio comparativo de normas de calidad de agua potable en distintos países de américa. Revista digital de Ciencias-Facultad de Ciencias Exactas, Naturales y de Salud Universidad de Belgrano. 2006.

Comisión Chilena del Cobre. análisis comparativo de normativas de descarga de residuos líquidos a aguas marinas y continentales superficiales .2007

## ANEXOS.

### ANEXO 1.

Resultados de las mediciones de mercurio en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)	RESULTADO DE MERCURIO (mg/L)	CONCEPTO	DECRETO UNICO COMPILATORIO O. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84	0631 del 2015 art. 10 Actividad mineras
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.0005	cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.0005	cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	0.0029	no cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.0005	cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.0005	cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.0005	cumple	0.002	0.002

		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.002	cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.0005	cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.001	cumple	0.002	0.002
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.0016	cumple	0.002	0.002
		2	0.0005	cumple	0.002	0.002
		3	0.003	cumple	0.002	0.002

## ANEXO 2

Resultados de las mediciones de Cobre en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE COBRE (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>DECRETO UNICO COMPILATORIO. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84</b>
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.02	cumple	1.00
		2	0.01	cumple	1.00
		3	0.1	cumple	1.00
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.03	cumple	1.00
		2	0.01	cumple	1.00
		3	0.1	cumple	1.00
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	0.11	cumple	1.00
		2	0.16	cumple	1.00
		3	0.1	cumple	1.00
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.23	cumple	1.00
		2	0.07	cumple	1.00
		3	0.1	cumple	1.00
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.02	cumple	1.00

		2	0.01	cumple	1.00
		3	0.1	cumple	1.00
Río Suratá	SA - 03	1	0.04	cumple	1.00
		2	0.08	cumple	1.00
		3	0.1	cumple	1.00
Río Vetás	RV-05	1	0.11	cumple	1.00
		2	0.11	cumple	1.00
		3	39.4	no cumple	1.00
Río Vetás	RV-02	1	0.04	cumple	1.00
		2	0.07	cumple	1.00
		3	0.1	cumple	1.00
Quebrada la Baja	QLB-01	1	0.39	cumple	1.00
		2	0.49	cumple	1.00
		3	0.522	cumple	1.00

### ANEXO 3

Resultados de las mediciones de Cadmio en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.

SITIO DE MUESTREO	PUNTO	PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)	RESULTADO DE CADMIO (mg/L)	CONCEPTO	DECRETO UNICO COMPILATORIO. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84
Río Suratá	SA - 07	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.005	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
Río Suratá	SA - 06	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.005	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
Río Vetás	RV-01	1	0.005	cumple	0.01

		2	0.005	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.005	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.005	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.005	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.009	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.006	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.005	cumple	0.01
		2	0.005	cumple	0.01
		3	0.01	cumple	0.01

## ANEXO 4

Resultados de las mediciones de Níquel en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE NIQUEL (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>RESOLUCION 833 DEL 2018. Art 11 actividad minera.</b>
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.05	cumple	0.4

		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.05	cumple	0.4
		2	0.05	cumple	0.4
		3	0.2	cumple	0.4

## ANEXO 5

Resultados de las mediciones de Zinc en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE ZINC (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>DECRETO UNICO COMPILATORIO. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84</b>
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.06	cumple	15.0
		2	0.03	cumple	15.0
		3	0.05	cumple	15.0
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.09	cumple	15.0
		2	0.03	cumple	15.0
		3	0.05	cumple	15.0
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	0.22	cumple	15.0
		2	0.2	cumple	15.0
		3	0.183	cumple	15.0
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.18	cumple	15.0
		2	0.15	cumple	15.0
		3	0.05	cumple	15.0
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.05	cumple	15.0
		2	0.03	cumple	15.0
		3	0.05	cumple	15.0
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.07	cumple	15.0
		2	0.15	cumple	15.0
		3	0.15	cumple	15.0
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.7	cumple	15.0
		2	1.25	cumple	15.0
		3	0.182	cumple	15.0
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.18	cumple	15.0
		2	0.25	cumple	15.0
		3	0.082	cumple	15.0
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.27	cumple	15.0
		2	0.31	cumple	15.0
		3	0.633	cumple	15.0

## ANEXO 6

Resultados de las mediciones de Manganeso en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE MANGANESO (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>RESOLUCION 833 DEL 2018. Art 11 actividad minera.</b>
Río Suratá	SA - 07	1	0.05	cumple	1.7
		2	0.05	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7
Río Suratá	SA - 06	1	0.05	cumple	1.7
		2	0.05	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7
Río Vetás	RV-01	1	0.26	cumple	1.7
		2	0.53	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7
Río Suratá	SA - 05	1	0.14	cumple	1.7
		2	0.32	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7
Río Tona	RT-01A	1	0.05	cumple	1.7
		2	0.05	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7
Río Suratá	SA - 03	1	0.08	cumple	1.7
		2	0.24	cumple	1.7

		3	0.1	cumple	1.7
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.62	cumple	1.7
		2	1.26	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.36	cumple	1.7
		2	0.81	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.32	cumple	1.7
		2	0.49	cumple	1.7
		3	0.1	cumple	1.7

## ANEXO 7

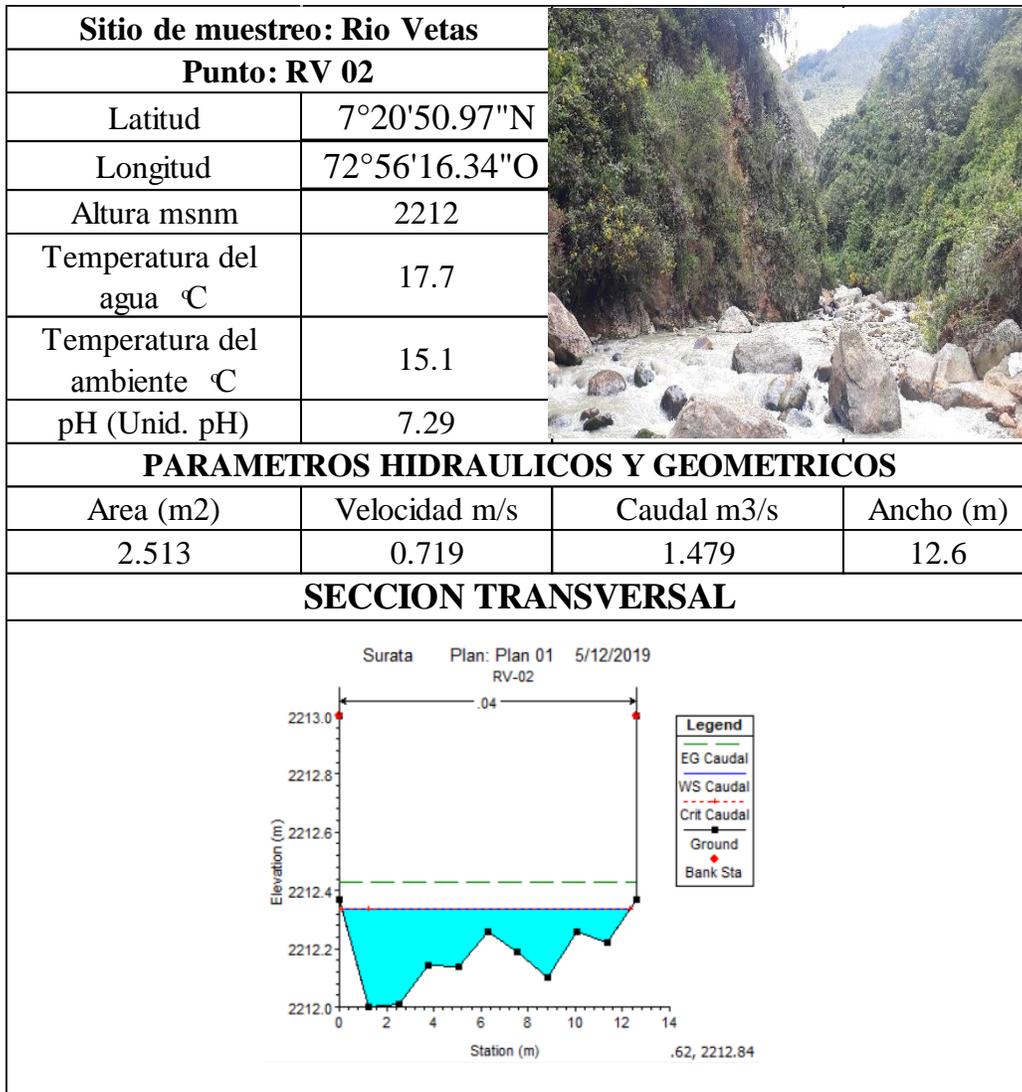
Resultados de las mediciones de Arsénico en la subcuenca Suratá dentro de la zona de influencia de la actividad minera y ganadera de la industria de California, Santander.

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>PUNTO</b>	<b>PERIODO DE ANALISIS (CAMPAÑA)</b>	<b>RESULTADO DE ARSENICO (mg/L)</b>	<b>CONCEPTO</b>	<b>DECRETO UNICO COMPILATORIO. Art. 2.2.3.3.9.3 tomado del Decr. 1594 del 84</b>	<b>0631 del 2015 art. 10 Actividad mineras</b>
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 07</b>	1	0.0001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.0025	cumple	0.05	0.1
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 06</b>	1	0.001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.0025	cumple	0.05	0.1
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-01</b>	1	0.001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.022	cumple	0.05	0.1
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 05</b>	1	0.001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.005	cumple	0.05	0.1
<b>Río Tona</b>	<b>RT-01A</b>	1	0.001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1

		3	0.0025	cumple	0.05	0.1
<b>Río Suratá</b>	<b>SA - 03</b>	1	0.001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.011	cumple	0.05	0.1
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-05</b>	1	0.001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.022	cumple	0.05	0.1
<b>Río Vetás</b>	<b>RV-02</b>	1	0.001	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.019	cumple	0.05	0.1
<b>Quebrada la Baja</b>	<b>QLB-01</b>	1	0.0016	cumple	0.05	0.1
		2	0.001	cumple	0.05	0.1
		3	0.037	cumple	0.05	0.1

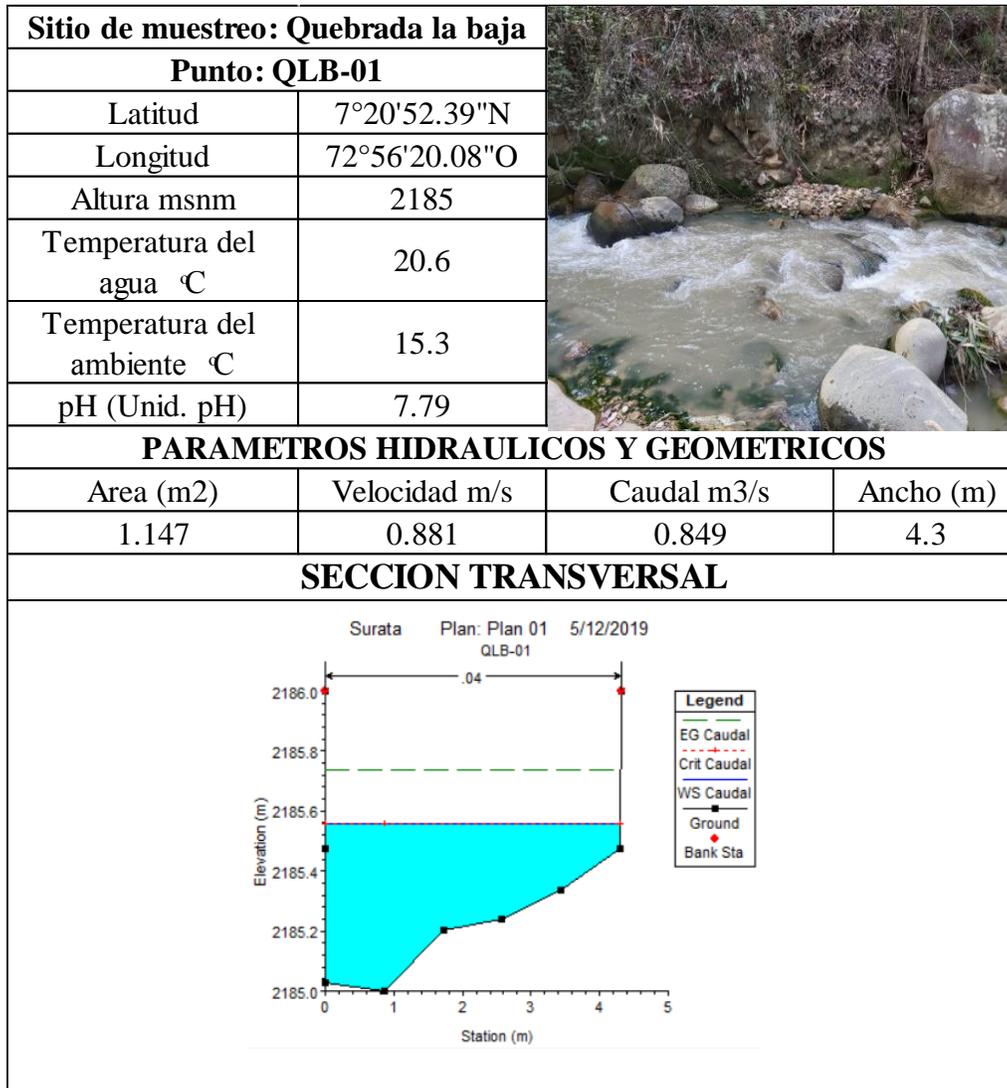
### **ANEXO 8**

Punto RV-05 ubicado en el Río Vetás en el municipio de Vetás, Santander en la siguiente imagen se observa sobre la lámina de agua un color plateado brillante procedente de los vertimientos aguas arriba de la zona por actividades mineras.



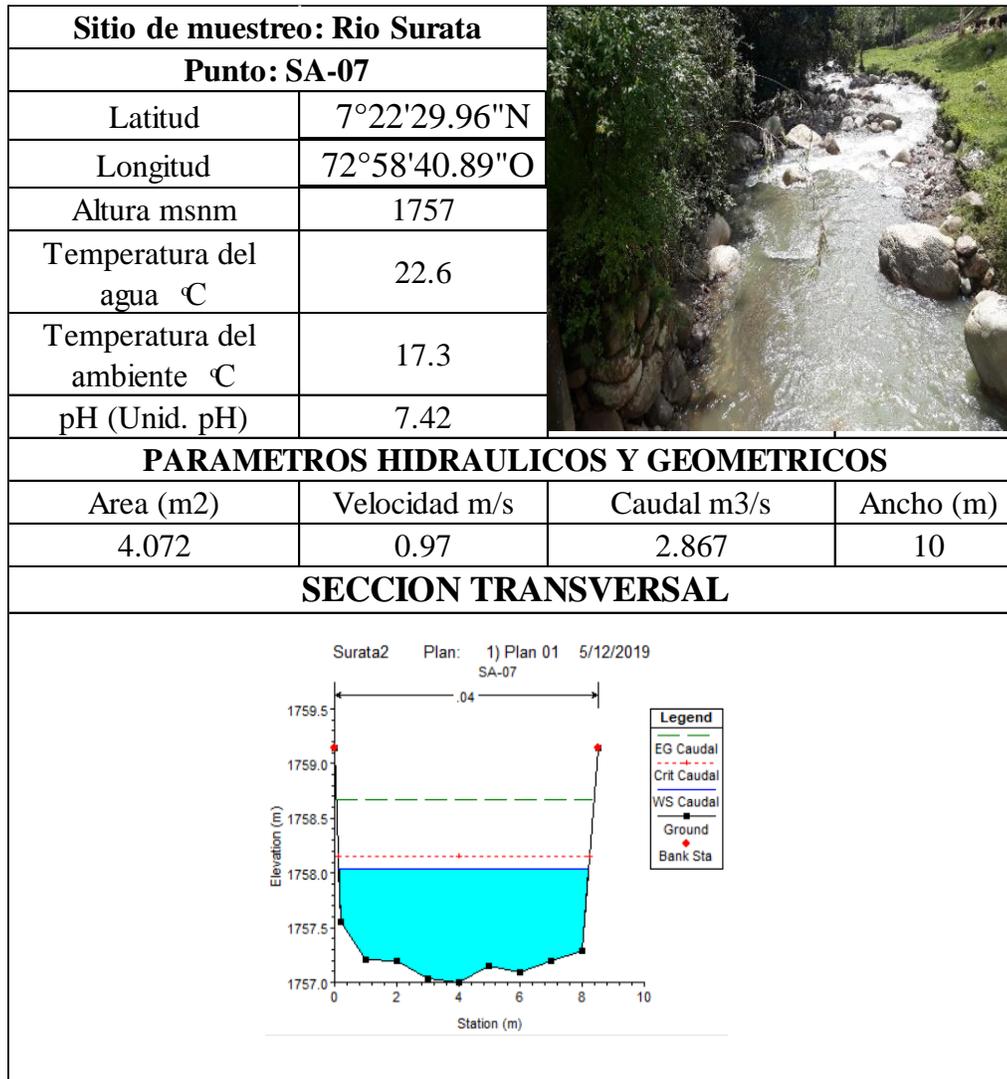
## ANEXO 10

En la tabla se observa la sección transversal del punto QLB-01, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce



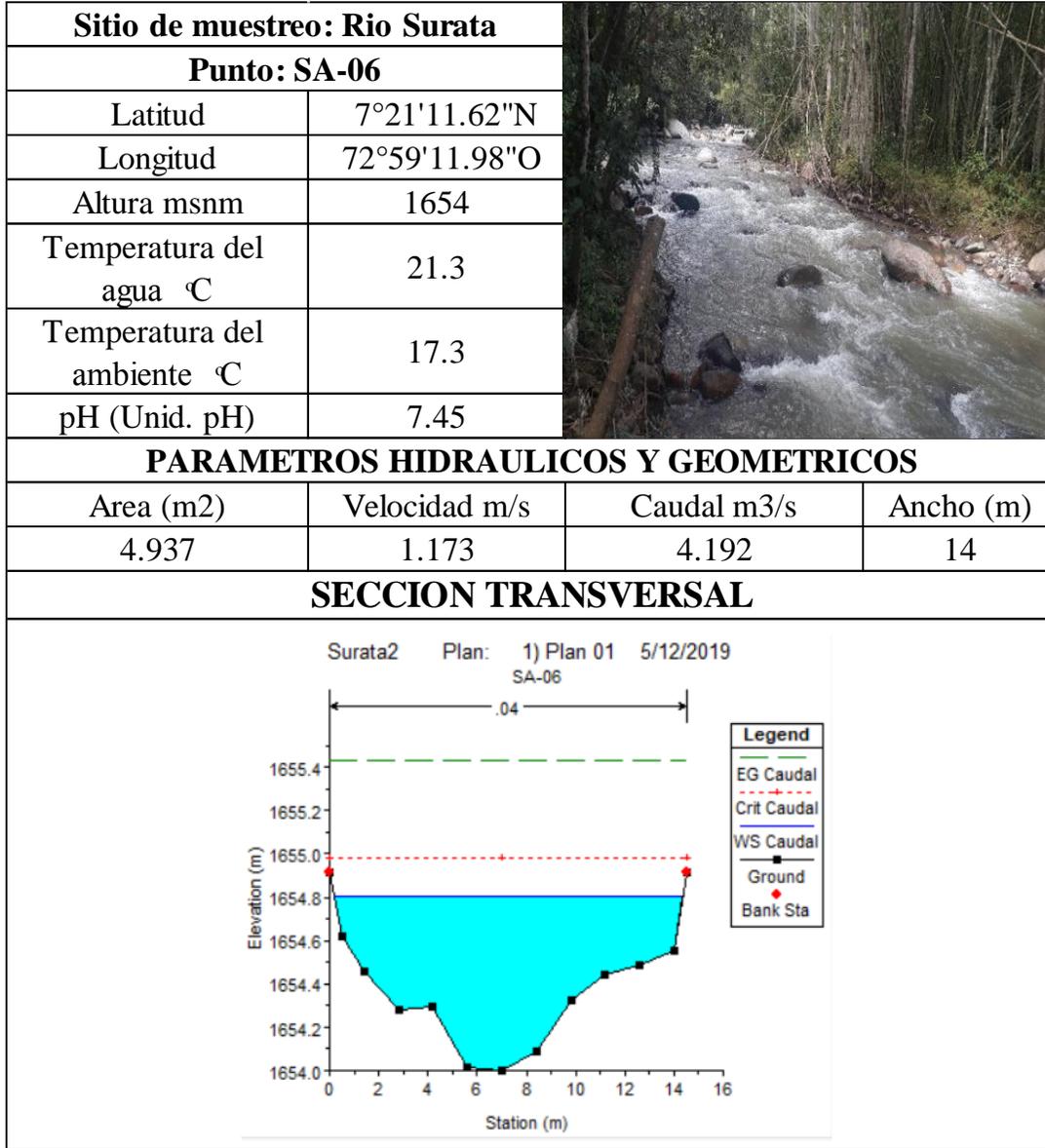
## ANEXO 11

En la tabla se observa la sección transversal del punto SA-07, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce



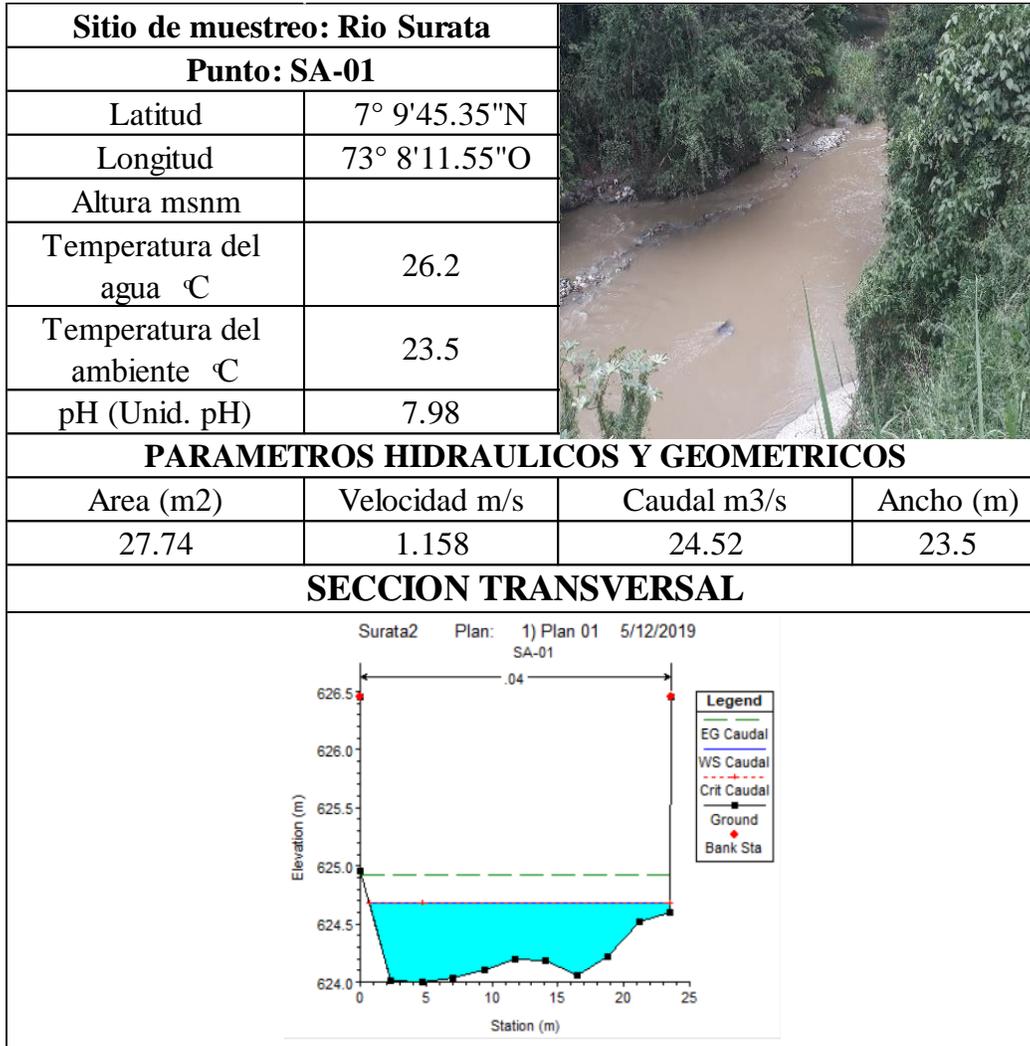
## ANEXO 12

En la tabla se observa la sección transversal del punto SA-06, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce



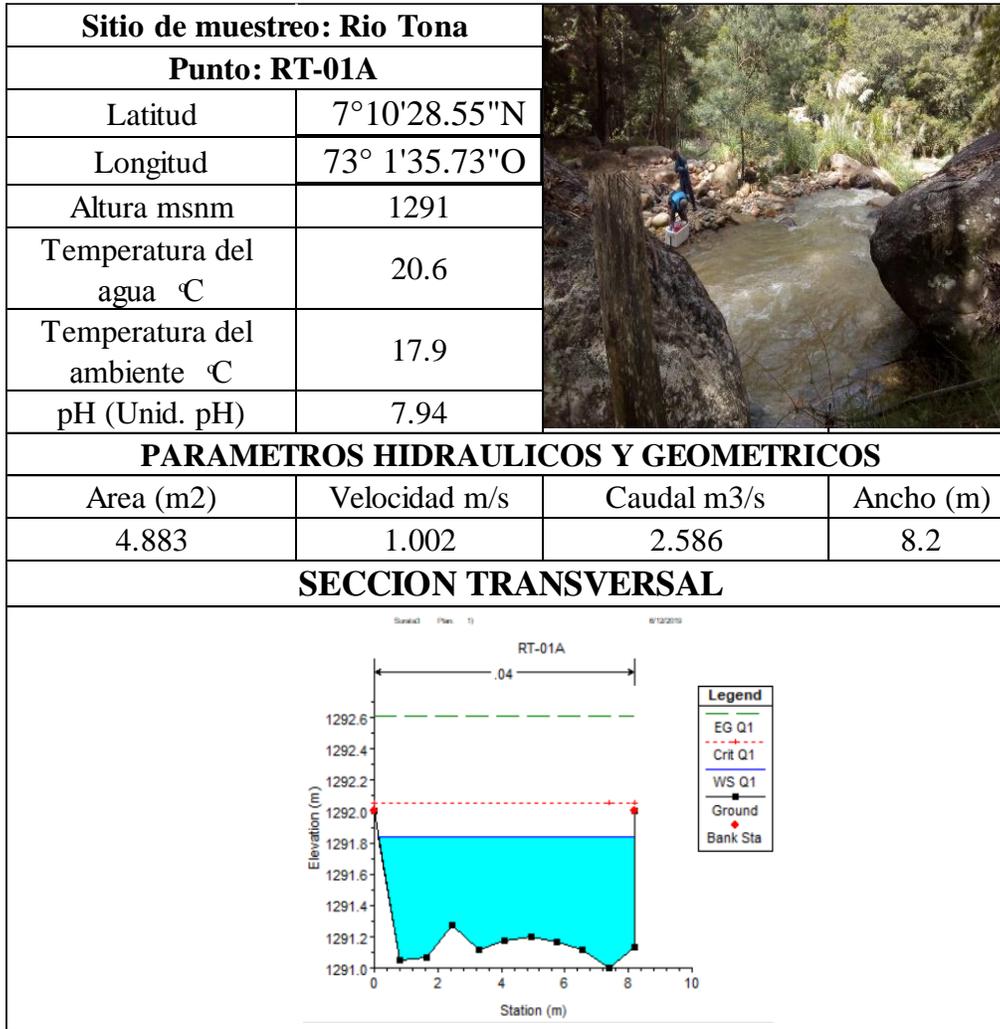
## ANEXO 13

En la tabla se observa la sección transversal del punto SA-01, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce



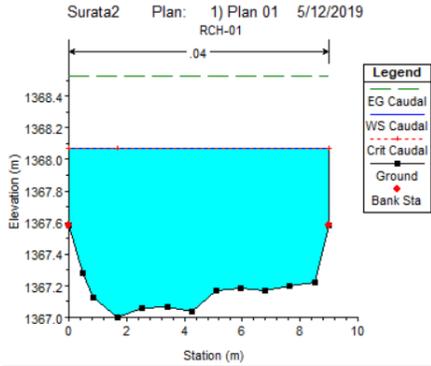
## ANEXO 14

En la tabla se observa la sección transversal del punto SA-06, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce.



**ANEXO 15**

En la tabla se observa la sección transversal del punto RCGH-01, con algunos parámetros hidráulicos y geométricos del cauce

<b>Sitio de muestreo: Rio Charta</b>			
<b>Punto: RCH-01</b>			
Latitud	7°16'52.31"N		
Longitud	73° 1'38.21"O		
Altura msnm	1367		
Temperatura del agua °C	28.5		
Temperatura del ambiente °C	22.7		
pH (Unid. pH)	8.24		
<b>PARAMETROS HIDRAULICOS Y GEOMETRICOS</b>			
Area (m2)	Velocidad m/s	Caudal m3/s	Ancho (m)
1.574	0.844	0.636	8.5
<b>SECCION TRANSVERSAL</b>			
<p>Surata2 Plan: 1) Plan 01 5/12/2019 RCH-01</p> 			

## ANEXO 16

Hoja de cálculo para el primer tramo modelado

SITIO DE MUESTREO	Río Vetas	Río Vetas	Q. la Baja	Río Vetas
<b>PUNTO</b>	<b>RV - 05</b>	<b>RV - 02</b>	<b>QLB-01</b>	<b>RV - 01</b>
Mercurio	0.002	0.0005	0.0016	0.0029
Cianuro	0.068	0.025	0.025	0.04
Hierro	13.1	4.2	3.2	3.1
Cobre	0.11	0.04	0.39	0.11
Cromo	0.05	0.05	0.05	0.05
Cadmio	0.005	0.005	0.005	0.005
Plomo	0.06	0.05	0.06	0.05
Níquel	0.05	0.05	0.05	0.05
Zinc	0.7	0.18	0.27	0.22
Manganeso	0.62	0.36	0.32	0.26
Aluminio	4.5	2.2	1.1	1.2
Arsénico	0.001	0.001	0.0016	0.001

<b>Rv-05</b>	<b>Rv-02</b>	<b>QLB-01</b>	<b>Rv-01</b>	<b>Datos</b>	<b>Tramo 1</b>
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>V prom</b>	0.4577
0	0	0	0	<b>V máx.</b>	1.1388
0.263	0.555	0	0.288	<b>DF</b>	0.5980
0.722	1.01	0.937	0.301	<b>L(m)</b>	13966.02
1.115	0.902	0.881	1.056	<b>tmed (seg)</b>	30512.10
0.47	0.344	0.593	0.892	<b>tmed (días)</b>	0.3531
0.745	0.445	0.476	0.556	<b>τ</b>	0.1419
0.182	0.719	0	1.493	<b>Tr(días)</b>	0.2112
0.181	0.349		0.666		
0.807	0.27		0.242		
0.28	0.171		0.338		
0	0		0.241		

TRAMO 1												
x	Hg	CN-	Fe	Cu	Cr	Cd	Pb	Ni	Zn	Mg	Al	As
	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)	M(x)
1	-1.8E-05	5.9E-03	2.0E+02	1.2E-02	6.8E-03	2.5E-05	1.3E-03	2.5E-03	6.1E-01	5.1E-01	2.4E+01	4.5E-03
301	-1.5E-08	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	6.3E-04	2.5E-05	1.9E-08	2.5E-03	1.6E-01	1.6E-01	2.7E-04	4.5E-03
601	-7.3E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	3.3E-04	2.5E-05	4.9E-09	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	6.7E-05	4.5E-03
901	-4.9E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.2E-04	2.5E-05	2.2E-09	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	3.0E-05	4.5E-03
1201	-3.7E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	1.7E-04	2.5E-05	1.2E-09	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	1.7E-05	4.5E-03
1501	-2.9E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	1.4E-04	2.5E-05	7.8E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	1.1E-05	4.5E-03
1801	-2.4E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	1.1E-04	2.5E-05	5.4E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	7.5E-06	4.5E-03
2101	-2.1E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	9.8E-05	2.5E-05	4.0E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	5.5E-06	4.5E-03
2401	-1.8E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	8.6E-05	2.5E-05	3.0E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	4.2E-06	4.5E-03
2701	-1.6E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	7.6E-05	2.5E-05	2.4E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	3.3E-06	4.5E-03
3001	-1.5E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	6.9E-05	2.5E-05	2.0E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	2.7E-06	4.5E-03
3301	-1.3E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	6.2E-05	2.5E-05	1.6E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	2.2E-06	4.5E-03
3601	-1.2E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	5.7E-05	2.5E-05	1.4E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	1.9E-06	4.5E-03
3901	-1.1E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	5.3E-05	2.5E-05	1.2E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	1.6E-06	4.5E-03
4201	-1.0E-09	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	4.9E-05	2.5E-05	1.0E-10	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	1.4E-06	4.5E-03
4501	-9.8E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	4.6E-05	2.5E-05	8.7E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	1.2E-06	4.5E-03
4801	-9.2E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	4.3E-05	2.5E-05	7.6E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	1.1E-06	4.5E-03
5101	-8.6E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	4.1E-05	2.5E-05	6.8E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	9.3E-07	4.5E-03
5401	-8.1E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	3.8E-05	2.5E-05	6.0E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	8.3E-07	4.5E-03
5701	-7.7E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	3.6E-05	2.5E-05	5.4E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	7.4E-07	4.5E-03
6001	-7.3E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	3.4E-05	2.5E-05	4.9E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	6.7E-07	4.5E-03
6301	-7.0E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	3.3E-05	2.5E-05	4.4E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	6.1E-07	4.5E-03
6601	-6.7E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	3.1E-05	2.5E-05	4.0E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	5.6E-07	4.5E-03
6901	-6.4E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	3.0E-05	2.5E-05	3.7E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	5.1E-07	4.5E-03
7201	-6.1E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.9E-05	2.5E-05	3.4E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	4.7E-07	4.5E-03
7501	-5.9E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.8E-05	2.5E-05	3.1E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	4.3E-07	4.5E-03
7801	-5.6E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.7E-05	2.5E-05	2.9E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	4.0E-07	4.5E-03
8101	-5.4E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.6E-05	2.5E-05	2.7E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	3.7E-07	4.5E-03
8401	-5.2E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.5E-05	2.5E-05	2.5E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	3.4E-07	4.5E-03
8701	-5.1E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.4E-05	2.5E-05	2.3E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	3.2E-07	4.5E-03
9001	-4.9E-10	2.7E-03	4.1E+01	1.2E-02	2.3E-05	2.5E-05	2.2E-11	2.5E-03	1.5E-01	1.6E-01	3.0E-07	4.5E-03

Hoja de cálculo para el segundo tramo modelado

SITIO DE MUESTREO	Río Suratá	Río Suratá	Río Suratá
PUNTO	SA - 07	SA - 06	SA - 05
Mercurio	0.0005	0.0005	0.0005
Cianuro	0.025	0.025	0.025
Hierro	0.6	1.3	6.3
Cobre	0.02	0.03	0.23
Cromo	0.05	0.05	0.05
Cadmio	0.005	0.005	0.005
Plomo	0.05	0.05	0.05
Níquel	0.05	0.05	0.05
Zinc	0.06	0.09	0.18
Manganeso	0.05	0.05	0.14
Aluminio	0.3	0.42	2
Arsénico	0.0001	0.001	0.001

<b>SA-07</b>	<b>SA-06</b>	<b>SA-05</b>	<b>Datos</b>	Tramo 2
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>V prom</b>	0.5966
0	0	0	<b>V máx.</b>	1.3320
0.383	0.391	1.028	<b>DF</b>	0.5521
0.652	0.726	1.063	<b>L(m)</b>	13275.00
1.332	1.112	0.958	<b>tmed (seg)</b>	22250.87
0.97	0.173	1.124	<b>tmed (días)</b>	0.2575
1.098	0.028	0.934	<b><math>\tau</math></b>	0.1153
0.57	1.009	0.649	<b>Tr(días)</b>	0.1422
0.439	0.783	0.766		
0.223	0.131	0.726		
0.087	0.417	0.822		
0	0.415	0.679		

Hoja de cálculo para el tercer tramo modelado

<b>SITIO DE MUESTREO</b>	<b>Río Vetás</b>	<b>Río Suratá</b>
<b>PUNTO</b>	<b>RV - 01</b>	<b>SA - 03</b>
Mercurio	0.0029	0.0005
Cianuro	0.04	0.025
Hierro	3.1	2.4
Cobre	0.11	0.04
Cromo	0.05	0.05
Cadmio	0.005	0.005
Plomo	0.05	0.05
Níquel	0.05	0.05
Zinc	0.22	0.07
Manganeso	0.26	0.08
Aluminio	1.2	1.6
Arsénico	0.001	0.001

<b>Río Vetás</b>	<b>Río Surata</b>	<b>Datos</b>	<b>Tramo 3</b>
<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>Velocidad (m/s)</b>	<b>V prom</b>	0.6856
0	0	<b>V máx.</b>	1.4930
0.288	0.642	<b>DF</b>	0.5408
0.301	0.805	<b>L(m)</b>	12221.27
1.056	0.75	<b>tmed (seg)</b>	17824.81
0.892	1.125	<b>tmed (días)</b>	0.2063
0.556	1.069	<b><math>\tau</math></b>	0.0947
1.493	1.053	<b>Tr(días)</b>	0.1116
0.666	1.029		
0.242	0.981		
0.338	1.131		
0.241	0.932		