

SIMULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UN TRAMO  
DE LA MICROCUENCA RIO FRÍO - QUEBRADA MENSULÍ ARANZOQUE

MARIA NATALIA CHAPARRO DÍAZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA

2013

SIMULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UN TRAMO  
DE LA MICROCUENCA RIO FRÍO - QUEBRADA MENSULÍ ARANZOQUE

MARIA NATALIA CHAPARRO DÍAZ

Trabajo de aplicación para optar por el título de:  
Magister en Ingeniería Ambiental

DIRECTOR  
ALVARO ANDRÉS CAJIGAS  
Ingeniero Sanitario, M. Sc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO-QUÍMICAS  
ESCUELA DE INGENIERIA QUIMICA  
MAESTRÍA EN INGENIERÍA AMBIENTAL  
BUCARAMANGA  
2013

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	15
OBJETIVOS.....	18
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN.....	19
2. MARCO TEÓRICO .....	23
2.1. CONTAMINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS .....	23
2.2. PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN .....	24
2.3. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA .....	28
2.3.1. Principios en la simulación de calidad de agua.....	30
2.3.2. Conservación de la masa y ecuaciones de transporte.....	31
2.3.3. Cinética de la reacción.....	36
2.3.4. Esquemas numéricos empleados para obtener una aproximación de la solución matemática.....	39
2.3.5. Desarrollo Histórico de los modelos de calidad de agua.....	40
2.3.5.1. Modelo de Streeter y Phelps (1925).....	43
2.3.5.2. Aportes a la modelación de oxígeno disuelto (1958-1964) .....	46
2.3.5.3. Modelación de nutrientes (introducción de la carga del fósforo). (1968) ...	48
2.3.5.4. Modelos de calidad de agua avanzados (1970-1998).....	49
2.4. EMPLEO DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN COLOMBIA .....	51
2.5. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS.....	54
2.6. ALCANCES EN LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUA .....	55
2.7. MODELOS DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA .....	56
2.7.1. FAMILIA DE MODELOS QUAL .....	57
2.7.1.1. QUAL2K.....	57
2.7.1.2. QUAL2Kw .....	59
2.8. CE-QUAL-W2 .....	68
2.9. MIKE 11 .....	71

2.10. WASP6 .....	74
2.11. EDP RIV1.....	77
3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	81
3.1. DESCRIPCIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RIO DE ORO .....	81
3.1.1. Afluentes río de oro.....	81
3.1.2. Río frío y sus afluentes .....	82
3.2. DESCRIPCIÓN DE LA QUEBRADA MENSULÍ Y SUS TRIBUTARIOS .....	82
4. METODOLOGÍA .....	86
5. DIAGNOSTICO DEL TRAMO DE LA MICROCUENCA.....	99
5.1. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS.....	99
5.1.1. Precipitación .....	100
5.1.2. Temperatura .....	102
5.1.3. Humedad del aire.....	103
5.1.4. Los vientos.....	103
5.1.5. Radiación solar .....	104
5.2. GEOPOSICIONAMIENTO DEL TRAMO DE ESTUDIO.....	105
5.3. BATIMETRIA .....	107
5.4. SELECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL .....	109
5.5. USOS ACTUALES DEL AGUA.....	111
5.6. ESQUEMATIZACIÓN DEL TRAMO DE LA MICROCUENCA .....	114
5.7. CALIDAD DEL AGUA .....	119
5.8. SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS .....	121
5.8.1. ESTADISTICA BÁSICA: Diferencia de medias con respecto a época.....	121
5.8.2. Prueba para diferencia de medias independientes .....	123
5.8.3. Análisis de varianzas ANOVA.....	125
5.8.4. Comparaciones múltiples.....	128
6. SELECCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA APLICABLE AL TRAMO DE LA MICROCUENCA EVALUADA .....	134
6.1. EVALUACION CUANTITATIVA DE LOS MODELOS .....	137
7. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA .....	141

7.1. FRONTERAS DE CALIBRACIÓN.....	143
7.2. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN .....	144
7.2.1. Resultados de Escenario 1 .....	153
7.2.2. Resultados de Escenario 2 .....	157
8. CONCLUSIONES .....	160
9. RECOMENDACIONES .....	165
BIBLIOGRAFIA.....	167
ANEXOS.....	172

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1 Representación esquemática de la carga, transporte y transformación de dos sustancias moviéndose a través y reaccionando con un volumen de agua.....	32
Figura 2 Fenómenos de transporte.....	34
Figura 3 Cuatro periodos en el desarrollo de la modelación de calidad de agua...43	43
Figura 4 Esquema de segmentación de QUAL2KW .....	60
Figura 5 Balance de flujo en cada elemento .....	61
Figura 6 Canal Trapezoidal.....	62
Figura 7 Balance de calor en cada elemento.....	63
Figura 8 Balance de masa en cada elemento .....	65
Figura 9 Microcuenca Rio Frío.....	83
Figura 10 Distribución de las actividades desarrolladas por los establecimientos que vierten sus residuos líquidos a la quebrada Mensulí Aranzoque. ....	84
Figura 11 Localización de puntos de monitoreo o control de la quebrada Mensulí Aranzoque.....	89
Figura 12 Precipitación estación Granja Piedecuesta.....	101
Figura 13 Localización geográfica de descargas y extracciones .....	106
Figura 14 Medición de ancho y profundidad de cada sección .....	107
Figura 15 Perfil puntos 1, 8, 13 Y 25.....	107
Figura 16 Caídas de agua.....	111
Figura 17. Tipos de extracciones de la Quebrada Mensulí-Aranzoque .....	112
Figura 18 Tipos de descargas a la Quebrada Mensulí-Aranzoque .....	113
Figura 19 Esquema de la Quebrada Mensuli Aranzoque y sus Principales Tributarios .....	115
Figura 20 Resultados del diagnóstico de la Quebrada Mensuli Aranzoque .....	118
Figura 21 Datos de entrada para el límite aguas arriba del tramo de estudio (Headwater) .....	145

Figura 22 Datos de entrada fuentes puntuales .....	146
Figura 23 Datos de entrada fuentes dispersas .....	146
Figura 24 Curva de calibración de Caudal .....	147
Figura 25 Curva de calibración de Velocidad.....	148
Figura 26 Curva de calibración de Profundidad. ....	148
Figura 27 Curva de Calibración de Temperatura. ....	149
Figura 28 Curva de calibración de oxígeno disuelto. ....	151
Figura 29 Curva de calibración de $DBO_{FAST}$ .....	151
Figura 30 Curva de calibración de pH.....	152
Figura 31 Curva de simulación de oxígeno disuelto .....	155
Figura 32 Curva de simulación de la $DBO_{FAST}$ (1) .....	155
Figura 33 Curva de simulación de oxígeno disuelto .....	158
Figura 34 Curva de simulación de la $DBO_{FAST}$ (2) .....	158

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1 Distribución de establecimientos que vierten sus residuos líquidos a las corrientes hídricas jurisdicción de la CDMB. ....	20
Tabla 2 Relación entre los parámetros de calidad de agua y sus usos .....	26
Tabla 3 Rangos de profundidad y velocidad para aplicar las expresiones de O'Connor y Dobbins, Churchill y Owens y Gibbs en la determinación de la aireación.....	48
Tabla 4 Constituyentes incorporados en el modelo .....	58
Tabla 5 Principales determinantes que modela QUAL2Kw.....	63
Tabla 6 Comparación entre los modelos QUAL2K y QUAL2Kw .....	66
Tabla 7 Variables de estado del modelo CE-QUAL-W2 .....	69
Tabla 8 Variables de estado del modelo MIKE11 .....	72
Tabla 9 Variables de estado del modelo WASP6 .....	75
Tabla 10 Variables de estado del modelo EDP RIV1 .....	78
Tabla 11 Localización puntos monitoreo de la quebrada Mensulí Aranzoque .....	88
Tabla 12 Recopilación metodología del proyecto .....	97
Tabla 13 Estaciones climáticas subcuenca Rio de Oro .....	99
Tabla 14 Precipitación media estación Granja Piedecuesta .....	101
Tabla 15 Recolección de datos de campo Georreferenciación.....	105
Tabla 16 Localización puntos monitoreo de la quebrada Mensulí Aranzoque .....	110
Tabla 17 Relación de vertimientos y captaciones.....	114
Tabla 18 Promedios 2010-2012 puntos de seguimiento.....	119
Tabla 19 Parámetros de calidad de agua medidos.....	120
Tabla 20 Datos resultantes de la estadística básica .....	121
Tabla 21 Prueba para diferencia de medias independientes .....	124
Tabla 22 Análisis de varianzas intergrupos e intragrupos de datos.....	126
Tabla 23 Comparaciones múltiples.....	128

Tabla 24 Matriz de componentes y atributos de diferentes modelos de calidad de agua .....	135
Tabla 25 Calificación de criterios por parámetro de selección del modelo .....	138
Tabla 26 Evaluación cuantitativa de modelos .....	139
Tabla 27 Configuración modelo QUAL2Kw.....	142
Tabla 28 Base de datos para la calibración del modelo de calidad del agua.....	143
Tabla 29 Tasas de reacción obtenidas en la calibración con QUAL2Kw .....	146
Tabla 30 Datos generados por la calibración.....	153
Tabla 31 Base de datos descargas puntuales no controladas.....	154
Tabla 32 Resultados obtenidos para el escenario .....	156
Tabla 33 Base de datos descargas establecimientos controlados.....	157
Tabla 34 Resultados obtenidos para el escenario .....	159

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo A Recolección de datos de campo Georreferenciación .....	172
Anexo B Reporte caracterización punto AZ-01A (2012-2012) .....	178
Anexo C Reporte caracterización puntos AZ-07 y MS-05 (2012-2012) .....	179
Anexo D Registro de campo batimetría .....	180
Anexo E Resultados de los puntos de muestreo de la Quebrada Mensulí .....	183

## RESUMEN

**TITULO:** SIMULACIÓN PARA EL ESTUDIO DE LA CALIDAD DEL AGUA EN UN TRAMO DE LA MICROCUENCA RIO FRÍO - QUEBRADA MENSULÍ ARANZOQUE

**AUTOR:** MARÍA NATALIA CHAPARRO DÍAZ

**PALABRAS CLAVE:** Calidad del agua, Modelación de fuentes hídricas, QUAL2Kw

### DESCRIPCIÓN:

Este estudio determina la calidad del agua de la quebrada Mensulí-Aranzoque, ubicada en el área metropolitana de Bucaramanga-Santander, donde la autoridad ambiental (Corporación Autónoma para la defensa de Bucaramanga – CDMB), teniéndose plenamente identificadas las actividades antrópicas que generan las diversas alteraciones de la calidad de agua. El estudio estadístico se realizó con el fin de seleccionar los parámetros de calidad más relevantes para la modelación matemática del cuerpo de agua, en el desarrollo del trabajo se empleó la base de datos históricos de tres puntos de monitoreo sobre la quebrada, realizado por la CDMB desde 2003, 1987 y 1983.

Se elaboraron una matriz cualitativa y una cuantitativa mediante las cuales se evaluaron cinco software disponibles, seleccionándose como aplicable la familia de modelos QUAL, debido a los dos criterios de mayor importancia siendo aplicación del software en regiones similares a la que será evaluada y aplicabilidad en las demás Corporaciones Autónomas Regionales, las cuales se constituyen como fundamentales para la CDMB, como entidad para la cual se desarrolla el modelo.

Finalmente se realizó la implementación y calibración del modelo, estableciéndose dos escenarios de saneamiento, en el primer caso donde la carga orgánica vertida se reduce al implementar una concentración máxima para los establecimientos con permiso de vertimiento, se observa un comportamiento positivo en términos de contaminación por materia orgánica mejorando la capacidad de autodepuración de la corriente. En cambio, si solo se regulan las descargas domésticas que se realizan sin tratamiento alguno, la mejora solo es obtenida para el tramo comprendido entre AZ-07 y AZ-01A donde se observa una contribución positiva en términos de materia orgánica.

---

<sup>1</sup>Proyecto de Grado para Maestría en Ingeniería Ambiental

<sup>2</sup>Facultad de Ingenierías Físico-Química. Escuela de Ingeniería Química. Director: M. Sc. Alvaro Andrés Cajigás Cerón.

## ABSTRACT

**TITLE:** SIMULATION FOR THE STUDY OF WATER QUALITY ON A STRETCH OF THE COLD RIVER WATERSHED - QUEBRADA MENSULÍ ARANZOQUE

**AUTHOR:** MARÍA NATALIA CHAPARRO DÍAZ

**KEYWORDS:** Water quality, water sources Modeling, QUAL2Kw

### DESCRIPTION.

This study determines the water quality of Mensulí-Aranzoque's creek, which is located in the metropolitan area of Bucaramanga, Santander, where the environmental authority (Corporación Autónoma para la defensa de Bucaramanga - CDMB), has identified human activities that generates the changes in water quality. The statistical analysis was performed in order to select the most relevant quality parameters for mathematical modeling of the water body, in the development of the work is the database used Historic three monitoring points on the creek, conducted by the CDMB from 2003, 1987 and 1983.

During the study were developed a qualitative and quantitative matrix through which evaluated five software available, selected as applicable QUAL model family, due to the two most important criteria of the software application being similar regions which will be evaluated and applicability in other Regional Autonomous Corporations, which are as critical to the CDMB, as an entity for which the model is developed.

Finally performed the implementation and calibration of the model, selected two scenarios, in the first case where the organic load discharged is reduced by implementing a maximum concentration for dumping permit establishments, there is a positive trend in terms of pollution by subject organic improving self-purification capacity of the stream. However, if only regulate domestic discharges that are performed without treatment, the improvement is only obtained for the section between AZ-07 and AZ-01A which shows a positive contribution in terms of organic matter.

---

<sup>1</sup>Project of Degree for Mastery in Environmental Engineering.

<sup>2</sup>Facultad of Engineering Physicist – chemistry School of Chemical Engineering. The director. M. Sc. Alvaro Andrés Cajigás Cerón

## INTRODUCCIÓN

La quebrada Mensulí Aranzoque se localiza en los Municipios de Piedecuesta y Floridablanca, cuenta con una extensión de 69 km<sup>2</sup> a lo largo de los cuales recorre parte de las veredas Mensulí, Guayana, Alto Mantilla y La Mata, para desembocar cerca de un área urbanizada aguas abajo del vertimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de Río Frío, que a su vez desemboca en Río de Oro, antes del área urbana del municipio de Girón.

La microcuenca pertenece a la subcuenca del Río de Oro y a la microcuenca del Río Frío e igualmente cuenta con afluentes importantes, donde sobresalen las quebradas Las Pavas, La Ronda, Guayana, Palmichal y Arrayanes.

La quebrada Mensulí - Aranzoque, es la segunda corriente hídrica que mayor número de descargas recibe teniendo en cuenta las 13 corrientes hídricas que están bajo la jurisdicción de la CDMB, principalmente debido a la ausencia de un colector a la red de alcantarillado en el área, ocasionando que se convierta en un vertedero natural para aguas contaminadas. Actualmente, se registra un total de 19 descargas con 9 tipos de actividades distintas de acuerdo al estudio de tasas retributivas del año 2011; sin embargo, pueden existir descargas no reportadas, que por ende no sean conocidas por Corporación Autónoma para la defensa de la Meseta de Bucaramanga - CDMB.

Las corrientes hídricas poseen una capacidad de asimilación para su autodepuración, la cual puede ser superada de acuerdo no solo al número de descargas de agua que recibe sino por las características y concentraciones de contaminantes vertidos. Este caso puede presentarse al no contarse con una buena herramienta de cuantificación para su ordenamiento y control de la contaminación.

Como respuesta a la falta de una herramienta para el ordenamiento y control de la contaminación de las corrientes hídricas, el Decreto 3930 de 2010 contempla los modelos de simulación de la calidad del agua como requisito para la obtención del permiso de vertimiento, sin embargo aún no se ha expedido la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico y por tanto la CDMB debe recurrir a la aplicación de modelos de simulación de los que se desconoce su calibración y validación.

Es importante destacar que para modelar la calidad del agua de una corriente es necesario simular los procesos de transformación de los diferentes compuestos que son vertidos a su cauce, es decir que se deben simular el transporte advectivo, el transporte dispersivo y la degradación o transformación de los componentes de la calidad del agua. Dichos procesos dependen del caudal, la velocidad, el área transversal y el radio hidráulico, características que se deben tomar de la modelación hidráulica de la corriente hídrica.

El proyecto a desarrollar busca establecer un instrumento que describa el comportamiento de la calidad del agua del tramo de la microcuenca Rio Frío quebrada Mensulí Aranzoque, mediante un modelo de simulación, que se constituya como una herramienta en la planificación del recurso hídrico y en el adecuado manejo de la problemática de contaminación del agua del tramo evaluado. Lo anterior, representa una utilidad para la CDMB, particularmente en el establecimiento de las metas correspondientes al ordenamiento del recurso hídrico y con ello el pago de tasas ambientales, que contribuyen con la sostenibilidad del tramo de la microcuenca.

Para el desarrollo del proyecto, se inicia con un diagnóstico del tramo de la microcuenca, donde se georreferencian cada una de las entradas y salidas, identificando su origen presumible, se establecen los tramos en los que se divide la corriente para tomar anchos y profundidades y realizar el perfil batimétrico.

Se realiza una evaluación de diversos modelos de calidad de agua comerciales, para realizar la selección del que más se ajusta a las condiciones de la microcuenca, en este caso la simulación de la calidad del agua utilizando el modelo QUAL2Kw. Cabe mencionar que, para realizar la modelación se tuvieron muchas limitaciones en cuanto a la información requerida para realizar la calibración y verificación del modelo. En este proceso se utilizó el modelo matemático QUAL2K como una herramienta de soporte adicional.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERAL**

Emplear un modelo de simulación de calidad del agua que se constituya como herramienta para la Autoridad Ambiental en el establecimiento de límites y metas de reducción en el tramo de la microcuenca Río Frío - quebrada Mensulí Aranzoque.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Realizar un diagnóstico de la zona de estudio correspondiente a la microcuenca a evaluar.
- Seleccionar el modelo de simulación de calidad del agua aplicable al tramo de la microcuenca.
- Calibrar el modelo comparando un conjunto de resultados medidos frente a los resultados entregados por este.
- Definir la aplicación de la herramienta que permita el establecimiento de límites y metas de reducción en el tramo evaluado de la microcuenca.

## 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

La CDMB como Autoridad Ambiental competente, promueve la gestión ambiental, estableciendo como punto de partida el conocimiento de la situación físico-biótica y socio-económica de los diferentes ecosistemas existentes en su área de jurisdicción. La base de su gestión la constituye el ordenamiento ambiental del territorio, siendo así de gran importancia el recurso hídrico, el cual se constituye como un eje fundamental.

En total son 13 las corrientes hídricas que están bajo la jurisdicción de la CDMB, de las cuales la que mayor número de vertimientos recibe es la codificada como RO-4A-RO-01 (Río de Oro, antes del área urbana de Girón hasta antes de la confluencia con el Río Suratá), con un total de 26 establecimientos. La quebrada Mensulí Aranzoque es la segunda en aportes con un total de 19 establecimientos, le sigue nuevamente otro tramo de Río de oro codificado como RO-05-RO-4A (antes del municipio de Piedecuesta hasta antes del área urbana del municipio de Girón) que recibe descargas de 13 establecimientos. (Estudio del pago de tasa retributiva para el año 2011 de la quebrada Mensulí Aranzoque, CDMB).

Los aportes de agua residual son generados por actividades de mantenimiento y reparación de vehículos automotores, elaboración de alimentos preparados para animales y productos para la molinería, producción, transformación y conservación de carnes, comercio al por menor de combustibles para automóviles, aporte de aguas domésticas rurales y de los cascos urbanos. A continuación, se incluye en la Tabla 1 la distribución de acuerdo al número de establecimientos que descargan a las 13 corrientes hídricas.

**Tabla 1** Distribución de establecimientos que vierten sus residuos líquidos a las corrientes hídricas jurisdicción de la CDMB.

<b>Cuerpo hídrico</b>	<b>N° establecimientos</b>
Río de oro, tramo RO-4A-RO-01	26
Quebrada Mensulí	19
Río de Oro, tramo RO-05-RO-4A	13
Río Chicamocha	11
Nac-SA-03 - Nac-SA-05	3
Río Lebrija	3
Río Salamaga	3
Río Frio	2
Nacimiento-RO-05	1
Quebrada la Angula	1
Río Cachirí	1
Río Negro	1

**Fuente:** Elaboración propia basado en el estudio del pago de tasa retributiva para el año 2011 de la quebrada Mensulí Aranzoque – CDMB.

Es pertinente destacar que existe una problemática significativa en torno a la quebrada Mensulí Aranzoque representada en el número de establecimientos que descargan a ésta y las características y concentraciones de los mismos, es por ello que debe evaluarse el comportamiento de la calidad del agua a lo largo de la misma, ya que siendo la quebrada Mensulí Aranzoque tributaria a la microcuenca de Río Frío, la cual a su vez desemboca en la Subcuenca del Río de Oro y finalmente confluyen a la Cuenca del Río Lebrija, toda acción tendiente a realizar saneamiento de la quebrada, contribuye a la descontaminación de los demás cuerpos hídricos .

Se ha intentado mediante la evaluación mediante indicadores, implementar acciones para atender la ausencia de una herramienta de control de localidad del agua, sin embargo, ésta no permite medir cuantitativamente los límites y metas de reducción de la quebrada Mensulí Aranzoque de manera tan precisa como empleando los modelos de simulación de calidad del agua.

La problemática se acentúa debido a que la CDMB se limita a realizar seguimiento de las empresas o instituciones grandes, desconociendo diversas descargas poco controladas a la corriente, lo cual evidencia la necesidad de realizar un diagnóstico que permita la identificación de cada uno de los puntos de extracción o vertido, que se constituyen como base de alimentación del modelo.

Actualmente, la CDMB cuenta con reportes históricos de tres puntos localizados a lo largo de la quebrada, siendo **AZ-1A** localizado antes de confluencia con Río Frío, **AZ-07** en el cruce de la Quebrada sobre la Autopista Piedecuesta – Floridablanca y **MS-05** en la Autopista Piedecuesta - Floridablanca, Antigua Placerosa, mencionando desde la desembocadura hasta el nacimiento.

Los reportes históricos de los últimos 3 años para los tres puntos mencionados (ver anexo 2), evidencian un deterioro de la calidad del agua al compararla con el punto MS-05, es decir el más cercano al nacimiento, ya que su índice de calidad de agua solo en dos oportunidades no es del rango bueno. Sin embargo, el punto AZ-07, permite identificar claramente un deterioro progresivo, determinándose calidades de dudoso e inadecuado. Finalmente, al realizar la misma comparación en el punto AZ-01A (más cercano a la desembocadura al Río de Oro) la calidad fluctúa significativamente, principalmente destacándose el año 2011 como crítico y aparentemente iniciando a mejorar en el año 2012 para finalizar nuevamente con un deterioro en el mes de septiembre, dicho comportamiento puede relacionarse con la capacidad de autodepuración de la fuente o con posibles medidas de control implementadas o al contrario vertimientos no contabilizados.

Teniendo como referencia la nueva normatividad, Decreto 3930 de 2010 “Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo 11 del Título VI-Parte 11/-Libro II del Decreto - Ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones”, se contemplan los modelos de simulación de la calidad del agua como requisito para

la obtención del permiso de vertimiento, utilizando la Demanda bioquímica de oxígeno a 5 días ( $DBO_5$ ), Demanda química de oxígeno (DQO), Sólidos suspendidos (SS), Potencial del ion hidronio (pH), Temperatura, Oxígeno disuelto (OD), caudal (Q), datos hidrobiológicos y finalmente coliformes totales y fecales, como parámetros mínimos a incluir en el modelo.

A partir de la modelación de calidad de agua, se espera obtener las características de las descargas antes de su vertido para que en determinados puntos, las concentraciones de los parámetros evaluados no sobrepasen los límites establecidos normativamente y lo más importante no afecten los ecosistemas propios de los mismos. El desarrollo del proyecto permite realizar de manera inicial un reconocimiento de la corriente, identificando la totalidad de los puntos de vertimiento y captación, lo cual se constituye como un lineamiento para que la CDMB pueda relacionar la información de permisos y tasas retributivas, permitiendo identificar posibles infractores que deterioren la calidad del agua. Igualmente, el modelo de simulación se constituye como una herramienta de planificación necesaria para la adecuada gestión del recurso hídrico, la cual contribuye al establecimiento de las metas de reducción y con ello el pago de tasas ambientales, buscando la sostenibilidad del tramo de la microcuenca.

La CDMB no cuenta con una herramienta que permita establecer las metas de reducción de los cuerpos de agua, sin embargo deberá comenzar a exigir la modelación de calidad de agua para el trámite de solicitud del permiso de vertimientos, para lo cual aun no se cuenta con la Guía Nacional de Modelación del Recurso Hídrico y hasta tanto se expida, se debe dar continuidad a la aplicación de cualquier modelo existente que permita realizar la evaluación ambiental del vertimiento, lo cual al no ser unificado no permite obtener resultados comparables que conlleven a la predicción de los impactos que causan los vertimientos en el cuerpo de agua, en función de la capacidad de asimilación y dilución de la corriente.

## **2. MARCO TEÓRICO**

### **2.1. CONTAMINACIÓN DE SISTEMAS HÍDRICOS**

La contaminación del agua debe entenderse como un concepto asociado a las características físicas, químicas y biológicas que impiden o dificultan su uso. El agua naturalmente en estado líquido no se encuentra pura, sino que va incorporando diversas sustancias a lo largo del ciclo del agua, tales como gases y compuestos minerales de origen orgánico e inorgánico, así como otros elementos. No obstante, no debe entenderse el término “uso” en su sentido estrictamente utilitarista para el ser humano (bebida, baño, riego, aplicación industrial, etc.), sino que el concepto debe ser más amplio haciendo referencia al mantenimiento de las condiciones naturales de forma que no se perturbe el funcionamiento de los ecosistemas.

Según la Ley de Aguas, la contaminación del agua es la acción y el efecto de introducir materias o formas de energía, o inducir condiciones en el agua que, de modo directo o indirecto, impliquen una alteración perjudicial de su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica.

El principal problema relacionado con la calidad del agua lo constituye la eutrofización, como consecuencia del aumento en los niveles de nutrientes, generalmente fósforo y nitrógeno. Las mayores fuentes de nutrientes provienen de la escorrentía agrícola y de las aguas residuales domésticas, así como efluentes industriales y emisiones a la atmósfera procedentes de la combustión de combustibles fósiles y de los incendios forestales.

El deterioro de la calidad del agua se ha convertido en motivo de preocupación a nivel mundial debido al incremento poblacional, la expansión de la actividad

industrial y agrícola y la amenaza que representa el cambio climático como causante de importantes alteraciones en el ciclo hidrológico.

Es de resaltar que cada vez es mayor la preocupación acerca del impacto en los ecosistemas acuáticos de los productos cosméticos y farmacéuticos como las píldoras anticonceptivas, analgésicos y antibióticos, ya que poco se sabe de sus efectos a largo plazo sobre los humanos y los ecosistemas.

## **2.2. PRINCIPALES FUENTES DE CONTAMINACIÓN**

En Colombia el 95% de las aguas residuales domésticas e industriales se vierten a los ríos sin ningún tipo de tratamiento, donde cerca del 65% se realizan en ríos o quebradas de montaña. A pesar de la alta capacidad de autopurificación, los ríos colombianos se encuentran en muchos casos contaminados en largos trayectos debido a la alta carga orgánica, de patógenos y nutrientes.

Todo elemento o compuesto químico tanto orgánico como inorgánico que en cantidad suficiente es capaz de entrar en contacto con un organismo vivo y originar daños o efectos adversos es considerado un contaminante químico.

La contaminación del agua representa una enorme amplitud de asuntos que parten del agua como parte de las capacidades naturales que proveen el recurso para el desarrollo de la vida humana, y que la actividad humana devuelve al entorno natural en niveles de calidad que alteran hasta ocasionar rupturas en equilibrios naturales frágiles que sustentan a esa misma vida. Desequilibrios que se incrementan paralelamente al crecimiento de las poblaciones y las concentraciones y características de las sustancias vertidas.

Los contaminantes químicos del agua incluyen compuestos inorgánicos y orgánicos disueltos o dispersos. Los contaminantes inorgánicos provienen de

descargas domésticas, agrícolas e industriales, o de la erosión del suelo. Entre ellos se pueden mencionar cloruros, sulfatos, nitratos y carbonatos, y también óxidos de azufre y nitrógeno, amoníaco y sulfuro de hidrógeno (ácido sulfhídrico).

Los contaminantes orgánicos provienen de desechos humanos y animales, tales como mataderos, industrias procesadoras de alimentos, productos químicos industriales de origen natural como aceites, grasas y tinturas, y diversos productos químicos sintéticos como pinturas, herbicidas, insecticidas, entre otros. Estos compuestos pueden ser descompuestos por bacterias aerobias, consumiendo oxígeno, por ello si este contaminante se encuentra en exceso, ocasiona agotamiento en el oxígeno, alterando la diversidad biológica.

Los criterios de calidad aplicables a un determinado recurso de agua deben estar basados en la observación científica (bioensayos) de los efectos de los diferentes contaminantes sobre los organismos propios del agua y de acuerdo con las condiciones locales. En la tabla a continuación, se presenta la relación entre algunos parámetros de calidad del agua y sus respectivos usos.

**Tabla 2** Relación entre los parámetros de calidad de agua y sus usos

<b>Parámetro</b>	<b>Variable</b>	<b>Problemática relacionada</b>	<b>Fuente de generación</b>
Estado General del Recurso	Oxígeno Disuelto	El OD es esencial para preservar la vida acuática en el agua, indica la capacidad autodepuradora y su ausencia indica condiciones anaerobias en el sistema, pudiendo generarse problemas de olores y deterioro del ecosistema.	Lo aporta la atmósfera y lo agota la descomposición de la materia orgánica, siendo aportada por las descargas de tipo doméstico.
Materia Inorgánica	SST, DQO	Si al relacionar la DQO con la DBO, se obtiene un rango alto, indica que gran parte de la materia orgánica presente en el cuerpo de agua no es biodegradable. La presencia de sólidos, puede generar problemas estéticos, depósitos de lodo, adsorción de contaminantes y depósitos de lodos y condiciones anaerobias.	Es aportada tanto por vertimientos de tipo doméstico como industrial e incluso por la erosión natural del suelo.
Materia Orgánica	DBO, SVT, SSV, SDV	Si se presentan altas concentraciones en términos de DBO y no se cuenta con capacidad de autodepuración, pueden generarse condiciones sépticas por el agotamiento del oxígeno y por ende afectación en la diversidad biológica.	Es aportada tanto por vertimientos de tipo doméstico como industrial e incluso por la degradación natural.
Nutrientes	Nitrógeno, Fósforo, Potasio, Zinc, Boro y Azufre	Son esenciales para el crecimiento, sin embargo cuando son descargados al agua pueden llevar el crecimiento de vida acuática indeseable, debido al crecimiento excesivo de algas (fenómeno de eutrofización) y toxicidad para los peces (amonio).	Es aportada tanto por vertimientos de tipo doméstico como industrial
Orgánicos tóxicos	Compuestos específicos (pesticidas, hidrocarburos clorados)	Esta materia tiende a resistir los métodos tradicionales de tratamiento. Genera compuestos tóxicos para la diversidad biológica, espumas (detergentes) que a su vez ocasionan reducción de la transferencia de	Es aportada tanto por vertimientos de tipo doméstico (detergentes principalmente) como industrial y agrícola.

Parámetro	Variable	Problemática relacionada	Fuente de generación
		oxígeno. Muchos de estos compuestos son recalcitrantes o difícilmente biodegradables y tóxicos al ambiente.	
Nivel de acidez	pH	El pH del agua afecta los procesos de desinfección, coagulación, solubilidad de los metales y la alcalinidad de los suelos.	Es aportada tanto por vertimientos de tipo doméstico como industrial.
Nivel de alcalinidad	Acidez, alcalinidad y capacidad buffer	Es de su gran importancia su determinación en los procesos de potabilización del agua, ya que afecta notablemente la eficiencia del proceso de coagulación.	Es aportada por industrias que realizan lavados con soluciones de hidróxidos, tales como las que realizan manipulación de alimentos.
Metales pesados	Elementos específicos (Cd, Zn, Ni, Cu, Cr, Pb y Hg).	Algunos son tóxicos para plantas y animales, generan inhibición al tratamiento biológico y contaminación del agua subterránea. Igualmente, la presencia de metales pesados se constituye como limitante para los usos posteriores del agua debido a las afectaciones que puede ocasionar a la salud.	Es aportada por vertimientos de industrias, tales como fundición, metalmecánica, baterías, entre otras.

**OD:** Oxígeno Disuelto

**SST:** Sólidos suspendidos totales

**SSV:** Sólidos suspendidos volátiles

**SD:** Sólidos disueltos.

**Fuente:** Adaptado de usos y estándares de calidad del río Bogotá. Empresa de Acueducto de Bogotá, Agosto 2002.

### 2.3. CONCEPTUALIZACIÓN DE LA MODELACIÓN DE LA CALIDAD DE AGUA

Comúnmente se ha definido que un modelo corresponde a "una representación simplificada de la realidad en la que aparecen algunas de sus propiedades". (Salas H, 1984). A continuación, varios autores han ahondado en el concepto, Thoman en 1987 expone que la modelación es una técnica de análisis que permite reproducir una serie de eventos por medio de expresiones matemáticas que representan los diferentes componentes a estudiar, por lo que el modelo debe ser una aproximación precisa del sistema real y contener el mayor número de aspectos reales, sin que ello implique un grado de complejidad que haga difícil su comprensión y aplicación.

Murthy *et al.* en 1990, definen como modelo el proceso mediante el cual un problema tal como aparece en el mundo real, se interpreta en términos de símbolos abstractos, donde la formulación matemática obtenida corresponde al modelo matemático del problema original y de esa manera es posible denominar el problema en términos netamente matemáticos. Dicha definición coincide con Carrera, en que las matemáticas constituyen un papel fundamental debido a que permiten expresar un problema en dichos términos.

En cuanto a la reproducción de algunas de sus propiedades, hace referencia a que la realidad o problema puede ser representado incluyendo solo algunas de las propiedades del mismo, lo cual reduce la complejidad de los sistemas, siendo claro en la definición "Un modelo es un objeto, concepto o conjunto de relaciones que se utiliza para representar y estudiar de forma simple y comprensible una porción de la realidad empírica". (Ríos, 1995).

Conforme a las definiciones de diversos autores, la conclusión a la que puede llegarse es que cada vez el concepto de modelo juega un papel mayor en

diferentes campos de la ciencia, pero que a pesar de ello no existe una definición general.

En un proceso de simulación de calidad de agua, uno de los insumos más importantes es el programa computacional o modelo, encargado de procesar ciertos datos de entrada por medio de algoritmos matemáticos, para obtener los resultados buscados.

La persona responsable de la simulación tiene dos opciones, la primera es desarrollar un modelo de simulación y la segunda adaptar un modelo existente. Aparentemente la primera alternativa parece ser la mejor, sin embargo el menor gasto de tiempo y recursos de la segunda hace que sea la preferida generalmente.

La selección de un modelo de calidad de agua implica observar las características de la corriente hídrica a estudiar, las capacidades de la entidad interesada en implementar el modelo y las propiedades del programa en sí; entonces, el modelo seleccionado será aquel cuyas propiedades se adapten mejor a las características de la corriente en cuestión y a las capacidades de la entidad interesada.

Un modelo típico de la calidad del agua consiste en la recopilación de las fórmulas que representan a los mecanismos físicos, químicos, biológicos y microbiológicos que determinan el destino y transporte de contaminantes en un cuerpo de agua, es así como se encuentran diversos modelos disponibles para los componentes individuales de la calidad del agua, tales como DBO, OD, DQO, nutrientes y temperatura.

La utilidad de los modelos para predecir el comportamiento del problema a representar se relaciona directamente con la adecuada selección de los factores relevantes para el mismo, así como una descripción de sus relaciones funcionales, ya que a pesar de simplificar el problema real no debe dejar de corresponder lo más cercanamente posible a ésta. (Trento A, 2001).

### **2.3.1. Principios en la simulación de calidad de agua**

La simulación de la calidad de agua en estados permanente y transitorio se ha utilizado en estudios de evaluación de la capacidad asimilativa de corrientes, permisos de vertimientos, diseño de infraestructura de tratamiento de aguas residuales y evaluación del impacto de derrames de sustancias peligrosas en cortos períodos de tiempo.

La aplicación de un modelo de calidad para evaluar el impacto que puede producir cualquier compuesto en un medio requiere:

- Fijar un volumen de control, considerado como el sistema en estudio, indistintamente del tamaño que posea.
- Identificar posibles entradas y salidas a través de las fronteras del volumen de control.
- Determinar las características del transporte en el interior del volumen de control y a través de sus fronteras. La capacidad de mezcla en el interior del sistema debe ser conocida, ya sea por mediciones o estimaciones basadas en la hidrodinámica del sistema.
- Conocer las cinéticas de reacción (física, química y biológica) y las constantes de velocidad al interior del volumen de control.

Es así como la aplicación de un modelo depende del tipo de contaminante y del tipo de sistema natural objeto de estudio.

Para la modelación, se requiere el desarrollo de una estructura común que permita la resolución de las ecuaciones que representan tanto el comportamiento físico del agua (conservación de masa) como las ecuaciones de transporte de masa (ecuaciones de advección-difusión-reacción de sustancias disueltas en el agua) (Pinho *et al.*, 2004), ambas serán incluidas con detenimiento en los ítems siguientes.

El campo del modelado hidrodinámico incluye una variedad de aproximaciones comúnmente empleadas en diversos estudios. En todos ellos, las ecuaciones básicas que sustentan al modelo hidrodinámico son universalmente conocidas, no obstante, existe un gran variedad de métodos para resolverlas.

A continuación, se incluye una breve descripción de las ecuaciones que representan los modelos de calidad del agua, así como las posibles herramientas posibles a emplear para dar resolución a las mismas.

### **2.3.2. Conservación de la masa y ecuaciones de transporte**

Los modelos de calidad de agua se basan en la conservación de masa, es decir, que dentro de un volumen finito de agua, la masa ni se crea ni se destruye. En términos cuantitativos, el principio se expresa como una ecuación de balance de masa que representa todas las transferencias de la materia a través de los límites del sistema y las transformaciones que ocurren dentro de él, es decir el ingreso de contaminantes al cuerpo de agua, el transporte y las reacciones en el cuerpo de agua, siendo así como durante un período finito de tiempo, la ecuación que lo representa es la siguiente:

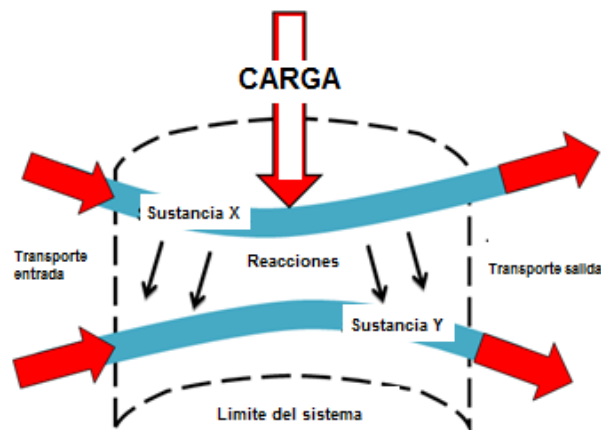
#### **Ecuación 1**

$$\text{Acumulación} = \text{cargas} \pm \text{transporte} \pm \text{reacciones} = \text{entrada} \pm \text{generación} \pm \text{consumo}$$

En la figura, se representa la conservación de la masa para dos sustancias hipotéticas que fluyen a través y reaccionan dentro de un volumen de agua. El movimiento de la materia a través del volumen, junto con el flujo de agua, se denomina transporte. Además de este flujo, la masa se gana o se pierde por las transformaciones o reacciones de las sustancias dentro del volumen.

En las reacciones o se agrega masa cambiando otro constituyente de la sustancia que está siendo modelada o se retira masa mediante la transformación de la sustancia en otro constituyente, tal como se presenta en la figura, donde X reacciona para formar Y, sin embargo la sustancia puede ser incrementada por cargas externas.

**Figura 1** Representación esquemática de la carga, transporte y transformación de dos sustancias moviéndose a través y reaccionando con un volumen de agua.



**Fuente:** Modificada de Surface water quality Modeling.

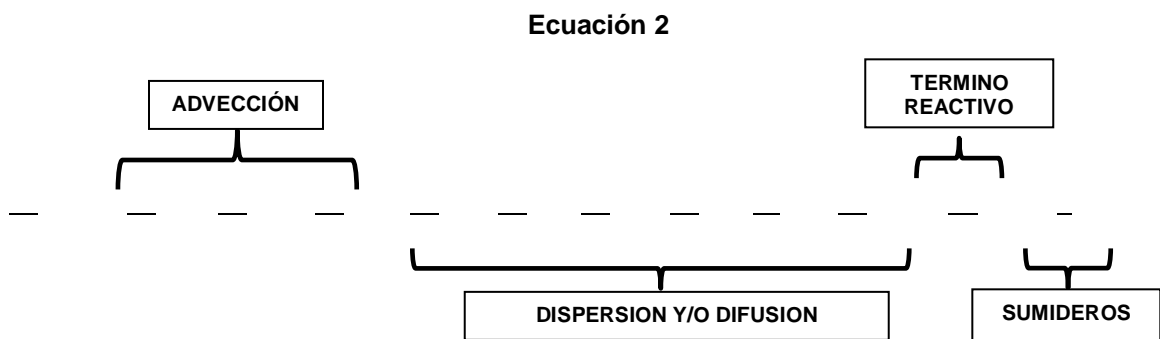
Un balance de masa se define como la verificación de igualdad cuantitativa de masas que debe existir entre los insumos de entrada y los productos de salida. La aplicación de un modelo basado en dicha ecuación permite determinar parámetros físicos-químicos y biológicos y determinar el grado de contaminación que pueden provocar en diferentes condiciones.

Por tal razón son considerados como el eje o núcleo de cualquier modelo de calidad de agua, siendo aplicados para cada una de las sustancias de interés a evaluar en la simulación.

Cuando una carga de contaminante se introduce en un cuerpo de agua, ocurren tres acciones fundamentales, siendo éstas la dispersión, el transporte convectivo y

la transformación del contaminante por reacciones físicas, químicas, biológicas o combinación de ellas (reacción o degradación), dichas acciones fueron incluidas en el ítem anterior, donde se relacionan con la formulación del balance general de masas.

Retomando la ecuación 1 y teniendo en cuenta los fenómenos de transporte asociados cuando se introduce una carga de contaminante a un cuerpo de agua, ocurren tres acciones fundamentales, siendo éstas la dispersión, el transporte convectivo y la transformación del contaminante por reacciones físicas, químicas, biológicas o combinación de ellas (reacción o degradación), se genera la ecuación fundamental de conservación, la cual representa la variación de concentración de un contaminante en el tiempo:

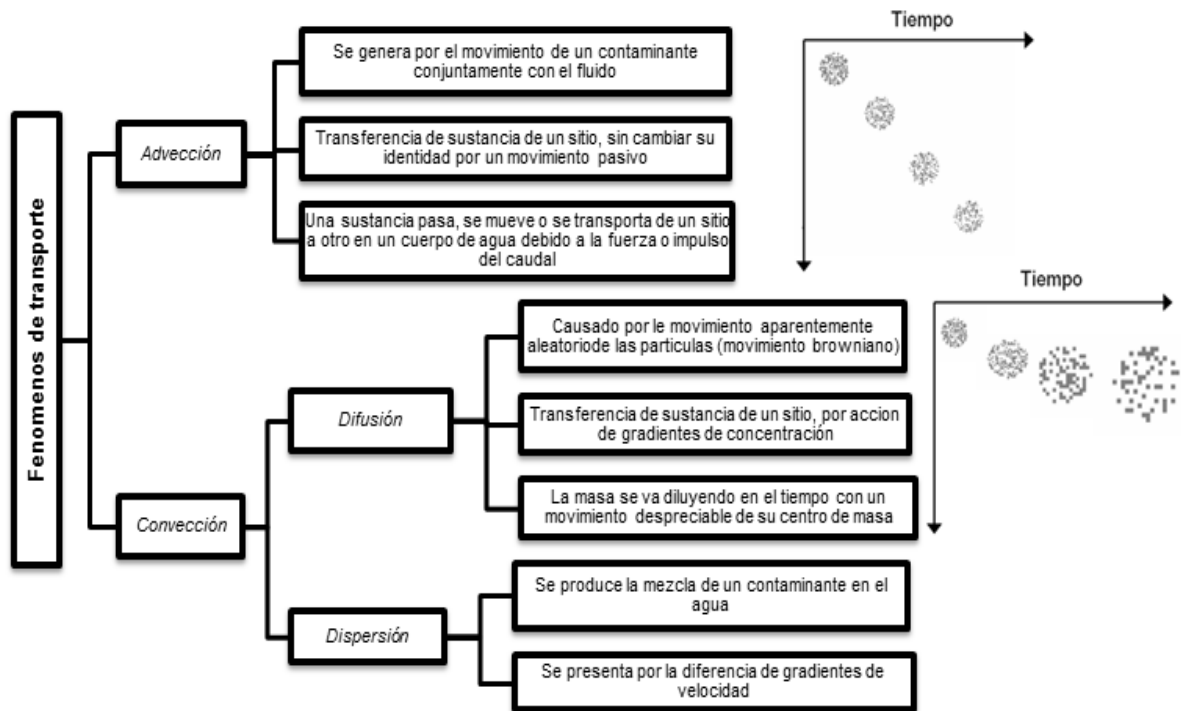


**Donde,**

- : Concentración del contaminante en mg/L o mol/L.
- : Tiempo en segundos (s)
- : Componente del vector velocidad real del agua longitudinalmente.
- : Componente del vector de velocidad del real agua transversalmente.
- : Componente del vector velocidad real agua verticalmente.
- : Componentes del tensor de dispersión en el seno del fluido (coeficientes de dispersión longitudinal, transversal y vertical respectivamente en  $m^2/s$ ).
- : Sumidero (adición o disminución) de una sustancia química por cargas contaminantes, donde S es la masa de la sustancia química y el volumen (mg/L.s ó mol/L.s).

A partir de la ecuación 2, se obtiene que la concentración de una sustancia química en el agua se puede ver afectada por los fenómenos de advección, dispersión, difusión, reacción y cargas externas, los cuales son abordados a continuación.

**Figura 2** Fenómenos de transporte



**Fuente:** Adaptado de Monerris, M; Sierra C.

El tercer término de la ecuación - reactivo, a diferencia de los mecanismos de transporte (advección y/o difusión/dispersión) mencionados, cambia la concentración de un contaminante por efecto de las transformaciones, ya sean de tipo químico, físico o biológico que sufre una sustancia en el medio, tal como la transformación del nitrógeno orgánico en nitratos o la velocidad de descomposición, por acción bacteriana de la DBO.

Los sumideros o fuentes, simbolizan todas aquellas posibles entradas y/o salidas de una sustancia en estudio, no asociadas a los mecanismos de transporte (advección o dispersión) y que puedan producirse por unidad de tiempo y de volumen de fluido.

Los modelos de calidad, acoplan las ecuaciones de transporte, describiendo la evolución espacial y temporal y con mayor o menor complejidad dimensional en función del tipo de masa de agua modelada, es así como se han implementado desde esquemas tridimensionales aplicados en cuerpos de agua como estuarios o embalses, hasta esquemas unidimensionales empleados principalmente en cuerpos lóticos en los que existe una dimensión preferencial de flujo.

Las múltiples propuestas derivadas de dicha ecuación difieren en la representación hidrodinámica del problema, en el número y tipo de reacciones químicas consideradas y en el esquema numérico empleado para obtener una aproximación de la solución matemática.

Para entender la secuencia de los fenómenos, se sabe que al momento en que se realiza una descarga ocurre una homogenización en la zona cercana, lo cual puede ocurrir debido al gradiente de concentraciones, la turbulencia debido a la diferencia de velocidades entre el vertido y el cuerpo de agua receptor o el diseño de la boca de descarga.

Cuando los gradientes se han suavizado (concentraciones, temperaturas, velocidades), el fenómeno de dispersión se produce de forma mucho más lenta, de esa manera la mezcla evoluciona fundamentalmente por convección y toman importancia los factores asociados a la adición o eliminación de elementos contaminantes, tales como: mortalidad de microorganismos, neutralización de productos tóxicos, decantación, etc.

Por tanto, para obtener las concentraciones de los elementos contaminantes en el punto de interés se divide el área afectada en dos zonas llamadas de vertido y de evolución. Inicialmente, debe hacerse referencia a la homogenización realizada en la zona de vertido debido a que indica el orden de magnitud de las concentraciones que van a existir en una amplia zona y adicionalmente la normatividad hace referencia a dicho punto como efluente del sistema, en el cual se monitorean los parámetros de interés.

Debe tenerse en cuenta lo que ocurre en la zona de evolución, donde, por predominar el fenómeno de convección es de interés primordial el conocimiento de las velocidades del cuerpo de agua receptor.

Para resolver la ecuación resultante, es necesario emplear esquemas numéricos, que permitan obtener aproximaciones a soluciones matemáticas.

### **2.3.3. Cinética de la reacción**

Cuando se produce una descarga de aguas residuales compuestas principalmente de materia orgánica en un río, se hace necesario realizar la medición de la Demanda Bioquímica de Oxígeno Carbonácea (DBOC) y Demanda Bioquímica de Oxígeno Nitrogenada (DBON) y sus constantes cinéticas asociadas, las cuales brindan información sobre la velocidad de degradación de la materia orgánica en un cuerpo de agua.

Una vez realizada la descarga, las bacterias presentes se alimentan para construir nuevo material celular y mantenerse con vida. Para este proceso de descomposición necesitan de oxígeno, por ello a mayor cantidad de materia orgánica presente mayor cantidad de oxígeno necesitan las bacterias. Como conclusión se puede decir que un nivel bajo de oxígeno indica una actividad biológica intensa y por ende contaminación en las aguas.

Las ecuaciones que permiten predecir el proceso se basan en el coeficiente de consumo de oxígeno por acción metabólica de las bacterias.

Las tasas de reaireación miden la velocidad con la que el oxígeno presente en la atmósfera es transferido a los cuerpos de agua. Este es el principal proceso que sirve como fuente de oxígeno y el principal uso de las tasas es la cuantificación de los procesos de reaireación en los modelos oxígeno disuelto de calidad agua.

Generalmente en la determinación de estas tasas se utilizan ecuaciones empíricas predictivas, donde la mayoría han sido derivadas para ríos de Europa y Estados Unidos los cuales representan sistemas físicos diferentes a los suramericanos. Es por ello, que en muchos casos se considera necesario determinar experimentalmente el valor real de la tasa de reaireación y establecer la ecuación predictiva de mayor precisión aplicable según el río a simular.

El trabajo realizado por Streeter y Phelps (1925) fue el pionero en la determinación de las tasas de reaireación en los ríos. Posteriormente se han desarrollado formulas predictivas que correlacionan la constante con las propiedades hidráulicas de la corriente. Estas ecuaciones se formularon siguiendo dos aproximaciones: métodos semi-empíricos (O'Connor y Dobbins (1956), Krenkel y Orlob (1962), Tsvoglou y Wallace (1972), Fok y Stall (1972)), y métodos empíricos (Churchill HW DO (1962), Langbein y Durum (1967), Owens y Gibbs HW DO. (1964)). Posteriormente, en el ítem aportes a la modelaciones del oxígeno disuelto, se incluye brevemente sobre algunas de las constantes calculadas por estos autores.

Además de las formulas, la reaireación puede ser medida directamente en campo. Comúnmente se emplean cuatro métodos, el balance de oxígeno en estado estable, la desoxigenación con Sulfito de Sodio, la oscilación diurna del oxígeno y

la inyección de sustancias volátiles (trazadores), siendo los tres primeros los más inexactos.

Retomando los modelos numéricos aproximan las ecuaciones a derivadas parciales o totales por ecuaciones en diferencias, discretizadas en cantidades espaciales y temporales finitas. La solución del sistema de ecuaciones algebraicas produce luego soluciones aproximadas para las variables en campo discreto, ante determinadas condiciones iniciales y de borde.

La selección del método numérico para discretizar los términos advectivo y dispersivo de la ecuación general, se constituye como un aspecto fundamental para la generación de resultados confiables.

La mayoría de los códigos resuelven de alguna forma de las ecuaciones tridimensionales de Navier-Stokes complementándolas con ecuaciones de conservación del volumen de agua y de la salinidad, los cuales utilizan mallas estructuradas o no estructuradas y se basan, comúnmente, en diferencias finitas, elementos finitos o aproximaciones híbridas que implican volúmenes finitos.

Los modelos de diferencias finitas requieren que la totalidad de la malla de cálculo contenga celdas de las mismas dimensiones, no obstante, a fin de resolver el flujo con mayor precisión, es posible implementar un refinamiento de la malla en la región de interés de modo que se resuelva primero el dominio completo con una malla gruesa y después, el subdominio con celdas de mayor resolución, siempre y cuando sea viable.

Los métodos de elementos finitos permiten una mayor flexibilidad mediante la subdivisión del sistema en triángulos que pueden variar en forma y tamaño. Asimismo, permiten seguir fielmente la morfología y la batimetría de la zona de estudio además que hacen posible una mejor representación de aquellas áreas

donde la actividad hidrodinámica es más significativa. Esta aproximación es ampliamente utilizada para la descripción hidrodinámica de lagunas y áreas costeras, debido a que en estas zonas, usualmente caracterizadas por su compleja batimetría y morfología, esta técnica tiene la ventaja de poder proveer una adecuada resolución en las distintas áreas de interés dentro de la zona de estudio (alta resolución en las entradas y canales y baja resolución en las zonas llanas).

Con respecto al método de volúmenes finitos, cabe mencionar que es un procedimiento de discretización que integra la ecuación diferencial original sobre un volumen finito, es decir, un trozo de intervalo (1D), superficie (2D) o volumen (3D) cuya forma concreta depende de la malla y del sistema de coordenadas que se esté empleando. Independientemente de la dimensionalidad del problema se sigue hablando de volúmenes finitos cuando uno se refiere a los trozos en los que se ha subdividido el dominio. De este modo se obtienen los balances para cada una de las zonas discretas en las que se ha subdividido el dominio global.

#### **2.3.4. Esquemas numéricos empleados para obtener una aproximación de la solución matemática**

La solución analítica de la ecuación general de balance de masa es posible únicamente en el caso que se pueda simplificar el funcionamiento del sistema natural. Dichas simplificaciones con cinéticas de tipo lineal, niveles constantes, caudal o geometría.

La simplificación más común para disminuir la complejidad de los modelos es la dimensionalidad de los mismos, es así como se buscan modelos de 0 o 1 dimensión como nivel más bajo de complejidad y que sin embargo son capaces de calcular las concentraciones medias basadas en condiciones de estado estacionario y bajo simplificaciones en la estimación del tiempo. De lo contrario, se

obtienen modelos dinámicos bidimensionales y tridimensionales, que contemplan mezclado dispersivo e intercambios que ocurren.

En ese caso cuando la geometría del sistema natural es muy compleja y no pueden realizarse simplificaciones para reducir el sistema tales como la mencionada frente al número de dimensiones, cuando los parámetros caudal, volumen, entre otros son variables o las cinéticas de reacción no son lineales, se hace necesario recurrir a métodos matemáticos para resolver la ecuación diferencial en derivadas parciales que representan el balance.

Los modelos numéricos son herramientas que permiten representar determinados aspectos del comportamiento de sistemas físicos, mediante técnicas numéricas. El desarrollo y aplicación de modelos numéricos corresponde a una de las etapas del proceso de conocimiento de los fenómenos físicos. Es así como, por más elaborado que esté un modelo, sus resultados siempre serán una aproximación a los aspectos más sobresalientes de la realidad, ello debe tenerse en cuenta a la hora de interpretarlo.

Los modelos matemáticos de calidad de agua están compuestos por ecuaciones diferenciales que describen los mecanismos principales de transporte: advección y dispersión. Adicionalmente, existen procesos propios de la cinética de las reacciones químicas de las sustancias, que dan cuenta de su degradación y dependen de la interacción de las sustancias entre sí y con el medio. A continuación, se menciona brevemente el interés de la cinética de la reacción.

### **2.3.5. Desarrollo Histórico de los modelos de calidad de agua**

A mediados del siglo XX, se inició el desarrollo de los modelos de calidad de agua, éstos están íntimamente relacionados con el estudio del tipo de contaminantes o sustancias químicas presentes en el sistema fluvial, que a su vez, permitían

conocer y caracterizar el sistema hídrico objeto de la aplicación del proceso la simulación del comportamiento de solutos y análisis de su capacidad de autodepuración.

De acuerdo a “Modelación de Calidad de agua”, los tipos de contaminantes, aproximadamente, que a través del tiempo, se han ido introduciendo en los diferentes modelos son:

- Oxígeno Disuelto-Materia Orgánica
- Fósforo Total-Fitoplancton
- Nutrientes-Fitoplancton
- Microorganismos patógenos
- Compuestos orgánicos tóxicos-Metales pesados
- Sólidos Sedimentables-Fangos
- Lluvia ácida
- Bioacumulación

Los parámetros nombrados anteriormente constituyeron la base investigativa para la mayoría de los científicos, profesionales de diferentes formación académica, tales como biólogos, matemáticos e ingenieros, entes y corporaciones ambientales a nivel mundial para trabajar en la invención a partir de la modelación matemática, de herramientas de fácil aplicación y otras más complejas que permitieran determinar a ciencia cierta la respuesta o reacción de un cuerpo hídrico, ante la influencia de cargas externas (vertimientos), ya sean por acción humana o natural, así como también extracciones considerables de caudal como captaciones, desvíos del cauce principal, entre otros.

Chapra 1997, elabora un esquema de la evolución de los procesos de predicción de calidad de agua mediante cuatro fases, en las cuales hace referencia a la preocupación de la sociedad frente al problema evidenciado en la calidad del

agua, los contaminantes, los sistemas modelados, la cinética y finalmente las capacidades computacionales disponibles durante cada uno de los períodos.

Desde sus inicios con Streeter y Phelps, la modelación respondió a la problemática por aguas no tratadas y efluentes primarios, con aportes en términos de DBO y OD, iniciándose con sistemas de 1 dimensión y planteando soluciones de tipo analítico.

Las etapas fueron evolucionando al introducir la sistematización o empleo de software de modelación, que permitieron incrementar la dimensionalidad de los modelos a 2, dando soluciones de índole numérica.

Las dos últimas etapas, involucran los términos biológico y toxico como ejes centrales debido a la introducción de nuevos contaminantes representados en los nutrientes. Dando continuidad a la sistematización de los modelos también se incrementan el número de dimensiones hasta poder involucrar 3 e igualmente generar respuestas de tipo numérico. A continuación en la figura se incluye el esquema en mención.

Se concluye a partir de la figura, que los modelos de calidad de agua han evolucionado desde simplificados unidimensionales, modelos de estado estacionario de la demanda bioquímica de oxígeno y oxígeno disuelto, a complejos modelos de dos y tres dimensiones, variando la hidrodinámica y los nutrientes, la eutrofización, la dinámica de la red alimentaria acuática, el transporte de sedimentos, los contaminantes de transporte y el destino y la bioacumulación de contaminantes (Thomann y Mueller, 1987).

**Figura 3** Cuatro periodos en el desarrollo de la modelación de calidad de agua

**1925- 1960 (Streeter-Phelps)**

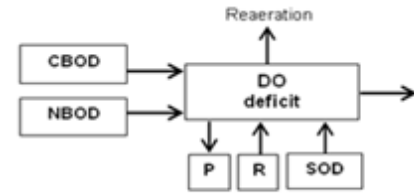
**Problemas:** aguas no tratadas y efluentes primarios

**Contaminantes:** DBO, OD

**Sistemas:** corrientes, estuarios (1D)

**Cinética:** lineal, control de entrada

**Soluciones:** analítica



**1960-1970 (Sistematización)**

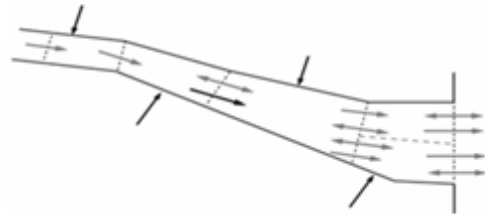
**Problemas:** Efluente primario y secundario

**Contaminantes:** DBO, OD

**Sistemas:** corrientes, estuarios (1D/2D)

**Cinética:** lineal, control de entrada

**Soluciones:** numérica



**1970-1977 (Biológico)**

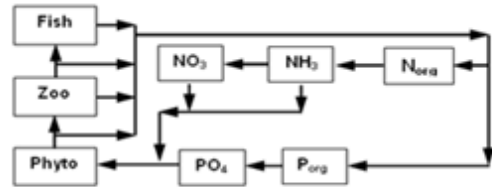
**Problemas:** eutrofización

**Contaminantes:** nutrientes

**Sistemas:** lagos, corrientes, estuarios (1D/2D/3D)

**Cinética:** no lineal, retroalimentación

**Soluciones:** numérica



**1977- Actual (Tóxicos)**

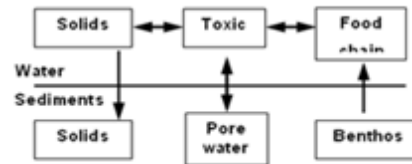
**Problemas:** eutrofización

**Contaminantes:** nutrientes

**Sistemas:** lagos, corrientes, estuarios (1D/2D/3D)

**Cinética:** no lineal, retroalimentación

**Soluciones:** numérica



**Fuente:** Modelo de Calidad de agua superficial

**2.3.5.1. Modelo de Streeter y Phelps (1925)**

De acuerdo a Gerald T. Orlob 1983, en la década de 1920, la comisión del Río Ohio en los Estados Unidos, comenzó un estudio intensivo sobre la cuenca del río, sus fuentes de contaminación y los impactos en el suministro de agua para uso doméstico; de allí surgió uno de los primeros modelos matemáticos de un ambiente acuático, la primera ecuación, de Streeter-Phelps, la cual describía el equilibrio de oxígeno disuelto en una corriente.

Comúnmente, el consumo de oxígeno disuelto, en sistemas naturales acuáticos, consecuencia de la degradación de la materia orgánica, se considera mediante

una cinética de primer orden. Algunos estudios propusieron, sin mucho aceptación posterior, cinéticas de segundo orden: Young and Clarck (1965); Shastry (1973).

En esta época, aún no estaban disponibles las computadoras, por tal razón, las aplicaciones a la solución de modelos, se limitó a una cinética lineal, geometrías simples y estado estacionario de cuerpos de agua receptores. Posteriormente, a partir de 1960 con la existencia de las computadoras, se dio origen a importantes avances tanto en los modelos como su aplicación. Los primeros avances en modelación involucraron expresiones numéricas de los marcos de análisis (por ejemplo, Thoman 1963). El primer modelo matemático aplicado a un cuerpo de agua fue elaborado por W. B. Streeter y E. B. Phelps en 1925 (Orlob, 1983) y aplicado al río Ohio en USA.

Hoy día, su trabajo se considera como la base de la modelación de calidad de agua; la cual aunque siendo relativamente simple une mecanismos primarios que regulan el intercambio de oxígeno en un cuerpo de agua receptor de cargas residuales, mediante dos procesos: (Chapra 1997, Gerald 1983).

- a) El consumo de oxígeno disuelto mediante la oxidación bioquímica de la materia orgánica disuelta y en suspensión.
- b) Aporte de oxígeno, al cuerpo hídrico, por medio de la aireación, a través de la interface agua-aire.

Estos autores desarrollaron una ecuación de balance de oxígeno para una descarga puntual a una tasa constante con condiciones hidrodinámicas estacionarias y para un tramo de geometría uniforme. Para ello, debieron considerar como hipótesis de partida las siguientes afirmaciones:

- Caudal y composición del vertimiento son constantes con el tiempo.
- Velocidad del río constante.

- La concentración sólo varía con la distancia a lo largo del río.
- La degradación de la materia orgánica sigue una cinética química de 1er. Orden.
- Se produce transferencia de oxígeno por reaeración superficial con la atmósfera.
- Estado estacionario.

En las ecuaciones 3 y 4 se representa, el modelo de Streeter y Phelps, aplicado a ríos de condiciones aerobias, flujo con superficie libre, flujo permanente, unidimensional, en donde se supone que la tasa de cambio del déficit de OD es igual a la diferencia entre la desoxigenación del agua, debida a la remoción de DBO y materia orgánica carbonácea por oxidación biológica, y la reaeración o suministro de OD proveniente de la atmósfera y causada por el déficit de OD y por la turbulencia.

—

**Ecuación 3**

————

**Ecuación 4**

**Donde,**

D= Déficit de OD para el tiempo , mg/L.

$L_0$ = DBOUC\* inicial, =0, mg/L.

L= DBOUC remanente, = , mg/L.

= Tiempo de flujo, d.

$K_1$ = Constante de desoxigenación, base e,  $d^{-1}$ .

$K_2$ = Constante de reaeración, base e,  $d^{-1}$ .

$D_0$ = Déficit inicial de OD, mg/L.

\*Demanda Bioquímica de Oxígeno Última Carbonácea.

Con el avance tecnológico se ingresa a una etapa computacional, que permite contar con modelos computacionales basados en el modelo simplificado de Streeter y Phelps, siendo el primero DOSAG 4 diseñado por la Junta de Desarrollo del Agua de Texas (1970), el cual resolvió el problema en estado estacionario por un sistema fluvial de segmentos múltiples, proporcionando flexibilidad en el trato con la variable de coeficientes de desoxigenación. Otro de los modelos computacionales basados en la ecuación de estos autores, es el modelo de simulación del oxígeno disuelto – SIMOX.

#### **2.3.5.2. Aportes a la modelación de oxígeno disuelto (1958-1964)**

Tal como se mencionaba en el ítem anterior, Streeter y Phelps se constituyen como precursores en la modelación de la calidad del agua, al lograr relacionar los dos principales mecanismos que definen el oxígeno disuelto en un cauce de agua superficial, siendo la descomposición de la materia orgánica y la reaeración (Chapra, 1997). Razón por la cual, se constituyen como pioneros en la estimación de tasas de aireación en ríos.

Para complementar el desarrollo de la predicción del comportamiento del oxígeno disuelto en un río influenciado por una descarga, se incluyen las diferentes ecuaciones que surgieron como proceso investigativo a la reaeración en cuerpos de agua superficiales, a partir de la determinación de dichos autores como pioneros.

Las ecuaciones más conocidas para determinar el valor de  $K_a$ , se incluyen a continuación (Chapra 1997, adaptado por Sierra 2011):

**O'Connor y Dobbins (1958):** asumen que la velocidad de transferencia de oxígeno al agua es función de la relación entre la velocidad ( $u$ ) de la corriente y la profundidad ( $H$ ):

—  
— **Ecuación 5**

Donde,

$K_L$  = Es la velocidad a la cual se transfiere el oxígeno de la atmósfera al agua.

$D_L$  = Coeficiente de difusión molecular ( $m^2/d$ ).

Esta relación puede ser expresada en función de la constante de reaireación mediante la siguiente ecuación:

— — **Ecuación 6**

El coeficiente de difusión molecular del  $O_2$  en aguas naturales es aproximadamente  $2.09 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2\text{s}^{-1}$ , por lo tanto, ésta fórmula permite ser expresada en unidades métricas:

— **Ecuación 7**

Las unidades son: ( $d^{-1}$ ), (m/s), (m).

**Churchill et al., 1962:** utilizó una expresión más empírica que la usada por O'connor y Dobbins. Estos investigadores realizaron varios análisis de regresión en los cuales investigaron la corrección entre el fenómeno de la reaireación, la profundidad velocidad en diversos tramos del río Tennessee (Estados Unidos):

— **Ecuación 8**

**Owens y Gibbs:** Owens et al. (1964) también utilizaron una relación empírica y combinaron sus resultados con los obtenidos en el río Tennessee y obtuvieron:

Covar 1976, encontró que las fórmulas descritas anteriormente, se podrían usar conjuntamente para predecir la reaeración por rangos de profundidad y combinaciones de velocidad. En la tabla presentada, se comparan las tres fórmulas, de acuerdo a los rangos de profundidad y velocidad de diferentes corrientes.

**Tabla 3** Rangos de profundidad y velocidad para aplicar las expresiones de O'Connor y Dobbins, Churchill y Owens y Gibbs en la determinación de la aireación.

<b>Parámetro</b>	<b>O'Connor y Dobbins</b>	<b>Churchill</b>	<b>Owens y Gibbs</b>
Profundidad (m)	0.3 – 9.14	0.61 – 3.35	0.12 – 0.73
Velocidad (m/s)	0.15 – 0.49	0.55 – 1.52	0.03 – 0.55

**Fuente:** Surface Water Quality Modeling.

### **2.3.5.3. Modelación de nutrientes (introducción de la carga del fósforo). (1968)**

El desarrollo de los modelos empíricos se inició a partir de los trabajos de Vollenweider (1968, 1975), él definió la eutrofización como un enriquecimiento de los nutrientes y el subsiguiente deterioro progresivo de su calidad, principalmente en lagos debido a la proliferación vegetal con las repercusiones consiguientes en el metabolismo global de las aguas afectadas.

Su investigación incluyó recolección de datos de vertimientos de fósforo a lagos, profundidad, tiempos de residencia y estado trófico de los mismos, estableció una correlación entre estas variables, de forma que se podía determinar el grado de eutrofización que podía llegar a tener un lago sometido a cierto vertido. Su hipótesis inicial para el desarrollo del modelo tuvo en cuenta los siguientes aspectos:

- Caudal y composición del vertimiento constantes con el tiempo.
- Lago completamente mezclado.
- No hay variación en el nivel del lago.
- Desaparición del fósforo por sedimentación.
- Estado estacionario.

Como en la mayoría de los casos, el fósforo era el nutriente limitante, los primeros modelos se basaban en relaciones semiempíricas entre diferentes características hidráulicas de los embalses y el aporte de fósforo (Vollenweider 1968 y 1975), Lauren y Mercier 1976. Sin embargo, más adelante, surgieron las relaciones entre el contenido de fósforo y la concentración de clorofila-a, éste parámetro es empleado como indicador de la población de fitoplancton. De acuerdo a este tema, surgieron las propuestas de Dillon y Rigler (1974), Rast y Lee (1978) y Barstsch y Gakstatter (1975).

Con el surgimiento de las técnicas computacionales, fue posible plantear modelos de varios nutrientes en diversas formas y las algas, modeladas en la mayoría de los casos mediante clorofila-a; con esto se incluyen el ciclo del nitrógeno, la materia orgánica y el oxígeno disuelto. Los modelos más conocidos de eutrofización en lagos y estuarios son los realizados sobre el estuario Potomac (Jaworsky *et al*, 1971; Freudberg, 1985; Thomman Y Fitpatrick, 1982).

#### **2.3.5.4. Modelos de calidad de agua avanzados (1970-1998)**

Uno de los primeros modelos de la EPA, para reproducir los fenómenos de escorrentía urbana y combinar fenómenos asociados a aguas residuales, fue el *SWMM Storm, Water Management Model* (Modelo de tormenta para la gestión del agua), siendo un modelo dinámico de precipitación-escorrentía usado para simular un evento único o de largo plazo (permanente) la cantidad y calidad de escorrentía

en áreas, principalmente urbanas. Este modelo fue desarrollado por primera vez en 1971 y ha sido objeto de varias mejoras importantes desde entonces.

Una versión extendida del modelo QUAL I, es el QUAL II, producido por la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (Water Engineers Resources, Inc., 1973), incluyendo de esa manera la capacidad de simular sistemas más complejos de flujo para el flujo tanto permanentes como no permanentes, y evaluar el impacto de la carga de nutrientes en el oxígeno de la corriente. Cabe mencionar que, las interacciones ecológicas incluyendo la fotosíntesis y la productividad primaria, han sido objeto de los trabajos más recientes en la modelación de corrientes.

Uno de los modelos desarrollados a partir de los estudios de eutrofización, fue el software WASP, Water quality Analysis Simulation Program (Di Toro *et al.*, 1983), el cual es un programa de modelación dinámico de un compartimiento para sistemas acuáticos, incluyendo tanto la columna de agua como los sedimentos bentónicos. (Dituro *et al.*, 1983; Connolly y Winfield, 1984; Ambrose *et al.*, 1993; Lana *et al.*, 2001). Este modelo de simulación es posible aplicarlo en una, dos, o tres dimensiones.

En 1987, surge el programa QUAL2, el cual fue considerado como uno de los modelos para ríos más completos desarrollados a lo largo de los años por la EPA (Environmental Protection Agency), donde se incluyen los fenómenos de degradación del material orgánico, decaimiento y respiración de las algas, nitrificación (considerando nitrito como producto intermedio), hidrólisis del nitrógeno orgánico y fósforo, reaireación, sedimentación de algas, fósforo orgánico, y nitrógeno orgánico, captación de oxígeno por el sedimento y/o liberación de nitrógeno y fósforo por el mismo.

Otra versión similar al QUAL2, es el programa QUAL2E, éste es un modelo unidimensional, de estado estacionario y que simula al mismo tiempo flujo y

calidad del agua en arroyos y ríos que pueden ser considerados de mezcla completa. No es adecuado para flujos inestables, pero si permite que las variaciones diurnas de la meteorología sean funciones forzadas de modo tal, que la temperatura del agua y las algas fotosintéticas puedan ser simuladas.

QUAL2K es una versión modernizada del modelo anterior, que funciona dentro del entorno Microsoft Windows y se codifica en Visual Basic para Aplicaciones (VBA) y utiliza a Excel como la interfaz gráfica para el usuario (EPA, 2005b). Otros modelos que hacen parte de la familia QUAL2K son el QUAL2Kw y XQUAL2Kw los cuales fueron desarrollados entre el 2005 y 2009.

#### **2.4. EMPLEO DE MODELOS DE SIMULACIÓN EN COLOMBIA**

En Colombia, la aplicación de modelos de simulación de calidad de agua ha sido realizada tanto por entidades ambientales como por universidades y entidades privadas, donde su utilidad se encuentra relacionada con la gestión del recurso hídrico del país.

Una de las entidades pioneras ha sido la CVC (Corporación Autónoma Regional del Valle del Cauca), quien desde el año 1972 ha venido implementado secuencialmente los modelos SIMOX I y II (1973), SWMM (1988), QUAL 2 (1992), QUAL 2E (1998) y MIKE 11 (2001). (Vélez *et al.*, 2003), para simular la dinámica de temperatura, OD, DBO y SST en el río Cauca. Desde dicha perspectiva, la CVC ha empleado los modelos de simulación como herramienta de control considerando que los plazos establecidos para la reducción de las cargas contaminantes, así como para estimar el impacto de diferentes opciones para la remoción de la carga vertida por la ciudad de Cali en la calidad del agua del Río Cauca.

Entre los años 1997 y 2011, se desarrollaron varios estudios acerca de la modelación de la calidad de agua de ríos en diferentes regiones del país, uno de ellos fue el realizado, dentro del Proyecto de Modelación del Río Cauca – PMC, en convenio entre la Universidad del Valle y la CVC, en el cual consideraron el estudio de los factores que afectaban y determinaban la calidad del agua del Río. En la Fase I del Proyecto PMC, ejecutado entre los años 1997 y 2001, se implementó el modelo de simulación dinámica MIKE 11 para representar los complejos procesos que describen el comportamiento de las características de la calidad del agua.

Por su trabajo en los años 2001 y 2002, la Universidad de los Andes se considera pionera en términos de integración de la componente hidrodinámica al problema de transporte, siendo empleados los Sistemas de Información Geográfica -SIG- para consolidar los resultados producto de la simulaciones realizadas.

El tema de los vertimientos es un problema de ordenamiento de los recursos hídricos y, por lo tanto, va mucho más allá del control que sobre la calidad de estos puede ejercer la Autoridad ambiental. Ordenar los recursos hídricos implica garantizar el acceso al recurso por parte de los diferentes usuarios y que el recurso esté disponible en cantidades y calidades mínimas para satisfacer su demanda. Para lograrlo se deberían cambiar las “reglas de juego” que rige la forma en que el ser humano usa el agua y, al usarla, la forma en que interactúan entre si y el medio natural.

En el año 2003, la Corporación Autónoma Regional del Quindío (CRQ) junto con la Universidad del Quindío, desarrollaron el proyecto titulado “Modelación de Corrientes Hídricas Superficiales en el Departamento del Quindío”, donde se incluyó la modelación de tres importantes corrientes hídricas: El Río Quindío, Río Roble y Quebrada Cristales, mediante el programa de simulación seleccionado para tal estudio el cual fue el QUAL-2E (EPA, 1987; Lozano *et al*, 2001)”.

En el 2005, la Corporación Autónoma regional del Valle del Cauca (CVC) junto con la Universidad del Valle, trabajaron en el proyecto de Modelación de la Calidad de las Aguas Superficiales de los Ríos Tuluá y Guadalajara, en el cual se implementó el modelo matemático del Río Tuluá en el tramo Jardín Botánico – Desembocadura vereda El Salto, empleando el programa de simulación de calidad de agua QUAL2K.

Durante el año 2006, en el contexto del Plan de Manejo Sustentable de la Cuenca del Río Chinchiná, y dentro del marco de los convenios suscritos con CORPOCALDAS y otras entidades, Aguas de Manizales E.S.P contrató en noviembre de 2005 con INGESAM Ltda. la ejecución del “Estudio de Factibilidad para la Recuperación y Mantenimiento de la Calidad de la Cuenca del Río Chinchiná-Fase I”, el cual incluyó la modelación de la quebrada Manizales, mediante la utilización del software QUAL2K, donde se seleccionaron 5 estaciones sobre la quebrada y 26 tributarios en una longitud de modelación de 8.21km.

En el año 2009, la Corporación Autónoma Regional de Boyacá adelantó un contrato con la universidad de Boyacá para el estudio de formulación, ordenación y reglamentación del uso de la corriente de la cuenca alta del Río Chicamocha, en el cual se diagnosticó y determinó su estado actual. La calidad de agua de éste río, fue simulada empleando el programa computacional QUAL2Kw, el cual, representa el sistema de corrientes como una red ramificada conformada por elementos llamados tramos que se articulan preservando la topología del sistema real.

En el año 2011, la Universidad de Medellín, como parte de la tesis de un estudiante de pregrado, llevó a cabo la Evaluación de la calidad del agua del futuro embalse Porce III por la influencia de la descarga del embalse Porce II, mediante el modelo de simulación de calidad de agua del futuro embalse Porce III, utilizando el programa de modelación CE-QUEALW2.

## 2.5. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DE LOS MODELOS

La calibración de un modelo es un proceso en el cual, con base en un grupo de datos de las fronteras del modelo, se realizan simulaciones hasta lograr reproducir con precisión las series de datos observados en campo en diferentes secciones de control, por medio del ajuste de los parámetros físicos y numéricos del modelo.

Una vez se ha calibrado el modelo es necesario disponer de otro conjunto de datos en las fronteras para verificar que con los mismos parámetros de calibración se puede describir en forma adecuada el nuevo grupo de datos de campo.

Tal y como lo mencionan Supriyasilp *et al* (2002), la recolección de datos del sistema resulta fundamental ya que todos los resultados producidos por el modelo están basados en los datos de entrada de las fronteras. Canale *et al* (1995) consideran que un modelo ha sido validado cuando todos los datos de entrada de las fronteras y los parámetros de calibración son medidos en campo y las respuestas de las simulaciones reproducen con precisión los datos de campo en diferentes secciones de control, por medio del ajuste de los parámetros físicos y numéricos del modelo.

Generalmente, dicha labor se lleva a cabo mediante la estimación de las constantes cinéticas asociadas a la descomposición de la materia orgánica, el decaimiento bacteriano, la reoxigenación, etc.

En ocasiones se calibran simultáneamente varias variables, lo cual puede generar que el conjunto de valores que representa en forma más ajustada los resultados, no corresponde o ajuste a la situación real. Por ello, se puede emplear una validación, donde mediante otro conjunto de datos se evalúan los resultados del modelo con los mismos parámetros de calibración y debe obtenerse una descripción adecuada para dicho grupo de datos.

La recolección de datos del sistema resulta fundamental, ya que todos los resultados generados por el modelo se basan en los datos de entrada. (Supriyasilp *et al* 2002). Para optimizar un modelo a partir del mejoramiento de la información para la calibración, es necesario evaluar cuáles de los parámetros de calidad realmente pueden reducir la incertidumbre de los resultados y cuáles son las fronteras que tienen un mayor impacto en los procesos modelados.

Normalmente no puede asumirse que existe solamente una combinación de parámetros del modelo que corresponda al mejor ajuste del mismo, por ello el proceso de calibración de un modelo tiene diferentes dificultades, tales como que no se conoce el umbral que determine la precisión que se requiere de los resultados, no hay la suficiente información para modelar; no hay tiempo y recursos para efectuar la calibración.

Para este tipo de problemas se pueden aplicar los denominados métodos de optimización global, tales como el de búsqueda aleatoria controlada o los algoritmos genéticos, entre otros (Noguchi *et al*, 2002). Uno de los métodos de búsqueda aleatoria controlada más usado es el método de Montecarlo, el cual permite la determinación de los parámetros dominantes y sensibles y la cuantificación de incertidumbre estructural y paramétrica (Camacho y Díaz, 2003 y Camacho *et al*, 2002).

## **2.6. ALCANCES EN LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUA**

Los modelos de calidad de agua tienen una gran cantidad de aplicaciones, sin embargo, se considera fundamental el poder predecir, es decir poder generar resultados precisos bajo condiciones hidrológicas y ambientales, diferentes a las observadas en la calibración del modelo, en el sistema modelado (Fischer *et al*,

1979) y con ello evaluar el impacto que puede generarse en la cuenca en términos de comportamiento de la calidad del agua, lo cual permite a su vez seleccionar las alternativas más significativas que permitan su saneamiento y mejora en la calidad del recurso o descartar aquellas que representen una afectación negativa que pueda ser irreparable. Es así, como incorporar los modelos como herramienta predictiva en la toma de decisiones, permite anticiparse a los impactos en la calidad del agua. (Castillo, 2007).

De igual importancia, se considera su utilidad como herramienta de planificación para el establecimiento de objetivos de calidad de agua, ya que la definición de límites y metas de vertimiento debe ser orientada al comportamiento de la calidad de agua de la corriente hídrica a la que se descarga. Lo anterior, representa así mismo su uso para establecer normas de calidad de agua de los efluentes que se otorguen ser descargados. (Lozano G, Peña L, Peña LF, Morales H, Zapata M. 2003).

Finalmente, otra de las utilidades del empleo de modelos es la evaluación de riesgos, ya que permite estimar la probabilidad de ocurrencia de eventos asociados a la contaminación de la corriente y por ende contribuye al desarrollo de los planes de prevención y mitigación. Como conclusión, en últimas los modelos permiten establecer programas de monitoreo de calidad del agua eficientes, donde se establezcan límites de vertido, con el fin de prevenir contaminación de las corrientes hídricas.

## **2.7. MODELOS DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DE AGUA**

En la literatura científica se encuentran gran variedad de modelos de distinto nivel de complejidad utilizados en diversas aplicaciones tales como MIKE, WASP o MIKE, entre otros. Asimismo, es posible encontrar derivaciones de un mismo

modelo a fin de incrementar su versatilidad en términos de aplicabilidad (CE-QUAL-ICM, CE-QUAL-W2, etc.).

La mayoría de los modelos de simulación de calidad de agua, tales como MIKE, QUAL2K, EPDRIV1, WASP, CEQUALR1, entre otros, emplean la ecuación de balance de masa, sin embargo tal como se mencionó previamente, su complejidad al ser de tipo diferencial parcial de segundo orden, genera que se realicen diferentes supuestos o elaboren simplificaciones, para obtener aproximaciones a soluciones matemáticas.

A continuación, se realiza una recopilación de las bondades de cada uno de los posibles software que se consideran como seleccionables para la simulación de la quebrada Mensulí Aranzoque.

### **2.7.1. FAMILIA DE MODELOS QUAL**

#### **2.7.1.1. QUAL2K**

Modelo de simulación gratuito de calidad del agua para ríos o corrientes, como versión actualizada del modelo QUAL2E (Chapra y Pelletier, 2003), el cual a su vez fue una extensión del modelo QUAL-I y II, desarrollados por F.D. Masch y Asociados y el Texas Water Development Board en 1970.

Es unidimensional y puede usarse tanto en condiciones de régimen permanente como variable (estacionario o dinámico). Igualmente, como ventaja permite simular las descargas de aguas residuales, extracciones de agua, flujos tributarios y pronosticar niveles de agua, caudales, en condiciones de régimen de flujo permanente, en cauces de pendientes moderadas y descargas permanentes de contaminantes (Violeta C, 2008).

Utiliza una simplificación de las ecuaciones de Saint Venant para flujo permanente y gradualmente variado según la ecuación de Manning. Para resolver las ecuaciones de transporte de masa y reacción, se emplea la solución de diferencias finitas, dividiéndose el río en un número específico de elementos computacionales y para cada elemento realiza un balance hidrológico en términos del flujo, un balance de energía en términos de temperatura y un balance de materia en términos de la concentración de los parámetros relevantes. (Jiménez M, 2008).

Usa como interfase gráfica el programa Excel, pero está programado en el lenguaje macro de Windows, "Visual Basic for Applications".

Permite simular diversos parámetros de calidad de aguas, como Oxígeno Disuelto, Demanda Bioquímica de Oxígeno, temperatura, Nitrógeno orgánico, amonio, nitrito, nitrato, Fósforo orgánico, fósforo disuelto, clorofila a, coliformes etc., los cuales son incluidos en la tabla como los constituyentes incorporados en el modelo. Adicionalmente, incluye las principales interacciones de los ciclos de nutrientes, producción de algas, demanda de oxígeno del bentos, demanda carbonosa de oxígeno, aireación atmosférica y sus efectos en la concentración de oxígeno disuelto (Violeta C, 2008).

**Tabla 4** Constituyentes incorporados en el modelo

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIDAD</b>
Temperatura	°C
Conductividad	µmhos
Sólidos suspendidos inorgánicos	mg D/l
Oxígeno disuelto	mg O <sub>2</sub> /l
DBO carbonácea de reacción lenta	mg O <sub>2</sub> /l
DBO carbonácea de reacción rápida	mg O <sub>2</sub> /l
Nitrógeno orgánico	µg N/l
Amonio	µg N/l

Nitrato	$\mu\text{g N/l}$
Fósforo orgánico	$\mu\text{g P/l}$
Fósforo inorgánico	$\mu\text{g P/l}$
Fitoplancton	$\mu\text{g A/l}$
Detritos (Material orgánico particulado)	$\mu\text{g D/l}$
Patógenos	cfu/100 ml
Alcalinidad	mg $\text{CaCO}_3/\text{l}$
pH	Unidades pH

\* mg/l =g/m<sup>3</sup>, D=peso seco. A=clorofila

**Fuente:** Elaboración propia a partir de EPA (QUAL2K)

Este modelo ha sido empleado ampliamente en el país, encontrándose aplicaciones para los Ríos Palo, La Paila, Quindío, Chinchiná, Roble, Bogotá, Cauca, entre otros.

Realizando una comparación con el modelo QUAL2E, se resalta como ventaja del modelo QUAL2K que no presenta limitaciones en el número de tramos y subtramos a modelar, ya que anteriormente se admitían 25 tramos, 20 tramos, 7 elementos de entrada y salida de caudal. (Jiménez M, 2008).

### 2.7.1.2. QUAL2Kw

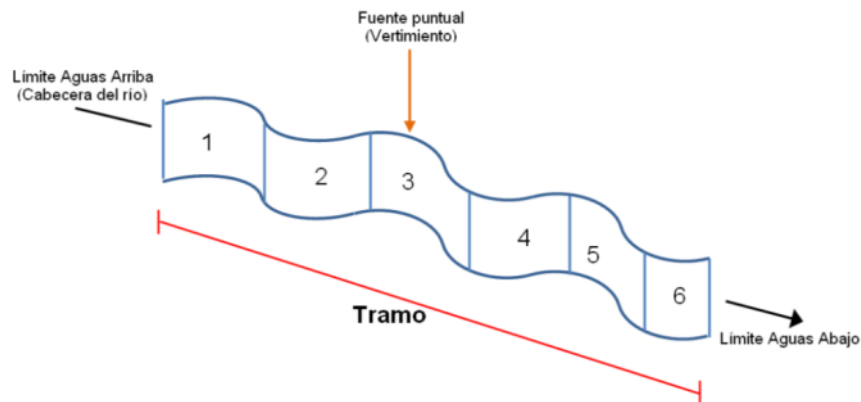
En el año 2005, Pelletier *et al.* Presentaron una nueva versión del modelo, llamada QUAL2Kw, que incluye un algoritmo genético que facilita la calibración del modelo en la aplicación de un cuerpo de agua en particular. Al igual que en las versiones anteriores, el modelo simula el transporte de sustancias no tóxicas en un esquema unidimensional, no uniforme y permanente de flujo, simula tanto el impacto de cargas puntuales como distribuidas sujetas a condiciones constantes en el tiempo.

El software modela integralmente el transporte físico de un vertimiento y las transformaciones biológicas y químicas de sus determinantes, es decir, incluye

dos temas fundamentales: la hidráulica y la calidad. A continuación, se presenta un resumen de la teoría que subyace al programa, documentada por Chapra, Pelletier & Tao (2008):

El modelo incluido representa la parte del cuerpo de agua a estudiar como una serie de tramos con características hidráulicas similares. Los tramos son numerados en orden ascendente iniciando desde la cabecera del río. En la figura a continuación, se presenta la esquematización hidráulica del modelo, identificando el tramo número 1 como localizado en la cabecera del río y el tramo último como el límite aguas abajo.

**Figura 4** Esquema de segmentación de QUAL2KW



**Fuente:** Chapra y Pelletier

Para cada elemento presentado en la figura, se lleva a cabo un balance de flujo de estado estable, a continuación se incluye la ecuación que lo describe, así como el esquema que lo representa:

**Ecuación 10**

**Donde,**

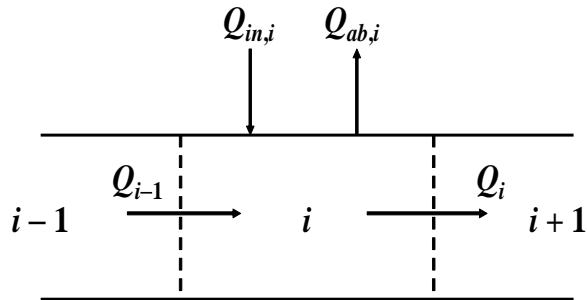
$Q_i$  = caudal que sale del elemento  $i$  y entra al elemento  $i + 1$  [ $m^3/d$ ]

$Q_{i-1}$  = caudal que ingresa desde el elemento anterior  $i - 1$  [ $m^3/d$ ]

$Q_{in,i}$  = caudal total que ingresa al elemento desde fuentes puntuales (vertimientos) o no puntuales (escorrentía) [ $m^3/d$ ]

$Q_{ab,i}$  = caudal total que sale del elemento debido a captaciones puntuales (bocatomas) y no puntuales (desbordamientos) [ $m^3/d$ ].

**Figura 5** Balance de flujo en cada elemento



**Fuente:** Chapra y Pelletier

Una vez el flujo de cada elemento es calculado, se determinan la profundidad y velocidad del canal. El modelo idealiza el río como un canal trapezoidal y bajo condiciones de flujo uniforme usa la ecuación de Manning para expresar la relación entre caudal y profundidad, de la siguiente manera:

**Ecuación 11**      — —

**Donde,**

$Q$  = caudal [ $m^3/s$ ]

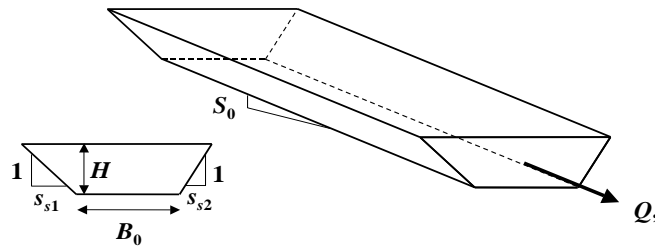
$S_0$  = pendiente de fondo [ $m/m$ ]

$n$  = coeficiente de rugosidad de Manning

$A_c$  = área de la sección transversal [ $m^2$ ]

$P$  = perímetro mojado [ $m$ ]

**Figura 6** Canal Trapezoidal



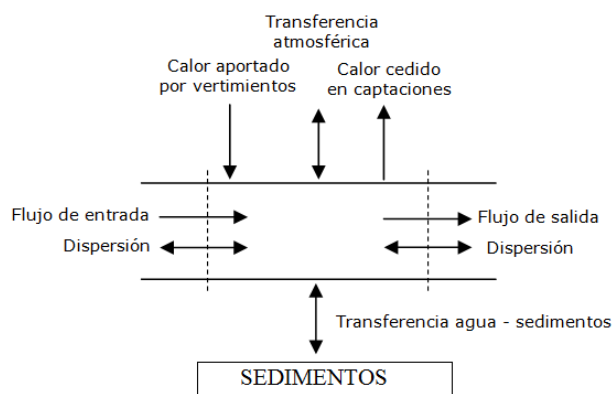
**Fuente:** Chapra y Pelletier

El software realiza el balance de flujo de un cuerpo de agua, utilizando los caudales de los puntos frontera del tramo de estudio, además de la información disponible de los aforos, características geomorfológicas del fondo del río y de los coeficientes de velocidad y profundidad. Igualmente, simula los procesos de transporte de los solutos y calcula el tiempo de viaje del contaminante a lo largo del segmento de estudio.

Otro aspecto muy importante es que al ser un modelo unidimensional, tiene en cuenta como mecanismo de transporte únicamente la difusión molecular.

La temperatura controla las tasas de reacción de los determinantes pues en condiciones naturales, la cinética de la mayoría de reacciones incrementa con la temperatura. El modelo efectúa un balance de calor entre dos elementos adyacentes considerando vertimientos, captaciones y transferencia de calor hacia o desde la atmósfera y los sedimentos, tal como se presenta en la figura:

**Figura 7** Balance de calor en cada elemento



**Fuente:** Chapra y Pelletier

El flujo de calor en la superficie del agua es calculado como la combinación de procesos que corresponden a la transferencia neta de calor por radiación solar sobre la superficie del agua, transferencia neta entre la atmósfera y el agua, conducción y evaporación en la interface agua-aire. Se tiene en cuenta la radiación solar dependiendo de la localización geográfica de la fuente, que es afectada por las condiciones atmosféricas de nubosidad, reflexión y sombra.

QUAL2Kw permite establecer la variación de los componentes de los cuerpos de agua mediante un modelo mecanístico que evalúa las interacciones entre un conjunto de determinantes, dado un grupo específico de tasas de reacción, obtenido a partir de un método de autocalibración. El modelo permite modelar diversos contaminantes, los cuales se presenta a continuación:

**Tabla 5** Principales determinantes que modela QUAL2Kw

Parámetro	Unidades*
Conductividad	$\mu\text{mhos}$
Temperatura	$^{\circ}\text{C}$
Sólidos totales disueltos	$\text{mgD/L}$
Sólidos suspendidos inorgánicos	$\text{mgD/L}$
Carbono orgánico total	$\text{mgC/L}$
Oxígeno Disuelto	$\text{mgO}_2/\text{L}$
pH	Unidades de pH
Demanda bioquímica de oxígeno de reacción	$\text{mg O}_2/\text{L}$

Parámetro	Unidades*
lenta DBOs*	
Demanda bioquímica de oxígeno de reacción rápida BODf**	mg O <sub>2</sub> /L
Nitrógeno orgánico	µgN/L
Nitrógeno amoniacal	µgN/L
Nitrógeno total	µgN/L
Nitritos, Nitratos	µgN/L
Amonio	µgN/L
Fósforo orgánico	µgP/L
Fósforo inorgánico	µgP/L
Detritus	mgD/L
Algas	mgA/m <sup>2</sup>
Biomasa de las algas	gD/m <sup>2</sup>
Nitrógeno en algas	mgN/m <sup>2</sup>
Fósforo en algas	mgP/m <sup>2</sup>
Patógenos	UFC/100 mL
Constituyentes genéricos***	Definido por usuario
Alcalinidad	mgCaCO <sub>3</sub> /L
Carbón inorgánico total	mol/L

\* Es la diferencia entre DQO – DBO<sub>5</sub>; \*\* Corresponde a la DBO<sub>5</sub>;\*\*\* Determinante es elegido por el usuario, puede escogerse como genérico la concentración de metales, cloruros, fenoles o hidrocarburos totales.

**Fuente:** Elaboración propia a partir de EPA (QUAL2Kw)

Para cada determinante el programa hace un balance de masa (ecuación 12), el cual se da teniendo en cuenta reaireación, sedimentación, demanda de oxígeno del sedimento, intercambio en el sedimento y flujo de carbono inorgánico en el sedimento. La ecuación de balance de masa para cada constituyente en un elemento se expresa como:

Ecuación 12 — — — — — — — — — —

**Donde,**

$W_i$  = carga externa del componente que entra y sale en el elemento  $i$  [g/d, mg/d]

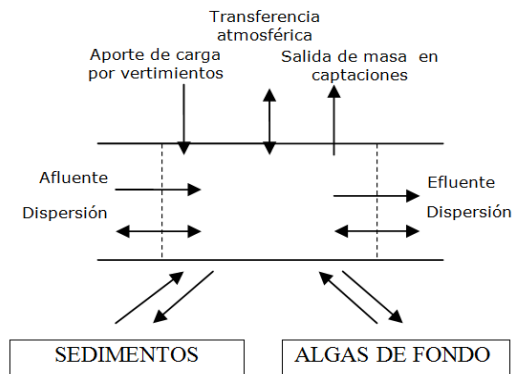
$S_i$  = fuentes y pérdidas del componente debidas a reacciones y mecanismos de transferencia de masa [ $\text{g}/\text{m}^3/\text{d}$ ,  $\text{mg}/\text{m}^3/\text{d}$ ].

$E'_{\text{hyp},i}$  = coeficiente global de intercambio de masa en el tramo  $i$

$c_1$  = diferencia de concentración en la superficie del agua

$c_{2,r}$  = zona de flujo subsuperficial en los sedimentos

**Figura 8** Balance de masa en cada elemento



**Fuente:** Chapra y Pelletier

Es necesario especificar que como método de solución de las ecuaciones diferenciales sobre las que se fundamenta el comportamiento de todas las variables (temperatura y determinantes), el software utiliza tres métodos numéricos, los cuales son: (1) Método de Euler, (2) Método de cuarto orden "Runge-kutta" y (3) Método del Paso Adaptivo.

El método del paso adaptativo está solamente disponible si se usa como ejecutable Fortran. El método de Euler es sugerido como el método por defecto debido a que obtiene resultados confiables utilizando menor tiempo de cómputo. Para los casos en los que los resultados sean inestables dicho método o se requiera mayor certeza, se utiliza el método de Runge Kutta, teniendo en cuenta que emplea una mayor cantidad de tiempo de cómputo.

En un modelo de calidad de agua se deben especificar las tasas de reacción o transformación de los determinantes, las cuales están sujetas a la cinética de reacción del cuerpo de agua. El objeto de la calibración es obtener un conjunto de parámetros (físicos y numéricos) cuyas tasas de reacción tengan el menor porcentaje de error entre los datos medidos en campo y los calculados por el modelo.

QUAL2Kw tiene la capacidad de calibrar automáticamente los parámetros seleccionados a través de un algoritmo genético denominado como PIKAIA. La aplicación de este algoritmo requiere información de partida para la calibración de las constantes cinéticas que inicialmente se suponen en la modelación y son ajustadas en las sucesivas corridas del modelo. Sin embargo, previa a la autocalibración el usuario debe ingresar en la hoja de cálculo de Excel conocida como "Fitness" la fórmula estadística que calcule el ajuste de los resultados del modelo al compararlos con los datos medidos en campo.

El modelo se encuentra igualmente implementado en Microsoft Excel bajo lenguaje Visual Basic, empleando como interface gráfica para entrada, ejecución y visualización de resultados del modelo. La integración numérica durante la ejecución del modelo se hace mediante el lenguaje Fortran 95 (Pelletier *et al.*, 2005). A continuación, se incluye una comparación entre los modelos QUAL2K y QUAL2Kw.

**Tabla 6** Comparación entre los modelos QUAL2K y QUAL2Kw

QUAL2K	QUAL2Kw
Modelo propuesto por Chapra y Pelletier en el año 2003	Modelo propuesto por Pelletier <i>et al</i> en el año 2005
Implementado en Microsoft Excel bajo lenguaje Visual Basic, empleando como interface gráfica para entrada, ejecución y visualización de resultados del modelo	
La integración numérica durante la ejecución del modelo se hace mediante el lenguaje Fortran 95	

QUAL2K	QUAL2Kw
Simula el transporte de sustancias no tóxicas en un esquema unidimensional, no uniforme y permanente de flujo, así mismo involucra tanto el impacto de cargas puntuales como distribuidas sujetas a condiciones constantes en el tiempo.	
	Incluye un algoritmo genético que facilita la calibración del modelo en la aplicación de un cuerpo de agua en particular
<p>Las variables de estado incluidas por el modelo son las siguientes:</p> <p>Temperatura  Conductividad  Sólidos suspendidos inorgánicos  Oxígeno disuelto  DBO carbonácea de reacción lenta  DBO carbonácea de reacción rápida  Nitrógeno orgánico  Amonio  Nitrato  Fósforo orgánico  Fósforo inorgánico  Fitoplancton  Detritos  Patógenos  Alcalinidad  pH</p>	<p>Las variables de estado incluidas por el modelo son las siguientes:</p> <p>Temperatura  Conductividad  Sólidos suspendidos inorgánicos  Oxígeno disuelto  DBO carbonácea de reacción lenta  DBO carbonácea de reacción rápida  Nitrógeno orgánico  Amonio  Nitrato  Fósforo orgánico  Fósforo inorgánico  Fitoplancton  Detritos  Patógenos  Alcalinidad  Carbono inorgánico total  Biomasa de las algas del fondo  Nitrógeno de las algas del fondo  Fósforo de las algas del fondo</p>

**Fuente:** Elaboración propia a partir de manuales de usuario

Se encuentran disponibles fácilmente los manuales del usuario Barnwell, TO y Brown, LC, 1987: Modelos de Calidad del Agua, Documentación y Manual de Usuario, EPA/600/3-87/007. Manual para la interfaz de Windows disponible por separado como: Agencia de Protección Ambiental de EE.UU., 1995: QUAL2E interfaz de Windows Guía del usuario, EPA/823/B/95/003. Cualificaciones del usuario: Necesidades de los usuarios de nivel de educación técnica y experiencia en modelado.

El software posee ciertas limitantes, dentro de las cuales se encuentran su aplicación en ríos unidimensionales donde se supone que son totalmente mezclados en el sentido vertical y lateral. Por otra parte, está reservado para estados estacionarios en los que las entradas de contaminantes y los parámetros predichos de calidad de agua no pueden evolucionar con el tiempo (días o semanas), aunque pueden variar en un ciclo diurno (variaciones horarias repetidas todos los días).

## **2.8. CE-QUAL-W2**

El modelo original fue conocido como LARM (Laterally Averaged Reservoir Model) y fue creado por Edinger y Buchak (1975). La mejora del modelo llevó al CE-QUAL-W2 Versión 1.0 desarrollado por el grupo de calidad de agua de la Estación Experimental de Navegación (Water Quality Modeling Group at the US Army Engineer Waterways Experiment Station USACE), que permite realizar simulaciones de calidad del agua de los lagos, embalses y estuarios

Debido a los algoritmos de la calidad del agua incluidos se dio lugar a los diversas versiones del modelo, las cuales han estado sujetas a mejorar la matemática, incrementando la exactitud y eficiencia e igualmente incluyendo un algoritmo que calcula el paso de tiempo máximo permitido y ajusta el paso del tiempo para ayudar a garantizar la estabilidad numérica, variable vertical / longitudinal, espaciado de la cuadrícula, múltiples fuentes puntuales / no puntual, y un esquema de orden superior del transporte numérico.

Modelo hidrodinámico bidimensional longitudinal / vertical y de calidad de agua, de carácter gratuito. Contiene dos modelos acoplados: uno hidrodinámico y transporte y otro de calidad de aguas, en el primero se resuelven las ecuaciones de flujo y transporte a través del método de diferencias finitas y en el segundo, se

cuenta con las herramientas necesarias para modelar varios grupos de algas. Ha sido ampliamente empleado en sistemas de agua superficiales estratificados tales como ríos, lagos, embalses, y estuarios, permitiendo simular los niveles de agua, las velocidades horizontales y verticales, la temperatura, y 22 parámetros de la calidad de agua. (User Manual, 1995)

Los algoritmos de calidad de agua incorporan dentro de los parámetros cualquier número de grupos de fitoplancton, cualquier número de grupos DBOc, cualquier número de grupos de sólidos inorgánicos suspendidos, fosfato, amonio, nitrato / nitrito, sílice, sílice disuelto en partículas biogénicas, hierro disuelto, oxígeno disuelto, de carbono inorgánico total, y alcalinidad, entre otros, los cuales son incluidos en la tabla que se incluye a continuación: (User Manual, 1995).

**Tabla 7** Variables de estado del modelo CE-QUAL-W2

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIDAD</b>
Conductividad	μmhos
Oxígeno disuelto	mg O <sub>2</sub> /L
DBO (tres formas)	mg O <sub>2</sub> /L
Fitoplancton	μg A/l
Perifiton	mg C/m <sup>2</sup>
Sólidos suspendidos inorgánicos	mg /L
Sólidos totales disueltos	mg /L
Sedimentos del fondo	mg/m <sup>2</sup>
Carbono inorgánico total	mole/l
Carbono orgánico total	mole/l
Amoníaco / amonio	mg N/L
Nitrógeno total	mg N/L
Nitrógeno Orgánico e inorgánico	mg N/L
Nitrato / nitrito	mg N/L
Amonio	μgN/L
Fósforo	μg P/l
Demanda de oxígeno de sedimentos	mg O/m <sup>2</sup>
Patógenos	cfu/100 ml
Temperatura	°C
pH	Unidades de pH
Alcalinidad	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Detritus	mgD/L

A: Clorofila

**Fuente:** Elaboración propia a partir de manual CE-QUAL-W2

El modelo ha sido ampliamente empleado como un componente fundamental de un Sistema de Gestión de la Información de Vertidos destinado a la gestión eficiente de los riesgos asociados con la liberación bien sea accidental o deliberada de sustancias peligrosas al agua (Martin *et al.*, 2004).

Puede simular respuestas a largo plazo de la calidad del agua, tanto variables de estado en sistemas estratificados y no estratificados. Es modular pudiendo añadir fácilmente subrutinas adicionales. Simula la interacción de los factores físicos (como regímenes de caudal y temperatura) con químicos (como nutrientes y algas).

Se basa en las ecuaciones de cantidad de movimiento lateral promediadas, continuidad, y el transporte. La formulación incluye la variación vertical, longitudinal, equilibrio, el impulso vertical en la forma de la aproximación hidrostática y la integración vertical de la ecuación de continuidad sobre la base de una superficie libre. Los constituyentes que determinan la densidad tales como la temperatura y la salinidad son relacionados con el impulso a través de una ecuación de estado. La técnica de solución variable en el tiempo del modelo se basa en un esquema de diferencias finitas.

Se encuentra disponible el manual del usuario Cole, Thomas y Buchak, Edward, 1995: CE-QUAL-W2 modelo bidimensional hidrodinámico y de calidad del agua. Cualificaciones del usuario: Necesidades de los usuarios de alto nivel de educación técnica y/o experiencia en modelado.

Dentro de las limitaciones del software, se encuentra que resuelve los gradientes en la dirección longitudinal y en sentido vertical y asume que los gradientes laterales son insignificantes, lo cual puede ser inapropiado para las masas de agua con importantes variaciones laterales. Por otra parte, los procesos de calidad de agua son extremadamente complejos y el modelo utiliza métodos simplificados

para solucionarlos. Diversos procesos de calidad de agua no son simulados, tales como los de zooplancton, macrófitos y demanda de oxígeno por los sedimentos. No incluye la transferencia a niveles tróficos más altos de zooplancton y peces.

## **2.9. MIKE 11**

Aplicación informática comercial desarrollada por el departamento de software de Danish Hydraulic Institute – Water & Environment (DHI, 2007) para la modelación unidimensional de flujos en lámina libre y régimen variable, calidad del agua y transporte de sedimentos en estuarios, ríos, sistemas de irrigación, canales y otros cuerpos de agua.

La característica principal del sistema de modelado MIKE 11 es la estructura modular integrado con una variedad de módulos adicionales para cada fenómeno relacionado con la simulación de los sistemas fluviales. De esa manera, el modelo dispone de una serie de módulos integrados, los cuales son: Hidrodinámico, Advección – Dispersión, Calidad de Agua y Transporte de Sedimentos, sin embargo el modelo hidrodinámico es el eje central del mismo, resolviéndose las ecuaciones de Saint Venant mediante diferencias finitas y el esquema implícito. Tiene un módulo de calidad del agua que realiza el cálculo de las relaciones entre materias que consumen oxígeno y la concentración de oxígeno disuelto, igualmente la variación de DBO, DQO, concentración, temperatura, etc. (Vélez, C. Galvis, A. Duque, A. Y Restrepo, G).

El módulo de calidad de agua, conocido como ECO Lab, se enfoca en aspectos tales como: oxígeno disuelto, materia orgánica, amonio, nitrato, fósforo, bacterias, clorofila a y procesos de eutrofización que incluyen los ciclos del carbono y de los nutrientes, el crecimiento del fitoplancton y zooplancton, balances de oxígeno y vegetación bentónico. De esta manera, MIKE 11 WQ (Calidad de agua por su sigla en inglés) incluye los parámetros oxígeno disuelto (OD), materia orgánica (DBO),

amoníaco / amonio ( $\text{NH}_4^+$  /  $\text{NH}_3$ ), nitratos ( $\text{NO}_3$ ), bacterias coliformes totales y fecales junto con diversos procesos de transformación y relaciones interactivas, tales como: degradación de la materia orgánica, producción fotosintética de oxígeno, respiración de animales y plantas, procesos de nitrificación y denitrificación, descomposición de las bacterias de acuerdo con la radiación solar, la temperatura y la salinidad, entre otros. (DHI, 1999).

A continuación, se incluyen las variables de estado que pueden ser modeladas:

**Tabla 8** Variables de estado del modelo MIKE11

VARIABLE	UNIDAD
Oxígeno disuelto	mg O <sub>2</sub> /L
DBO (tres formas- suspendida, disuelta y sedimento)	mg O <sub>2</sub> /L
Amoniaco / amonio	mg N/L
Nitrato / nitrito	mg N/L
Nitrógeno inorgánico	mg N/L
Cloruros	mg Cl-/l
Fósforo disuelto	µg P/l
Fosforo inorgánico	µg P/l
Coliformes fecales y totales	cfu/100 ml
Temperatura	°C
pH	Unidades de pH
Alcanidad	mg CaCO <sub>3</sub> /l
Fitoplancton C	mg/L
Fitoplancton N	mg/L
Fitoplancton P	mg/L
Clorofila a	mg/L
Zooplancton C	mg/L
Detritus C	mg/L
Detritus N	mg/L
Detritus P	mg/L
Constituyentes genéricos	Definido por usuario
Sedimentos del fondo	mg/m <sup>2</sup>

**Fuente:** Elaboración propia a partir de DHI

Otros módulos que pueden ser incluidos, se relacionan con el modelado de sedimentos tales como el módulo AD que resuelve la ecuación de advección - dispersión para el material disuelto o en suspensión que usan un esquema implícito de diferencia finita; o el módulo ST utilizado para el estudio del transporte de sedimentos no cohesivos y las condiciones morfológicas en ríos. Cabe

mencionar que, existen diversas versiones del modelo, involucrando una dimensión (MIKE11) y dos dimensiones (MIKE21).

El modelo hidrodinámico se constituye como el motor clásico para ríos y canales abiertos, el cual posee gran flexibilidad, robustez y utilidades, incluyendo:

- Solución totalmente dinámica a las ecuaciones no lineales de St. Venant para canales abiertos.
- Métodos de Muskingum y Muskingum-Cunge para routing simplificado.
- Adaptación automática a flujo subcrítico y supercrítico.
- Una amplia selección de estructuras hidráulicas como aliviaderos, obras drenaje, puentes, bombas, pérdida de energía y estructuras tabuladas.
- Opciones de simulación con pasos de tiempo fijos, tabulados o adaptados.

MIKE 11 emplea un esquema implícito en diferencias finitas centradas para todos los puntos de la malla y por tanto debe emplear un término correctivo para minimizar la dispersión numérica, reducir el error de truncamiento de tercer orden y poder simular perfiles de concentración con frentes abruptos.

Las ecuaciones del modelo de comunicación de transporte se basan en el principio clave de la conservación de la masa. Los módulos de calidad de agua de MIKE 11 consisten de ecuaciones diferenciales acopladas, donde para resolverlas se emplea una integración numérica de acuerdo a diversas rutinas de integración empleables por el modelo, siendo estas EULER (Solución de Euler o Lineal), RK4 (cuarto orden de Runge-Kutta) y RKQC (quinto orden Runge-Kutta con el control de calidad), las cuales varían en exactitud y tiempo de computo, es decir que los resultados más exactos y que tardan más por tiempo de computo, se calculan utilizando las RKQC (rutina por defecto).

Ha sido aplicado en país en los Rio Cauca y Magdalena, sin embargo sus aplicaciones son pocas debido a que no es un software gratuito y el entrenamiento requerido es significativo e igualmente no es modificable en términos de los códigos fuente de programación.

Al ser un paquete de software comercial, se ofrece servicio en línea proporcionado por DHI y centros de servicio en todo el mundo. Los manuales de usuario y manuales de referencia son proporcionados con el software, que también incluye un sistema de ayuda contextual específico.

Cualificaciones del usuario: Necesidades de los usuarios de alto nivel de educación técnica y experiencia en modelado.

## **2.10. WASP6**

Esta versión del programa WASP fue desarrollado la Agencia de Protección Ambiental - EPA de USA. El modelo de simulación de calidad del agua WASP5, es una mejora del modelo WASP original (Di Toro *et al*, 1983; Connolly y Winfield, 1984; Ambrose, R. B. *et al*, 1988), como modelo dinámico de compartimentos, que incluye tanto la columna acuática como el bentos del sedimento. Permite modelar sistemas en una, dos y tres dimensiones, ya que trabaja con elementos finitos o celdas volumétricas; otorga la posibilidad de especificar coeficientes de dispersión en función del tiempo y realiza una cómoda estructuración de los procesos cinéticos. Presenta la variación temporal de los procesos de advección, dispersión, contaminación difusa y puntual (Violeta C, 2008).

Se aplica a todo tipo de cuerpos de agua (lagos, ríos, estuarios, etc.), para modelar dinámicamente el sistema acuático incluyendo la columna de agua y la capa bentónica, teniendo en cuenta los procesos de advección, dispersión, cargas puntuales y difusas así como los procesos de intercambio (Ambrose *et al.*, 1988;

Wool *et al.*, 2006). Otorga la posibilidad de especificar coeficientes de dispersión en función del tiempo, y realiza estructuración de los procesos cinéticos.

El WASP consiste en dos programas independientes, DYNHYD5 y WASP, que pueden funcionar conjuntamente o separadamente. El programa hidrodinámico DYNHYD5 simula el movimiento del agua, mientras que el programa de la calidad de agua WASP simula el movimiento y la interacción de los contaminantes dentro del sistema acuático.

Por otra parte, el WASP está suplementado por dos sub-modelos cinéticos para simular la contaminación convencional (relacionada con el oxígeno disuelto, DBO, nutrientes y eutrofización) y la contaminación por tóxicos (relacionada con químicos orgánicos, metales y sedimento). La conexión de ambos modelos subcinéticos con los programas de WASP proporciona respectivamente los modelos EUTRO y TOXI (Ambrose *et al.*, 1988).

El modelo TOXI corresponde a transporte y destino de productos químicos orgánicos y metales para cualquier tipo de sistema acuático (químicos orgánicos y metales simples) y el modelo EUTRO para modelos convencionales de calidad del agua.

Permite simular diversos parámetros de calidad de aguas, los cuales son incluidos en la tabla que se incluye a continuación: (User Manual EPA, 2000).

**Tabla 9** Variables de estado del modelo WASP6

<b>VARIABLE</b>	<b>UNIDAD</b>
Conductividad	µmhos
Oxígeno disuelto	mg O <sub>2</sub> /L
DBO (tres formas)	mg O <sub>2</sub> /L
Algas	mgA/m <sup>2</sup>
Fitoplancton (carbono)	mg C/L
Perifiton (carbono)	mg C/m <sup>2</sup>
Detritus (C, N, P)	µg D/l

Nitrógeno orgánico disuelto	mg N/L
Amoniaco / amonio	mg N/L
Nitritos, Nitratos	mg N/L
Fósforo orgánico disuelto	µg P/l
Ortofosfato	µg P/l
Salinidad	
Diagénesis del sedimento	
Demanda de oxígeno de sedimentos	mg O/m <sup>2</sup>
Patógenos	cfu/100 ml
Temperatura	°C
Mercurio	
Constituyentes genéricos	Definidos por el usuario

**Fuente:** Elaboración propia a partir de EPA (WASP6)

WASP considera la mayor parte de los procesos que afectan el transporte de diversos contaminantes químicos orgánicos, dentro de los cuales se encuentran absorción hidrofóbica, volatilización, sedimentación, ionización, precipitación, hidrólisis, oxidación y reducción, biodegradación y bioconcentración, excluyendo solamente la reducción y la precipitación-disolución, cuya consideración como reacciones adicionales implica la descripción de su cinética por el usuario (Wool *et al.*, 2006).

El software posee ciertas limitaciones, dentro de las cuales se encuentra el que no considera algunas variables y procesos, tales como los líquidos en fase no acuosa (derrames de petróleo), los procesos de mezcla, el secado de segmentos (marismas, llanuras de inundación), y las reacciones de metales. El modelo separa los módulos de eutrofización y de tóxicos. Además, no puede ejecutarse secuencialmente de forma sencilla.

Este modelo permite la interacción con el usuario en Windows y posee capacidad gráfica para ver los resultados y compararlos con los datos de campo e igualmente provee una ayuda al usuario en términos de interpretación y predicción de las respuestas de la calidad de agua frente a distintos fenómenos de contaminación (User Manual EPA, 2000).

Las ecuaciones resueltas por WASP6 se basan en el principio clave de la conservación de la masa. El software permite al usuario seleccionar el método de solución, pudiendo escoger dentro de los siguientes: 1) Euler como técnica de solución usualmente empleada, 2) COSMIC límite de flujo, esta técnica de solución es típicamente utilizada cuando se emplean modelos multidimensionales hidrodinámicos 3) Runge Kutta de 4 pasos solución, como técnica utilizada para simulaciones diurnas.

No hay aplicaciones conocidas en país a diferencia de modelos como el QUAL2K y el MIKE11, que han sido aplicados por diversos entes y para diferentes cuerpos hídricos. Sin embargo, existen aplicaciones en USA para determinar eutrofización del estuario del Potomac (Thomann y Fitzpatrick, 1982), la contaminación del estuario del río de James (O'Connor *et al.*, 1983), la contaminación orgánica volátil del estuario de Delaware (Ambrose, 1987), y la contaminación de metales pesados de Deep River.

Se encuentran disponibles los manuales de usuario Ambrose, RB, Iana, TA, y Martin, JL, 1993: El Análisis de la Calidad del Agua Programa de Simulación WASP y El conjunto de datos de entrada.

Cualificaciones del usuario: Necesidades de los usuarios de alto nivel de educación técnica y/o experiencia en modelado.

## **2.11. EDP RIV1**

Modelo unidimensional hidrodinámico y de calidad del agua en dos módulos consistentes, siendo estas partes un código de ordenador independiente (RIV1H, el código hidrodinámico y RIV1Q, el código de calidad de agua). Para su empleo, el código hidrodinámico se aplica primero para predecir el transporte de agua y sus resultados y posteriormente dicho archivo se lee utilizando el modelo de

calidad. Fue diseñado por U.S. Army Engineers Waterways Experiment Station (WES) en 2005.

El modelo puede emplearse para predecir variaciones de calidad del agua en arroyos y ríos con flujos altamente inestables, aunque también puede ser utilizado para la predicción bajo condiciones de flujo estacionario.

En términos hidrodinámicos, EPD-RIV1H predice las corrientes, profundidades, velocidades del agua, elevaciones de la superficie y otras características hidráulicas, mediante la resolución de las ecuaciones de flujo de St. Venant.

En cuanto a calidad de agua es capaz de simular la interacción de 16 variables de calidad, las cuales se mencionan a continuación.

**Tabla 10** Variables de estado del modelo EDP RIV1

VARIABLE	UNIDAD
Temperatura	°C
Demanda bioquímica de oxígeno carbonoso (CBOD)	mg O <sub>2</sub> /L
CBOD2 (tipo CBOD segundo)	mg O <sub>2</sub> /L
Demanda Bioquímica de Oxígeno Nitrogenados	mg O <sub>2</sub> /L
Nitrógeno orgánico	mg N/L
Amoniaco / amonio	mg N/L
Nitritos, Nitratos	mg N/L
Oxígeno disuelto	mg O <sub>2</sub> /L
Fosfatos	µg P/l
Fósforo orgánico	µg P/l
Algas	mgA/m <sup>2</sup>
Hierro disuelto y manganesio	µg/l
Patógenos	cfu/100 ml
Constituyentes genéricos	Definidos por el usuario

**Fuente:** Elaboración propia a partir de EDP RIV1

Además, el modelo incluye los impactos de los macrófitos adjuntos en el oxígeno disuelto y las cargas de la cabeza de las plantas de energía de la temperatura río y la cinética de la calidad del agua, al igual que el reciclado de nutrientes.

En la aplicación del modelo se supone, para los propósitos de modelado, que el cuerpo de agua es de una dimensión (longitudinal). Es decir, las velocidades son asumidas para ser representadas adecuadamente por un valor medio sobre la sección transversal y la mezcla en las dimensiones lateral y vertical se supone que sea suficiente para impedir el establecimiento de gradientes fuertes, lo que permite la suposición de homogeneidad en la sección transversal. Dicha suposición representa la principal limitación del modelo.

El EPD-RIV resuelve las ecuaciones hidrodinámicas para obtener tiempo de flujo y elevación de la superficie del agua. Debido a que no hay una solución analítica para las ecuaciones de gobierno, deben resolverse numéricamente. El esquema de solución utilizada es ampliamente conocido y aceptado, el cual es el conocido como técnica de los cuatro puntos, como técnica de solución implícita.

Se conoce un sistema de caja, a partir de la cual se genera un sistema de ecuaciones que deben ser resueltos simultáneamente y debido a que no todos los términos son lineales, a continuación, el sistema de ecuaciones debe resolverse de forma iterativa durante el tiempo, es así como se realiza una estimación inicial y luego una vez resueltas las ecuaciones, se comparan los resultados con la estimación. Si los resultados no son aceptables en la prueba de convergencia, se realiza nuevamente otra iteración. Así, la solución está controlada en parte por la información proporcionada por el usuario.

Los algoritmos de calidad de agua para los contaminantes convencionales simulados por EPD-RIV1Q son relativamente amplias, en comparación con otros modelos disponibles de calidad del agua. Sin embargo, hay una serie de procesos no simulados por el modelo. Por ejemplo, el modelo no incluye los procesos de transporte de sedimentos como la erosión y la deposición y su impacto en la calidad del agua, así como no simula los procesos en los sedimentos que afectan

las tasas de demanda de oxígeno y liberación de nutrientes, por tanto dichas tasas son especificadas para el modelo.

Se encuentra disponible el manual de usuario Burke, Roy, 2002: Un modelo unidimensional hidrodinámico y de calidad de agua.

Cualificaciones del usuario: Necesidades de los usuarios de alto nivel de educación técnica y/o experiencia en modelado.

### **3. DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO**

#### **3.1. DESCRIPCIÓN DE LA SUBCUENCA DEL RIO DE ORO**

Nace en la Quebrada Santa Rita vereda Cristales en el alto del picacho a 3.400 m.s.n.m. en jurisdicción del Municipio de Piedecuesta, finaliza al unirse con el Río Suratá para conformar el Río Lebrija. Posee las siguientes microcuencas Río frío, Quebradas: Llano Grande, Montes, Ruitoque, Aranzoque, Palogordo, Loro, San Pedro, La Iglesia, Las Nieves, La Rosita, Padre Jesus. Caños: Garrapero, Los Mango, Linderos, Raya, etc.

El Río de Oro contempla un amplio recorrido por zonas pobladas recibiendo descargas directas de los alcantarillados de los municipios de Bucaramanga, Piedecuesta y Girón e indirectas del municipio de Floridablanca, también recibe vertimientos de la zona industrial del Palenque - Café Madrid, y descargas no puntuales de las áreas agroindustriales.

##### **3.1.1. Afluentes río de oro**

Aguas abajo del área urbana del municipio de Piedecuesta, el río de Oro recibe a la quebrada Grande, la quebrada Soratá y el Río Lato. Y en la zona del Municipio de Girón los afluentes son el Río Frío, la Quebrada la Iglesia, la quebrada Chimitá y las corrientes de la escarpa de la Meseta de Bucaramanga.

Siendo de interés el río Frío, por ser donde desemboca la quebrada a evaluar a continuación se influye una breve descripción junto con los afluentes importantes dentro de los cuales se incluye la quebrada de interés.

### **3.1.2. Río frío y sus afluentes**

El Río Frío es una corriente en la cual se han adelantado importantes obras de saneamiento, lo que ha llevado al mejoramiento de su calidad. Pero en su parte baja es receptora del efluente de la PTAR Río Frío y de las aguas crudas que no alcanzan a ser tratadas, lo que disminuye su calidad, a pesar de la remoción de carga contaminante obtenida en la PTAR.

La variación del índice de calidad de agua- ICA es de descenso a medida que el Río entra a zonas pobladas, donde a pesar de que no recibe descargas directas de aguas residuales, si presenta niveles altos de coliformes fecales. Igualmente, se recibe la descarga de la PTAR Río Frío y en el último tramo se encuentra la entrada de la quebrada Aranzoque, la cual contribuye a dicho incremento antes de la entrega al Río de Oro.

La Quebrada Aranzoque que antes del punto AZ-07 es llamada Quebrada Mensulí, recibe descargas producidas por las industrias y viviendas localizadas en la zona, por lo cual el ICA a lo largo de los últimos periodos se ha clasificado para este punto como dudoso.

### **3.2. DESCRIPCIÓN DE LA QUEBRADA MENSULÍ Y SUS TRIBUTARIOS**

La quebrada Mensulí Aranzoque se localiza en los Municipios de Piedecuesta y Floridablanca, perteneciendo a la región Occidental del Macizo de Santander, contando con una extensión de 69 km<sup>2</sup>, a lo largo de los cuales recorre parte de las veredas Mensulí, Guayana, Alto Mantilla, La Mata y finalmente desemboca cerca de un área urbanizada, aguas abajo del vertimiento de la planta de tratamiento de aguas residuales de Río Frío, que a su vez desemboca en Río de Oro, antes del área urbana del municipio de Girón. (Gamarra Y, Restrepo, R. Cajigas A, 2012).

La microcuenca pertenece a la subcuenca del Rio de Oro y a la microcuenca del Rio Frio e igualmente cuenta con afluentes importantes, donde sobresalen las siguientes quebradas: Las Pavas, La Ronda, Guayana, Palmichal y arrayanes. A continuación en la figura se incluye la localización de microcuenca.

**Figura 9 Microcuenca Rio Frío**



**Fuente:** Sistema de Información (SIA) Imagen Landsat, año 2001, SIG – CDMB.

El deterioro de las áreas aferentes de la quebrada Mensuli, en su parte alta y en las tierras bajas, causa muchos problemas al medio ambiente y a la comunidad. El costo de este daño se percibe en erosión del suelo, deslizamientos, disminución de la cantidad y calidad del agua, pérdida de biodiversidad y graves desequilibrios ecológicos. Esta problemática constituye uno de los principales obstáculos para lograr el desarrollo sostenible de la cuenca, y se evidencia la necesidad de su ordenación y uso adecuado. (Gamarra Y, Restrepo, R. Cajigas A, 2012).

De acuerdo a los datos obtenidos por la Autoridad Ambiental - CDMB<sup>1</sup>, la mayor parte de los vertimientos asociados a corrientes hídricas en su jurisdicción, corresponden a aquellos establecimientos que realizan labores del lavado de

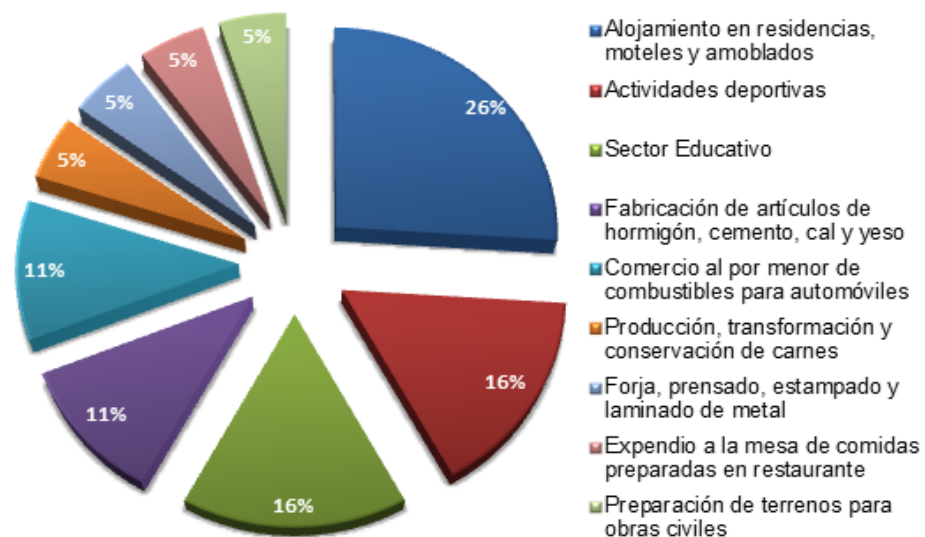
---

<sup>1</sup> Los resultados son los equivalentes para un reporte de 88 establecimientos a partir auto declaraciones de tasa retributiva para el cuarto (4) periodo, tercer quinquenio del año 2011; sin embargo, la corriente puede presentar otro tipo de descargas.

vehículos automotores, así como actividades relacionadas con su mantenimiento y reparación. Seguido de la actividad denominada producción, transformación y conservación de carnes, donde se incluyen las plantas procesadoras de productos cárnicos y las dedicadas al beneficio de aves y reses.

De acuerdo con los resultados obtenidos a partir del estudio del pago de tasa retributiva para el cuarto (4) periodo, tercer quinquenio del año 2011, la quebrada Mensulí – Aranzoque, recibe vertimientos por parte 19 establecimientos, los cuales se clasifican en 9 tipos de actividades, cuya distribución se relaciona a continuación en la figura.

**Figura 10** Distribución de las actividades desarrolladas por los establecimientos que vierten sus residuos líquidos a la quebrada Mensulí Aranzoque.



**Fuente:** Elaboración propia basado en el estudio del pago de tasa retributiva para el año 2011 de la quebrada Mensulí Aranzoque – CDMB.

Con los resultados presentados en la figura, se evidencia que la microcuenca a evaluar, recibe un número de descargas significativas. Principalmente representada en vertimientos de población urbana y rural pero sin restar la importancia de las descargas de tipo industrial realizadas a lo largo de la misma.

Reconociendo el deterioro ocasionado en la calidad del agua, debida a incrementos en las cargas orgánicas e inorgánicas, se considera pertinente emplear la modelación como herramienta de gestión del recurso hídrico, teniendo en cuenta los parámetros de calidad de agua medidos a lo largo de la misma.

## **4. METODOLOGÍA**

La metodología contempla cada una de las etapas a desarrollar para el cumplimiento de los objetivos planteados en el proyecto de simulación para el estudio de la calidad del agua en un tramo de la microcuenca río Frío - quebrada Mensulí Aranzoque, iniciando con la etapa diagnóstica, para posteriormente realizar la selección del modelo, su implementación y posterior obtención de la herramienta entregable ante la CDMB.

### **FASE 1. DIAGNOSTICO DEL TRAMO DE LA MICROCUENCA**


Dentro del diagnóstico del tramo de la microcuenca, se contempla realizar la descripción de la zona de estudio, por tanto se inicia con la identificación de las características climatológicas de interés para ingresar al modelo, debido a su interacción con algunos parámetros fisicoquímicos indicadores de la calidad del agua, es por ello que se requieren datos de precipitación, temperatura, humedad del aire, velocidad del viento y radiación solar, los cuales son obtenidos a partir de fuente como el IDEAM y los planes de ordenamiento territorial.

A continuación se realiza el recorrido de identificación del tramo, donde se llevan a cabo las siguientes actividades.

#### **I. GEOPOSICIONAMIENTO DEL TRAMO DE ESTUDIO**

El geoposicionamiento consistió en determinar las coordenadas del sitio de estudio y la elevación con la ayuda de un equipo de posicionamiento global GPS. A lo largo del recorrido por la quebrada, se georreferencian cada uno de los puntos de descarga e igualmente cada uno de los aportes por concepto de tributarios y extracciones, incluyendo el tipo de descarga presumible.

Para ello, se emplea un formato de recolección de datos, que contiene la información de campo recolectada y se presenta a continuación:

 <b>Universidad Pontificia Bolivariana</b> <small>SECCIONAL BUCARAMANGA</small>			<b>RECOLECCION DE DATOS DE CAMPO</b>
<b>Punto</b>	<b>Georreferenciación</b>	<b>Tipo de vertimiento (Presumible) o extracción</b>	

Empleando los datos de georreferenciación, se construye la localización geográfica de la quebrada, incluyendo los puntos y la clasificación o tipo de descarga o extracción obtenida.

## **II. BATIMETRIA**

Simultáneamente con la georreferenciación de los puntos de interés, se determina el ancho y profundidad en los tramos de la quebrada en el segmento de estudio, empleando instrumentos de medición, cuyos resultados permiten construir el perfil batimétrico, obteniéndose las características de la corriente en términos de lámina de agua.

## **III. SELECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL**

Los puntos de Monitoreo o control seleccionados obedecen a información secundaria generado en un estudio previo sobre la quebrada Mensulí Aranzoque, siendo obtenidos a partir de puntos de interés para la CDMB, condiciones topográficas y de acceso a la quebrada.

A continuación, se incluye la localización de los puntos de monitoreo seleccionados, los cuales deberán ser validados en campo.

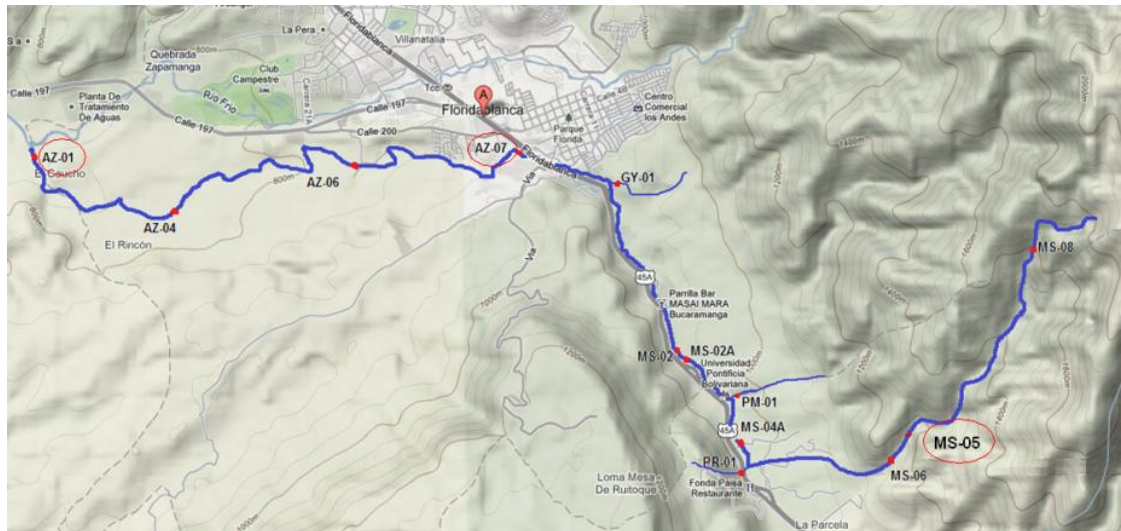
**Tabla 11** Localización de puntos de monitoreo de la quebrada Mensulí Aranzoque

#	Código	Localización	Georeferenciación
1	MS-06	Captación acueducto Parcelaciones Mensulí	7° 01' 80" N 73° 03' 97" W
2	MS-05	Autopista Piedecuesta - Floridablanca, Antiguo Platacero	7° 02' 8" N 73° 04' 15" W
3	PR-01	Quebrada Paramito, Sector Box Couvert Morichal	7° 01' 79" N 73° 04' 95" W
4	MS-04A	Batea antes de EDS San Pedro de Oriente	7° 02' 8" N 73° 04' 15" W
5	PM-01	Quebrada Palmichal antes de confluencia con quebrada Mensulí	7° 02' 14" N 73° 04' 16" W
6	MS-02A	Aguas arriba captación AVINSA	7° 02' 48" N 73° 04' 29" W
7	MS-02	Aguas abajo captación AVINSA	7° 02' 48" N 73° 04' 29" W
8	GY-01	Quebrada la Guayana antes de confluencia con quebrada Mensulí	7° 02' 58" N 73° 04' 49" W
9	AZ-07	Cruce de la Quebrada sobre la Autopista Piedecuesta – Floridablanca	7° 03' 40" N 73° 04' 64" W
10	AZ-06	Puente autopista después de EDS Terpel	7° 03' 01" N 73° 05' 53" W
11	AZ-04	Detrás del colegio San Patricio	7° 03' 46" N 73° 06' 30" W
12	AZ-1A	Antes de confluencia con Río Frío. Sitio conocido como Los Totumos	7° 03' 49" N 73° 08' 36" W

**Fuente:** Guía de campo de los macroinvertebrados acuáticos de la quebrada Mensulí – Santander, 2012.

A continuación, en la figura se incluye la localización de los puntos de control a lo largo de la quebrada los cuales fueron mencionados en la tabla, los puntos señalados con color rojo corresponden a los puntos con los que se cuenta con información histórica.

**Figura 11** Localización de puntos de monitoreo o control de la quebrada Mensulí Aranzoque



**Fuente:** Guía de campo de los macroinvertebrados acuáticos de la quebrada Mensulí – Santander, 2012.

#### **IV. USOS ACTUALES DEL AGUA**

El recorrido de la quebrada permite identificar los diferentes usos dados al agua de la corriente hídrica, por tanto a partir de la información recopilada con el formato de diligenciamiento de los datos de geoposicionamiento, se clasifica cada punto como entrada o salida, es decir aporte o extracción e igualmente cada categoría se subdivide como vertimiento de agua residual o industrial, agua lluvia o tributario para el caso de los aportes o captación para el caso de extracción.

La clasificación mencionada, permite que los usos del agua se establezcan como extracción de materiales del lecho, riego, receptora de residuos sólidos, vertimientos de aguas residuales industriales y domésticas, lo cual ha ocasionado el deterioro de la calidad del agua tal.

## **V. ESQUEMATIZACIÓN DEL TRAMO DE LA MICROCUENCA**

La esquematización del tramo a simular incluye cada una de las fronteras internas, las cuales están constituidas quebradas y corrientes superficiales tributarias, aportes de agua lluvia, vertimientos de aguas residuales domésticas y aguas residuales industriales y extracciones de agua. Adicionalmente, se incluye la localización de los puntos de control previamente validados, identificando las diferentes descargas o extracciones entre uno y otro punto.

Lo anterior, permite concluir el tipo de extracción o aporte con mayor distribución de porcentaje y sobre el cual debe realizarse mayor seguimiento.

## **VI. CALIDAD DEL AGUA**

Se realiza una consolidación tomando como base los datos históricos de los tres últimos años (2010-2012) para los puntos AZ-01A, AZ-07 y MS-05, buscando determinar el comportamiento en la calidad del agua de la quebrada en términos de índice de calidad de agua.

Posteriormente, se relacionan los promedios obtenidos para los últimos años, con los datos obtenidos para la elaboración de la guía de campo de los macroinvertebrados acuáticos, validando la calidad del agua obtenida en ambos casos.

## **VII. SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS**

Para realizar la selección y procesamiento de datos, se parte de la base existente a partir de 1983, 1987 y 2003 para los puntos AZ-01A, AZ-07 y MS-05 respectivamente. Dichos datos son sometidos a diversas pruebas estadísticas, las cuales se mencionan a continuación incluyendo la utilidad de cada una.

- **Diferencia de medias con respecto a época**

Teniendo en cuenta los meses que corresponden a cada época, es decir seca o lluviosa, los cuales son determinados como condiciones climáticas del área de influencia, se calculan las medias para cada uno de los parámetros de calidad de agua con los que se cuenta información.

Del análisis se obtiene el número de datos empleados en cada caso, determinando si es una muestra representativa del comportamiento de calidad de agua según el parámetro y si de manera preliminar las medias difieren según la época climática o si al contrario no lo hacen.

- **Prueba para diferencia de medias independientes**

La prueba de diferencia de medias independientes, busca verificar si la afirmación de que las medias para los parámetros son diferentes independientemente de la época climática, es así como se analizan los 23 parámetros contemplados mediante la prueba de Levene para la igualdad de varianzas, la cual indica si puedo o no suponer varianzas iguales.

Si la probabilidad asociada al estadístico Levene es  $>0.05$ , suponen varianzas iguales, de lo contrario si es  $<0.05$  se suponen varianzas distintas. A partir de ello, se determina con el nivel de significación bilateral, el grado de compatibilidad entre la hipótesis de igualdad o desigualdad de medias y las diferencias entre medias poblacionales observadas.

- **Análisis de varianzas ANOVA**

Una vez realizadas las pruebas anteriores donde se involucra la época climática frente a los parámetros, se busca conocer si los grupos tienen medias iguales, por

tanto se construye un análisis de varianza, el cual ofrece el estadístico F con su nivel de significación y establece la variabilidad descompuesta de la siguiente manera:

- **Varianza entre grupos o inter-grupos.** Mide la variabilidad entre las medias de cada grupo respecto a la media total de todas las observaciones.
- **Varianza dentro de los grupos o intra-grupos.** Mide la variabilidad de cada observación respecto a la media de su grupo.

Del mismo modo que se emplea con la prueba de la t de Student y con otras pruebas estadísticas, se divide un efecto observado respecto a un error aleatorio. Por ello, en este caso se divide el efecto debido a la pertenencia de los grupos (varianza entre grupos) respecto a la dispersión debida al azar o error aleatorio (varianza dentro de los grupos). Al cociente se le denomina F, el cual si sobrepasa cierto valor crítico, entonces es posible afirmar que el efecto observado es demasiado grande para poder ser explicado por el azar (error aleatorio) y que por tanto no todos los grupos estudiados tienen la misma media.

Los datos obtenidos son presentados como la suma de cuadrados intergrupos, que mide la dispersión de la media de cada grupo respecto de la media total y la suma de cuadrados intragrupos, que mide la dispersión de cada observación respecto a la media de su grupo. Para el caso particular, se cuenta con tres grupos, siendo los puntos con información histórica por parte de la CDMB.

Con la suma de cuadrados y los grados de libertad, se obtiene el cociente entre ambas F, para comprobar si el efecto observado es tan grande como para no poder ser explicado por el error aleatorio.

Es así como si el valor de F es menor o igual que 0.05, se rechaza la hipótesis de igualdad de medias y por el contrario si es mayor se acepta la igualdad de medias, es decir, no existen diferencias significativas entre los grupos.

## - **Comparaciones múltiples**

La prueba de Scheffé es una prueba que se aplica para hacer comparaciones múltiples de las medias de grupos, cuyo análisis de varianza contrasta la hipótesis de igualdad de medias de dos o más grupos. Si el resultado se considera estadísticamente significativo, lo que se puede afirmar es que al menos la media de uno de los grupos es distinta a las restantes, o bien que hay otras medias diferentes entre sí.

Este tipo de análisis entre puntos resulta ser de gran utilidad, con el fin de identificar si los parámetros evaluados se comportan de la misma manera entre punto y punto.

Para realizar la interpretación de los resultados, debe tenerse en cuenta el nivel de significación, por tanto se asume que las medias para cada punto son diferentes como hipótesis y como hipótesis nula que son iguales, por tanto si se obtiene un resultado mayor a 0.05 refleja que no hay diferencias significativas entre medias y por el contrario si es inferior a 0.05 indica que hay diferencia significativa entre medias.

## **FASE 2. SELECCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA APLICABLE AL TRAMO DE LA MICROCUENCA EVALUADA.**

La búsqueda de los modelos de simulación requiere una revisión bibliográfica profunda, debido a que existen una gran cantidad de modelos disponibles, sin embargo se considera útil realizar una evaluación general preliminar donde se seleccionen 5 modelos, con el fin de evaluar mediante una adaptación de la metodología empleada por Lozano, G. Zapata, M.A. y Peña, L.E. en "Selección modelo de simulación de calidad agua", empleando el modelo que de acuerdo a

sus características específicas obtenga una mayor cuantificación, para ello se evaluarán como mínimo los siguientes criterios:

Para realizar la selección, se elabora una matriz descriptiva, que proporciona información acerca de los componentes y funciones de los modelos, calificando posteriormente de manera cualitativa y cuantitativa la inclusión diversos atributos, los cuales se califican de acuerdo a los requerimientos para la modelación de la cuenca a analizar, siendo la puntuación mas alta la mas deseable.

- Dimensionalidad de la ejecución: Hace referencia a la suposición del software sobre la dirección en donde predomina la ocurrencia de las reacciones de los constituyentes en la quebrada, lo cual se evalúa de acuerdo al número de dimensiones contempladas por el modelo. Se otorga mayor puntuación a menor cantidad de dimensiones.
- Permanencia en el tiempo: Define el comportamiento en el tiempo de los procesos simulados por el modelo, es decir si es estable o dinámico. Se asigna mayor calificación a los programas de ejecución estable.
- Complejidad de los datos de entrada: Este criterio se relaciona específicamente con el número de dimensiones del modelo, su permanencia en el tiempo y los parámetros que sean seleccionados para simular. Su puntuación se asigna de acuerdo a la complejidad de los datos de entrada.
- Precisión del modelo: Este criterio es fundamental, buscando un modelo que arroje resultados confiables, debido a que para poder presentar una herramienta a la CDMB, deben obtenerse resultados precisos. Se califica con mayor puntuación según la precisión del programa relacionada con los métodos numéricos empleados para la aproximación matemática.
- Parámetros modelados: Se establecerá una puntuación de acuerdo al número de parámetros modelados de interés, considerándose de interés los que sean seleccionados durante la fase 1. Como mínimo el modelo deberá contemplar los parámetros incluidos en el Decreto 3930 de 2010, siendo éstos Demanda

bioquímica de oxígeno a 5 días ( $DBO_5$ ), Sólidos suspendidos (SS), Potencial del ion hidronio (pH), Temperatura, Oxígeno disuelto (OD), caudal (Q), datos hidrobiológicos y coliformes totales y fecales.

- Entrenamiento necesario: Define la capacitación que debe tenerse para la ejecución del modelo, tanto en la teoría como en la operación de la modelación, ya que se busca que dicho modelo pueda continuar siendo empleado por la CDMB y debe capacitarse al funcionario apropiadamente. Por ello, a menor entrenamiento requerido mayor será la asignación de la puntuación.
- Disponibilidad de manuales de usuario: Esta particularidad de los programas está muy relacionada con el entrenamiento requerido. La puntuación otorgada fue mayor para los modelos con los manuales más claros y completos.
- Aplicación del software en regiones similares a la que será evaluada. Se considera importante que se cuente con antecedentes en el país, debido a las condiciones geográficas y climatológicas del mismo. Se otorga una mayor calificación al o los software con los cuales se cuente con antecedentes comprobables.
- Costo: Debido a que no se cuenta con presupuesto para la adquisición de software, se determina asignar calificación a los que sean de uso libre.
- Aplicabilidad en las demás Corporaciones Autónomas Regionales. Se asigna mayor calificación a quienes son empleados por otras corporaciones regionales.

### **FASE 3. CALIBRAR EL MODELO COMPARANDO UN CONJUNTO DE RESULTADOS MEDIDOS FRENTE A LOS RESULTADOS ENTREGADOS POR ESTE.**

Una vez seleccionado el modelo, se deben ingresar los datos requeridos por éste, los cuales pueden variar siendo más o menos de acuerdo al modelo mismo. Cada modelo tiene la capacidad para calibrar automáticamente los parámetros

seleccionados, es decir que el usuario tiene la opción de especificar los valores para cada tipo de parámetro o incluir auto-calibrar a los parámetros seleccionados.

Los modelos tienen la capacidad de realizar la calibración automáticamente a través un algoritmo genético propio. Sin embargo, previa a la autocalibración el usuario debe ingresar la fórmula estadística que calcule el ajuste de los resultados del modelo al compararlos con los datos medidos en campo.

- Una vez seleccionada la función matemática que represente mejor la evolución de las variables del modelo,
- Diseño del proceso de calibración, donde se realizan una serie de simulaciones agrupadas por parámetros significativos que afectan a una o a pocas variables.

#### **FASE 4. DEFINIR LA HERRAMIENTA CUANTITATIVA QUE PERMITA EL ESTABLECIMIENTO DE LÍMITES Y METAS DE REDUCCIÓN EN EL TRAMO EVALUADO DE LA MICROCUENCA.**

Una vez calibrado el modelo, se cuenta con la herramienta cuantitativa que permita el establecimiento de límites y metas de reducción en el tramo evaluado de la microcuenca y que será presentado como tal ante la CDMB para sus fines pertinente en la labor de ordenamiento hídrico.

Con el fin de evidenciar con mayor facilidad cada una de fases con sus respectivas actividades desarrolladas, se incluye una recopilación breve en la tabla 12 presentada a continuación:

**Tabla 12 Recopilación metodología del proyecto**

Emplear un modelo de simulación de calidad del agua que se constituya como herramienta para la Autoridad Ambiental en el establecimiento de límites y metas de reducción en el tramo de la microcuenca Río Frío - quebrada Mensulí Aranzoque			
<b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>	<b>FASES</b>	<b>ACTIVIDADES</b>	<b>RESULTADOS</b>
Realizar un diagnóstico de la zona de estudio correspondiente al tramo de la microcuenca Río Frío - quebrada Mensulí.	Descripción de la zona de estudio	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Identificación de características climatológicas</li> <li>• Recorrido para realizar georreferenciación del tramo y toma de batimetría.</li> <li>• Selección de puntos de control.</li> <li>• Usos actuales del agua</li> <li>• Construcción de la esquematización del tramo</li> <li>• Calidad del agua</li> <li>• Selección y procesamiento de datos</li> </ul>	<p>Esquematización georeferenciada de los vertimientos</p> <p>Validación de puntos de control</p> <p>Selección de datos representativos para el modelo</p>
Seleccionar el modelo de simulación de calidad del agua aplicable al tramo de la microcuenca evaluada.	Selección del modelo de simulación	Revisión bibliográfica exhaustiva, con el fin de aplicar una adaptación de la metodología empleada por Lozano, G. Zapata, M.A. y Peña, L.E. en "Selección modelo de simulación de calidad agua".	Selección de modelo de simulación a emplear

<p>Calibrar el modelo comparando un conjunto de resultados medidos frente a los resultados entregados por este.</p>	<p>Modelamiento del tramo de la microcuenca Río Frío - quebrada Mensulí</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Selección de la función matemática que represente mejor la evolución de las variables del modelo</li> <li>• Análisis de sensibilidad</li> <li>• Asignación de valores a parámetros poco significativos</li> <li>• Diseño del proceso de calibración</li> </ul>	<p>Modelo calibrado</p>
<p>Definir la herramienta cuantitativa que permita el establecimiento de límites y metas de reducción en el tramo evaluado de la microcuenca.</p>			<p>Herramienta cuantitativa útil para la toma de decisiones de manejo del tramo de la microcuenca</p>

## 5. DIAGNOSTICO DEL TRAMO DE LA MICROCUENCA

Para elaborar el diagnóstico del tramo de la microcuenca, es necesario iniciar identificando las características climatológicas de interés para ingresar al modelo, debido a su interacción con algunos parámetros fisicoquímicos indicadores de la calidad del agua.

### 5.1. CARACTERÍSTICAS CLIMATOLÓGICAS

Debido a que no se cuenta con estación climatología, debe recurrirse a emplear los valores promedios para definir y comparar el clima con la estación más cercana. Para el análisis climático de la Subcuenca Río de Oro se tomaron como base principal las estaciones ubicadas en la zona, las cuales se incluyen a continuación, destacando que la estación que se localiza más cerca de la zona de influencia de la quebrada es Granja Piedecuesta, sin embargo es de tipo pluviográfico, por lo cual solo se contará con registros de pluviosidad.

**Tabla 13** Estaciones climáticas subcuenca Rio de Oro

NOMBRE	TIPO	ENTIDAD	ALTURA (msnm)
UIS	Climatológica Principal	IDEAM	1.018
Llano Grande	Climatológica Ordinaria	IDEAM	777
El Rasgón	Climatológica Ordinaria	CDMB	1.950
La Esperanza	Climatológica Ordinaria	CDMB	1.020
PTAR	Climatológica Ordinaria	CDMB	785
Granja Piedecuesta	Pluviográfica	IDEAM	1.000
La Galvicia	Pluviométrica	IDEAM	1.779
El Picacho	Pluviométrica	IDEAM	3.310
Berlin	Climatológica Ordinaria	IDEAM	3.214
Palogordo	Pluviométrica	IDEAM	950
La Floresta	Pluviográfica	IDEAM	925
Club Campestre	Pluviométrica	CDMB	940
La Flora	Pluviométrica	CDMB	1.100
CDMB	Pluviográfica	CDMB	950
Sevilla	Pluviométrica	CDMB	1.900
La Mariana	Pluviométrica	CDMB	2.250

Fuente: IDEAM

La parte alta de las microcuencas Oro Alto, Río Frío y Río Lato está caracterizada por la estación Rasgón. La parte baja de la Microcuenca Oro Alto y parte baja de las microcuencas Río Frío y Río Lato, está caracterizada por las estaciones UIS ubicada en el costado norte de la meseta de Bucaramanga y La Esperanza ubicada al Este del caso urbano de Floridablanca. En la microcuenca Oro Medio se halla también la estación Llanogrande, de gran importancia para definir el cambio de tipo climático entre el valle del Río de Oro y la Meseta de Bucaramanga.

A continuación, se incluye una breve descripción de los parámetros climatológicos de interés para el modelo, los cuales corresponden a la quebrada a evaluar.

#### **5.1.1. Precipitación**

La precipitación es uno de las características del clima más definitorio. Es también factor principal de control del ciclo hidrológico en una región, siendo de esa manera fundamental determinado época climática y aporte de caudales a la corriente hídrica.

En el caso particular de las estaciones climatológicas ubicadas en la región, el movimiento de la zona de convergencia intertropical -ZCIT- es el factor que determina el régimen bimodal imperante en la zona. Adicionalmente, se presentan factores locales de mediana escala originados por la accidentalidad topográfica. Son comunes los efectos de Fohen, las circulaciones locales de valle-montaña y las precipitaciones orográficas.

El régimen de lluvias registrado en la zona alta de la microcuenca Río de Oro es definido por las estaciones Berlín, Rasgón y El Picacho. El régimen de lluvias en la estación Rasgón también es de tipo bimodal. Para la estación Berlín la precipitación tiene un comportamiento igualmente bimodal.

Para el caso de la Quebrada Mensuli Aranzoque, la estación más cercana, la cual se constituye como de interés para el desarrollo del proyecto, es la llamada Granja Piedecuesta, donde el régimen de lluvias es de tipo bimodal, registrándose los siguientes datos de precipitación media.

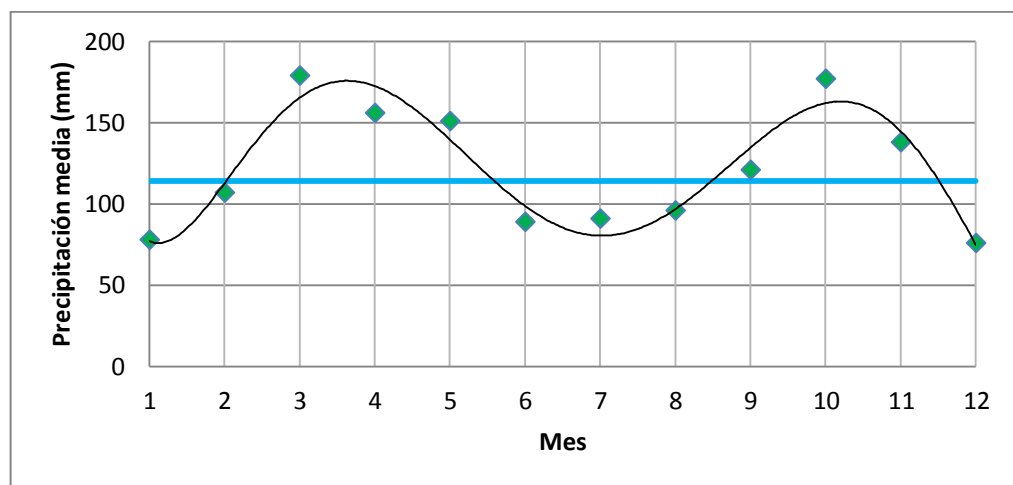
**Tabla 14** Precipitación media estación Granja Piedecuesta

Mes	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Precipitación media (mm)	78	107	179	156	151	89	91	96	121	177	138	76

**Fuente:** Caracterización componente físico – biótico municipio de los Santos

Conforme a lo anterior y para determinar los meses que corresponden a periodos de lluvia o sequía, se elabora el grafico presentado teniendo en cuenta la precipitación media y los puntos de inflexión.

**Figura 12** Precipitación estación Granja Piedecuesta



**Fuente:** Elaboración propia a partir de caracterización componente físico - biótico  
Municipio de los Santos

La precipitación a lo largo del año conforma un ciclo bimodal con dos períodos secos y dos húmedos, un período seco que va desde Diciembre hasta el mes de Febrero; los meses lluviosos del primer semestre son básicamente Marzo, Abril y

Mayo, a continuación las lluvias disminuyen durante Junio, Julio y Agosto; en Septiembre comienza el segundo período lluvioso del año que se extiende hasta Noviembre, con lluvias nuevamente en el mes de Diciembre aunque de menor intensidad.

### **5.1.2. Temperatura**

El clima en la región es variado en la parte alta las temperaturas están relacionadas con el ambiente de muy frío, frío, parte media y baja cálido y medio, influenciados por la altitud que determina la insolación terrestre. La zona intertropical es la que recibe mayor insolación por unidad de superficie, al incidir perpendicularmente sobre ella los rayos solares.

Las estaciones para las cuales se registra la temperatura media es para la Estación El Rasgón, la Estación UIS y la Estación Llanogrande con temperatura máxima promedio de 22.5°C, 30.2 °C, 26.7°C y mínima promedio de 8.3 °C, 17.5 °C y 22.9°C, respectivamente.

Debido a que la estación Granja Piedecuesta solo registra pluviosidad, no se cuenta con temperatura promedio cercana a la zona y al realizar revisión de los datos históricos de los últimos tres años, se encuentra una temperatura máxima de 32.5°C y mínima de 22.3 °C, temperaturas que difieren significativamente de las de las tres estaciones mencionadas.

Los climas moderadamente húmedos, ligeramente húmedo y semihúmedo se encuentran desde las estribaciones de las microcuencas Oro Alto, Río Frío y Río Lato hasta el área de escarpa de la meseta de Bucaramanga y la mesa de Ruitoque. Esta área se caracteriza por poca deficiencia de agua. Ésta zona corresponde al canal de desagüe del cauce principal de los ríos Oro, Lato y Frío y su área aferente, tramos de conducción de poca producción de agua. (Estudio de POA Río de Oro, CDMB).

### **5.1.3. Humedad del aire**

El vapor de agua es uno de los gases atmosféricos que más variación presenta en el espacio y en el tiempo en cuanto a su cantidad en el aire. En efecto, el vapor llega al aire procedente de los mares y de las zonas húmedas de las tierras mediante la evaporación y sale del aire por condensación y posterior precipitación.

La variación de la cantidad de vapor de agua contenido en el aire de la baja atmósfera está en función del tipo de suelo, la época del año, la temperatura ambiente y otros factores que afectan al proceso de entrada (evaporación) y al de salida (condensación y precipitación).

La humedad relativa promedio para la Estación El Rasgón es de 83 %, con una oscilación promedio entre 79 % y 86 %. En la Estación UIS es de 82 %, con una oscilación promedio entre 69 % y 90 %. Según datos analizados en la Estación Llano Grande, la humedad relativa promedio para la microcuenca Oro Medio es de 78%, con una oscilación promedio entre 76% y 79%.

Nuevamente, la estación Granja Piedecuesta no reporta este parámetro, así que la información anteriormente incluida se constituye como la disponible.

### **5.1.4. Los vientos**

A nivel local se producen vientos de origen casi exclusivamente térmico. Se produce un mayor calentamiento del aire en contacto con el suelo, al calentarse se dilata, pesa menos y tiende a elevarse, dejando un vacío que será ocupado por el aire frío, más pesado y con tendencia a descender. En la noche se produce un proceso inverso; el aire desciende de las montañas a los valles. (Brisas de valle y de montaña).

Vientos locales de carácter fuerte también son importantes por los efectos devastadores. En general en el trópico, estos factores tienen gran preponderancia en el aporte de humedad, en favorecer los movimientos verticales y en la formación de nubes convectivas, provocando chubascos o tormentas, particularmente en la tarde, los cuales pueden estar acompañados de vientos violentos de corta duración, cuyas velocidades pueden superar los 100 kph. Los ventarrones en la región son de origen espontáneo se presentan en los meses de julio y agosto.

En la parte media de la Subcuenca Río de Oro, según información de la estación UIS, única en la subcuenca que registra datos de viento, prevalecen en general los vientos con intensidades débiles. El valor anual promedio es de 1.8 m/seg, y la dirección predominante es Norte.

#### **5.1.5. Radiación solar**

Es importante conocer la orientación de la cuenca, ya que ésta determina la cantidad de sol que recibe durante el día y el ángulo de los rayos solares sobre la misma. Las cuencas con orientación N-S, es decir, aquellas cuyo cauce principal corre hacia el norte o hacia el sur, no reciben insolación uniforme en las dos vertientes durante todo el día; en cambio, las cuencas con orientación E-W reciben insolación en las dos vertientes durante todo el día, lo cual influye en la evaporación en forma diferente.

El promedio anual de Brillo solar en la Estación El Rasgón es de 1700 horas, para la Estación UIS es de 1435.8 horas; en la Estación Llano Grande es de 2000 horas. En general los meses de noviembre, diciembre y enero presentan los mayores valores de brillo solar, debido a la disminución de la nubosidad.

## 5.2. GEOPOSICIONAMIENTO DEL TRAMO DE ESTUDIO

Se realiza georeferenciación de cada uno de los puntos de descarga e igualmente de cada uno de los aportes por concepto de tributarios y extracciones, incluyendo el tipo de descarga presumible, siendo descarga de agua residual doméstica o industrial, captación, aporte tributario, aporte agua lluvia o descarga desconocida.

En total se incluyeron 104 puntos distribuidos según la clasificación anterior, cuya georeferenciación es incluida como anexo 1. Sin embargo a continuación, se incluyen algunos de los datos recolectados en campo, los cuales corresponden a los puntos de mayor significancia, abarcando desde principales fuentes de extracción hasta principales vertimientos tanto domésticos como industriales.

**Tabla 15** Recolección de datos de campo Georreferenciación

Punto	Georreferenciación	Tipo de vertimiento (Presumible) o extracción
6	Latitud: 7° 1' 45" N	Captación restaurante Mensuli
	Longitud: 73° 3' 59" W	
15	Latitud: 7° 2' 14" N	Aporte Quebrada Palmichala
	Longitud: 73° 4' 18" W	
16	Latitud: 7° 2' 18,7 N	PTAR UPB - Vertimiento AR doméstica
	Longitud: 73° 4' 25,0 W	
23	Latitud: 7° 2' 27,65" N	Captación Avinsa
	Longitud: 73° 4' 30,84" W	
24	Latitud: 7° 2' 27,65" N	PTAR Avinsa - Vertimiento AR industrial
	Longitud: 73° 4' 30,84" W	
32	Latitud: 7° 2' 42,10" N	Quebrada Guayana (Comfenalco)
	Longitud: 73° 4' 36,07" W	
33	Latitud: 7° 2' 42,40" N	Vertimiento AR doméstica Comfenalco
	Longitud: 73° 4' 36,22" W	
49	Latitud: 7° 2' 58,22" N	Aporte Quebrada La Guayana
	Longitud: 73° 4' 48,87" W	
56	Latitud: 7° 3' 23" N	Agua residual industrial MAC POLLO
	Longitud: 73° 5' 1" W	
59	Latitud: 7° 3' 22" N	Captación MAC POLLO

	Longitud: 73° 5' 3" W	
64	Latitud: 7° 3' 28" N	Captación Estación de servicio
	Longitud: 73° 5' 13" W	
65	Latitud: 7° 3' 30" N	Aporte Quebrada La Ronda
	Longitud: 73° 5' 13" W	
67	Latitud: 7° 3' 31" N	Agua residual de estación de servicio
	Longitud: 73° 5' 13" W	
76	Latitud: 7° 3' 27" N	Aporte agua residual doméstica (colegio)
	Longitud: 73° 5' 34" W	
91	Latitud: 7° 3' 30" N	Canal agua residual doméstica (punto de monitoreo CDMB Aranzoque)
	Longitud: 73° 6' 44" W	
96	Latitud: 7° 3' 22" N	Descarga agua residual doméstica zona franca
	Longitud: 73° 7' 54" W	
98	Latitud: 7° 3' 22" N	Aporte agua residuales Matadero ecológico
	Longitud: 73° 7' 54" W	

Con los datos de georreferenciación obtenidos, se construye la localización geográfica de la quebrada, donde se indican cada uno de los puntos y la clasificación o tipo de descarga o extracción respectiva, tal como se presenta en la figura a continuación:

**Figura 13** Localización geográfica de descargas y extracciones



Fuente: Elaboración propia Google Maps

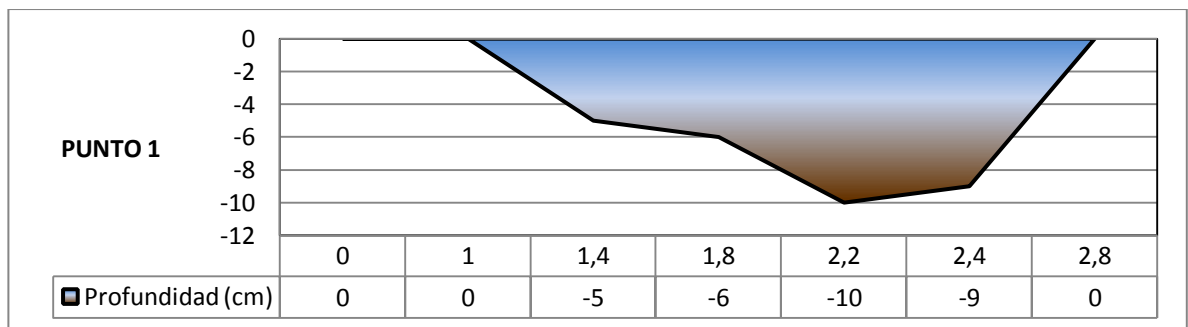
### 5.3. BATIMETRIA

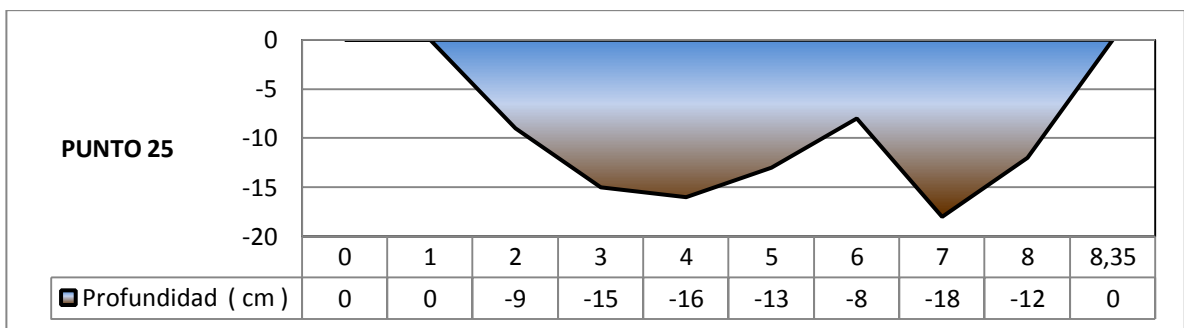
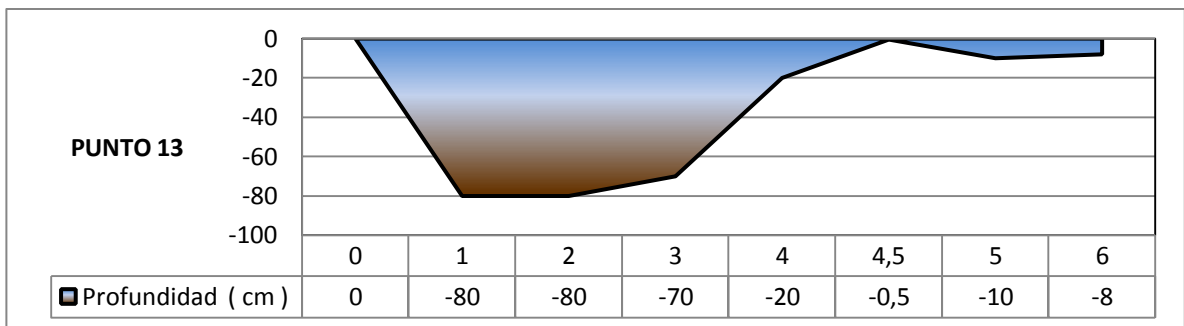
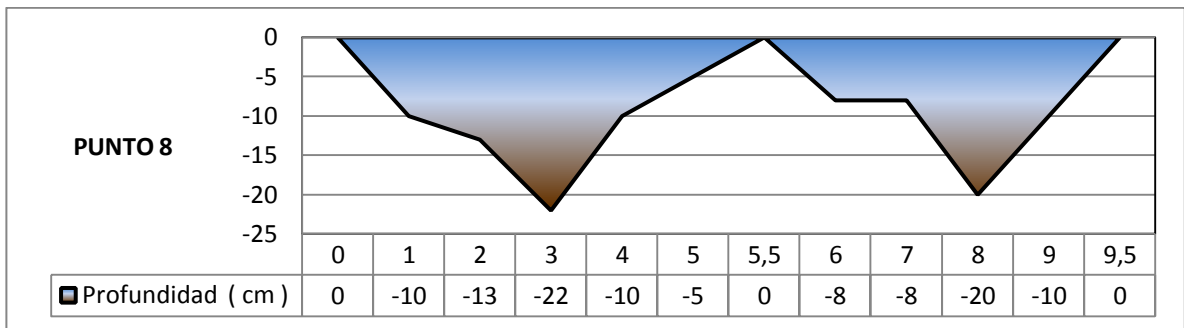
Durante la georreferenciación de cada uno de los puntos de interés, se realizó en forma simultánea la determinación del ancho en cada uno de los tramos de la quebrada en el segmento de estudio, a cada una de las cuales se les determinó la profundidad y con estos datos se realizó el perfil batimétrico. A continuación, se incluye en la figura la toma de datos realizada y posteriormente los perfiles obtenidos para los puntos 1, 8, 13 y 15.

**Figura 14** Medición de ancho y profundidad de cada sección



**Figura 15** Perfil puntos 1, 8, 13 Y 25





Los perfiles presentados anteriormente, fueron elaborados con base en el levantamiento de información de anchos y profundidades de los tramos, la cual es incluida en el anexo 4. Debe tenerse en cuenta que la información se presenta iniciando desde el punto más cercano al nacimiento (1), hasta la confluencia de la quebrada con el Rio Frio (25).

De manera generalizada, la quebrada posee láminas de agua de poca profundidad, exceptuando tramos donde su profundidad máxima alcanza los 80

cms, y secciones del ancho inundables en periodos de lluvia que no obtuvieron lamina. El ancho de la quebrada es igualmente fluctuante, con un ancho máximo de 9.5 m y un mínimo de 2.4 m.

En época de lluvia, es destacable que la lámina de agua crece significativamente debido a que el ancho promedio de la quebrada es bajo.

#### **5.4. SELECCIÓN DE PUNTOS DE CONTROL**

Para la selección de los puntos de Monitoreo o control, se tuvo en cuenta información secundaria (estudio previo sobre la quebrada Mensulí Aranzoque), puntos de interés para la CDMB, condiciones topográficas y de acceso a la quebrada.

Se definieron 11 puntos de los 12 puntos establecidos inicialmente, desde el nacimiento hasta la desembocadura, debido a que el punto de captación del acueducto veredal Alto de Mantilla (MS-08), debió ser descartado para la toma de datos, así como para la batimetría al presentarse diversas caídas de agua que varían entre 2 metros hasta 25 metros aproximadamente, por ello dicho punto no se considera representativo y no es incluido para la modelación.

Sin embargo, se incluye el punto MS-05 debido a que se cuenta con información histórica como punto más cercano al nacimiento a partir de 2003 y por tanto será el punto de partida a ingresar al modelo.

A continuación, se incluye la localización de los puntos de monitoreo seleccionadas, así como la evidencia fotográfica de las caídas de agua encontradas a lo largo del recorrido.

**Tabla 16** Localización de puntos de monitoreo de la quebrada Mensulí Aranzoque

#	Código	Localización	Georeferenciación
1	MS-06	Captación acueducto Parcelaciones Mensulí	7° 01' 80" N 73° 03' 97" W
2	MS-05	Autopista Piedecuesta - Floridablanca, Antiguo Platacero	7° 02' 8" N 73° 04' 15" W
3	PR-01	Quebrada Paramito, Sector Box Couvert Morichal	7° 01' 79" N 73° 04' 95" W
4	MS-04A	Batea antes de EDS San Pedro de Oriente	7° 02' 8" N 73° 04' 15" W
5	PM-01	Quebrada Palmichal antes de confluencia con quebrada Mensulí	7° 02' 14" N 73° 04' 16" W
6	MS-02A	Aguas arriba captación AVINSA	7° 02' 48" N 73° 04' 29" W
7	MS-02	Aguas abajo captación AVINSA	7° 02' 48" N 73° 04' 29" W
8	GY-01	Quebrada la Guayana antes de confluencia con quebrada Mensulí	7° 02' 58" N 73° 04' 49" W
9	AZ-07	Cruce de la Quebrada sobre la Autopista Piedecuesta – Floridablanca	7° 03' 40" N 73° 04' 64" W
10	AZ-06	Puente autopista después de EDS Terpel	7° 03' 01" N 73° 05' 53" W
11	AZ-04	Detrás del colegio San Patricio	7° 03' 46" N 73° 06' 30" W
12	AZ-1A	Antes de confluencia con Río Frío. Sitio conocido como Los Totumos	7° 03' 49" N 73° 08' 36" W

**Fuente:** Guía de campo de los macroinvertebrados acuáticos de la quebrada Mensulí – Santander, 2012.

Teniendo en cuenta dicha información, la delimitación de la zona de estudio comprende desde el punto MS-05 como nacimiento hasta el punto AZ-01A como punto de descarga, para un total de 12 puntos de control.

**Figura 16** Caídas de agua



### **5.5. USOS ACTUALES DEL AGUA**

El recorrido de la quebrada permite identificar los diferentes usos dados al agua de la corriente hídrica, es así como se determina que es usada para la extracción de materiales del lecho e igualmente el agua es captada tanto para uso doméstico, como riego e industria, tal como se evidencia en la figura presentada a continuación.

**Figura 17.** Tipos de extracciones de la Quebrada Mensulí-Aranzoque



También se usa como fuente receptora de residuos sólidos y vertimientos de aguas residuales industriales y domésticas, lo cual ha ocasionado el deterioro de la calidad del agua tal, lo cual se evidencia en las figuras a continuación. Cabe mencionar, que la contaminación por residuos sólidos en las orillas de la quebrada, puede generar carga dispersa como consecuencia de la escorrentía.

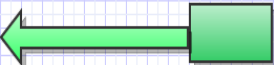
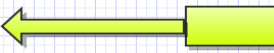
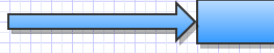

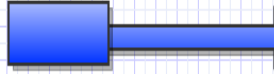
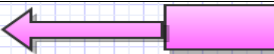
**Figura 18 Tipos de descargas a la Quebrada Mensulí-Aranzoque**

	
<p>Aporte agua residual doméstica</p>	<p>Contaminación por residuos sólidos,</p>
	
<p>Aporte agua lluvia</p>	<p>Aporte agua residual industrial</p>
	
<p>Deterioro de la calidad del agua</p>	

## 5.6. ESQUEMATIZACIÓN DEL TRAMO DE LA MICROCUENCA

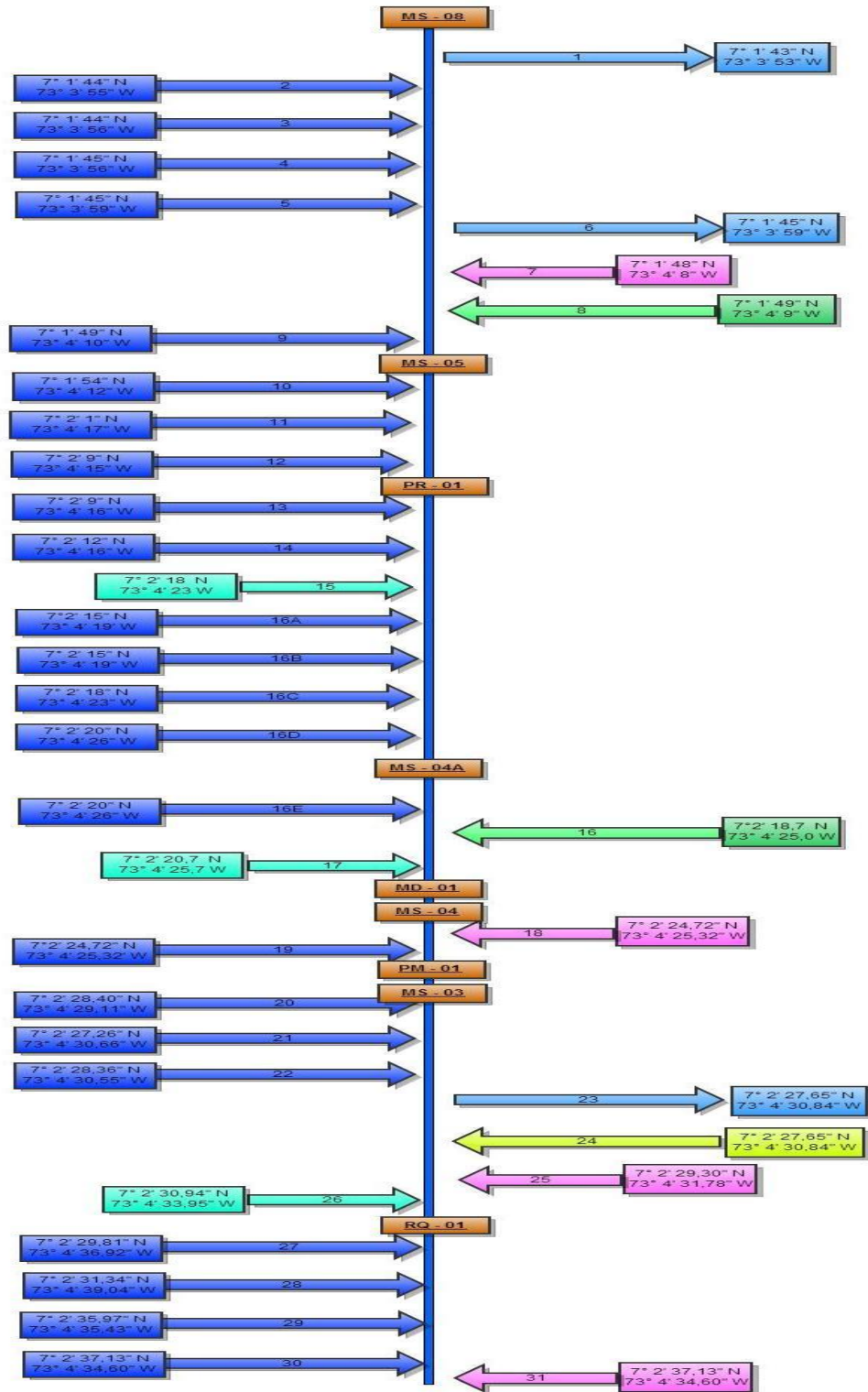
Para el proceso de esquematización del tramo a simular, se incluyeron 104 fronteras internas, las cuales están constituidas por 8 quebradas y corrientes superficiales tributarias, 26 vertimientos de aguas residuales domésticas, 4 de aguas residuales industriales y 9 extracciones de agua. Igualmente, se cuenta con 50 vertimientos de agua lluvia y 7 descargas desconocidas, cuya relación se presenta en la siguiente tabla indicando el número correspondiente el cual fue asignado de acuerdo al levantamiento de la información de georreferenciación de cada punto, así como el identificador empleado para el esquema relacionado posteriormente.

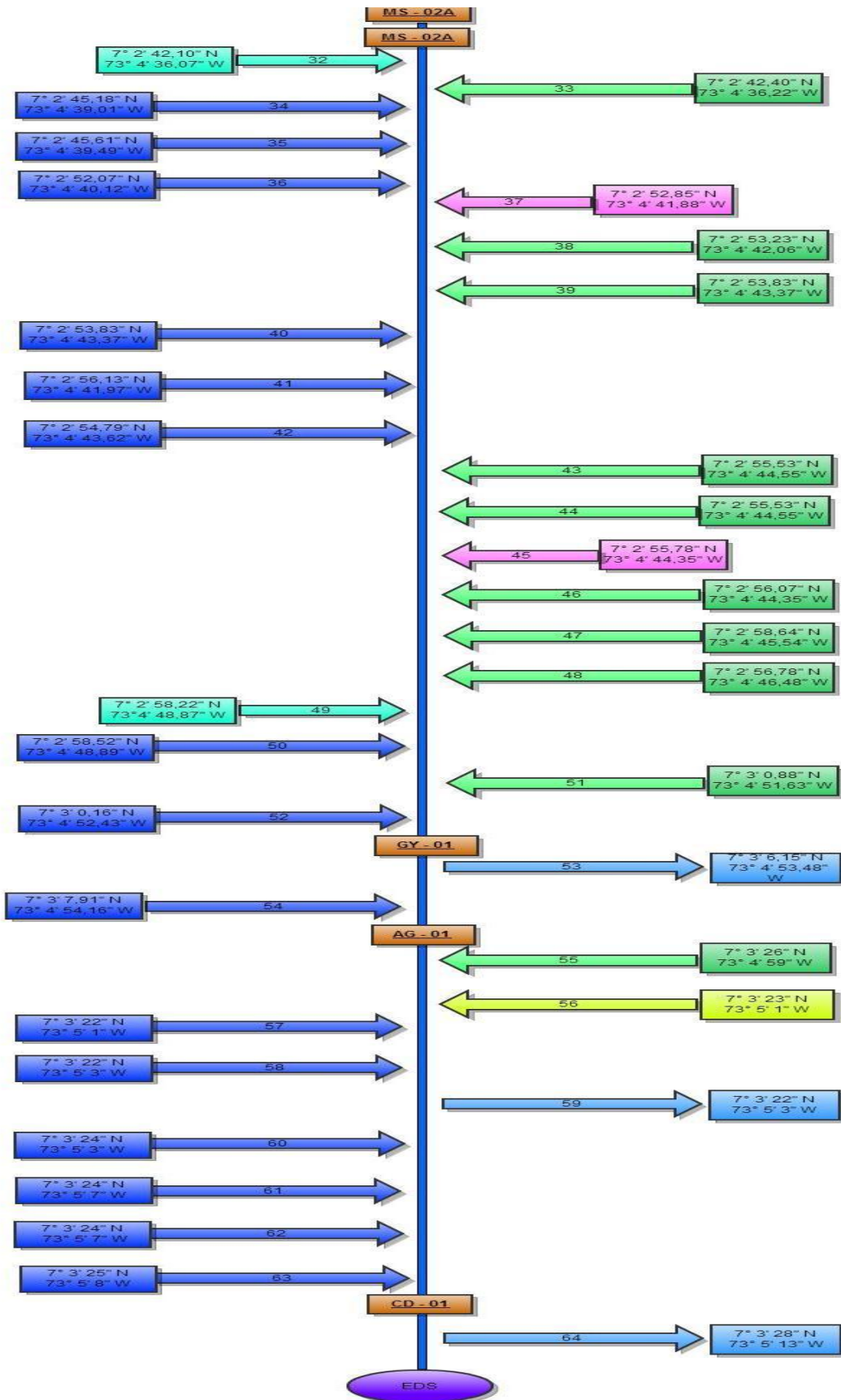
**Tabla 17** Relación de vertimientos y captaciones

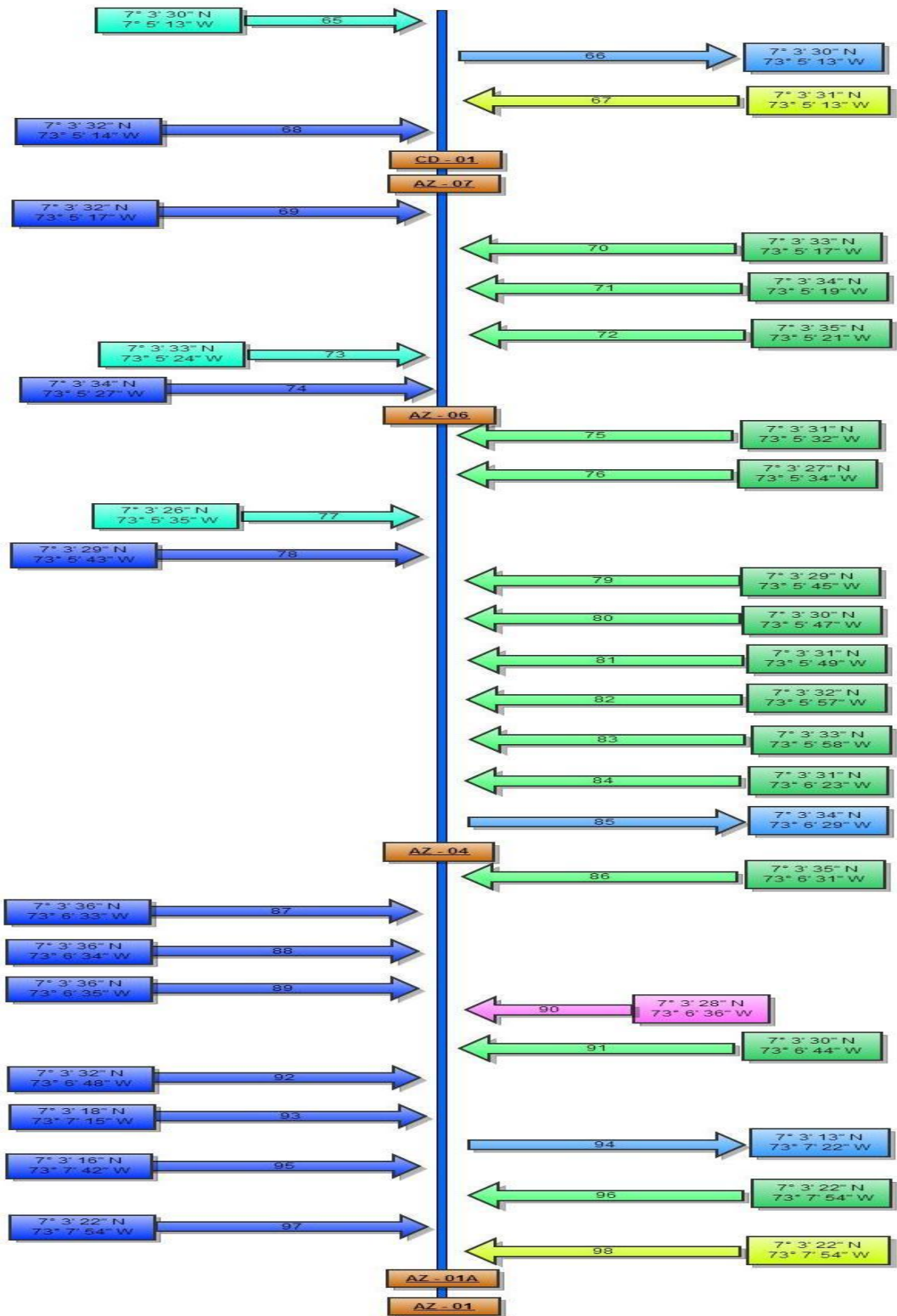
Tipo	Numeración	Identificador en la esquematización
Vertimiento agua residual doméstica	8,16, 33, 38, 39, 43, 44, 46, 47, 48, 51, 55, 70, 71, 72, 75, 76, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 86, 91, 96	
Vertimiento agua residual industrial	24, 56, 67, 98	
Captación	1, 6, 23, 53, 59, 64, 66, 85, 94	
Tributario	15, 17, 26, 32, 49, 65, 73, 77	
Aporte de agua lluvia	2, 3, 4, 5, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 16A, 16B, 16C, 16D, 16E, 16F, 19, 20, 21, 22, 27, 28, 29, 30, 34, 35, 36, 40, 41, 42, 50, 52, 54, 57, 58, 60, 61, 62, 63, 68, 69, 74, 78, 87, 88, 89, 92, 93, 95, 97	
Descarga desconocida	7, 18, 25, 31, 37, 45, 90	

La esquematización de la quebrada, se incluye gráficamente como una línea recta donde los tributarios, las descargas domésticas e industriales y las extracciones corresponden a flujos laterales, cuya dirección indica si corresponde a entrada o a salida.

Figura 19 Esquema de la Quebrada Mensuli Aranzoque y sus Principales Tributarios



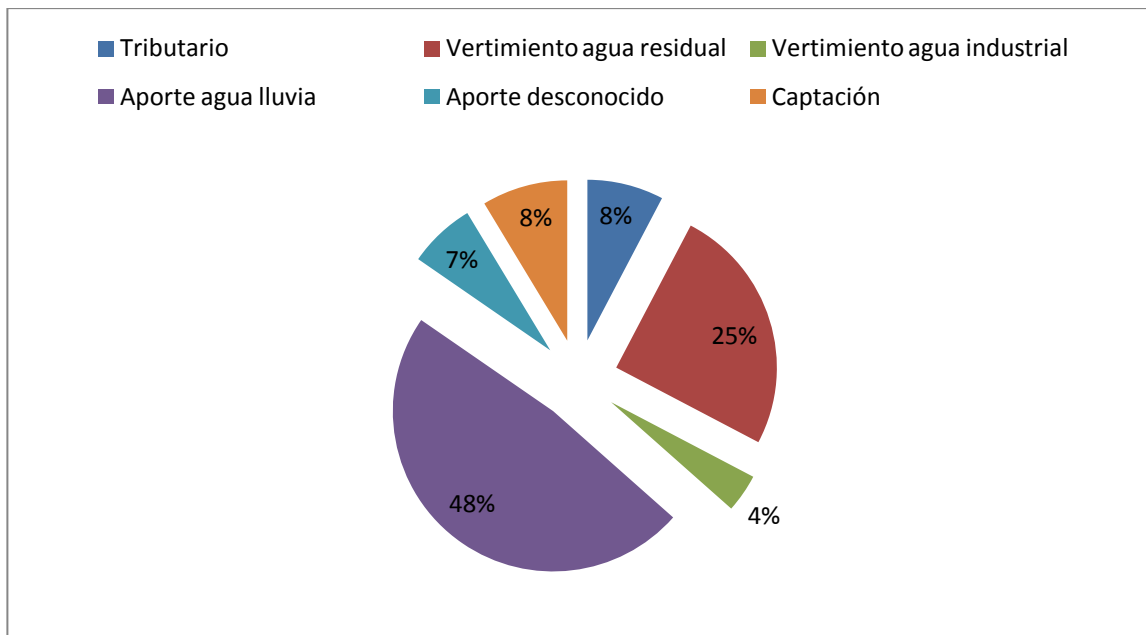




Tal como se observa en la figura, la mayoría de las descargas realizadas a la quebrada, corresponden a aportes de agua lluvia con un 48%, sin embargo es notable el alto porcentaje que se obtiene por descargas domésticas con un 25%, debido a la ausencia de un colector para las aguas domésticas generadas tanto por establecimientos como por viviendas localizadas a lo largo del tramo.

Se obtuvo un aporte de tributarios del 8% y por extracciones de agua de igual porcentaje. El aporte de descargas de dudosa procedencia denominada como aportes desconocidos obtuvo un 7%, las cuales pueden corresponder a aportes domésticos o por aguas de escorrentía o lluvia, sin embargo no se considera conveniente asumir el generador. Por último, con un 4% se incluyen las aguas residuales industriales, que a pesar de ser el menor porcentaje, generan vertimientos con cargas significativas descargadas a la corriente.

**Figura 20** Resultados del diagnóstico de la Quebrada Mensuli Aranzoque



## 5.7. CALIDAD DEL AGUA

Como se evidenciaba en ítems anteriores, el deterioro ambiental de la quebrada está asociado a la contaminación generada por las descargas de aguas residuales domésticas e industrias, el uso inadecuado del suelo y los residuos sólidos procedentes de los asentamientos. Sin embargo, es fundamental tener en cuenta la información histórica de las caracterizaciones ejecutadas por la CDMB como actividades de seguimiento de la corriente.

A continuación, se incluyen los promedios (2010-2012) para cada uno de los parámetros de calidad de aguas y puntos de control a los que se realiza seguimiento. La tabla fue elaborada teniendo en cuenta la información de las caracterizaciones de los años en mención, las cuales son incluidas como anexo 2 y 3.

**Tabla 18** Promedios 2010-2012 puntos de seguimiento

Parámetro	AZ-01A	AZ-07	MS-05
Oxígeno Disuelto	6.9	6.0	6.9
Demanda Química Oxígeno	36.7	40.7	19.1
Demanda Biológica Oxígeno	6.6	10.7	2.0
Nitrógeno Total	1.1		
Fósforo	0.4	0.5	0.2
Coliformes Totales	551333.3	1183000.0	132056.3
Coliformes Fecales	230400.0	568300.0	22850.0
Sólidos Totales	218.5	210.9	184.0
Turbiedad	36.0	19.7	39.3
pH	8.0	7.8	7.9
Temperatura Agua	24.7	25.0	22.6
Índice Calidad Agua	51.2	44.8	56.6
Clasificación	DUDOSA	DUDOSA	BUENA
Nitrógeno Kjeldahl	1.6	2.8	0.8
Nitrógeno Amoniacal	0.2	1.9	0.1
Nitritos	0.1	0.2	0.0
Nitratos	1.0	0.5	0.6
Sólidos Suspendidos	50.2	29.6	43.8
Temperatura Ambiente	27.3	29.3	26.7
Conductividad	202.1	253.8	117.8
Alcalinidad	65.5		56.3

**Fuente:** Elaboración propia basado en datos de caracterización CDMB.

Es pertinente relacionar dichos promedios, con los datos obtenidos para la elaboración de la guía de campo de los macroinvertebrados acuáticos de la quebrada Mensulí – Santander, validando la calidad del agua obtenida en ambos casos. Por ello, a continuación se incluyen para los puntos AZ-07 y AZ-01A, los parámetros de calidad obtenidos.

**Tabla 19** Parámetros de calidad de agua medidos

<b>Parámetro</b>	<b>AZ-07</b>	<b>AZ-01A</b>
Caudal	428,2	468,4
pH		8,12
Temperatura del agua	24,2	24,6
Temperatura ambiente	27,3	27,7
Altura	938	763
pH	7,82	8,12
Conductividad	168	173
Turbiedad	32,8	225
OD	6,68	7,02
DQO	29,3	21,1
DBO5	5	1,7
Notrógeneo total Kjeldahl	1,8	0,82
Nitrógeno amoniacal	0,57	0,08
Nitritos	0,114	0,085
Nitratos	0,88	0,98
Fósforo Total	0,34	0,27
Sólidos Totales	164	164
Sólidos Suspendidos	37	21
Coliformes totales	540000	16000000
Coliformes fecales	350000	140000
Ortofosfatos	0,27	0,22
Dureza	47,4	50,2
Cloruros	9,4	7,69
Alcalinidad	57,1	62,4
Grasas y Aceites	5,7	<5
ICA (cuantificado)	49	50
ICA (cualificado)	Dudosa	Dudosa

**Fuente:** Elaboración propia basado en datos de caracterización CDMB.

Teniendo en cuenta la información presentada, puede evidenciarse que la calidad del agua a partir de 2010 ha mantenido una condición indeseable, al ser clasificada como dudosa.

## 5.8. SELECCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Debido a que se cuenta con información histórica de tres puntos monitoreados, siendo estos MS-05, AZ-07 y AZ-01A, cuyos reportes se realizan desde 2003, 1987 y 1983 respectivamente, el volumen de datos es significativo y debe por ende ser procesado para determinar la información que se considera como representativa para ser empleada en el modelo y obtener mejores resultados.

Para lo anterior, se emplean herramientas estadísticas que corresponden desde la estadística básica, pruebas para diferencia de medias independientes y análisis de varianza, cuyos resultados se presentan a continuación:

### 5.8.1. ESTADISTICA BÁSICA: Diferencia de medias con respecto a época

Inicialmente, se busca determinar el volumen de datos con los cuales se llevará a cabo la calibración del modelo a emplear, por ello teniendo en cuenta los meses que corresponden a cada época, es decir seca (1) o lluviosa (2), los cuales fueron determinados en el ítem de condiciones climáticas, se obtienen las medias para cada uno de los parámetros de acuerdo a dicho criterio. Dichos resultados son presentados en la tabla a continuación, la cual contiene el número de elementos empleados para el cálculo y la media obtenida.

**Tabla 20** Datos resultantes de la estadística básica

PARÁMETRO	Época	N	Media
Oxígeno Disuelto	1	231	6,338
	2	227	6,274
Demanda Química Oxígeno	1	86	27,700
	2	83	25,910

<b>PARÁMETRO</b>	<b>Época</b>	<b>N</b>	<b>Media</b>
Demanda Biológica Oxígeno	1	230	27,16
	2	227	22,24
Nitrógeno Total	1	213	3,7801
	2	203	3,8433
Fósforo	1	230	0,5110
	2	226	0,5002
Coliformes Totales	1	122	650225,41
	2	123	527227,64
Coliformes Fecales	1	230	241080,04
	2	226	258519,47
Sólidos Totales	1	230	300,43
	2	227	331,62
Turbiedad	1	231	74,39
	2	226	117,08
pH	1	230	7,635
	2	222	7,589
Temperatura Agua	1	229	22,94
	2	223	22,94
Índice Calidad Agua	1	229	48,10
	2	223	47,33
Nitrógeno Kjeldahl	1	97	1,521
	2	92	1,427
Nitrógeno Amoniacal	1	181	1,054
	2	178	1,084
Nitrógeno Orgánico	1	144	2,946
	2	144	2,981
Nitritos	1	231	0,1303
	2	227	0,1459
Nitratos	1	231	0,4516
	2	227	0,4556
Sólidos Suspendidos	1	231	70,44
	2	227	83,76
Sólidos Suspendidos Volátiles	1	154	71,29
	2	141	85,06
Temperatura Ambiente	1	229	26,33
	2	223	26,13
Cianuro Total	1	6	0,3367
	2	6	0,3400
Conductividad	1	28	180,85
	2	34	190,13
Mercurio	1	2	0,00
	2	0	.
Caudal	1	176	0,2872

PARÁMETRO	Época	N	Media
	2	168	0,4030
Alcalinidad	1	0	.
	2	3	62,400

A simple vista, las medias parecen ser muy diferentes en la mayoría de los casos, sin embargo dicha afirmación debe validarse y para ello se deben realizar pruebas de diferencia de medias independientes, las cuales se incluyen en el ítem siguiente.

Es posible determinar que los parámetros cianuro, mercurio, alcalinidad e incluso conductividad, no cuentan con suficiente información que permita describir el comportamiento de la calidad del agua de la quebrada, por tanto no serán parámetros representativos.

### **5.8.2. Prueba para diferencia de medias independientes**

La prueba de diferencia de medias independientes, busca verificar si la afirmación de que las medias para los parámetros son diferentes independientemente de la época climática, para ello se analiza el comportamiento de la calidad del agua frente al periodo, determinando si existe o no diferencia significativa para cada los parámetro evaluado.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la prueba, donde (1) corresponde a si se han asumido varianzas iguales y (2) si no se han asumido varianzas iguales.

**Tabla 21** Prueba para diferencia de medias independientes

PARÁMETRO	Prueba de Levene para la igualdad de varianzas		Prueba t para igualdad de medias			
	F	Sig.	t	gl	Sig. bilateral	
Oxígeno Disuelto	(1)	,000	,988	0,394	456	0,694
	(2)			0,394	454,878	0,693
Demanda Química Oxígeno	(1)	2,255	,135	0,672	167	0,503
	(2)			0,672	166,980	0,503
Demanda Biológica Oxígeno	(1)	1,739	,188	0,613	455	0,540
	(2)			0,614	422,112	0,540
Nitrógeno Total	(1)	,262	,609	-0,210	414	0,834
	(2)			-0,209	411,085	0,834
Fósforo	(1)	,058	,809	0,159	454	0,874
	(2)			0,158	401,629	0,874
Coliformes Totales	(1)	3,576	,060	1,250	243	0,213
	(2)			1,249	240,526	0,213
Coliformes Fecales	(1)	,943	,332	-0,373	454	0,709
	(2)			-0,373	446,972	0,710
Sólidos Totales	(1)	,551	,458	-0,701	455	0,484
	(2)			-0,702	431,067	0,483
Turbiedad	(1)	4,627	,032	-1,388	455	0,166
	(2)			-1,385	429,074	0,167
pH	(1)	,072	,789	1,020	450	0,308
	(2)			1,019	446,700	0,309
Temperatura Agua	(1)	,947	,331	-0,029	450	0,977
	(2)			-0,029	429,397	0,977
Índice Calidad Agua	(1)	,079	,778	0,681	450	0,496
	(2)			0,681	449,877	0,496
Nitrógeno Kjeldahl	(1)	,097	,756	0,584	187	0,560
	(2)			0,582	180,988	0,561
Nitrógeno Amoniacal	(1)	1,019	,313	-0,224	357	0,823
	(2)			-0,224	354,354	0,823
Nitrógeno Orgánico	(1)	1,107	,294	-0,105	286	0,917
	(2)			-0,105	279,474	0,917
Nitritos	(1)	2,871	,091	-0,824	456	0,410
	(2)			-0,824	450,136	0,411

Nitratos	(1)	,762	,383	-0,122	456	0,903
	(2)			-0,122	455,944	0,903
Sólidos Suspendidos	(1)	2,288	,131	-0,876	456	0,381
	(2)			-0,876	452,534	0,382
Sólidos Suspendidos Volátiles	(1)	3,906	,049	-1,068	293	0,286
	(2)			-1,057	266,900	0,291
Temperatura Ambiente	(1)	1,644	,200	0,823	450	0,411
	(2)			0,824	449,294	0,411
Cianuro Total	(1)	,433	,526	-0,090	10	0,930
	(2)			-0,090	9,192	0,930
Conductividad	(1)	3,898	,053	-0,626	60	0,534
	(2)			-0,650	57,653	0,518
Caudal	(1)	8,172	,005	-2,270	342	0,024
	(2)			-2,251	294,101	0,025

Se determina con el nivel de significación bilateral, el grado de compatibilidad entre la hipótesis de igualdad o desigualdad de medias y las diferencias entre medias poblacionales observadas. Es así como por ejemplo para el parámetro oxígeno disuelto se asumen varianzas iguales y con un nivel de significación lateral de 0.694, mayor a 0.05 se asume que no hay compatibilidad entre la hipótesis de igualdad de medias y las diferencias entre medias poblacionales observadas.

La anterior afirmación indica que para el parámetro en mención, no hay diferencia entre épocas climáticas, lo cual ocurre para los demás parámetros evaluados con excepción del caudal, donde resulta ser validada la afirmación de que existe diferencia en el parámetro según el periodo.

### 5.8.3. Análisis de varianzas ANOVA

Una vez realizadas las pruebas anteriores donde se involucra la época climática frente a los parámetros, se busca conocer si los grupos tienen medias iguales, por

tanto se construye un análisis de varianza descompuesta entre grupos y dentro de los grupos.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos a partir de la aplicación de la prueba, donde (1) corresponde a la variabilidad intergrupos y (2) a la intragrupos.

**Tabla 22** Análisis de varianzas intergrupos e intragrupos de datos

PARÁMETROS		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Oxígeno Disuelto	(1)	85,570	2	42,785	14,951	0,000
	(2)	1302,099	455	2,862		
	Total	1387,669	457			
Demanda Química Oxígeno	(1)	6061,599	2	3030,800	11,379	0,000
	(2)	44213,218	166	266,345		
	Total	50274,818	168			
Demanda Biológica Oxígeno	(1)	190748,214	2	95374,107	13,709	0,000
	(2)	3158547,438	454	6957,153		
	Total	3349295,652	456			
Nitrógeno Total	(1)	447,929	2	223,965	26,699	0,000
	(2)	3464,478	413	8,389		
	Total	3912,407	415			
Fósforo	(1)	16,169	2	8,084	16,618	0,000
	(2)	220,376	453	,486		
	Total	236,545	455			
Coliformes Totales	(1)	4,009E13	2	2,005E13	46,223	0,000
	(2)	1,049E14	242	4,337E11		
	Total	1,450E14	244			
Coliformes Fecales	(1)	1,974E12	2	9,869E11	4,023	0,019
	(2)	1,111E14	453	2,453E11		
	Total	1,131E14	455			
Sólidos Totales	(1)	1946289,426	2	973144,713	4,371	0,013
	(2)	1,011E8	454	222625,443		
	Total	1,030E8	456			
Turbiedad	(1)	438495,959	2	219247,980	2,033	0,132
	(2)	4,896E7	454	107836,121		
	Total	4,940E7	456			
pH	(1)	2,182	2	1,091	4,712	0,009
	(2)	103,941	449	,231		
	Total	106,123	451			
Temperatura Agua	(1)	391,583	2	195,792	52,039	0,000
	(2)	1689,309	449	3,762		
	Total	2080,892	451			
Índice Calidad Agua	(1)	6959,523	2	3479,762	27,024	0,000
	(2)	57816,229	449	128,767		
	Total	64775,752	451			

PARÁMETROS		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
Nitrógeno Kjeldahl	(1)	30,153	2	15,076	14,169	0,000
	(2)	197,909	186	1,064		
	Total	228,062	188			
Nitrógeno Amoniacal	(1)	21,913	2	10,956	7,413	0,001
	(2)	526,175	356	1,478		
	Total	548,087	358			
Nitrógeno Orgánico	(1)	208,648	1	208,648	29,015	0,000
	(2)	2056,643	286	7,191		
	Total	2265,291	287			
Nitritos	(1)	1,023	2	,511	13,218	0,000
	(2)	17,602	455	,039		
	Total	18,625	457			
Nitratos	(1)	0,467	2	,233	1,907	0,150
	(2)	55,665	455	,122		
	Total	56,131	457			
Sólidos Suspendidos	(1)	87025,516	2	43512,758	1,649	0,193
	(2)	1,201E7	455	26395,339		
	Total	1,210E7	457			
Sólidos Suspendidos Volátiles	(1)	318263,281	2	159131,640	14,146	0,000
	(2)	3284682,945	292	11248,914		
	Total	3602946,225	294			
Temperatura Ambiente	(1)	607,917	2	303,959	56,787	0,000
	(2)	2403,326	449	5,353		
	Total	3011,243	451			
Conductividad	(1)	117244,450	2	58622,225	39,920	0,000
	(2)	86641,601	59	1468,502		
	Total	203886,051	61			
Mercurio	(1)	0,000	1	,000	.	.
	(2)	0,000	0			
	Total	0,000	1			
Caudal	(1)	5,745	2	2,873	13,637	0,000
	(2)	71,830	341	0,211		
	Total	77,575	343			
Alcalinidad	(1)	55,815	1	55,815	1,237	0,466
	(2)	45,125	1	45,125		
	Total	100,940	2			

El análisis de los resultados obtenidos permite concluir que para los parámetros turbiedad, nitratos, sólidos suspendidos y alcalinidad se acepta la hipótesis de igualdad de medias, es decir que éstos parámetros no varían entre los tres puntos evaluados. Sin embargo los parámetros restantes, es decir caudal, nitrógeno total, temperatura del agua, nitrógeno Kjeldahl, temperatura ambiente, conductividad, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno,

fosforo, coliformes total y fecales, sólidos totales, pH, índice de calidad de agua, nitrógeno amoniacal, y nitritos, generan rechazo de la hipótesis, por tanto existe al menos un grupo cuya media es diferente a la media de los demás grupos.

Como el problema consiste en analizar las descargas y extracciones realizadas a la quebrada y su influencia en la calidad del agua, lo ideal es contar con campañas de muestreo de duración anual, sin embargo al no ser posible se busca la condición más desfavorable, siendo en este caso la época de sequía donde el caudal es más bajo.

#### 5.8.4. Comparaciones múltiples

Para realizar la interpretación de los resultados obtenidos para la prueba de comparaciones múltiples, debe tenerse en cuenta el nivel de significación, por tanto se asume que las medias para cada punto son diferentes como hipótesis y como hipótesis nula que son iguales, si se obtiene un resultado mayor a 0.05 refleja que no hay diferencias significativas entre medias y por el contrario si es inferior a 0.05 indica que hay diferencia significativa entre medias.

La tabla incluye todas las comparaciones de grupos por pares, es por ello que existe información en ambos sentidos, es decir que se concluye la misma afirmación sin que el orden de los factores afecte el resultado.

**Tabla 23** Comparaciones múltiples

Variable dependiente	(I) Punto2	(J) Punto2	Sig.
Oxígeno Disuelto	A	B	0,000
		C	0,001
	B	A	0,000
		C	0,881
	C	A	0,001
		B	0,881

<b>Variable dependiente</b>	<b>(I) Punto2</b>	<b>(J) Punto2</b>	<b>Sig.</b>
Demanda Química Oxígeno	A	B	0,933
		C	0,000
	B	A	0,933
		C	0,000
	C	A	0,000
		B	0,000
Demanda Biológica Oxígeno	A	B	0,000
		C	0,003
	B	A	0,000
		C	0,968
	C	A	0,003
		B	0,968
Nitrógeno Total	A	B	0,000
		C	0,000
	B	A	0,000
		C	0,001
	C	A	0,000
		B	0,001
Fósforo	A	B	0,000
		C	0,000
	B	A	0,000
		C	0,203
	C	A	0,000
		B	0,203
Coliformes Totales	A	B	0,000
		C	0,136
	B	A	0,000
		C	0,000
	C	A	0,136
		B	0,000
Coliformes Fecales	A	B	0,974
		C	0,022
	B	A	0,974
		C	0,041
	C	A	0,022
		B	0,041
Sólidos Totales	A	B	0,203
		C	0,022
	B	A	0,203
		C	0,315
	C	A	0,022
		B	0,315
Turbiedad	A	B	0,424
		C	0,182

Variable dependiente	(I) Punto2	(J) Punto2	Sig.
	B	A	0,424
		C	0,646
	C	A	0,182
		B	0,646
pH	A	B	0,309
		C	0,106
	B	A	0,309
		C	0,011
	C	A	0,106
		B	0,011
Temperatura Agua	A	B	0,000
		C	0,000
	B	A	0,000
		C	0,029
	C	A	0,000
		B	0,029
Índice Calidad Agua	A	B	0,000
		C	0,000
	B	A	0,000
		C	0,005
	C	A	0,000
		B	0,005
Nitrógeno Kjeldahl	A	B	0,042
		C	0,013
	B	A	0,042
		C	0,000
	C	A	0,013
		B	0,000
Nitrógeno Amoniacal	A	B	0,731
		C	0,001
	B	A	0,731
		C	0,003
	C	A	0,001
		B	0,003
Nitritos	A	B	0,449
		C	0,000
	B	A	0,449
		C	0,000
	C	A	0,000
		B	0,000
Nitratos	A	B	0,370
		C	0,236
	B	A	0,370
		C	0,768
	C	A	0,236
		B	0,768
Sólidos Suspendidos	A	B	0,993

Variable dependiente	(I) Punto2	(J) Punto2	Sig.
	B	C	0,211
		A	0,993
		C	0,263
	C	A	0,211
		B	0,263
Sólidos Suspendidos Volátiles	A	B	0,007
		C	0,000
	B	A	0,007
		C	0,009
	C	A	0,000
		B	0,009
Temperatura Ambiente	A	B	0,000
		C	0,000
	B	A	0,000
		C	0,029
	C	A	0,000
		B	0,029
Conductividad	A	B	0,020
		C	0,000
	B	A	0,020
		C	0,000
	C	A	0,000
		B	0,000
Caudal	A	B	0,001
		C	0,000
	B	A	0,001
		C	0,065
	C	A	0,000
		B	0,065

Punto A: AZ-01A, Punto B: AZ-07, Punto C: MS-05

Las diferencias empíricas entre los pares de medias contrastadas indican por ejemplo, que al comparar en el parámetro oxígeno disuelto el punto B (AZ-07) con el punto C (MS-05), se observa una significación de 0.881, lo cual conduce a concluir que existe una probabilidad alta de que esta diferencia sea una de las múltiples aleatorias pertenecientes a la distribución de diferencias de medias cuyo valor representativo es 0. Es decir, la diferencia empírica obtenida entre los dos puntos no es estadísticamente diferente de 0 y por tanto no significativa. Es así como se acepta la hipótesis nula y se dice que no hay diferencia significativa entre las medias de los puntos.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos, se puede concluir que los parámetros nitrógeno total, temperatura del agua, nitrógeno Kjeldahl, sólidos suspendidos volátiles, temperatura ambiente, y conductividad difieren punto a punto, lo cual se refleja con una significación inferior a 0.05, siendo representativa la diferencia entre puntos.

Por lo contrario, los parámetros nitratos, turbiedad y sólidos suspendidos no difieren entre puntos, observándose significancias superiores a 0.05.

Los parámetros restantes, es decir oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fosforo, coliformes total y fecales, sólidos totales, pH, temperatura del agua, índice de calidad de agua, nitrógeno amoniacal, nitritos, sólidos suspendidos volátiles y caudal, difieren entre algún punto.

En el caso del oxígeno disuelto, fosforo, demanda biológica de oxígeno y caudal se mantienen en los puntos B y C, sin embargo difieren del punto A, es decir el punto más cercano a la descarga a Rio Frío.

La demanda química de oxígeno, coliformes fecales, nitrógeno amoniacal y nitritos se mantienen en los puntos A y B, sin embargo difieren del punto C, el cual corresponde al más cercano al nacimiento y por ende con mejor calidad de agua.

Los coliformes totales se mantienen en los puntos A y C, sin embargo difieren del punto B, lo cual se espera debido a que se reciben diversas descargas de tipo doméstico en el tramo comprendido hasta el siguiente punto de monitoreo.

Por último, los parámetros sólidos totales y pH presentan un comportamiento estadístico diferente, ya que no difieren en los puntos A y B. Sin embargo para el primero parámetro en mención, los puntos B y C no representan diferencia pero estadísticamente los puntos A y C generan una diferencia representativa.

En cuanto al pH, los puntos A y C no representan diferencia significativa pero el punto B y C estadísticamente son diferentes.

Lo anterior, permite analizar como los diferentes aportes realizados a la quebrada, logran incrementar algunos parámetros, de esa manera es de interés la conclusión que se obtiene a partir de la demanda química de oxígeno, la cual en el punto de nacimiento difiere de los dos puntos siguientes, donde se incrementa significativamente, por lo cual con los datos históricos y los obtenidos en el monitoreo de 2010, se identifica a Avinsa como aportante destacable a dicho comportamiento.

## 6. SELECCIÓN DEL MODELO DE SIMULACIÓN DE CALIDAD DEL AGUA APLICABLE AL TRAMO DE LA MICROCUENCA EVALUADA

Una vez culminada la etapa de búsqueda, se verificó que los modelos cumplieran las condiciones mínimas y se recopiló la información requerida, de tal manera que se contara con elementos de juicio suficientes para seleccionar el modelo que se ajuste con los objetivos propuestos desde la definición del problema. De esa manera, para la selección final se identificaron características particulares de cada modelo y, mediante una ponderación aritmética, se determinó cuál era el modelo adecuado.

En la tabla a continuación, se presenta la matriz elaborada a partir de la revisión bibliográfica, donde se incluyen las características más representativas de cada modelo, divididas en grupos o *factores* por su similitud en cuanto a lo que representan, por ejemplo, los parámetros encargados de definir a calidad del cuerpo de agua, fueron ubicados en el *factor fisicoquímicos*, aquellos encargados de describir los fenómenos de transporte, dimensión y tipo de sistema que simula el programa, se incluyeron dentro del *factor estructural*, entre otros.

**Tabla 24** Matriz de componentes y atributos de diferentes modelos de calidad de agua

ATRIBUTOS		SOFTWARE DE MODELACIÓN				
FACTOR	Parámetro	CE-QUAL -W2	MIKE 11, MIKE 21, MIKE 3	QUAL 2E/ QUAL2Kw	WASP5/ 6/7	EDP RIV
<b>FACTOR FISICOQUÍMICO</b>	Conductividad	X		X	X	
	Temperatura	X	X	X		X
	Sólidos totales disueltos	X		X		
	Sólidos suspendidos inorgánicos	X		X		
	Alcalinidad	X		X		
	Carbono Orgánico Total	X		X		
	Constituyente Genérico		X	X	X	X
	pH	X		X		
<b>Total de parámetros por factor</b>		<b>7</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>FACTOR BIOLÓGICO (Nutrientes, procesos en sedimentos y patógenos)</b>	Patógenos		X	X		X
	Detritus	X	X	X		
	Fitoplancton	X		X	X	
	Sedimentos del fondo	X	X	X		
	Diagénesis de sedimentos			X	X	
	Algas	X	X	X	X	X
	Nitrógeno total	X		X		
	Nitrógeno Orgánico e inorgánico			X	X	X
	Nitratos y Nitritos	X	X	X	X	X
	Amonio	X	X	X	X	X
	Fósforo	X	X	X	X	X
<b>Total de parámetros por factor</b>		<b>8</b>	<b>8</b>	<b>11</b>	<b>7</b>	<b>6</b>
<b>FACTOR PROCESOS Y</b>	Oxígeno Disuelto	X	X	X	X	X

ATRIBUTOS		SOFTWARE DE MODELACIÓN				
FACTOR	Parámetro	CE-QUAL -W2	MIKE 11, MIKE 21, MIKE 3	QUAL 2E/ QUAL2Kw	WASP5/ 6/7	EDP RIV
<b>TRANSFORMACIONES (Degradación de materia orgánica e inorgánica)</b>	Materia Orgánica disuelta	X				
	Demanda Bioquímica de oxígeno Carbonácea	X	X	X	X	X
	Demanda Béntica de Oxígeno		X	X		
<b>Total de parámetros por factor</b>		<b>3</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>2</b>
<b>FACTOR ESTRUCTURAL (Tipo de sistema, dimensión, estado, transporte y cargas)</b>	Lotico	X	X	X	X	X
	Lentico	X			X	X
	1D Ramificado	X	X	X	X	X
	2D (X/Y)				X	
	2D (X/Z)	X			X	
	3D				X	
	Estable			X		X
	Cuasi-dinámico		X	X	X	X
	Dinámico	X	X		X	
	Advectivo	X	X	X	X	X
	Dispersivo	X	X	X	X	X
	Intercambio Béntico	X	X	X	X	X
	Entradas constantes	X	X	X	X	X
	Entradas variables	X	X		X	
Simulada		X		X		
<b>Total de parámetros por factor</b>		<b>10</b>	<b>10</b>	<b>8</b>	<b>14</b>	<b>9</b>
<b>GRAN TOTAL</b>		<b>28</b>	<b>23</b>	<b>30</b>	<b>25</b>	<b>19</b>

Fuente: Adaptado de Lozano G, y otros.

Los resultados obtenidos en la evaluación del *factor fisicoquímicos*, la familia de programas QUAL, proporciona una mayor representatividad en cuanto los parámetros que definen la caracterización de una fuente hídrica. El programa CE QUAL-W2, registró un segundo lugar y los tres modelos restantes; MIKE, WASP y EDP RIV obtuvieron la misma calificación.

Los resultados de la evaluación del *factor biológico*, sugieren a la familia de programas QUAL, como la más propicia para evaluar este tipo de características en un cuerpo de agua. Una segunda opción con igual número de atributos, son los modelos CE-QUALW2 y el MIKE.

Finalmente, los resultados obtenidos en los factores *procesos y transformaciones y estructural*, indican al modelo WASP como el programa con la mejor ubicación para su selección. Sin embargo, esta situación amerita ser analizada debido a la limitación que representa su no aplicabilidad en el país.

Conforme a los resultados obtenidos para los diversos criterios analizados cualitativamente, se concluye la familia de modelos QUAL, obtiene la calificación más elevada principalmente debido a los factores físico químico y biológico, los cuales representan interés por ser los datos que permiten ser modelados por el software.

## **6.1. EVALUACION CUANTITATIVA DE LOS MODELOS**

Teniendo en cuenta los parámetros evaluados de manera cualitativa, se procede a realizar de la misma manera una evaluación cuantitativa, para lo cual se establecieron los rangos o características que deben poseer los modelos para que les sea otorgada una mayor o menor puntuación. Conforme a ello, a continuación se incluye cada criterio de selección junto con la ponderación correspondiente, la cual se otorga de acuerdo a los requerimientos para la modelación de la cuenca a

analizar, para la cual es representativo un software unidimensional debido a que se considera que se homogeniza facilmente el agua en la seccion donde predomina el flujo. Se considera la puntuacion mas alta como la mas deseable.

**Tabla 25** Calificación de criterios por parámetro de selección del modelo

PARÁMETRO	PONDERACIÓN			
	<b>Dimensionalidad de la ejecución - D</b>	1D Ramificado 6	2D (X/Y) 4	2D (X/Z) 4
<b>Permanencia en el tiempo - C</b>	Estable 6	Cuasi-dinámico 4	Dinámico 2	
<b>Complejidad de los datos de entrada</b>	Relación D:C 6:6 2	Relación D:C 4:6, 4:4, 6:4, 3:6 4	Relación D:C 3:4, 4:2, 3:2 6	
<b>Precisión del modelo</b>	Modelo de precisión suficiente de acuerdo a la fuente hídrica modelada 4		Modelo de alta precisión 6	
<b>Parámetros modelados</b>	Mínimo de 9 variables 2	Entre 10 - 15 variables 3	16 o más variables 4	20 o más variables 6
<b>Entrenamiento necesario</b>	Capacitación significativa 2	Intermedio 4	Poca capacitación 6	
<b>Disponibilidad de manuales de usuario</b>	Poca disponibilidad de manuales o éstos tienden a ser confusos 2		Manuales claros y completos 6	
<b>Aplicación del software en regiones similares a la que será evaluada</b>	No ha sido utilizado en regiones similares a la que será evaluada 0	Poco utilizado en regiones similares a la que será evaluada 4	Ampliamente utilizado en regiones similares a la que será evaluada 6	
<b>Costo</b>	Costo 0		Gratuito 6	
<b>Aplicabilidad en las demás Corporaciones Autónomas Regionales</b>	No ha sido utilizado por Corporaciones Autónomas Regionales 0	Poco utilizado por Corporaciones Autónomas Regionales 2	Ampliamente utilizado por Corporaciones Autónomas Regionales 6	

De acuerdo a lo anterior, se elabora la siguiente matriz de valoración, donde se obtiene el modelo con mayor puntuación, el cual será seleccionado para realizar la modelación de la calidad del agua para el tramo de la microcuenca.

**Tabla 26** Evaluación cuantitativa de modelos

<b>CARACTERÍSTICA</b>	<b>QUAL</b>	<b>MIKE</b>	<b>WASP</b>	<b>EDP RIV</b>	<b>CE-QUAL W2</b>
Dimensionalidad de la ejecución	6	6	2	6	4
Permanencia en el tiempo	6	2	2	6	2
Complejidad de los datos de entrada	4	1	1	4	4
Precisión del modelo	4	6	6	2	4
Parámetros modelados	6	6	6	4	6
Entrenamiento necesario	4	2	4	4	4
Disponibilidad de manuales de usuario	6	2	6	2	6
Aplicación del software en regiones similares a la que será evaluada	6	4	0	0	0
Costo	6	0	6	6	6
Aplicabilidad en las demás Corporaciones Autónomas Regionales	6	2	0	0	0
<b>TOTAL</b>	<b>54</b>	<b>31</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>36</b>

Conforme a ello con una calificación de 54 unidades, se selecciona como aplicable la familia de modelos QUAL, principalmente debido a los dos criterios de mayor importancia siendo aplicación del software en regiones similares a la que será evaluada y aplicabilidad en las demás Corporaciones Autónomas Regionales, las cuales se constituyen como fundamentales para la CDMB, entidad para la cual se desarrolla el modelo. Se destaca el modelo debido al gran número de aplicaciones conocidas realizadas en diferentes regiones del país con características similares a las de interés.

La calificación es igualmente es otorgada por ser un modelo gratuito, que permite modelar gran variedad de parámetros obteniendo una precisión significativa debido a la complejidad del tramo. Igualmente, de acuerdo a las necesidades del tramo a modelar se constituyeron como fundamentales la dimensionalidad y la permanencia en el tiempo, ello debido a la dirección en donde predomina la ocurrencia de las reacciones de los constituyentes en la quebrada.

## 7. IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO DE CALIDAD DEL AGUA

La simulación de una corriente hídrica exige la incorporación de información confiable al modelo, con el fin de que las diferentes salidas se aproximen con lo que se requiera representar. Entre las principales entradas contempladas en el software, se encuentran las condiciones aguas arriba del tramo o los tramos a simular, características físicas e hidráulicas de la corriente, constantes de reacción físicas y químicas y datos correspondientes tanto al aporte como a la abstracción de diferentes fuentes sobre la corriente principal.

A diferencia de la esquematización hidrodinámica, para la modelación de la calidad del agua, las quebradas tributarias se esquematizaron como descargas puntuales sobre la quebrada, debido a que no se disponía de información suficiente de los parámetros de calidad del agua en ellos.

Dentro de las condiciones aguas arriba del tramo a simular, se contemplan el caudal y las características físico-químicas del agua, tales como: Temperatura, Conductividad, Sólidos Inorgánicos, Oxígeno Disuelto, DBO rápida, DBO lenta, Nitrógeno Orgánico, Nitrógeno Amoniacal, Nitratos, Fósforo Orgánico, Fósforo Inorgánico, Fitoplancton, Detritus, Patógenos, Alcalinidad y pH, sin embargo conforme a la información disponible solo es posible emplear los parámetros Temperatura, Oxígeno Disuelto y DBO rápida.

La implementación del modelo comienza con la representación de las características hidrogeométricas del tramo de la microcuenca (esquematización) y la definición de los datos de entrada (bases de datos de las fronteras y los parámetros de calibración) y las variables de salida del modelo.

La configuración del modelo se presenta en el cuadro a continuación, donde se incluyen los datos básicos requeridos para la simulación de la calidad del agua.

El modelo simula la DBO última y cuando solo se dispone de DBO5 como en el caso de la modelación, es necesario especificar un factor de conversión en base e. En este caso el factor especificado (0.25) corresponde al valor recomendado por el manual del modelo.

**Tabla 27 Configuración modelo QUAL2Kw**

<b>Componente</b>	<b>Parámetro</b>	<b>Modelo QUAL2Kw</b>
<b>Simulación</b>	Tipo de régimen de flujo	Permanente
	Tipo de secciones transversales	Trapezoidal
<b>Componentes de la calidad del agua</b>	Parámetros a modelar	Temperatura
		DBO
		OD
	Factor de conversión de DBO <sub>5</sub> en DBO última	0,25 en base e
<b>Datos geográficos y climatológicos</b>	Latitud (grados)	7.04
	Longitud (grados)	73.07
	Elevación de la cuenca	1013

El modelo unidimensional QUAL2Kw representa una corriente hídrica superficial como una serie de elementos computacionales, los cuales transfieren información relacionada con el flujo en forma consecutiva, lo cual es descrito por variables tal como la velocidad. Para determinar las características o relaciones hidráulicas que definen el comportamiento hidráulico de la quebrada se utilizan las ecuaciones de Manning.

Una vez seleccionados los parámetros a modelar, de acuerdo a la caracterización fisicoquímica tanto de la descarga como del cuerpo de agua, y del funcionamiento del software QUAL2Kw, se procedió a ingresar los datos de acuerdo a los

requerimientos del software, se calibró el modelo y se definieron los escenarios de modelación, dichas actividades son mencionadas en los ítems a continuación.

## 7.1. FRONTERAS DE CALIBRACIÓN

Las fronteras externas del modelo están constituidas por las estaciones de calidad del agua o puntos de medición establecidos por la CDMB y de los cuales se cuenta con información disponible. Las fronteras internas del modelo están constituidas por los tributarios, descargas de aguas residuales y aguas lluvias.

Cada una de estas fronteras debe contener la información de los componentes de la calidad del agua que se desean simular, las cuales constituyen la base de datos con la que se alimenta el modelo para realizar la simulación.

En la tabla a continuación, se presentan los datos de campo de las estaciones de calidad del agua utilizadas para la calibración del modelo, especificando su nombre, ubicación a lo largo del eje del río y el dato puntual de los componentes de la calidad del agua.

**Tabla 28** Base de datos para la calibración del modelo de calidad del agua

<i>Distancia Km</i>	<i>Cond umhos</i>	<i>ISS mgD/L</i>	<i>DO mgO2/L</i>	<i>CBODf mgO2/L</i>	<i>Norg ugN/L</i>	<i>Porg ugN/L</i>	<i>Inorg P ugP/L</i>	<i>Pathogens cfu/100 mL</i>	<i>Alk mgCaCO3/L</i>	<i>pH</i>
10.60	108	10	7.13	1.40	890	140	0.00	110000		7.83
10.53	134	10	7.06	3.00	900	20	140	1600000	72.90	7.96
9.95	167	13	7.00	3.20	950	70	190	540000	56.30	7.92
9.89	168	16	6.80	9.90	2350	10	230	240000	64.40	7.99
6.87	203	48	6.50	9.00	1230	70	270	1600000	69.20	7.48
4.25	201	17	6.25	8.00	2860	320	260	2400000	66.00	6.84
0.00	173	10	6.20	2.70	740	50	220	16000000	62.40	8.12

Se simuló el comportamiento de la temperatura, la DBO5 y el OD en el tramo de la microcuenca quebrada Mensulí Aranzoque bajo condiciones de flujo permanente,

se utilizó una representación geométrica trapezoidal de la sección transversal medida en campo por batimetría, empleando la base de datos presentada en el anexo 4.

Una vez especificada la configuración del modelo se calibraron los parámetros que describen los procesos de transporte y transformación de los componentes de la calidad del agua a modelar.

Estos datos se compararon con los resultados del modelo hasta llegar a calibrarlo es decir encontrar el mejor ajuste entre los datos de campo y los calculados. La calibración analizó el módulo hidrodinámico con relación al de calidad de agua. Cabe resaltar la importancia de la calibración del modelo hidrodinámico, ya que regula el tiempo de transito del agua a lo largo del río y éste a su vez incide sobre la temperatura y el oxígeno disuelto.

- **Calibración:** la calibración del modelo de calidad, utilizando la información de las condiciones fisicoquímicas en el vertimiento y cuerpo agua.
- **Escenario 1:** simulación del modelo de calidad con el colector de alcantarillado, el cual recibiría cada una de las descargas de tipo doméstico.
- **Escenario 2:** simulación del modelo de calidad con ajuste en vertimientos correspondiente a empresas, tanto de origen doméstico como industrial.

## 7.2. RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Una vez seleccionados los parámetros a modelar de acuerdo a la caracterización fisicoquímica tanto de la descarga como del cuerpo de agua, y del funcionamiento del software QUAL2Kw, se procedió a ingresar los datos de acuerdo a sus requerimientos, se calibró y se definieron los escenarios de modelación.



Figura 22 Datos de entrada fuentes puntuales

Name	Location (km)	Point		Temperature			Specific Conductance			Inorganic Suspe	
		Abstraction m3/s	Inflow m3/s	mean °C	range/2 °C	time of max	mean umhos	range/2 umhos	time of max	mean mg/L	range/ mg/L
1. Captación	12.33	0.0005		20.00			100.00				
2. Aporte agua lluvia	12.26		0.0002	23.00			100.00			2.00	
3. Aporte agua lluvia	12.23		0.0002	23.00			100.00			2.00	
4. Aporte agua lluvia	12.20		0.0002	23.00			100.00			2.00	
5. Aporte agua lluvia	12.11		0.0002	23.00			100.00			2.00	
6. Captación restaurante Mensuli	12.11	0.0010		23.00			100.00				
7. Aporte desconocido	11.81		0.0001	23.00			100.00			2.00	
8. Agua residual doméstica	11.77		0.0001	23.00			100.00			6.30	
9. Aporte por rebose de tanque de almacenamie	11.74		0.0002	23.00			100.00			2.00	
9A. Quebrada	11.735612		0.0573	23.00			100.00			6.00	
10. Aporte agua lluvia	11.563662		0.0002	23.00			100.00			2.0000	
11. Aporte agua lluvia	11.298212		0.0002	23.00			100.00			2.0000	
12. Aporte agua lluvia	11.01829		0.0002	23.00			100.00			2.0000	
13. Aporte agua residual doméstica	10.98866		0.0008	23.00			100.00			18.1000	
14. Aporte agua lluvia	10.895259		0.0002	23.00			100.00			2.0000	
14A. Aporte agua residual doméstica	10.854179		0.0009	23.00			100.00			84.8000	
15. Aporte Quebrada Palmichala	10.812059		0.0181	23.00			100.00			25.0000	
16A. Aporte Agua lluvia UPB	10.768469		0.0002	23.00			100.00			2.0000	
16B. Aporte Agua lluvia UPB	10.768469		0.0002	23.00			100.00			2.0000	

Figura 23 Datos de entrada fuentes dispersas

Name	Up (km)	Down (km)	Diffuse Abstraction m3/s	Diffuse Inflow m3/s	Temp C	Spec Cond umhos	Inorg SS mgD/L	Diss Oxygen mg/L	CBOD slow mgO2/L	CBOD fast mgO2/L	Organic N ugN/L	Ammon N ugN/L	Nitrate N ugN/L	Organic P ugP/L	Inorganic P ugP/L	Phyto plankton ug/L
10. Aporte agua lluvia	6.25			0.0300												
11. Aporte agua lluvia	6.12			0.0200												
12. Aporte agua lluvia	3.84			0.0300												
13. Aporte agua lluvia	2.13			0.0300												

Los resultados de la calibración se presentan en la tabla. La función objetivo de maximización correspondió al Inverso del Error Cuadrático Promedio, evaluando todos los determinantes, obteniendo un ajuste de 1,2608.

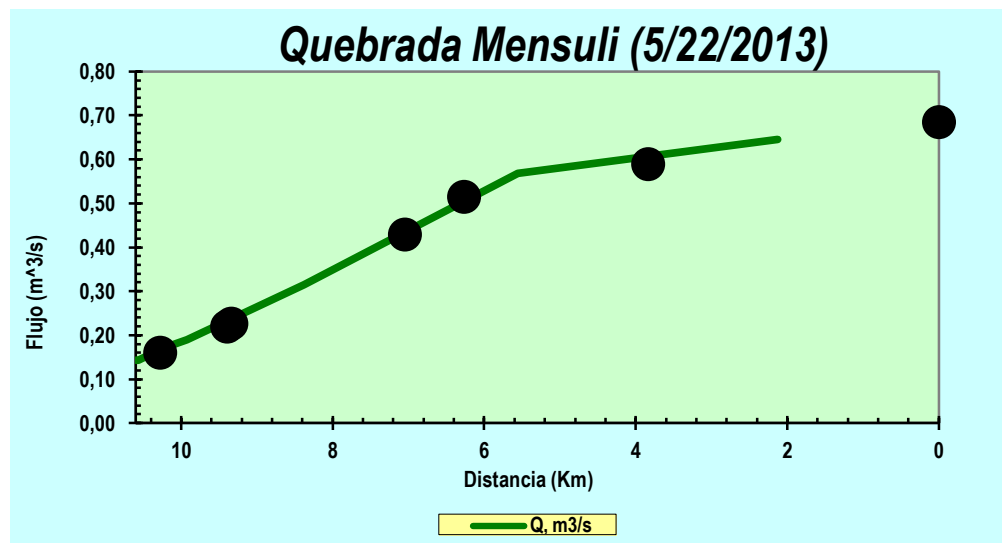
Tabla 29 Tasas de reacción obtenidas en la calibración con QUAL2Kw

PARÁMETRO	UNIDAD	VALOR
Modelo de reaireación	O'Connor Dobbins	
Velocidad de sedimentación sólidos suspendidos inorgánicos	m/d	0.35208
Tasa de hidrólisis de la CDBOslow	/d	3.19585
Tasa de oxidación de la CDBOslow	/d	0.32152
Tasa de oxidación de la CDBOfast	/d	3.74495
Tasa decaimiento de patógenos	/d	0.8

Las figuras en las que se presentan los resultados obtenidos durante el proceso de calibración, se presentan como una comparación en perfil a lo largo del tramo de estudio, debido a que no se dispone de información de la variación temporal los resultados. Las curvas graficadas corresponden a la respuesta para un día de los modelos de calidad del agua mientras que los puntos corresponden a los valores medidos en la campaña de medición realizada en las estaciones de calidad del agua ubicadas a lo largo de la quebrada.

A continuación se incluye la curva de calibración de caudal, la cual como puede observarse logra un buen ajuste con 0.77, entendiéndose que a mayor valor obtenido mejor ajuste obtenido. Igualmente, debe destacarse que a lo largo del tramo existen 9 captaciones, cuyos caudales debieron ser estimados.

**Figura 24** Curva de calibración de Caudal



Dentro de la caracterización hidráulica de la quebrada, además del caudal hacen parte la velocidad y la profundidad, cuyos resultados de calibración son incluidos a continuación.

Figura 25 Curva de calibración de Velocidad.

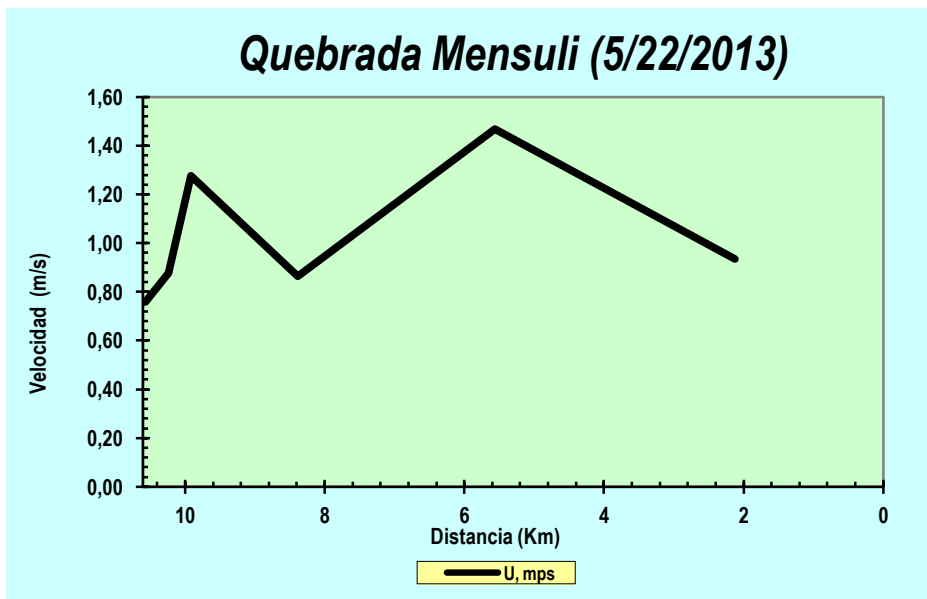
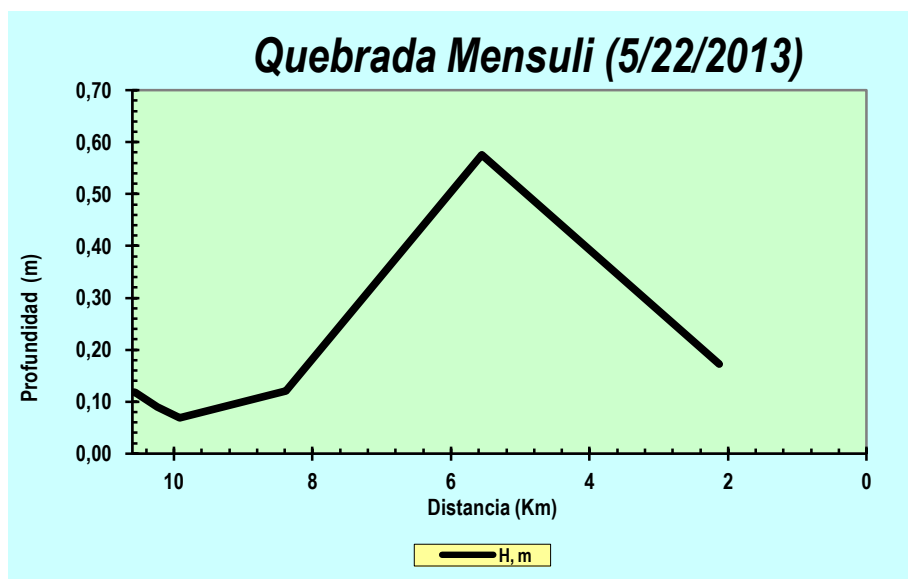


Figura 26 Curva de calibración de Profundidad.



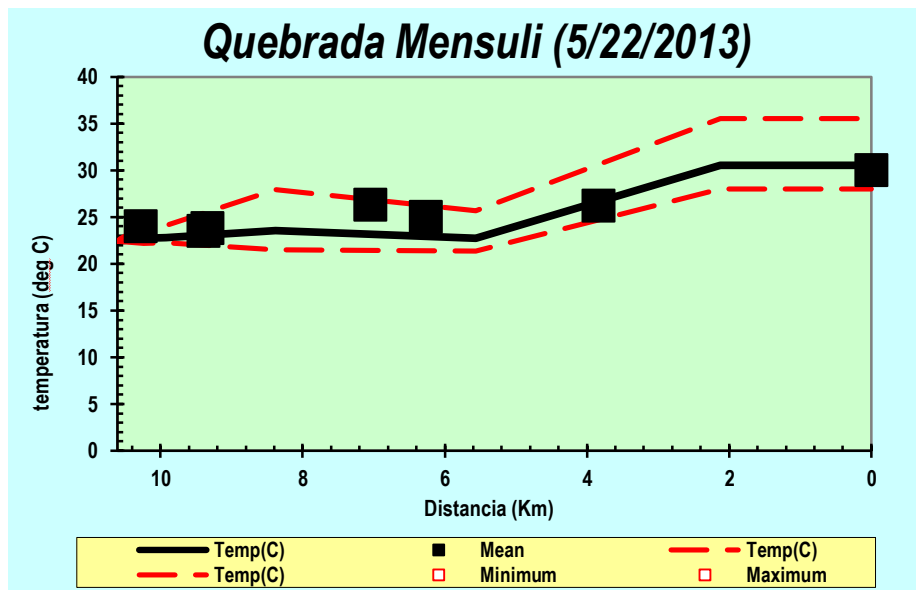
Dentro de los tres parámetros hidráulicos, los resultados del caudal indicaron el mejor ajuste entre los tres, al adicionar las cargas dispersas existentes en la zona de estudio. Se observan cambios importantes de caudal en el cuerpo de agua, por

lo que el aporte de la carga contaminante por el componente de flujo es significativo.

La velocidad y profundidad tuvieron un buen ajuste, sin embargo al ser estimadas de acuerdo a la batimetría, se presentan una serie de variaciones aunque no significativas. Por ello, es importante destacar la importancia de la toma de datos y caracterización de la cuenca en estudio, ya que es fundamental para la obtención de resultados confiables y coherentes con la realidad, pues dichos parámetros juegan un papel importante en los balances de masas y determinación de las tasas de reacción de los determinantes.

La temperatura fue el siguiente parámetro a ser calibrado, considerando que los otros procesos simulados como la degradación de la materia orgánica y el cambio del oxígeno disuelto están influenciados por dicho parámetro. En la figura presenta se incluye la curva de calibración obtenido para este parámetro, donde se obtiene un buen ajuste teniendo en cuenta que la mayor parte de las temperaturas de las descargas puntuales debieron asumirse como agua residual típica.

**Figura 27** Curva de Calibración de Temperatura.



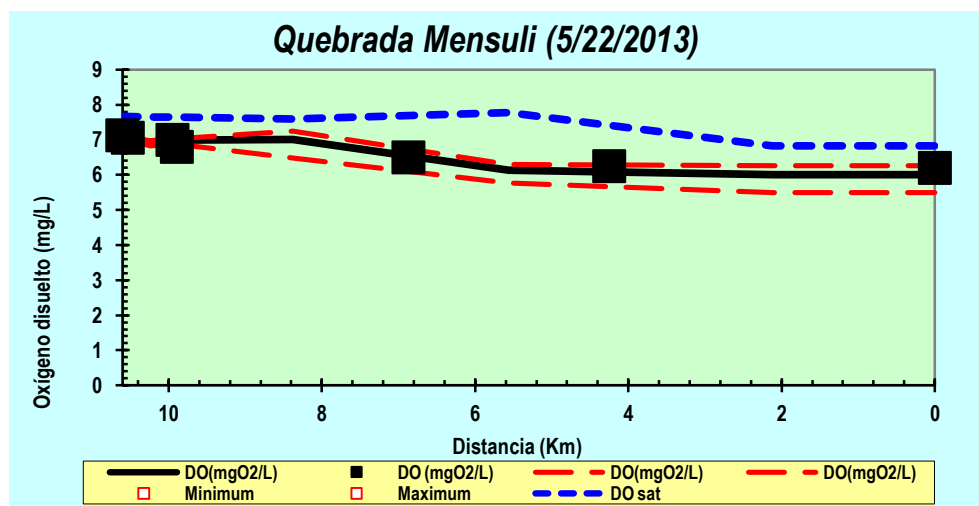
Las condiciones de las descargas afectan el delta de temperatura en el tramo, ya que como se puede observar entre los puntos aguas arriba y aguas abajo, el incremento de temperatura fue 8 grados, lo cual ratifica parte del diagnóstico donde se identificó un incremento significativo a la altura del km 7.

Los parámetros oxígeno disuelto y contenido de materia orgánica representada por la  $DBO_{FAST}$ , se vieron representados de manera eficiente durante el proceso de calibración, partiendo del análisis preliminar de calidad de agua donde se presentan indicios de contaminación generados por los diversos vertimientos de tipo doméstico no contabilizados por la autoridad ambiental, al igual que descargas significativas de agua lluvia y aporte de tributarios.

Se destaca que las características geomorfológicas de la cuenca, pueden influir en la reaeración, lo cual acelera los procesos de degradación de materia orgánica y contribuye a la autopurificación del cuerpo de agua. Sin embargo, durante el proceso de calibración se detectó un reporte de tipo industrial poco confiable en términos de carga, el cual generada un ajuste poco confiable en el caso de la  $DBO_{FAST}$ , por ello fue necesario incrementar la concentración de acuerdo a las características presumibles para dicho vertimiento, obteniéndose un mejor ajuste ya que con los datos reportados por la autoridad ambiental el modelo no simula la condición.

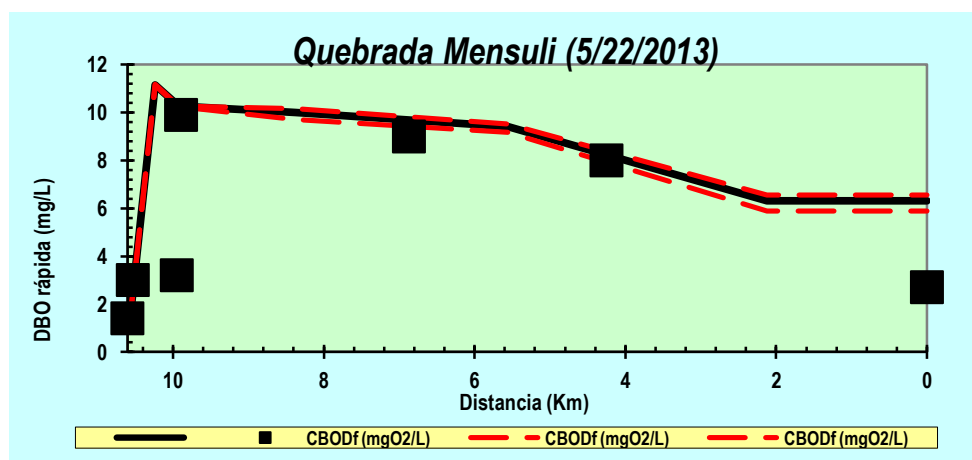
La afirmación realizada es soportada dentro del diagnóstico tanto como parte del recorrido como del análisis estadístico.

**Figura 28** Curva de calibración de oxígeno disuelto.



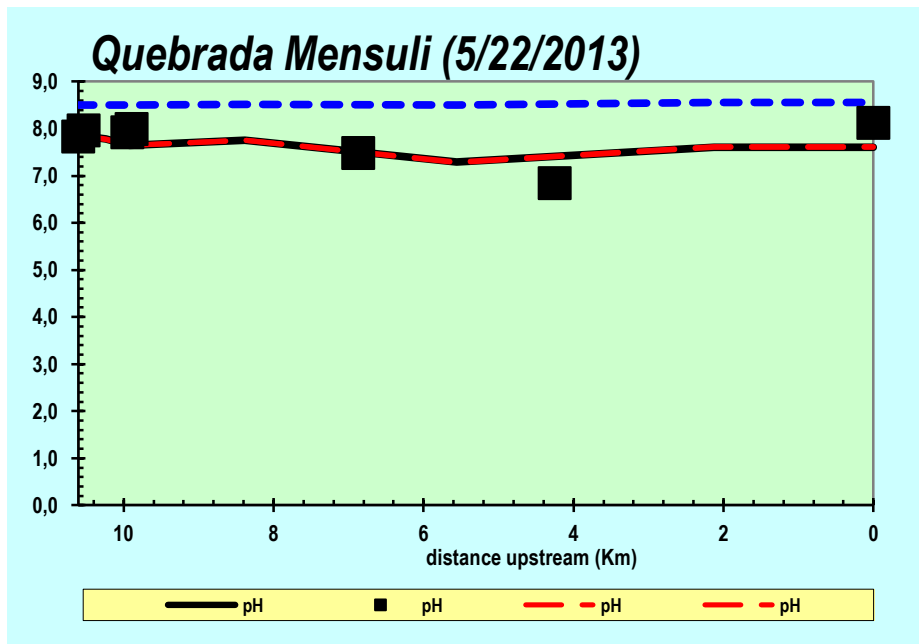
En la figura se presentan los resultados de la simulación para la DBO<sub>5</sub>, siendo el parámetro que más dificultades presenta para ser simulado, posiblemente por el reporte de información suministrada por los generadores o en menor medida por tratarse de un bioensayo donde son muchos los factores que afectan la medición como por ejemplo la relación de la materia orgánica soluble a la suspendida, los sólidos sedimentables y los flotables, la presencia de hierro en su forma oxidada o reducida, la presencia de compuestos azufrados, entre otros.

**Figura 29** Curva de calibración de DBO<sub>FAST</sub>



Según los resultados de la calibración es posible afirmar que las concentraciones de DBO<sub>5</sub> en la mayor parte del recorrido del tramo superan el rango de 3mg/L, siendo indicativo de una afectación significativa en términos de disponibilidad de oxígeno para los organismos vivos.

Figura 30 Curva de calibración de pH



En la figura 30, puede observarse el comportamiento del pH sobre el cual las descargas no generan efectos adversos, pues los valores aguas abajo no sufren cambios significativos que generen un incumplimiento normativo o cambios drásticos que afecten la biota acuática, al registrarse valores menores al rango establecido por el Decreto 1594 de 1984 (5.52 Unidades de pH). A pesar de ello, se considera conveniente estudiar el comportamiento de los factores bióticos de la quebrada, relacionándolo con la calidad del agua en el tramo evaluada mediante este estudio.

La tabla a continuación, incluye la recopilación de los datos ingresados al modelo para la calibración y los que logra predecir el modelo. Es así como puede identificarse una afectación significativa en términos de contaminación por materia orgánica en los puntos MS-02 y AZ-07, tramo a lo largo del cual se localizan una industria y una sede recreacional con descargas significativas e igualmente 8 descargas domésticas sin tratamiento alguno.

**Tabla 30** Datos generados por la calibración

	<b>Distance km</b>	<b>DO (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>DO(mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>CBODf (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>CBODf (mgO<sub>2</sub>/L)</b>
<b>Headwater</b>			7.04		1.30
<b>MS-05</b>	10.60	7.13	7.04	1.40	1.41
<b>MS-04A</b>	10.53	7.06	6.93	3.00	11.16
<b>MS-02A</b>	9.95	7.00	6.99	3.20	10.26
<b>MS-02</b>	9.89	6.80	7.01	9.90	10.01
<b>AZ-07</b>	6.87	6.50	6.13	9.00	9.41
<b>AZ-04</b>	4.25	6.25	6.00	8.00	6.32
<b>Terminus</b>	0.00	6.20	6.00	2.70	6.32

No obstante las limitaciones de información se logró un buen ajuste entre los valores medidos y los calculados por el modelo en términos de temperatura, demanda biológica de oxígeno y oxígeno disuelto, donde se obtiene la mejor aproximación entre las curvas simuladas y los valores medidos.

### **7.2.1. Resultados de Escenario 1**

El escenario 1 hace referencia a la disminución de las cargas domésticas no controladas, es decir pequeños vertimientos realizados a la quebrada por la población residente en los alrededores, dicha suposición se encuentra soportada en el proyecto del interceptor sanitario Mensuli, mediante el cual podrían eliminarse dichas descargas directas y por ello se procede a identificar su contribución en la cuenca.

En la tabla se incluyen los puntos reportados como descargas domésticas directas, a los cuales se asignó un valor de DBO de 200 mg/l y que para crear el escenario son supuestos como 0.

**Tabla 31** Base de datos descargas puntuales no controladas

		Point	Temperature	Specific Conductance	ISS	DBO	Fast CBOD	Alkalinity	pH
Name	Location (km)	m3/s	°C	umhos	mg/L	mg/L	mgO2/L	mgCaCO3/L	s.u.
39	8.846181	0.0001	23.00	100.00	250	0	200	100	7
43	8.661401	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
44	8.661401	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
46	8.633581	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
48	8.491891	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
55	7.352371	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
67	6.5726	0.0001	23.00	100.00	250	0	200	100	7
70.	6.39591	0.0002	23.00	100.00	250	0	200	100	7
71	6.32398	0.0002	23.00	100.00	250	0	200	100	7
72	6.25427	0.0002	23.00	100.00	250	0	200	100	7
75	5.8287	0.0030	23.00	100.00	250	0	420	100	7
76	5.66817	0.0001	23.00	100.00	250	0	420	100	7
79	5.28015	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
80	5.20364	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
81	5.13687	0.0000	23.00	100.00	250	0	200	100	7
82	4.88273	0.0002	23.00	100.00	250	0	200	100	7
83	4.84104	0.0002	23.00	100.00	250	0	200	100	7
84	3.78704	0.0002	23.00	100.00	250	0	200	100	7
86	3.49758	0.0001	23.00	100.00	250	0	200	100	7
91	2.72585	0.0001	23.00	100.00	250	0	200	100	7

Una vez ajustados los valores de DBO para el escenario, se obtienen las curvas de calibración de interés, las cuales se incluyen a continuación, correspondientes a los parámetros oxígeno disuelto y demanda biológica de oxígeno.

Figura 31 Curva de simulación de oxígeno disuelto

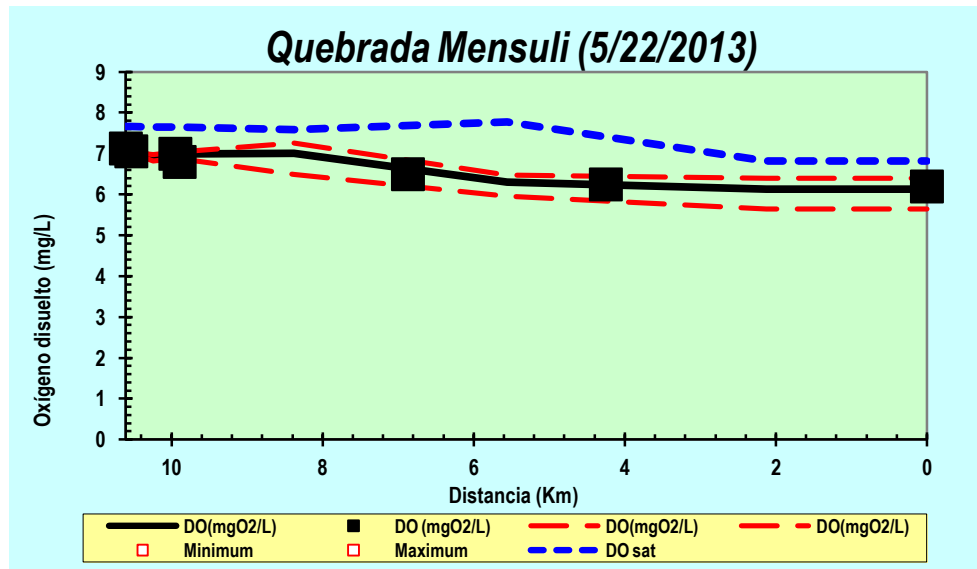
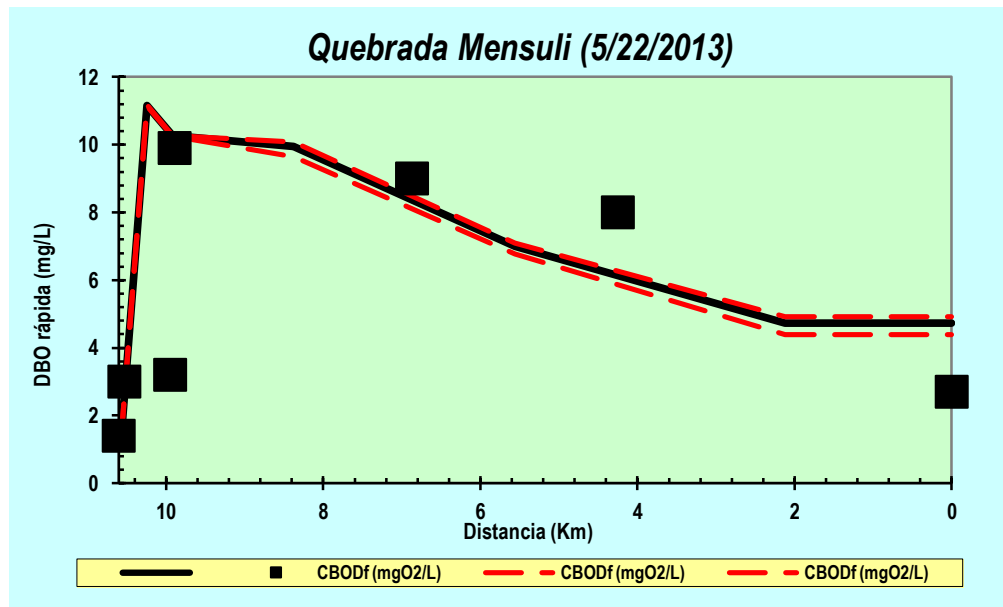


Figura 32 Curva de simulación de la DBO<sub>FAST</sub> (1)



Es posible identificar que los aportes no controlados de tipo doméstico no impactan significativamente en la calidad del agua, aguas arriba del tramo donde

su capacidad de autodepuración es mayor al verter caudales bajos que pueden ser asimilados por la corriente, ello se evidencia en las figuras anteriores y la tabla que se incluye a continuación.

Es de interés el comportamiento generado entre los puntos AZ-07 y AZ-01A, ya que corresponden al tramo final evaluado, donde se observa una contribución positiva en términos de materia orgánica, al obtenerse una disminución progresiva.

Debe señalarse que dicho comportamiento, se debe en gran parte a la presencia de un vertimiento doméstico significativo por ser de gran caudal por la población que lo genera y por no poseer sistema de control alguno. Igualmente, es destacable el aporte realizado por la quebrada La Guayana como aporte tributario, por ello es importante contar con información detallada del diagnóstico de dicha fuente, de manera que pueda gestionarse y contribuir al saneamiento de la quebrada. Lo anterior, es confirmado al analizar el oxígeno disuelto, ya que se evidencia una disminución que representa degradación de la materia orgánica y por ende una mejora en la capacidad de autodepuración de la corriente hídrica.

**Tabla 32** Resultados obtenidos para el escenario

	Distance km	DO (mgO <sub>2</sub> /L)	DO(mgO <sub>2</sub> /L)	CBODf (mgO <sub>2</sub> /L)	CBODf (mgO <sub>2</sub> /L)
Headwater			7.04		1.30
MS-05	10.60	7.13	7.04	1.40	1.41
MS-04A	10.53	7.06	6.93	3.00	11.16
MS-02A	9.95	7.00	6.99	3.20	10.26
MS-02	9.89	6.80	7.01	9.90	9.95
AZ-07	6.87	6.50	6.30	9.00	6.99
AZ-04	4.25	6.25	6.13	8.00	4.74
Terminus	0.00	6.20	6.13	2.70	4.74

## 7.2.2. Resultados de Escenario 2

El escenario 2 hace referencia a la disminución de las cargas procedentes de industrias o establecimientos que cuentan con permiso de vertimientos ante la CDMB, es decir que reportan información anual ante dicho organismo. Bajo dicho criterio, se elabora la tabla 31 donde se incluyen los generadores mencionados, junto con las características físico-químicas incluidas en la simulación.

**Tabla 33** Base de datos descargas establecimientos controlados

		<i>Point</i>	<i>Temperature</i>	<i>Specific Conductance</i>	<i>Inorganic Suspended Solids</i>	<i>Dissolved Oxygen</i>	<i>Fast CBOD</i>	<i>Alkalinity</i>	<i>pH</i>
		<i>Inflow</i>	<i>mean</i>	<i>mean</i>	<i>mean</i>	<i>mean</i>	<i>mean</i>	<i>mean</i>	<i>mean</i>
<i>Name</i>	<i>Location (km)</i>	<i>m3/s</i>	<i>°C</i>	<i>umhos</i>	<i>mg/L</i>	<i>mg/L</i>	<i>mgO2/L</i>	<i>mgCaCO3/L</i>	<i>s.u.</i>
8	11.77	0.0001	23.00	100.00	6.30	0	4.7	100	7
13	10.98866	0.0008	23.00	100.00	18.1	0	15.0	100	7
14A	10.854179	0.0009	23.00	100.00	84.8	0	27.0	100	7
16	10.547809	0.0007	27.00	100.00	4.30	0	26.9	100	7
24	10.064879	0.0084	23.00	100.00	11.72	0	200.0	100	7
33	9.35655	0.0001	23.00	100.00	2.8	0	100.0	100	7
38	8.89	0.00	23.00	100.00	29.59	15	100.00	7.00	8.89
47	8.555641	0.0001	23.00	100.00	100.08	0	216.8	100	7
51	8.286081	0.0003	23.00	100.00	0.2	0	200.0	100	7

Una vez ajustados los valores de DBO para el escenario, se obtienen las curvas de calibración de interés, las cuales se incluyen a continuación, correspondientes a los parámetros oxígeno disuelto y demanda biológica de oxígeno.

Figura 33 Curva de simulación de oxígeno disuelto

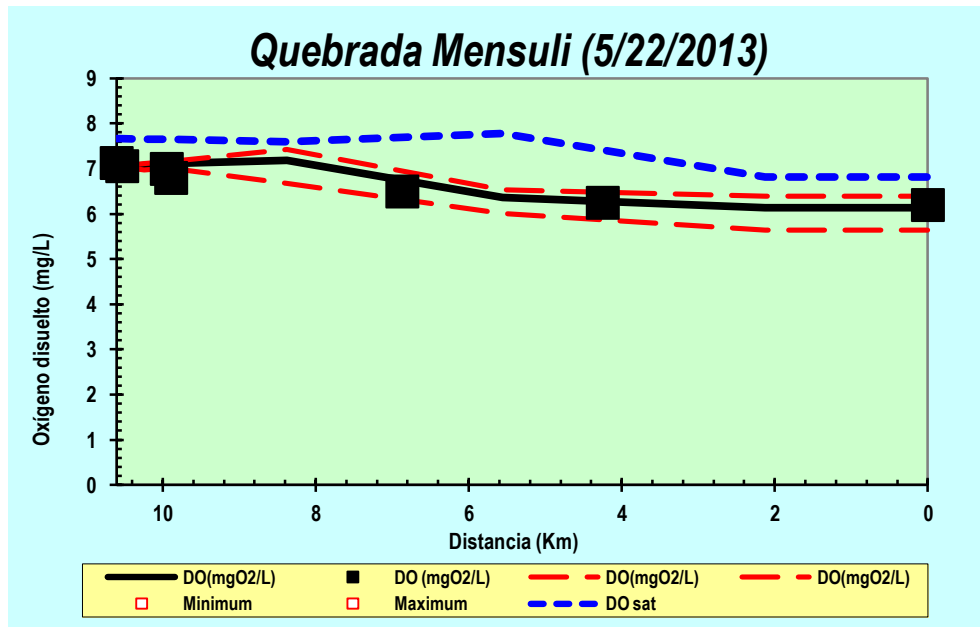
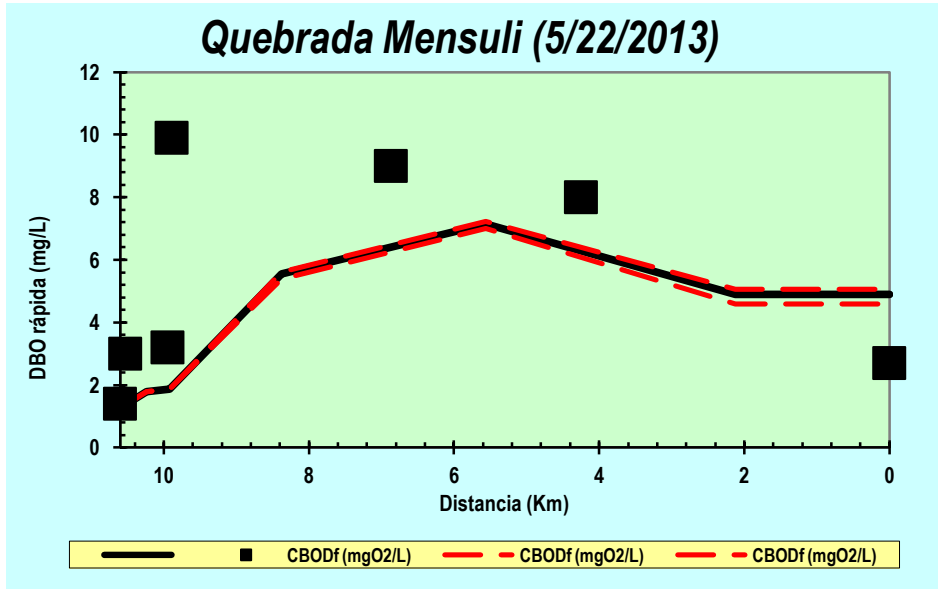


Figura 34 Curva de simulación de la DBO<sub>FAST</sub> (2)



Es posible identificar que los aportes controlados impactan significativamente en la calidad del agua a lo largo del tramo, evidenciándose un incremento en la

capacidad de autodepuración de la corriente con decremento en la DBO tramo a tramo e igualmente un ligero incremento en el oxígeno disuelto disponible. Dicho comportamiento se observa en las figuras de las curvas de calibración, así como en los resultados obtenidos para el escenario presentado en la tabla 34.

**Tabla 34 Resultados obtenidos para el escenario**

	<b>Distance km</b>	<b>DO (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>DO(mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>CBODf (mgO<sub>2</sub>/L)</b>	<b>CBODf (mgO<sub>2</sub>/L)</b>
Headwater			7.04		1.30
MS-05	10.60	7.13	7.04	1.40	1.31
MS-04A	10.53	7.06	7.07	3.00	1.79
MS-02A	9.95	7.00	7.11	3.20	1.87
MS-02	9.89	6.80	7.18	9.90	5.55
AZ-07	6.87	6.50	6.36	9.00	7.15
AZ-04	4.25	6.25	6.14	8.00	4.90
Terminus	0.00	6.20	6.14	2.70	4.90

## 8. CONCLUSIONES

- Durante el diagnóstico del tramo de la microcuenca, se identificaron un total de 104 puntos, el 48% corresponde a aportes de agua lluvia y el 25% a descargas domésticas, reflejándose la ausencia de un colector para las aguas domésticas generadas tanto por establecimientos como por viviendas localizadas a lo largo de la quebrada, localizándose diversos vertidos directos sin control. Se incluyen cada uno con un 8% tanto los aportes tributarios como las extracciones de agua, con un 7% aportes con descargas o aportes desconocidos y un 4% por aportes de aguas residuales industriales, las cuales a pesar de ser el menor porcentaje, generan vertimientos con cargas significativas, lo cual es evidenciado en el recorrido diagnóstico.
- A partir de los perfiles batimétricos elaborados con base en el levantamiento de información de anchos y profundidades de los tramos, se determina que la quebrada posee láminas de agua de poca profundidad, exceptuando tramos donde su profundidad máxima alcanza los 80 cms, y secciones del ancho inundables en periodos de lluvia que no obtuvieron lamina. El ancho de la quebrada es igualmente fluctuante, con un ancho máximo de 9.5 m y un mínimo de 2.4 m. En época de lluvia, la lámina de agua crece significativamente debido a que el ancho promedio de la quebrada es bajo.
- El procesamiento de datos a partir del análisis estadístico, permitió determinar que para los parámetros de calidad del agua contemplados, no hay diferencia entre épocas climáticas, lo opuesto ocurre con el caudal, donde resulta ser validada la afirmación de que existe diferencia en el parámetro según el periodo. Lo anterior, se relaciona con el objeto de

estudio, debido a que para analizar las descargas y extracciones y su influencia en la calidad del agua de la quebrada, lo ideal es contar con campañas de muestreo de duración anual, sin embargo al no ser posible se busca la condición más desfavorable, siendo la época de sequía donde el caudal es más bajo.

- En cuanto a la variación entre los parámetros frente a los 3 puntos históricos, se determinó que para los parámetros turbiedad, nitratos, sólidos suspendidos y alcalinidad no existe variación significativa entre ellos. Sin embargo; los parámetros caudal, nitrógeno total, temperatura del agua, nitrógeno Kjeldahl, temperatura ambiente, conductividad, oxígeno disuelto, demanda biológica de oxígeno, demanda química de oxígeno, fosforo, coliformes total y fecales, sólidos totales, pH, índice de calidad de agua, nitrógeno amoniacal, y nitritos, presentan variación por tanto existe al menos un grupo cuya media es diferente a la media de los demás grupos.
- Los resultados obtenidos en la evaluación cualitativa involucraron los factores fisicoquímico, biológico, procesos y transformaciones y estructural, en cuanto al primer factor, la familia de programas QUAL proporcionó una mayor representatividad en cuanto los parámetros que definen la caracterización de una fuente hídrica. En la evaluación del factor biológico, apuntan nuevamente a la familia de programas QUAL como la más propicia para evaluar este tipo de características en un cuerpo de agua y finalmente, los resultados obtenidos en los factores procesos y transformaciones y estructural, señalan el modelo WASP como el programa con la mejor ubicación para su selección, sin embargo dicho software representa un limitante debido a su no aplicabilidad en el país y por tanto el no empleo por parte de otras Corporaciones Autónomas Regionales, a diferencia de la familia de modelos QUAL.

- Una vez elaborada la matriz de ponderación de los modelos a evaluar, se selecciona como aplicable la familia de modelos QUAL, principalmente debido a los dos criterios de mayor importancia siendo aplicación del software en regiones similares a la que será evaluada y aplicabilidad en las demás Corporaciones Autónomas Regionales, las cuales se constituyen como fundamentales para la CDMB, como entidad para la cual se desarrolla el modelo. Dentro de dicha selección también se destaca por ser un modelo gratuito, que permite modelar gran variedad de parámetros obteniendo una precisión significativa debido a la complejidad del tramo.
- Para realizar la calibración del modelo, se definieron 8 puntos de control desde el nacimiento hasta la desembocadura de la quebrada, descartando el punto de captación del acueducto veredal Alto de Mantilla (MS-08), como consecuencia de las diversas caídas de agua que varían entre 2 metros hasta 25 metros aproximadamente.
- Aunque la calidad de los datos existentes es baja, el ajuste de las curvas de calibración oxígeno disuelto y la demanda biológica de oxígeno es aceptable y consigue reproducir de forma acertada las mediciones de la campaña desarrollada en el 2010 que se han utilizado para modelar y calibrar.
- Dentro de los tres parámetros hidráulicos, los resultados del caudal indicaron el mejor ajuste entre los tres, observándose cambios importantes de caudal en el cuerpo de agua, por lo que el aporte de la carga contaminante por el componente de flujo es significativo. Es importante destacar la toma de datos y caracterización de la cuenca en estudio, siendo fundamental para la obtención de resultados confiables y coherentes con la realidad, constituyéndose el caudal, velocidad y profundidad como

parámetros que juegan un papel importante en los balances de masas y determinación de las tasas de reacción de los determinantes.

- Con el modelo calibrado se realizaron algunas aplicaciones que permitieron estudiar el efecto en la calidad del agua generado por dos posibles planes tendientes al saneamiento de la cuenca, los cuales se consideran deben estudiarse con profundidad por la CDMB como herramienta en la toma de decisiones, resaltándose que si se continúa con los niveles actuales de vertido de cargas orgánicas, debe determinarse su afectación en el tiempo, así como ampliar el alcance e involucrar la microcuenca como tal.
- Al evaluar el escenario en el cual la carga orgánica vertida se reduce al implementar una concentración máxima para los establecimientos con permiso de vertimiento, se observa un comportamiento positivo en términos de contaminación por materia orgánica, mejorando la capacidad de autodepuración de la corriente. En cambio, si solo se regulan las descargas domésticas que se realizan sin tratamiento alguno, la mejora solo es obtenida para el tramo comprendido entre AZ-07 y AZ-01A donde se observa una contribución positiva en términos de materia orgánica.
- El análisis realizado en los escenarios permitió concluir que al realizar esfuerzos individuales en el tratamiento de las aguas residuales domésticas, no se logra generar un impacto significativo en la calidad del agua, sin embargo en el sector industrial dicha situación es contraria, debido a que con metas individuales puede contribuirse directamente con el saneamiento de la quebrada. Lo ideal sería unir esfuerzos en pro del saneamiento de la cuenca, por lo cual se sugiere una gestión integral del recurso hídrico, iniciando con la clara identificación de los generadores y el establecimiento de límites máximos de vertido tanto para vertimientos

actualmente controlados como para los detectados como parte del diagnóstico.

- Se estableció una herramienta de simulación de la quebrada, donde se plantean dos posibles escenarios, bajo los cuales la CDMB puede evaluar el establecimiento de límites y metas de reducción en el tramo evaluado de la microcuenca, realizando variaciones ya sea incrementado porcentajes de remoción de los vertimientos controlados, estableciendo límites máximos en términos de concentración en los parámetros de mayor afectación o controlando aquellos vertidos no controlados realizados de manera directa a la corriente. Es así como el proyecto representa una contribución al estudio del comportamiento de la calidad del agua de la quebrada y al proceso de su modelación como una herramienta de predicción con fines de planificación y control, siendo un primer avance para el conocimiento de la quebrada tanto en el comportamiento hidráulico como en la calidad del agua.

## 9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que en las futuras campañas de muestreo con propósitos de calibración del modelo de calidad del agua se programe un monitoreo continuo durante el día y la noche en la mayoría de las estaciones del tramo en estudio, tanto en la quebrada como en los principales tributarios, con el fin de evaluar en el tiempo el comportamiento de la calidad.
- Con el fin de mejorar la confiabilidad de los resultados de las aplicaciones del modelo de calidad del agua con fines de pronóstico, es necesario seguir avanzando en la optimización del proceso de calibración y verificación del modelo. Así mismo, se recomienda realizar estudios más detallados de los planes para el manejo de las aguas residuales, con el fin de mejorar las bases de datos usadas en las aplicaciones del modelo y poder estimar los límites de confianza asociados con los resultados del modelo de calidad del agua.
- Los resultados del modelo de calidad del agua permitieron establecer no sólo el deterioro de la calidad, sino también la ausencia de programas de saneamiento, la falta de control y vigilancia hacia los vertimientos domésticos e industriales a lo largo del tramo.
- La simulación de la quebrada representa una estrategia de aproximación a realidad, sin embargo se enfrenta a las limitaciones de información disponible para lograr una adecuada representación de un fenómeno como lo es su comportamiento ante los vertimientos de cargas contaminantes.
- La información de la calidad del agua que se encuentra disponible presenta limitaciones en cuanto a que los datos de calidad del agua no siempre se

relacionan con el caudal de la fuente medido en el momento del muestreo, así como el muestreo es enfocado a la caracterización de la calidad del agua y no a la calibración de modelos de calidad y en muchos casos no se miden todos los parámetros o no se registra el dato. Adicionalmente, no hay simultaneidad en el muestreo entre la quebrada y sus tributarios, los cuales reciben a su vez descargas significativas.

## BIBLIOGRAFIA

BROWN L. C., TO. O. BARNWELL. The enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUELA2E-UNCAS: documentation and User Manual U. S. Environmental Protection Agency. Athens GA EPA/600/3-87-0074. 1987

CABELLO, V. Modelo semidistribuido de transporte de sustancias en el cauce principal del río Guadalfeo. Master en hidráulica ambiental Universidad de Granada, Cordoba y Málaga. Noviembre 2008.

CAMACHO, L.A., DÍAZGRANADOS, M. Metodología para la obtención de un modelo predictivo de transporte de solutos y de calidad del agua en ríos – Caso Río Bogotá. Seminario Internacional la hidroinformática en la gestión integrada de los recursos hídricos. Cartagena. 2003

CAMACHO, LUIS A. Metodologías de caracterización hidráulica, hidrológica y de autopurificación de ríos de montaña colombianos. 2008

Calibración Y Aplicaciones Del Modelo De Calidad Del Agua Del Río Cauca. Universidad Del Valle. Corporación Autónoma Regional Del Valle Del Cauca. Caracterización Y Modelación Matemática Del Río Cauca -PMC- Fase II. 2004.

CARRERA, J. Methodological Conceptualization of Mathematical Modelling. Math. Comput. Modelling, v. 16, n. 12, pp. 19-26, 1992.

CASTILLO, J. Modelos de calidad de aguas. Disponible en: [https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/C151D/1/material\\_docente/bajar?id\\_material=199644](https://www.u-cursos.cl/ingenieria/2007/2/C151D/1/material_docente/bajar?id_material=199644). 2007

Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga CDMB. Grupo De Planificación Ordenamiento Ambiental Territorial POAT. Plan De Ordenación Y Manejo Ambiental Subcuenca Rio De Oro. Octubre 2007.

Corporación Autónoma Regional Para La Defensa De La Meseta De Bucaramanga CDMB. Grupo De Planificación Ordenamiento Ambiental Territorial POAT. Reporte de 88 establecimientos que contribuyeron con el pago de tasa retributiva para el año 2011.

Contraloría Municipal De Floridablanca. “Sobre El Estado De Los Recursos Naturales Y Del Ambiente”. Informe Ambiental Del Municipio De Floridablanca Vigencia 2011.

DHI \_ Danish Hydraulic Institute. Mike 11. A modelling system for rivers and canal, short description. Guide to getting started. 1999.

DOMINGUEZ, J; BORROTO, J y HERNANDEZ, A. Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río Almendares. Ciudad de La Habana. 2003.

Environmental Protection Agency EPA. Storm Water Management Model (SWMM). [en línea] <http://epa.gov/athens/wwqtsc/html/swmm.html>).

GAMARRA, Y. RESTREPO, R. CAJIGAS, A; Guía de campo de los macroinvertebrados acuáticos de la quebrada Mensulí – Santander – Colombia. Primera edición. Ediciones Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia. 2012

JIMÉNEZ, M. Mutc – Un Modelo De Transporte En Ríos: Aplicación Al Río Sinú. Universidad Nacional De Colombia. 2008

LOZANO, G; PEÑA, E; PEÑA, L; MORALES, H; ZAPATA, M. Selección del modelo de simulación de calidad del agua en el proyecto modelación de corrientes hídricas superficiales en el Departamento del Quindío. Universidad del Quindío, Corporación Autónoma Regional del Quindío, 2003.

LOZANO, G; PEÑA, E; PEÑA, L; MORALES, H; ZAPATA, M. Modelo de Simulación de la calidad del Agua para el río Quindío. Universidad del Quindío, Corporación Autónoma Regional del Quindío, 2003.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Beatriz Uribe Botero. DECRETO 3930 DE 2010. (OCTUBRE 25 DE 2010). Por el cual se reglamenta parcialmente el Título I de la Ley 9 de 1979, así como el Capítulo II del Título VI -Parte III- Libro II del Decreto-ley 2811 de 1974 en cuanto a usos del agua y residuos líquidos y se dictan otras disposiciones.

MIRASSOU, S. La gestión integral de los recursos hídricos: aportes a un desarrollo conceptual para la gobernabilidad del agua, 2009.

MONERRIS, M.M., Marzal, D.P.1999. Modelación de la Calidad del Agua. Universidad Politécnica de Valencia.

MURTHY, D. N. P.; PAGE, N. W.; RODIN, E. T. Mathematical Modelling. Oxford: Pergamon Press, 1990. apud CARRERA, 1992.

Organización de Naciones Unidas ONU, Calidad del agua [en línea] <<http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>>.

ORLOB, G. Mathematical modeling of water quality: Steams, lakes, and reservoirs Universidad de California, Davis, 1983.

PAREDES ARQUIOLA Javier, Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídrico. Valencia, 2004. 368 h. Doctorado, Universidad politécnica de Valencia, Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos Canales y Puertos, Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente.

PAREDES, J. Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídrico. 2004.

PELLETIER, G. CHAPRA, S. TAO, H. 2005. QUAL2Kw - A framework for modeling water quality in streams and rivers using a genetic algorithm for calibration. Environmental Modelling & Software. Environmental Monitoring and Assessment; Vol. 125; 201-217.

RIOS, S. Modelización. Madrid: Alianza. 1995

SALAS, H. Criterios Para Seleccionar Modelos Matemáticos De Calidad De Agua. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente. 1984.

SIERRA RAMIREZ, Carlos Alberto, Calidad del agua - Evaluación y diagnostico -. Primera Edición. Medellin, 2011 p. 457. ISBN 978-958-8692-06-7

STREETER H. W. and E. B. Phelps A study of the pollution and natural purification of the Ohio River, III. Factors concerned in the phenomena of oxidation and reaeration US public Healt Service, Washington 1925 Bulletin 146, 75pp

THOMANN V., MUELLER J, Particles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper & Row, New York, 1987

THOMANN V., MUELLER John, Particles of Surface Water Quality Modeling and Control. Harper & Row, New York, 1987

TORRES, F. Desarrollo y Aplicación de un Índice de Calidad de Agua para ríos en Puerto Rico. Universidad De Puerto Rico. 2009

TRENTO, A. "Reseña sobre modelos unidireccionales de calidad de agua en ríos. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hidráulicas UNL, 2001.

VELEZ, C. GALVIS, A. DUQUE, A Y RESTREPO, G. La modelación matemática en el estudio de calidad del agua del Río Cauca. Antecedentes y perspectivas. Agua 2003. Seminario internacional la hidroinformática en la gestión integrada de los recursos hídricos. 2003

VELEZ, C. GALVIS, A. DUQUE, A Y RESTREPO, G. La modelación en el estudio del Río Cauca. Antecedentes y perspectivas. 2003. Seminario internacional la hidroinformática en la gestión integrada de los recursos hídricos. Cartagena. 2003

3er Informe sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo «El agua en un mundo en constante cambio». WWAP, 2009. Calidad del agua [en línea] <<http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>> [citado en 8 de agosto de 2012]

## ANEXOS

### Anexo A Recolección de datos de campo Georreferenciación

<b>RECOLECCION DE DATOS DE CAMPO</b>		
<b>Punto</b>	<b>Georreferenciación</b>	<b>Tipo de vertimiento (Presumible) o extracción</b>
<b>1</b>	Latitud: 7° 1' 43" N	Captación
	Longitud: 73° 3' 53" W	
<b>2</b>	Latitud: 7° 1' 44" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 3' 55" W	
<b>3</b>	Latitud: 7° 1' 44" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 3' 56" W	
<b>4</b>	Latitud: 7° 1' 45" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 3' 56" W	
<b>5</b>	Latitud: 7° 1' 45" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 3' 59" W	
<b>6</b>	Latitud: 7° 1' 45" N	Captación restaurante Mensuli
	Longitud: 73° 3' 59" W	
<b>7</b>	Latitud: 7° 1' 48" N	Aporte desconocido
	Longitud: 73° 4' 8" W	
<b>8</b>	Latitud: 7° 1' 49" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 9" W	
<b>9</b>	Latitud: 7° 1' 49" N	Aporte por rebose de tanque de almacenamiento
	Longitud: 73° 4' 10" W	
<b>10</b>	Latitud: 7° 1' 54" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 12" W	
<b>11</b>	Latitud: 7° 2' 1" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 17" W	
<b>12</b>	Latitud: 7° 2' 9" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 15" W	
<b>13</b>	Latitud: 7° 2' 9" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 16" W	
<b>14</b>	Latitud: 7° 2' 1" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 17" W	
<b>15</b>	Latitud: 7° 2' 14" N	Aporte Quebrada Palmichala

	Longitud: 73° 4' 18" W	
<b>16 A</b>	Latitud: 7° 2' 15" N	Aporte Agua lluvia UPB
	Longitud: 73° 4' 19" W	
<b>16 B</b>	Latitud: 7° 2' 15" N	Aporte Agua lluvia UPB
	Longitud: 73° 4' 19" W	
<b>16 C</b>	Latitud: 7° 2' 18" N	Aporte Agua lluvia UPB
	Longitud: 73° 4' 23" W	
<b>16 D</b>	Latitud: 7° 2' 20" N	Aporte Agua lluvia UPB
	Longitud: 73° 4' 26" W	
<b>16 E</b>	Latitud: 7° 2' 20" N	Aporte Agua lluvia UPB
	Longitud: 73° 4' 26" W	
<b>16</b>	Latitud: 7° 2' 18,7 N	PTAR UPB - Vertimiento AR doméstica
	Longitud: 73° 4' 25,0 W	
<b>17</b>	Latitud: 7° 2' 20,7 N	Aporte Quebrada
	Longitud: 73° 4' 25,7 W	
<b>18</b>	Latitud: 7° 2' 24,72" N	Tubería (Descarga desconocida)
	Longitud: 73° 4' 25,32" W	
<b>19</b>	Latitud: 7° 2' 24,72" N	Aporte de caño
	Longitud: 73° 4' 25,32" W	
<b>20</b>	Latitud: 7° 2' 28,40" N	Tubería (Aporte agua lluvia por escorrentía)
	Longitud: 73° 4' 29,11" W	
<b>21</b>	Latitud: 7° 2' 27,26" N	Tubería (Aporte agua lluvia por escorrentía)
	Longitud: 73° 4' 30,66" W	
<b>22</b>	Latitud: 7° 2' 28,36" N	Tubería (Aporte agua lluvia por escorrentía)
	Longitud: 73° 4' 30,55" W	
<b>23</b>	Latitud: 7° 2' 27,65" N	Captación Avinsa
	Longitud: 73° 4' 30,84" W	
<b>24</b>	Latitud: 7° 2' 27,65" N	PTAR Avinsa - Vertimiento AR industrial
	Longitud: 73° 4' 30,84" W	
<b>25</b>	Latitud: 7° 2' 29,30" N	Aporte desconocido
	Longitud: 73° 4' 31,78" W	
<b>26</b>	Latitud: 7° 2' 30,94" N	Aporte Quebrada
	Longitud: 73° 4' 33,95" W	
<b>27</b>	Latitud: 7° 2' 29,81" N	Aporte presuntamente agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 36,92" W	
<b>28</b>	Latitud: 7° 2' 31,34" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 39,04" W	

<b>29</b>	Latitud: 7° 2' 35,97" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 35,43" W	
<b>30</b>	Latitud: 7° 2' 37,13" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 34,60" W	
<b>31</b>	Latitud: 7° 2' 37,13" N	Aporte desconocido
	Longitud: 73° 4' 34,60" W	
<b>32</b>	Latitud: 7° 2' 42,10" N	Quebrada
	Longitud: 73° 4' 36,07" W	
<b>33</b>	Latitud: 7° 2' 42,40" N	Vertimiento AR doméstica Comfenalco
	Longitud: 73° 4' 36,22" W	
<b>34</b>	Latitud: 7° 2' 45,18" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 39,01" W	
<b>35</b>	Latitud: 7° 2' 45,61" N	Aporte presuntamente agua lluvia (3)
	Longitud: 73° 4' 39,49" W	
<b>36</b>	Latitud: 7° 2' 52,07" N	Aporte agua lluvia Comfenalco
	Longitud: 73° 4' 40,12" W	
<b>37</b>	Latitud: 7° 2' 52,85" N	Aporte desconocido
	Longitud: 73° 4' 41,88" W	
<b>38</b>	Latitud: 7° 2' 53,23" N	Aporte agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 42,06" W	
<b>39</b>	Latitud: 7° 2' 53,83" N	Agua residual doméstica (2 tubos)
	Longitud: 73° 4' 43,37" W	
<b>40</b>	Latitud: 7° 2' 53,83" N	Aporte agua lluvia (2 tubos)
	Longitud: 73° 4' 43,37" W	
<b>41</b>	Latitud: 7° 2' 56,13" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 41,97" W	
<b>42</b>	Latitud: 7° 2' 54,79" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 4' 43,62" W	
<b>43</b>	Latitud: 7° 2' 55,53" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 44,55" W	
<b>44</b>	Latitud: 7° 2' 55,53" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 44,55" W	
<b>45</b>	Latitud: 7° 2' 55,78" N	Aporte desconocido
	Longitud: 73° 4' 44,35" W	
<b>46</b>	Latitud: 7° 2' 56,07" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 44,35" W	
<b>47</b>	Latitud: 7° 2' 58,64" N	Agua residual doméstica

	Longitud: 73° 4' 45,54" W	
48	Latitud: 7° 2' 56,78" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 46,48" W	
49	Latitud: 7° 2' 58,22" N	Aporte Quebrada
	Longitud: 73° 4' 48,87" W	
50	Latitud: 7° 2' 58,52" N	Aporte Puente
	Longitud: 73° 4' 48,89" W	
51	Latitud: 7° 3' 0,88" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 51,63" W	
52	Latitud: 7° 3' 0,16" N	Aporte agua lluvia (3 tubos)
	Longitud: 73° 4' 52,43" W	
53	Latitud: 7° 3' 6,15" N	Captación
	Longitud: 73° 4' 53,48" W	
54	Latitud: 7° 3' 7,91" N	Aporte agua lluvia (puente)
	Longitud: 73° 4' 54,16" W	
55	Latitud: 7° 3' 26" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 4' 59" W	
56	Latitud: 7° 3' 23" N	Agua residual industrial MAC POLLO
	Longitud: 73° 5' 1" W	
57	Latitud: 7° 3' 22" N	Agua lluvia MAC POLLO
	Longitud: 73° 5' 1" W	
58	Latitud: 7° 3' 22" N	2 tuberías Agua lluvia MAC POLLO
	Longitud: 73° 5' 3" W	
59	Latitud: 7° 3' 22" N	Captación MAC POLLO
	Longitud: 73° 5' 3" W	
60	Latitud: 7° 3' 24" N	Agua de secado de canastas MAC POLLO
	Longitud: 73° 5' 3" W	
61	Latitud: 7° 3' 24" N	Agua lluvia MAC POLLO (canal)
	Longitud: 73° 5' 7" W	
62	Latitud: 7° 3' 24" N	Agua lluvia MAC POLLO (tubería)
	Longitud: 73° 5' 7" W	
63	Latitud: 7° 3' 25" N	Aporte canal
	Longitud: 73° 5' 8" W	
64	Latitud: 7° 3' 28" N	Captación Estación de servicio
	Longitud: 73° 5' 13" W	
65	Latitud: 7° 3' 30" N	Aporte Quebrada
	Longitud: 73° 5' 13" W	

<b>66</b>	Latitud: 7° 3' 30" N	Captación Estación de servicio
	Longitud: 73° 5' 13" W	
<b>67</b>	Latitud: 7° 3' 31" N	Agua residual de estación de servicio
	Longitud: 73° 5' 13" W	
<b>68</b>	Latitud: 7° 3' 32" N	Aporte agua lluvia (canal)
	Longitud: 73° 5' 14" W	
<b>69</b>	Latitud: 7° 3' 32" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 5' 17" W	
<b>70</b>	Latitud: 7° 3' 33" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 5' 17" W	
<b>71</b>	Latitud: 7° 3' 34" N	Agua residual doméstica
	Longitud: 73° 5' 19" W	
<b>72</b>	Latitud: 7° 3' 35" N	Se presume agua residual doméstica pero no se encuentra vertiendo
	Longitud: 73° 5' 21" W	
<b>73</b>	Latitud: 7° 3' 33" N	Aporte Quebrada
	Longitud: 73° 5' 24" W	
<b>74</b>	Latitud: 7° 3' 34" N	Aporte agua lluvia (escaleras)
	Longitud: 73° 5' 27" W	
<b>75</b>	Latitud: 7° 3' 31" N	Aporte agua residual doméstica
	Longitud: 73° 5' 32" W	
<b>76</b>	Latitud: 7° 3' 27" N	Aporte agua residual doméstica (colegio)
	Longitud: 73° 5' 34" W	
<b>77</b>	Latitud: 7° 3' 26" N	Aporte Quebrada
	Longitud: 73° 5' 35" W	
<b>78</b>	Latitud: 7° 3' 29" N	Canal de agua lluvia
	Longitud: 73° 5' 43" W	
<b>79</b>	Latitud: 7° 3' 29" N	Aporte agua residual doméstica
	Longitud: 73° 5' 45" W	
<b>80</b>	Latitud: 7° 3' 30" N	Aporte agua residual doméstica
	Longitud: 73° 5' 47" W	
<b>81</b>	Latitud: 7° 3' 31" N	Aporte agua residual doméstica
	Longitud: 73° 5' 49" W	
<b>82</b>	Latitud: 7° 3' 32" N	Aporte agua residual doméstica (canal escalonado)
	Longitud: 73° 5' 57" W	
<b>83</b>	Latitud: 7° 3' 33" N	Aporte agua residual doméstica (canal escalonado)
	Longitud: 73° 5' 58" W	
<b>84</b>	Latitud: 7° 3' 31" N	Aporte tubería agua residual doméstica

	Longitud: 73° 6' 23" W	
<b>85</b>	Latitud: 7° 3' 34" N	Captación
	Longitud: 73° 6' 29" W	
<b>86</b>	Latitud: 7° 3' 35" N	Aporte agua residual doméstica
	Longitud: 73° 6' 31" W	
<b>87</b>	Latitud: 7° 3' 36" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 6' 33" W	
<b>88</b>	Latitud: 7° 3' 36" N	Canal de aporte
	Longitud: 73° 6' 34" W	
<b>89</b>	Latitud: 7° 3' 36" N	Rebose agua por rebose de lago de Mediterráneo
	Longitud: 73° 6' 35" W	
<b>90</b>	Latitud: 7° 3' 28" N	Aporte desconocido
	Longitud: 73° 6' 36" W	
<b>91</b>	Latitud: 7° 3' 30" N	Canal aguas residuales doméstica (punto de monitoreo CDMB Aranzoque)
	Longitud: 73° 6' 44" W	
<b>92</b>	Latitud: 7° 3' 32" N	Aporte agua lluvia
	Longitud: 73° 6' 48" W	
<b>93</b>	Latitud: 7° 3' 18" N	Aporte canal de agua
	Longitud: 73° 7' 15" W	
<b>94</b>	Latitud: 7° 3' 13" N	Captación bocatoma
	Longitud: 73° 7' 22" W	
<b>95</b>	Latitud: 7° 3' 16" N	Canal de agua lluvia
	Longitud: 73° 7' 42" W	
<b>96</b>	Latitud: 7° 3' 22" N	Descarga agua residual doméstica zona franca
	Longitud: 73° 7' 54" W	
<b>97</b>	Latitud: 7° 3' 22" N	Aporte agua lluvia zona franca
	Longitud: 73° 7' 54" W	
<b>98</b>	Latitud: 7° 3' 22" N	Aporte agua residuales Matadero ecológico
	Longitud: 73° 7' 54" W	

## Anexo B Reporte caracterización punto AZ-01A (2012-2012)

Fecha	06.04 .2010	05.05 .2010	21.07 .2010	09.09 .2010	17.11 .2010	27.04 .2011	25.05 .2011	27.07 .2011	03.08 .2011	21.09 .2011	16.11 .2011	25.06 .2012	26.07 .2012	27.08 .2012	28.09 .2012
Punto	<b>AZ-01A</b>														
OxígenoDisuelto	6.4	6.73	7.22	7.28	7.6	4.36	6.72	6.82	6.83	7.63	6.91	6.84	7.19	7.19	7.37
DemandaQuímicaOxígeno	23	27.7	23.5	29	24	142	26.2	31.8	30.5	22.7	34	22.5	44	44	25.8
DemandaBiológicaOxígeno	2.7	2	2.3	3.2	2.3	55	6	1.6	2.3	1.9	6.5	2.8	4.1	4.1	1.9
NitrógenoTotal	1.87	0.76	0.74												
Fósforo	0.34	0.32	0.44	0.4	0.22	0.56	0.33	0.21	0.22	0.18	0.3	0.22	0.34	0.34	2.21
ColiformesTotales	9200 0	2400 0	2400 00	9200 0	2400 00	2400 000	9200 00	5400 00	1600 000	9200 00	5400 00	1300 00	2200 00	2200 00	9200 0
ColiformesFecales	4000	2400 00	1300 0	5400 0	2400 0	2400 000	7000 0	1300 00	2200 00	1700 00	7900 0	8000	1300 0	1300 0	1800 0
SólidosTotales	212	188	200	204	250	498	240	200	160	194	186	174	192	192	188
Turbiedad	6.87	23.6	4.7	64.7	104	166	56.2	19	21.8	19.3	28.9	1.8	7.72	7.72	7.47
pH	8.26	8.08	8.1	7.86	7.9	7.62	7.29	8.08	7.92	7.85	8.04	8.03	8.2	8.2	7.96
Temperatura Agua	25	26	24.5	23.7	21.5	24.6	25.1	24.7	24.3	24.2	23.2	26.8	26.3	26.3	25
ÍndiceCalidad Agua	68	49	55	49	46	22	50	50	50	51	52	60	57	57	52
Clasificación	Buena	Buena	Buena	Dudosa	Dudosa	Inadecuada	Dudosa	Dudosa	Dudosa	Dudosa	Dudosa	Buena	Buena	Buena	Dudosa
NitrógenoKjeldahl	1.87	0.76	0.74	1.2	1.3	9.01	0.87	0.82	0.97	1.95	1.52	0.85	0.88	0.88	1.04
NitrógenoAmoniacal	0.84	0.1	0.05	0.12	0.32					0.04	0.02	0.2	0.22	0.22	
Nitritos	0.16	0.04	0.05	0.07	0.06	0.14	0.18	0.05	0.02	0.04	0.02	0.18	0.16	0.16	0.17
Nitratos	2.39	0.94	0.97	1.28	0.85	0.35	0.92	0.73	0.52	0.61	0.63	1.26	1.22	1.22	1.33
SólidosSuspendidos	7	22	46	46	88	256	94	54	24	23	48	18	9	9	8.5
Temperatura Ambiente	24	29.5	27	26.7	22.3	27	27.9	27.6	26.8	27.1	27.1	30.4	29.8	29.8	26.8
Conductividad	292	200	184	202	157	234	156	187	180	174	185	206	221	221	232
Caudal															
Alcalinidad										60.7	70.2				

### Anexo C Reporte caracterización puntos AZ-07 y MS-05 (2012-2012)

Fecha	10.03.2010	07.04.2010	16.08.2012	11.09.2012	03.03.2010	07.04.2010	06.05.2010	22.07.2010	16.09.2010	11.11.2010	28.04.2011	07.06.2011	26.07.2011	18.08.2011	22.09.2011	10.11.2011	19.06.2012	04.07.2012	16.08.2012	11.09.2012	
Punto	AZ-07				MS-05																
Oxígeno Disuelto	5.47	6.93	4.5	5.06	5.37	5.61	6.32	7.3	7.06	7.6	7	7.26	7.21	7.08	6.91	6.98	7.25	7.26	7.53	7.11	
Demanda Química Oxígeno	32.4	41.4	73.3	48	15.7	15.7	15.7	17.8	26.9	17.2	21.8	24.3	15.7	24.8	27.6	17.9	15.7	15.7	17.6	15.7	
Demanda Biológica Oxígeno	8.6	8.2	27	9.5	2	2.1	1.6	1.3	9.8	1.3	1.5	1.3	1.3	1.7	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	
Nitrógeno Total																					
Fósforo	0.69	0.88	0.72	0.49	0.2	0.28	0.15	0.12	0.1	0.09	0.13	0.16	0.1	0.15	0.2	0.11	0.32	0.13	0.07	0.11	
Coliformes Totales	920000	160000	160000	240000	160000	240000	920000	160000	240000	790000	240000	160000	920000	240000	920000	280000	920000	920000	170000	160000	
Coliformes Fecales	130000	240000	920000	160000	790000	490000	220000	350000	540000	490000	110000	350000	540000	170000	170000	790000	170000	540000	110000	130000	
Sólidos Totales	240	270	226	229	146	150	144	153	156	220	222	234	222	275	234	210	150	150	120	158	
Turbiedad	20.6	25.5	20.1	10.2	4.11	4.75	8.89	27.5	13.7	98.5	66.4	96.4	26	103	89.6	59.4	12	7.6	4.3	6.67	
pH	7.91	8.15	7.49	7.73				7.74	7.84	7.71	7.73	7.67	7.98	7.91	8.03	7.35	7.8	8.14	8.16	8.26	
Temperatura Agua	25	27	26.3	26	25	26	23	21	21.5	19.9	20.8	21.7	21.4	21.4	22.7	21.3	22.9	23.6	23.6	25.7	
Índice Calidad Agua	46	45	33	45	61	63	58	56	55	57	56	50	54	47	52	58	58	56	63	61	
Clasificación	Dudosa	Dudosa	Inadecuada	Dudosa	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Dudosa	Buena	Dudosa	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	
Nitrógeno Kjeldahl	2.01		6.78	7.24	0.74	1.01	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.74	0.9	0.74	0.74	0.88	0.74	0.74	0.74	
Nitrógeno Amoniacal		3.28	3.28			0.05	0.11	0.09	0.08	0.05							0.23	0.03	0.12		
Nitritos	0.68	0.46	0.09	0.09	0.01	0.02	0.02	0.13	0.01	0	0.1	0	0.01	0.01	0	0	0.09	0.01	0.01	0.01	
Nitratos	1.1	0.62	0.31	0.36	0.42	0.34	0.41	0.37	0.35	0.84	0.6	0.83	0.82	0.71	0.65	0.69	1.2	0.73	0.55	0.55	
Sólidos Suspensos	44	36	40	23	4.8	5.6	5.6	12	14.8	66	83	108	33	138	108	80	14.5	11	4.8	11.5	
Temperatura Ambiente	27	30	32.5	30.3	28	29	27	25	24.6	24.6	22.5	25.6	25.9	24.7	27.7	24.9	28.9	29.9	27.9	30.6	
Conductividad	320	341	263	293				128	128	86.5	113	95.9	116	112	112	108	130	131	125	146	
Caudal																					
Alcalinidad																				56.3	

Anexo D Registro de campo batimetría

1	Ancho ( m )	0	1	1.4	1.8	2.2	2.4	2.8					
	Profundidad ( cm )	0	0	-5	-6	-10	-9	0					
	N	07° 145'			W	73° 347'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>1032</b>				
2	Ancho ( m )	0	0.4	0.8	1.2	1.6	2.4						
	Profundidad	0	0	-12	-8	-7	0						
	N	07° 145'			W	73° 360'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>984</b>				
3	Ancho ( m )	0	0.5	1	2	3	3.3						
	Profundidad	0	0	-13	-8	-2	0						
	N	07° 149'			W	73° 412'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>1005</b>				
4	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5						
	Profundidad	0	0	-12	12	13	0						
	N	07° 159'			W	73° 414'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>989</b>				
5	Ancho ( m )	0	1	2	3	3.3							
	Profundidad	-10	-10	-5	-3	0							
	N	07° 159'			W	73° 414'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>972</b>				
6	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	6	6.35				
	Profundidad	-10	0	-8	-20	-15	-28	-12	0				
	N	07° 02' 26.9"			W	73° 04' 33.8"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>990</b>				
7	Ancho ( m )	0	1	1.4	2	3	4	5	6	7	8	9	
	Profundidad	0	-10	0	-10	-11	-14	-22	-5	0	-2	0	
	N	07° 02' 31.4"			W	73° 04' 38.6"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>976</b>				
8	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	5.5	6	7	8	9	9.5
	Profundidad	0	-10	-13	-22	-10	-5	0	-8	-8	-20	-10	0
	N	07° 02' 37.4"			W	73° 34' 42.0"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>961</b>				
9	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	6	7	8			
	Profundidad	0	-10	-15	-8	-8	-8	-8	-10	0			
	N	07° 02' 44.7"			W	73° 04' 0.97"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								<b>956</b>				
10	Ancho ( m )	0	1	2	3	3.8							
	Profundidad	0	-25	-24	-28	0							

	N	07° 02' 52.7"	W	73° 04' 48.4"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								949		
11	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	6			
	Profundidad	0	-8	-12	-12	-15	-35	0			
	N	07° 03' 03.5"	W	73° 04' 54.4"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								939		
12	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	6	7		
	Profundidad	0	0	-5	-18	-35	-35	-10	0		
	N	07° 03' 03.5"	W	73° 04' 54.4"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								945		
13	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	4.5	5	6		
	Profundidad	0	-80	-80	-70	-20	-0.5	-10	-8		
	N	07° 03' 03.5"	W	73° 04' 54.4"							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								928		
14	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	5.04	6		
	Profundidad	0	0	0	-8	-9	-15	-10	0		
	N	07° 318'	W	73° 456'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								936		
15	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	6	7	7.5	
	Profundidad	0	-10	-16	-12	-12	-24	-8	0	0	
	N	07° 325'	W	73° 51'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								952		
16	Ancho ( m )	0	1	2	3	3.8					
	Profundidad	-5	-18	-25	-4	0					
	N	07° 324'	W	73° 56'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								911		
17	Ancho ( m )	0	0.4	0.8	1.2	2.2	3	4	4.4		
	Profundidad	0	-18	-28	-10	-18	-12	-8	0		
	N	07° 330'	W	73° 513'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								906		
18	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	4.8				
	Profundidad	-30	-15	-9	-8	-18	0				
	N	07° 330'	W	73° 513'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								896		
19	Ancho ( m )	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8.6
	Profundidad	0	-12	-18	-12	-10	-8	-10	-18	-20	-40
	N	07° 330'	W	73° 533'							
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>								866		
20	Ancho ( m )	0	0.4	1.4	2	3	4	5	6	6.3	
	Profundidad	-40	-40	-23	-14	-10	-8	-6	-6	-8	

	<b>N</b>	07° 330'	<b>W</b>	73° 545'								
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>							846				
21	<b>Ancho ( m )</b>	0	1	2	3	4	4.5	5				
	<b>Profundidad</b>	0	-13	-17	-18	-18	-10	0				
	<b>N</b>	07° 329'	<b>W</b>	76° 618'								
	<b>ALTURA SOBRE EL NIVEL DEL MAR</b>							844				
22	<b>Ancho ( m )</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8.5	8.9
	<b>Profundidad</b>	0	-1	-3	-9	-9	-8	-9	-12	-18	-22	0
	<b>N</b>	07° 329'	<b>W</b>	76° 618'								
								820				
23	<b>Ancho ( m )</b>	0	1	2	3	4	5	6	7			
	<b>Profundidad</b>	0	-17	-18	-19	-21	-20	-9	0			
	<b>N</b>	07° 331'	<b>W</b>	73° 634'								
								811				
24	<b>Ancho ( m )</b>	0	1	2	3	4	5					
	<b>Profundidad</b>	0	-22	-18	-8	-2	0					
	<b>N</b>	07° 331'	<b>W</b>	73° 645'								
								790				
25	<b>Ancho ( m )</b>	0	1	2	3	4	5	6	7	8	8.35	
	<b>Profundidad</b>	0	0	-9	-15	-16	-13	-8	-18	-12	0	
	<b>N</b>	07° 326	<b>W</b>	73° 78'								
								799				

## Anexo E Resultados de los puntos de muestreo de la Quebrada Mensulí

PARÁMETRO	PUNTOS DE MUESTREO QUEBRADA MENSULI																				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	MS-08	MS-06	MS-05	PR-01	MS-04A	MD-01	MS-04	PM-01	MS-03	RQ-01	MS-02A	MS-02	CAL-L-01 (Canal aguas lluvias)	GY-01	AG-01	CD-01	AZ-07	RD-01	AZ-06	AZ-04	AZ-1A
<b>MEDICIONES "IN SITU"</b>																					
Caudal (l/s)	6,2	142,7	59,9	57,3	159,4	18,2	131,9	18,1	211,4	19,4	218,8	225,5	2	104,9	23,6	21	428,2	223	544	558,4	468,4
pH (unidades de pH)								8,08	7,94	7,31				7,62	7,68			7,87	7,87	7,72	8,12
Temperatura del agua (°C)	16,5	19,7	21,4	23,6	22,8	23,6	23,2	21,4	21,4	22	21,8	22,4	22,1	22	22,6	25,4	24,2	23	22	22,6	24,6
Temperatura Ambiente (°C)	17,9	21,7	24,5	25,8	26,1	30,8	24,1	22,5	23,9	23,9	24,3	23,8	27,8	25,9	28,3	27,1	27,3	25,5	25	26,2	27,7
Altura (m)	187,1	102,6	101,3	1008	994	989	976	938	968	973	974	968	961	953	951	943	938	932	899	832	763
<b>LABORATORIO (análisis físico, químico y microbiológico)</b>																					
pH (unidades de pH)	7,29	7,88	7,83	8,01	7,96	7,97	7,96	8,08	7,94	7,31	7,89	7,67	7,2	7,62	7,68	7,57	7,82	7,87	7,87	7,72	8,12
Conductividad	43,5	95,6	108	160	134	230	143	201	138	40	134	154	48	152	181	244	168	267	144	138	173
Turbiedad	8,9	105	77	168	403	13,1	37,2	25,9	54,4	30,8	48,4	49,1	41,9	48,2	43,6	8,23	32,8	4,89	713	1065	225
OD	7,32	7,37	7,13	6,77	7,06	6,48	6,82	7,15	7,11	6,92	6,9	6,54	6,23	6,94	6,39	6	6,68	6,6	6,8	5,68	7,02
DQO	<15,7	26,6	25,3	24,9	19,9	<15,7	24,2	20,3	20	18,7	20,3	44	55,6	<15,7	35,6	<15,7	29,3	18,3	77	82,9	21,1
DBO5	1,3	1,3	1,4	5,7	3	1,3	4	1,3	1,5	2,6	1,6	9,9	19	1,6	8,3	1,4	5	1,3	7,4	6,6	1,7
Nitrógeno total Kjeldahl	<0,74	1,03	0,96	1,1	1,01	<0,74	<0,74	<0,74	<0,74	<0,74	1,07	2,69	4,18	0,81	6,93	<0,74	1,8	98	2,7	3,01	0,82
Nitrógeno amoniacal	0,04	0,04	0,07	0,24	0,11	0,06	0,13	<0,03	0,13	0,19	0,12	0,34	0,54	0,17	4,38	0,12	0,57	0,04	0,28	0,15	0,08
Nitritos	<0,003	<0,003	0,006	0,092	0,042	0,036	0,043	<0,003	0,047	0,009	0,049	0,052	0,008	0,021	0,3	0,096	0,114	0,018	0,095	0,074	0,085
Nitratos	1,11	0,88	0,76	0,62	0,66	1,45	0,92	0,48	0,59	0,32	0,7	0,61	0,25	0,82	1,35	0,6	0,66	1,92	0,8	0,73	0,98
Fósforo Total	<0,06	0,2	0,14	0,28	0,16	0,12	0,29	0,11	0,19	0,12	0,26	0,24	0,71	0,26	2,2	0,09	0,34	0,17	0,5	0,58	0,27
Sólidos totales	96	238	210	145	164	182	160	174	174	66	178	186	106	218	170	178	164	190	809	1052	164
Sólidos Suspendidos	28	104	88	6	36	4	34	25	46	16	45	48	42	79	45	6	37	5,6	635	750	21
Coliformes totales	1700	16000	110000	>=240000	160000	54000	>=240000	160000	>=240000	160000	>=240000	>=240000	160000	220000	>=240000	920000	540000	>=240000	240000	350000	1600000
Coliformes fecales	130	700	2000	92000	230000	240000	540000	49000	920000	540000	350000	5400000	3500000	7900000	9400000	3500000	1600000	2400000	17000000	14000000	
Ortofosfatos	0,03	0,15		0,18	0,14		0,2	0,1			0,19	0,23		0,21			0,27		0,25	0,26	0,22
Dureza	9,3	27		51,8	41,2		43	65,4			43,7	42,8		44,2			47,4		52,2	55,4	50,2
Cloruros	0,27	1,86		5,83	3,31		4,24	8,22			2,12	11,4		3,45			9,4		7,69	6,36	7,69
Alcalinidad	79,8	50		60,4	72,9		81,2	78,6			53	49,6		60,8			57,1		56	53,5	62,4
Grasas y Aceites			<5,0		6,4		5,1		5,3		<5,0	5,6	5,6		<5,0		5,7		<5,0		<5,0
ICA (cuantificado)	79	56	61	53	55	56	52	63	51	54	53	51	37	51	43	55	49	38	36,7	36	50
ICA (cualificado)	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Buena	Dudosa	Buena	Buena	Dudosa	Dudosa	Dudosa	Dudosa	Buena	Dudosa	Dudosa	Dudosa	Inadecuada	Dudosa