

**INTERACCIÓN DEL RÍO BOTELLO CON EL ACUÍFERO DE FACATATIVÁ,  
MEDIANTE EL USO DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y  
TÉCNICAS HIDROGEOQUÍMICAS.**

**WILLIAM ANDRÉS CASTAÑEDA CELEITA**

**RICARDO JIMENEZ RONDEROS**

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**BOGOTÁ D.C.**

**2018**

**DETERMINAR LA INTERACCIÓN DEL RÍO BOTELLO CON EL ACUÍFERO DE  
FACATATIVÁ, MEDIANTE EL USO DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO  
CONCEPTUAL Y TÉCNICAS HIDROGEOQUÍMICAS.**

**WILLIAM ANDRÉS CASTAÑEDA CELEITA**

Ingeniero en Recursos Hídricos y Gestión Ambiental

**RICARDO JIMENEZ RONDEROS**

Ingeniero Ambiental y Sanitario

Trabajo presentado como requisito para optar al título de  
**Magister en Ciencias Ambientales**

**Director:**

**CESAR OCTAVIO RODRIGUEZ NAVARRETE**

Hidrogeólogo, MSc, PhD, Esp

**UNIVERSIDAD DE BOGOTÁ JORGE TADEO LOZANO  
FACULTAD DE CIENCIAS NATURALES E INGENIERÍA  
MAESTRÍA EN CIENCIAS AMBIENTALES**

**BOGOTÁ D.C.**

**2018**

## Contenido

INDICE DE TABLAS .....	4
Índice de ilustraciones.....	4
INDICE DE ANEXOS .....	5
RESUMEN .....	6
1. INTRODUCCION.....	7
2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN .....	10
3. JUSTIFICACIÓN .....	13
4. MARCO REFERENCIAL .....	14
4.1 MARCO CONCEPTUAL.....	14
4.2 MARCO TEORICO.....	16
4.2.1 Hidrogeología.....	17
4.2.2 Balance hídrico .....	19
4.2.3 RED DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	23
4.2.4 HIDROGEOQUIMICA .....	24
4.2.5 CALIDAD DEL AGUA .....	28
5. HIPÓTESIS.....	32
6. OBJETIVOS.....	33
7. MATERIALES Y MÉTODOS.....	33
7.1 Descripción del área.....	34
7.2 ALCANCE Y MÉTODO.....	35
8. DESARROLLO DE TRABAJO.....	37
8.1 GEOLOGÍA.....	37
8.1.1 ESTRATIGRAFÍA .....	38
8.1.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL .....	46
8.1.3 GEOMORFOLOGIA.....	49
8.2 HIDROGEOLOGÍA.....	50
8.2.1 RED DE FLUJO.....	59
8.2.2 EVALUACION HIDROGEOQUIMICA .....	61

8.3 HIDROLOGÍA .....	66
8.4 EVALUACION FISICOQUIMICA Y BACTERIOLÓGICA.....	85
8.4.1 HISTOGRAMAS DE CALIDAD DE AGUA .....	85
8.4.2 ANALISIS DE CALIDAD DE AGUA SUPERFICIAL Vs. AGUA SUBTERRANEA .....	96
8.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	101

#### INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estratigrafía de Facatativá.....	38
Tabla 2. Niveles estáticos fuentes subterráneas.....	60
Tabla 3. Relación de pozos municipio de Facatativá .....	62
Tabla 4. Caracterización hidrogeoquímica de pozos en Facatativá.....	63
Tabla 5. Estaciones Hidroclimáticas seleccionadas .....	68
Tabla 6. Precipitación mensual multianual por estación y su promedio .....	70
Tabla 7. Evapotranspiración mensual multianual estación Venecia .....	72
Tabla 8. Variables para realizar el balance Hídrico .....	74
Tabla 9 . Conversión de unidades. Caudal (m <sup>3</sup> /s) a Escorrentía (mm). .....	75
Tabla 10. Déficit y/o exceso mediante la relación evapotranspiración y la precipitación ...	76
Tabla 11. Balance hidroclimático .....	78
Tabla 12. Estaciones Limnimétricas seleccionadas .....	80
Tabla 13 . Caudales medios mensuales multianuales por estación limnimétrica .....	81
Tabla 14. Balance hidrológico mensual multianual periodo 1991 -2014 .....	83
Tabla 15. Consolidado balance hídrico anual multianual.....	84
Tabla 16. Calidad del agua de pozos y río Botello.....	96

#### ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1. Distribución de los recursos hídricos globales.....	16
Ilustración 2. Esquema de Balance Hídrico global en el ciclo hidrológico .....	19
Ilustración 3. Red de flujo subterránea .....	23
Ilustración 4. Diagramas típicos de Stiff.....	26
Ilustración 5. Esquema de diagrama de Piper. ....	27
Ilustración 6. Casos típicos de agua según Piper. ....	27
Ilustración 7. Columna estratigráfica sección Subachoque - Pacho .....	41
Ilustración 8. Principales rasgos de estructurales de Facatativá .....	47
Ilustración 9. Perfiles Hidrogeológicos de Facatativá .....	58
Ilustración 10. Perfil topográfico acuífero de Facatativá .....	<b>¡Error! Marcador no definido.</b>

Ilustración 11. Clasificación de las aguas subterráneas acuífero de Facatativá .....	66
Ilustración 12. Precipitación mensual promedio en las estaciones: Venecia, la Tribuna y El Tesoro. ....	70
Ilustración 13. Histograma precipitación media mensual multianual (mm) .....	71
Ilustración 14. Histograma evaporación media mensual .....	73
Ilustración 15. Distribución temporal Balance Evaporación – Precipitación .....	77
Ilustración 16. Histograma de Déficit vs exceso.....	77
Ilustración 17. Balance Hídrico climático microcuenca del río Botello – periodo 1991 -2014 .....	79
Ilustración 18. Histograma de caudales medios mensuales multianuales periodo 1991 - 2014.....	81
Ilustración 19. Comparación estimada de las variables de caudal, precipitación, evapotranspiración e infiltración periodo 1992 - 2014.....	83

#### INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Plancha No. 1 Geología de Facatativá.	
Anexo 2. Plancha No. 2 Hidrogeología Subcuenca río Botello	
Anexo 3. Plancha No. 3 Red de flujo acuífero de Facatativá	
Anexo 4. Plancha No. 4 Zonas de interés hidrogeológico de Facatativá	
Anexo 5. Plancha No. 5 Distribución espacial y composición química del acuífero de Facatativá	
Anexo 6 Plancha No. 6 Hidrografía de Facatativá	
Anexo 7. Plancha No. 7 Estaciones hidroclimatológicas	

## RESUMEN

En el presente estudio, se llevó a cabo una caracterización hidrogeoquímica de las aguas superficiales y subterráneas de la parte baja del río Botello en el municipio de Facatativá, estableciendo el grado de interacción entre estas; así como los procesos geoquímicos que explican la composición química del agua que se encuentra en el acuífero. Mediante el análisis de información geológica (estratigrafía y litología) de la zona de estudio se encontraron depósitos cuaternarios, rocas del grupo Guadalupe y del sistema Cuaternario los cuales forman los acuíferos de los que actualmente se está captando el agua para el acueducto de Facatativá mediante pozos profundos. También se confirmó que la recarga ocurre directamente a través del agua lluvia y del agua superficial infiltrada en sus áreas de afloramiento del acuífero de la arenisca dura (Ksgd) y de labor y tierna (Ksglt).

Se analizaron los resultados de las pruebas fisicoquímicas y bacteriológicas realizadas por la Empresa Aguas de Facatativá SAS ESP entre el 2010- 2014 y una del año 2018 a los 7 pozos que abastecen al municipio, encontrando que no hay influencia de la contaminación del río Botello hacia los pozos.

Mediante los métodos de Stiff y Piper se diferenciaron dos acuíferos, predominando aguas de naturaleza bicarbonatada, que corresponden a aguas situadas en zonas de proximidad a áreas de recarga.

Fue muy importante como parte del modelo conceptual, el balance hídrico en el área de estudio, obteniendo como resultado meses con déficit hídrico, advirtiendo que en el Municipio Facatativá son muy importantes los recursos hídricos subterráneos. Mediante la ecuación del balance hídrico el excedente en el año Hidrológico representa el potencial de recarga por la lluvia de los acuíferos mediante la infiltración la cual es muy baja corroborando lo encontrado por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca -CAR respecto a la sobreexplotación del acuífero.

## 1. INTRODUCCION

La importancia del agua subterránea en el desarrollo municipal y especialmente en el abastecimiento para consumo humano es alta, en el entendido que se configura

como una opción económica y de buenas características fisicoquímicas y bacteriológicas para su uso. Es así que en grandes centros urbanos como Ciudad de México, Lima y La Habana, son utilizadas para abastecer su comunidad y sus procesos económicos.

En Colombia el agua subterránea ha sido fuente de abastecimiento de algunos sectores urbanos y rurales y tiene gran importancia en el sector agroindustrial (IDEAM, 2015) En el Valle del Cauca por ejemplo, las aguas subterráneas abastecen el 90 % de la producción de caña de azúcar y gran parte del consumo humano; este cultivo ocupa aproximadamente 200.000 hectáreas (Ríos, Vélez, 2008). En el país, el sector floricultor hace uso de éstas aguas para el desarrollo de cerca de 7200 hectáreas sembradas de las cuales alrededor del 79% se encuentran ubicadas en la Sabana de Bogotá.<sup>1</sup> Según el estudio realizado por el DANE en el año 2009, el 24% de cultivos de flores utilizan agua subterránea para su proceso de producción y el 6.9% la utiliza para el consumo humano. Por otra parte, se resalta el uso del agua subterránea para procesos industriales en compañías como Coca Cola S.A y Cervecería Bavaria S.A., entre otras (IDEAM, 2015). Todo lo anterior se da gracias a la excelente calidad del agua subterránea y los bajos costos asociados a su explotación comparados con abastecimiento de agua superficial.

A la fecha, son muchos los estudios que se han realizado en el país para la cuantificación y conocimiento de la disponibilidad de agua subterránea; entre ellos se tienen la Investigación de las Subcuencas Hidrogeológicas de la Sabana de Bogotá (Granados 2011), identificando seis subcuencas hidrogeológicas principales en la Sabana de Bogotá; calculando un total de 42`500.000.000 m<sup>3</sup> de agua susceptible de aprovechamiento. La Evaluación Cuantitativa del Agua Subterránea de la Sabana de Bogotá. (Rodríguez. 1979) en el cual se encontró que el volumen total de agua subterránea almacenada en las areniscas de la

---

<sup>1</sup> DANE. Censo de fincas productoras de flores en 28 municipios de la Sabana de Bogotá y Cundinamarca. 2009

formación Guadalupe Superior, alcanzan una cifra de 25000 millones de metros cúbicos. Este volumen representa más del 95 por ciento del total del agua almacenada en la actualidad, incluyendo todos los 6 embalses existentes en la cuenca de la sabana. De otra parte, se han realizado estudios utilizando técnicas hidrogeoquímicas y de isótopos para determinar la conexión entre aguas superficiales y subterráneas, su origen y dirección del flujo, como el estudio evaluación y conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal Ciénaga de Colombia (Santa, Martínez y Betancur 2008) donde se incorporó técnicas no convencionales como lo son la hidroquímica y la hidrología isotópica que permite un mayor nivel de comprensión de los sistemas hidrológicos, en la medida en que es posible identificar el origen, la evolución del agua y los tiempos de tránsito y residencia en los diferentes compartimientos del ciclo hidrológico y la caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del Oja – Tirón. (Martínez, Arúzo y Valladolid 2007). Donde se llevó a cabo una amplia caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del Oja-Tirón (La Rioja-Castilla y León, España), encontrando la existencia de contaminación difusa de los recursos hídricos debido a la lixiviación de nitrato procedente de las prácticas de fertilización agrícola. Asimismo, se han detectado elevadas concentraciones de cromo hexavalente, en localidades donde existe una curtiduría cuyos vertidos podrían generar un riesgo para la salud, debido a la gran movilidad del cromo hexavalente y su elevada toxicidad. Es por ello que la infiltración del agua en el subsuelo, es un factor relevante para poder determinar las afectaciones de las aguas subterráneas por actividades económicas que se desarrollen en zonas con presencia de acuíferos.

Ya desde los años 70 en el país se ha estudiado el movimiento del agua subterránea mediante técnicas isotópicas, entre las que figuran la identificación del origen del agua subterránea para la solución de problemas geotécnicos (Rodríguez, 1997b; 1977c; 1990; Hoyos, 1990), los estudios hidrogeológicos regionales y el modelamiento de acuíferos (Gómez & Amaya, 2004; Díaz, 1998; Veloza, 2002), los estudios isotópicos de la precipitación (Rodríguez, 2004;

Salazar, 1996), y los estudios orientados a la gestión de los recursos hídricos (UNAL, 1997).

Con la presente investigación se obtienen referentes a fin de que se direccionen las políticas locales de gestión de recursos hídricos desde un punto de vista integral, reconociendo que las aguas subterráneas hacen parte del ciclo hidrológico y, por tanto, se deben considerar como tal al momento de la definición de estrategias de uso, manejo y conservación de este importante recurso. Además, se presentaron recomendaciones para el manejo integral del recurso hídrico y mitigar las afectaciones que se puedan estar presentando en las aguas subterráneas.

## 2. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Según el IDEAM en el Estudio Nacional de Agua 2010 y 2014 destacan que Colombia posee buen potencial de aguas subterráneas en el 75 % de su territorio. Se cuenta pues con estudios a nivel de prospección y exploración, sobre todo en la Sabana de Bogotá, La Guajira, Catatumbo, algunos sectores de la Costa Atlántica, Valle del César y en áreas del Valle Superior y Medio del Magdalena, en donde los estudios han sido extensivos. En estas zonas, sin embargo, no se cuenta con un seguimiento y monitoreo, generado a partir de redes básicas, que propicie el reconocimiento de la dinámica espacio-temporal del recurso. El común denominador es la ausencia de datos sistemáticos que permitan hacer un diagnóstico más ajustado. La provincia hidrogeológica mejor estudiada del territorio colombiano corresponde al Cauca-Patía, sobre la cual se soporta el desarrollo regional de esta parte del país (IDEAM, 2010a).

La susceptibilidad de contaminación de las aguas subterráneas por interacción con aguas superficiales depende entre otras de la geología (Rodriguez Navarrete, 1984). En este sentido, es imperativo conocerlas y establecer la interacción e incidencia de las aguas superficiales con el acuífero. El agua subterránea se halla

distribuida verticalmente en dos zonas denominadas de aireación y saturación (Otálvaro, Hidráulica de Aguas Subterráneas , 1999). La zona de aireación consta de intersticios interconectados, ocupados parcialmente por agua y por aire; está limitada por la tabla de agua en su parte inferior y por la superficie del terreno en su parte superior (Otálvaro, Hidráulica de Aguas Subterráneas , 1999). El contenido de agua en esta zona puede variar entre cero y saturación completa, lo que ocurre cuando hay un aporte de agua desde la superficie del suelo, la cual pertenece al ciclo hidrológico. (Rodríguez, 1984). Este concepto es muy importante como base de esta investigación pues está indicando que hay una relación directa, que debe ser esclarecida, entre las aguas superficiales pertenecientes al ciclo hidrológico y los recursos hidrogeológicos. Sin embargo, estas relaciones dependen de los factores y características geológicas e hidrogeológicas del área de estudio, siendo precisamente éstas características las que se deben conocer para dar respuesta al problema que ha sido observado y será expuesto en este documento.

Para el municipio de Facatativá se han llevado a cabo estudios hidrogeológicos enfocados al abastecimiento de agua para consumo humano como por ejemplo la Evaluación hidrogeológica pre factibilidad municipio de Facatativá (INGEOMINAS, 1996) e Hidrogeología de las cuencas de los ríos Bojacá y Balsillas , Sabana de Bogotá (INGEOMINAS, 1991). Sin embargo, desde el punto de vista de movimientos del agua subterránea, interacciones entre el agua superficial y subterránea no se han desarrollado estudios rigurosos, lo cual ocasiona un vacío científico y de conocimiento para la correcta gestión y aprovechamiento del recurso subterráneo. Lo anterior, favorece situaciones como las evidenciados por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR en el estudio realizado por Hidroplan Ltda. Denominado “Cuantificación de las Aguas Subterráneas” donde se encontraron descensos pronunciados en las últimas

décadas por la excesiva extracción poniendo en riesgo importante los acuíferos de la Formación Guadalupe.

Conforme al estudio de cuantificación de la demanda de agua subterránea en la Sabana de Bogotá (CAR, 2008) se concluyó que en siete años se presentaron descensos en el sistema acuífero cuaternario. Por ejemplo, en las cuencas del Chicú superan los 5 metros (-5.34 m), en Balsillas (-6.63 m) y en Fontibón (-5.60 m). En el sistema acuífero Guadalupe, los descensos superan los veinte (20) metros en las cuencas Chicú (- 27.47 m) y Subachoque (-21.18 m), mientras que en Balsillas los descensos alcanzan -10.53 m. Por todo lo anterior la Corporación mediante el Acuerdo 31 de 2005 declaró como Zona Crítica para el aprovechamiento de aguas subterráneas a la Sabana de Bogotá.

Por otra parte, el agua del río Botello ubicado en el extremo occidental de la sabana de Bogotá municipio de Facatativá se halla contaminada con aguas servidas (agropecuarias y domésticas), que fluyen sobre las areniscas del acuífero Guadalupe, que constituyen el principal acuífero de Facatativá, del cual se extrae agua subterránea para el abastecimiento del acueducto del municipio. Es, por lo tanto, importante establecer si las aguas contaminadas están recargando el acuífero y fluyendo hacia los pozos profundos que abastecen al acueducto de Facatativá demandando agua para unas 150.000 personas.

Queda clara entonces la necesidad de gestión del agua subterránea y el vacío de conocimiento respecto: 1) al origen, la dirección y el flujo del agua subterránea y, 2) el grado de contaminación del acuífero de Facatativá. Con base en lo planteado, esta investigación, pretende responder a las siguientes preguntas:

1. ¿Se presenta infiltración de los cauces superficiales al acuífero principal, en inmediaciones del municipio de Facatativá?
2. ¿Cuál es la dirección del flujo de agua subterránea en el área de estudio?
3. ¿Cuál es la incidencia de la contaminación del río Botello sobre el acuífero de Guadalupe? y en los pozos asociados?

### 3. JUSTIFICACIÓN

El agua del río Botello se halla contaminada con aguas servidas (agropecuarias y domésticas), que fluyen sobre la zona de recarga de las areniscas del Guadalupe, que constituyen el principal acuífero de la Sabana de Bogotá, del cual se extrae agua subterránea para el acueducto de Facatativá. Es por lo tanto muy importante establecer si las aguas contaminadas están recargando el acuífero y fluyendo hacia los pozos profundos, que abastecen al acueducto de Facatativá.

La justificación de la importancia de llevar a cabo esta investigación radica en varios aspectos a saber:

- Desde el punto de vista INVESTIGATIVO y ACADÉMICO, ya que a la fecha no se han llevado a cabo investigaciones en el área de influencia con la escala de trabajo que se llevó a cabo. Por el contrario, se cuenta con investigaciones que abarcan temáticas más generales y zonas más amplias.
- Desde lo SANITARIO y lo SOCIAL es de suma importancia la presente investigación, ya que el acuífero es usado para actividades domésticas, riego y consumo humano, lo cual podría ocasionar problemas de salud pública y acarrear costos adicionales en el tratamiento de las aguas.
- Desde lo POLÍTICO y la GOBERNABILIDAD, es de suma importancia el desarrollo de la presente investigación pues conocer las características y el comportamiento de las aguas subterráneas en el área de estudio, al igual las afectaciones que se puedan estar presentando por la influencia del río sobre el acuífero permitirá generar estrategias y/o redireccionar políticas

para la correcta gestión del recurso hídrico por parte de la autoridad ambiental competente.

#### 4. MARCO REFERENCIAL

Para el desarrollo de la presente investigación es imprescindible definir algunos conceptos que permitan abordar los temas permitiendo así mayor comprensión.

##### 4.1 MARCO CONCEPTUAL

###### **Cuenca hidrogeológica**

Muestreo compuesto:

**Muestreo simple o instantáneo:** representa las condiciones de una corriente o de un agua residual en el momento en que esta se colecta. Consta de muestras pequeñas individuales, que se toman ya sea proporcionales al tiempo o al flujo. Se mezclan para formar una muestra total, que es la que se somete al análisis de laboratorio. (Sierra Ramírez , 2011)

**Modelo Hidrogeológico Conceptual:** Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga. En términos generales, sintetiza las condiciones básicas del estado y dinámica de las aguas subterránea en el subsuelo y sus relaciones con los cuerpos de agua superficial y los aportes atmosféricos. Se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica,

hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada. (IDEAM, 2018)

**Iones:** es un átomo o grupo atómico con cargas eléctricas libres. Si un átomo cede electrones, queda cargado positivamente y se denomina **cación**. Si los capta, queda cargado negativamente y se denomina **anión**. En el primer caso están en exceso las cargas positivas del núcleo y en el segundo hay exceso de electrones (Romero Rojas, 2009).

**Acuífero:** Un acuífero se define como una unidad de roca o sedimento, capaz de almacenar y transmitir agua, entendida como el sistema que involucra zonas de recarga tránsito y descarga, así como sus interacciones con otras unidades similares, aguas superficiales y marinas (Decreto 1640 de 2012). El agua a subterránea está presente donde quiera que pueda penetrar bajo la superficie del suelo en rocas lo suficientemente permeables como para permitir el movimiento del agua a través de ellas.

Los acuíferos pueden presentarse en cuatro distintas formaciones geológicas:

- a) Depósitos de gravas y arenas no consolidadas, intercalados frecuentemente con estratos de limos y arcillas, con pocas unidades de carbonatos.
- b) Formaciones consolidadas y semiconsolidadas de conglomerados y areniscas, que tienen permeabilidad y porosidades primarias (intergranulares) y secundarias (fracturas y diaclasas).
- c) Formaciones carbonatadas que tienen fisuras y fracturas, que pueden ensancharse por disolución. Tienen porosidades y permeabilidades primarias muy pequeñas.
- d) Rocas ígneas y metamórficas con fisuras y fracturas que permiten el almacenamiento y circulación del agua (Vélez, 1999).

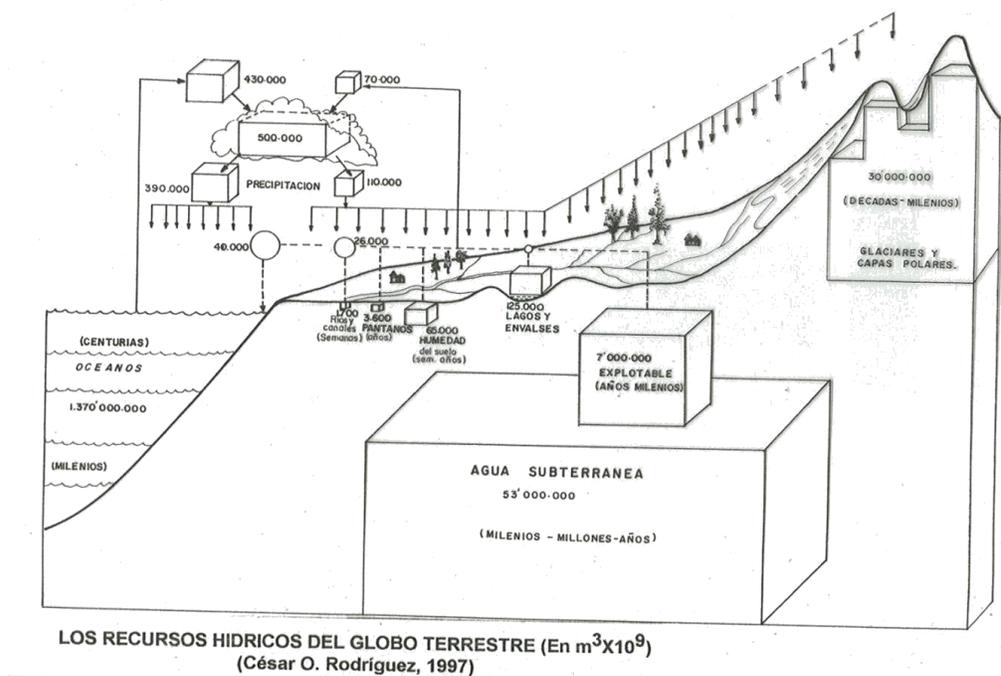
## 4.2 MARCO TEORICO

El agua subterránea como elemento vital para el desarrollo de las comunidades debe ser gestionado en el marco de la sostenibilidad ambiental de tal forma que asegure su calidad y cantidad para las generaciones presentes y futuras. En este sentido y atendiendo a los objetivos de ésta investigación se presenta la descripción teórica de las temáticas abordadas.

Para poder planear y gestionar los recursos hídricos, es necesario conocer sus características generales en cuanto a su distribución, comportamiento y magnitud (en términos de cantidad y calidad). Lo anterior presupone un conocimiento general de los conceptos básicos de la hidrología superficial y subterránea, así como de su dinámica e interacción con los demás elementos del medio biofísico y socioeconómico, al igual que el desarrollo de las medidas de protección, su manejo y gestión (Rodríguez, 1984).

El agua subterránea tiene importancia como componente esencial del ciclo hidrológico y como reserva fundamental.

Ilustración 1. Distribución de los recursos hídricos globales



Fuente: (Rodríguez Navarrete, 1984)

#### **4.2.1 Hidrogeología**

Se considera como agua subterránea aquella parte del agua del ciclo hidrológico que está bajo la superficie del terreno sometida a presiones mayores que la atmosférica (Davist y De Wiest, 1966). Esta agua subsuperficial satura el medio a través del cual se mueve y en el cual es almacenada. Su ocurrencia se da en varios tipos de espacios abiertos en las rocas, tales como fisuras, intersticios entre granos, fracturas y diaclasas. Debido a las diferencias de presión hidrostática esta agua está en continuo movimiento. Se puede decir entonces que la existencia, movimiento y almacenamiento del agua subterránea están controlados por la secuencia, litología, espesores y estructura de los materiales que forman la tierra (Geología). Además, el movimiento y la capacidad de almacenamiento son controlados por la permeabilidad (que mide la habilidad del agua para moverse a través del medio poroso) y la porosidad (relación de vacíos y volumen total de material).

Con base en la publicación Hidráulica de Aguas Subterráneas (1999) de la Universidad Nacional de Medellín, y de los conceptos básicos en el seminario de Rodríguez (1984), se definen a continuación algunos conceptos importantes los cuales proporcionan la base para entender el problema que se enfrentó en este documento y con los que se podrá corroborar la hipótesis planteada de acuerdo a los estudios consultados y la información recogida en campo.

**Conductividad y porosidad.** Los espacios abiertos, vacíos o intersticios en las rocas son los receptáculos para el almacenamiento y la circulación del agua subterránea. Son de dos tipos:

- a) Poros intergranulares (primarios): se encuentran en rocas sedimentarias clásticas consolidadas o no.
- b) Poros que resultan de fisuras y fracturas, formando dos grupos:

- Rocas estratificadas fisuradas que pueden sufrir disolución, formando canales a lo largo de las fracturas y planos de estratificación (evaporitas, calizas, carbonatos).
- Rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, que son capaces de almacenar y transmitir agua por medio de las fisuras y fracturas.

La manera como esos poros están intercomunicados entre sí define lo que se denomina permeabilidad o conductividad hidráulica, que mide la "habilidad" del agua para circular por las diferentes formaciones geológicas. Lo anterior significa que un material puede tener porosidad muy alta (arcillas) y sin embargo su permeabilidad ser nula, ya que los poros no están intercomunicados.

**Las aguas subterráneas en rocas sedimentarias.** Las arcillas, limolitas, argilitas y otra serie de rocas detríticas de grano fino, representan aproximadamente el 50% de todas las rocas sedimentarias. Le siguen en importancia las areniscas, luego los conglomerados, los yesos, los *chert*, tilitas y las diatomitas. Estas rocas también tienen porosidades y permeabilidades de las formaciones.

En las areniscas la porosidad total varía entre un 5 y un 33%. El factor que más influye es el tipo de cemento. Las más comunes son la arcilla, la calcita, la dolomita y el cuarzo.

La permeabilidad de las areniscas suele ser varias veces menor que la permeabilidad de los correspondientes sedimentos no consolidados ni cementados. Mientras que la arena media tiene una permeabilidad entre 1 - 30 m/día, los valores para las areniscas correspondientes de grano medio varían entre 1 mm - 0.5 m/día. La permeabilidad en las rocas carbonatadas puede variar desde menos de un mm/día, en el caso de las calizas ricas en minerales de arcilla, hasta varios miles de metros por día, en el caso de brechas groseras y apenas cementadas. Posiblemente la mayor transmisibilidad de casi todas las calizas es debida a la presencia de grietas y fracturas ensanchadas por efecto de disolución del agua.

**Estimación de la recarga.** La estimación precisa de la recarga es de vital importancia para el manejo sostenible de los acuíferos. La recarga de un acuífero

puede darse naturalmente debido a la precipitación, a través de ríos o lagos, por irrigación, fugas de redes de acueducto o alcantarillado o infiltraciones de embalses. Existen diversas técnicas para estimar la recarga de un acuífero, su escogencia depende de parámetros como la confiabilidad, los intervalos de tiempo y la disponibilidad de recursos, tanto logísticos como económicos. Lo ideal es obtener estimativos obtenidos por diversas técnicas, que generalmente proporcionan valores diferentes, ya que de esta manera se tiene alguna idea de la confiabilidad de los resultados.

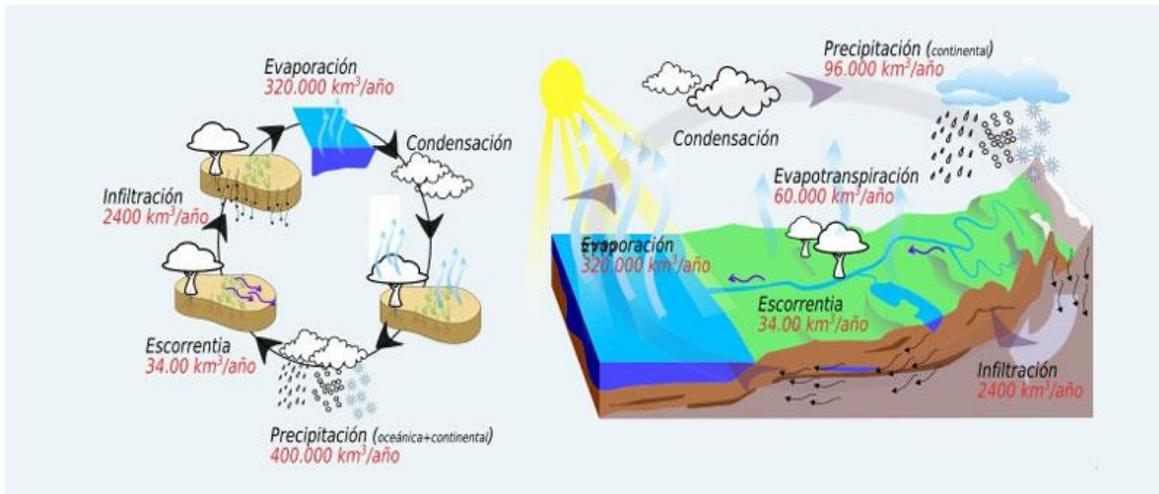
#### **4.2.2 Balance hídrico**

El ciclo hidrológico, es un modelo conceptual que describe el almacenamiento y movimiento del agua entre la Biosfera, Atmósfera, Litosfera, Hidrosfera, lo que se denomina Sistema Climático; el cual es importante conocer para realizar el balance hídrico en una cuenca.

El estudio del Balance Hídrico en hidrología se basa en la aplicación del principio de conservación de masas de agua (también se conoce como ecuación de la continuidad). Este método de medición analiza la entrada y salida de agua de un espacio territorial a lo largo del tiempo. Mediante el estudio del Balance Hídrico es posible hacer una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.

El ciclo del agua implica un cambio continuo de grandes masas de un estado físico a otro con su consiguiente transporte. Al volumen de agua que se desplaza de un depósito a otro y a lo largo de un año se llama Balance Hídrico global o atmosférico. Que es representado en el siguiente esquema.

*Ilustración 2. Esquema de Balance Hídrico global en el ciclo hidrológico*



Fuente: Modificado por Ordoñez de [www.cmapspublic2.ihmc.us](http://www.cmapspublic2.ihmc.us), (2011).

El movimiento permanente del ciclo hidrológico se debe fundamentalmente a dos causas: la primera, el sol que proporciona la energía para evaporar el agua, y la gravedad terrestre, que hace que el agua condensada descienda y se produzca la precipitación y el escurrimiento a través de la cuenca.

Para realizar el balance hídrico superficial fue necesario conocer los procesos o caminos que sigue el agua en el suelo y en la atmósfera, como son la precipitación, la escorrentía superficial, la infiltración y la evapotranspiración, con los cuales podemos aplicar la ecuación del balance de masas.

Es importante también conocer las características fisiográficas, edafológicas y biológicas del lugar en las cuales estos procesos tienen lugar; por eso, una evaluación precisa del balance hídrico está estrechamente ligada con la cantidad y calidad de la información disponible y, en particular, de la red de estaciones y número de años de sus registros.

El balance puede ser realizado para distintos períodos (horas, días, meses, estaciones del año o años). Para el área específica de estudio, donde se conoció la interacción de la escorrentía superficial con la cuenca subterránea, se utilizaron los balances medios de agua con la precipitación y los caudales, usándolos para

hacer el ciclo hidrológico multianual, permitiendo de esta manera reducir la ecuación general del Balance Hídrico.

Para la representación anual de las variables del ciclo hidrológico y su mejor interpretación se usaron hidrogramas, los cuales son la expresión o variación gráfica del caudal en función del tiempo. El hidrograma, está en función del aporte de precipitaciones que puedan ocurrir en la superficie de la cuenca y de las características físicas de ella.

Para estudiar las zonas acotadas en el área de estudio se efectuó un Balance Hídrico ajustado en el que se incorporaron variables tomadas de la realidad local a analizar, para esto se usaron datos multianuales de las estaciones meteorológicas e hidrológicas que se encuentran en el área de influencia de la subcuenca del río Botello. Este tipo de balance sirve como herramienta de gestión y administración del recurso agua.

Se debe completar las series históricas de los componentes de la ecuación de balance hídrico, a fin de obtener el promedio anual multianual para cada componente y tener confiabilidad en el resultado del balance final.

Con el valor del promedio anual multianual de las variables del ciclo hidrológico, se puede aplicar la ecuación del balance hídrico la cual se muestra a continuación.

$$P = EVT + Q + I \Delta A$$

PRECIPITACIÓN = EVAPOTRANSPIRACIÓN + ESCORRENTÍA SUPERFICIAL + INFILTRACIÓN + DIFERENCIA DE ALMACENAMIENTO

Como se indicó anteriormente para un balance anual con series multianuales la diferencia de almacenamiento es cero, por lo tanto, esta variable no fue tomada en cuenta al momento de aplicar la ecuación.

Para el tratamiento de los datos de las series históricas se aplican diferentes métodos matemáticos. Para el caso de estudio se trabajó con la Interpolación, el cual se presenta a continuación.

### **Método general del inverso de la distancia (Interpolación) (Bateman, 2017)**

La interpolación del punto problema se realiza asignando pesos a los datos del entorno en función inversa de la distancia que los separa -inverse distance weighting, IDW-.

La fórmula general es:

$$\hat{z}_j = \sum_{i=1}^n k_{ij} \cdot z_i$$

Donde  $\hat{z}_j$  es el valor estimado para el punto j ; n es el número de puntos usados en la interpolación;  $z_i$  el valor en el punto i-ésimo y  $k_{ij}$  el peso asociado al dato i en el cálculo del nodo j. Los pesos k varían entre 0 y 1 para cada dato y la suma total de ellos es la unidad.

Para establecer una función de proporcionalidad entre el peso y la distancia, la fórmula general queda como sigue:

$$\hat{z}_j = \frac{\sum_i \frac{z_i}{d_{ij}^b}}{\sum_i \frac{1}{d_{ij}^b}} \quad \text{Donde } k_{ij} = 1/d_{ij}^b \text{ y } b \text{ es un exponente de ponderación que controla la forma en la que el peso disminuye con la distancia.}$$

A partir de esta expresión le asignamos valores a la precipitación mediante la interpolación en los meses donde los datos no existen, teniendo en cuenta la distancia de las estaciones y su influencia sobre cada valor teniendo en cuenta la distribución de las estaciones meteorológicas en el área de la cuenca.

La expresión por el método del inverso de la distancia para la precipitación queda de la siguiente manera:

$$PJ = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Pi}{(Dij)^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(Dij)^2}}$$

Donde P= precipitación

D= distancia entre estaciones con respecto a la precipitación

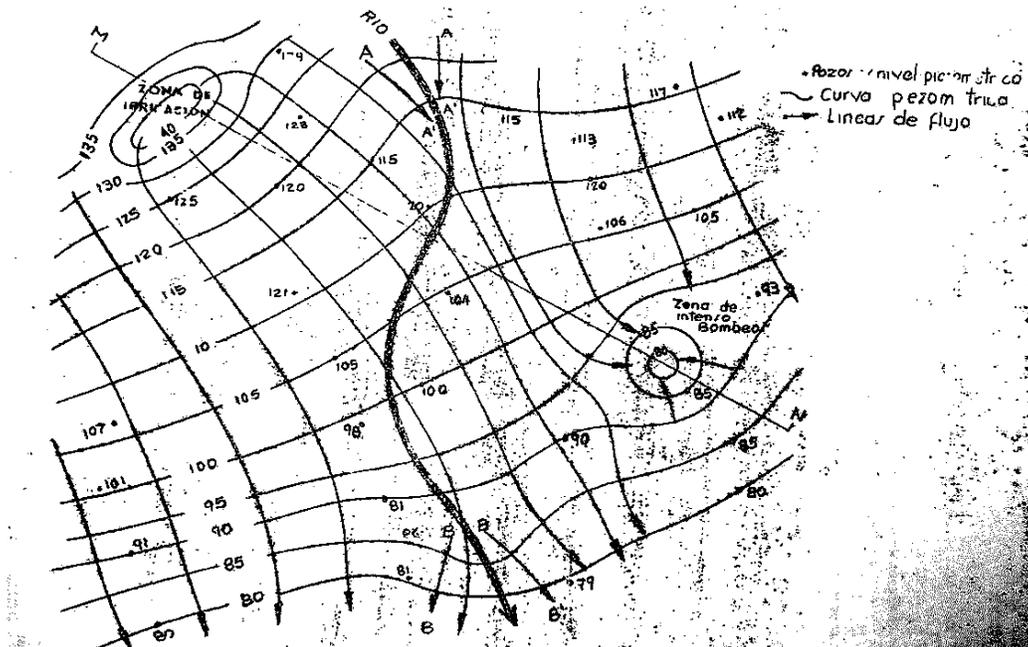
#### 4.2.3 RED DE FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Según, (Rodriguez Navarrete, 1984) las redes de flujo corresponden a gráficos que representan el movimiento del agua subterránea a partir de las isopiezas que son líneas imaginarias que representan los valores de las presiones a las cuales se encuentra sometida el agua subterránea y las líneas de flujo que intersectan a las isopiezas en ángulos de 90° representando la dirección que siguen las partículas de agua en el acuífero.

En este sentido para la construcción de la red de flujo de agua subterránea se obtuvieron los niveles naturales o piezométricos del agua según corresponda de la mayor cantidad de fuentes a saber ya sean manantiales, pozos, aljibes, acuíferos de la zona de estudio.

Los puntos identificados con sus datos de niveles se plasmaron en un plano topográfico con una escala que está determinada con el tipo de investigación, donde posteriormente se trazan líneas de igual nivel piezométrico o isopiezas como se presenta en la siguiente ilustración.

Ilustración 3. Red de flujo subterránea



Fuente. (Rodríguez Navarrete, 1984)

A partir de los mapas se obtiene información valiosa del comportamiento del acuífero en la zona de estudio, es así que se puede determinar la profundidad a la cual se encuentra el agua en un punto cualquiera de la sección, también se determina el movimiento del agua subterránea e identifican zonas de recarga y descarga, se calcula el gradiente hidráulico, el caudal de flujo, las reservas subterráneas temporales, entre otras (Rodríguez Navarrete, 1984).

#### 4.2.4 HIDROGEOQUIMICA

Las aguas naturales contienen pequeñas cantidades de iones en solución, y gases disueltos y su concentración depende de una gran cantidad de factores, que incluyen los tipos de minerales con los que el agua está en contacto, el tiempo de residencia y los procesos biológicos que actuaron sobre ella. El agua subterránea es un agua natural cuya composición química depende de la meteorización y la descomposición de las rocas con las cuales entra en contacto, en el tiempo y en el espacio. Por ello, los estudios geoquímicos de estas aguas pueden mostrar diferencias entre la calidad de agua de diferentes acuíferos que servirán posteriormente para dar pautas para el buen uso de este recurso.

Las sustancias minerales presentes en el agua se disocian en forma de partículas cargadas eléctricamente, llamadas iones. Los cationes y aniones predominantes en las aguas naturales son:  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  respectivamente.

La información hidrogeoquímica procesada permite obtener información importante para el conocimiento y gestión de los sistemas de aguas superficiales y subterráneas, es así que permite entre otras cosas: la identificación de mecanismos generadores de caudal, determinación de áreas de recarga y descarga, patrones de circulación de aguas subterráneas, tiempos de residencia, determinación de la edad, dirección y velocidad del agua subterránea, verificación de balances hídricos, estudio de interconexiones entre agua superficial y subterránea e identificar el origen del agua subterránea.

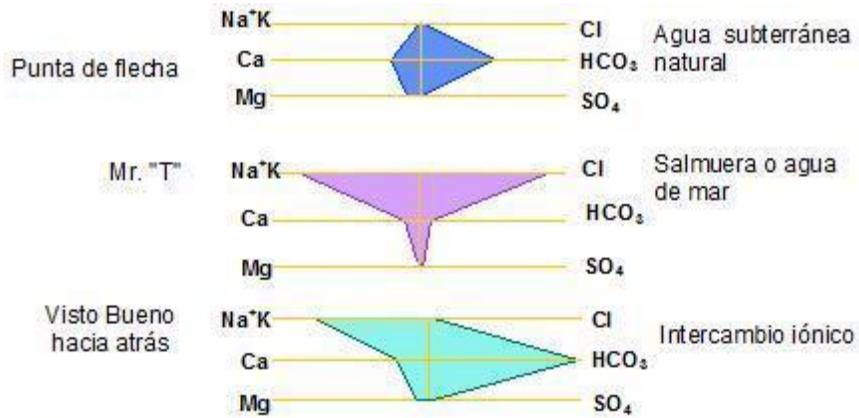
Para el procesamiento de dicha información existen técnicas convencionales (Piper, Schoeller, Durov, Ternary, mapas de distribución de diagramas de Stiff, Ludwig-Langelier, diagrama de Gibbs) o técnicas isotópicas; en este sentido y para el presente trabajo se aplicaron técnicas como Stiff y Piper las cuales se describen a continuación.

#### **DIGRAMA DE STIFF (Emilio & Llamas, 2001)**

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el  $\text{Na}^+$  se confronta con el  $\text{Cl}^-$ , el  $\text{Ca}^{+2}$  con el  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Mg}^{+2}$  con el  $\text{SO}_4^{-2}$ . Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/l tal cual se presenta en la ilustración 4.

Dos características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado, permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica).

Ilustración 4. Diagramas típicos de Stiff



Tomado de (www.aguaysig.com, 2018)

### DIAGRAMA DE PIPER:

Este gráfico permite representar muchos análisis sin dar origen a confusiones. Las aguas geoquímicamente similares quedan agrupadas en áreas bien definidas (Custodio, 1965).

Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones más representativos en el agua es decir  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^{++}$   $\text{K}^{+}$  y  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^{-}$  y  $\text{HCO}_3^{-}$  respectivamente. Para el caso del triángulo que representa los cationes, a cada vértice se le asigna los cationes así: vértice 1 calcio, vértice 2 magnesio, vértice 3 sodio y potasio. De igual forma sucede con el triángulo que representa los aniones: vértice 1 sulfatos, vértice 2 cloruros y vértice 3 carbonatos y bicarbonatos.

Los valores obtenidos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes como se presenta en la ilustración 5. Es de anotar que las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con

respecto a la suma total de aniones y cationes respectivamente. Ver ilustración 6. (www.aguaysig.com, 2018).

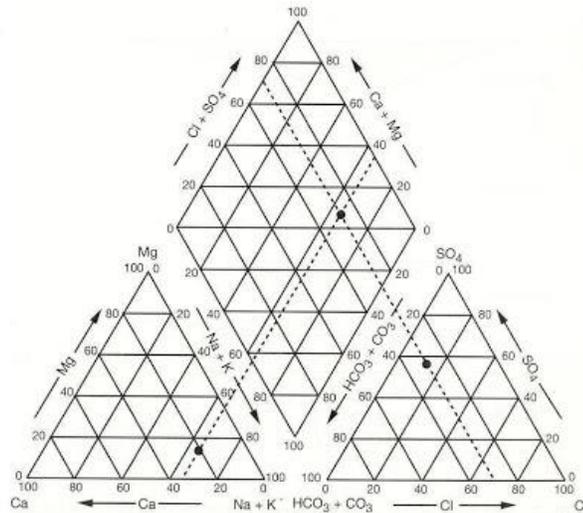
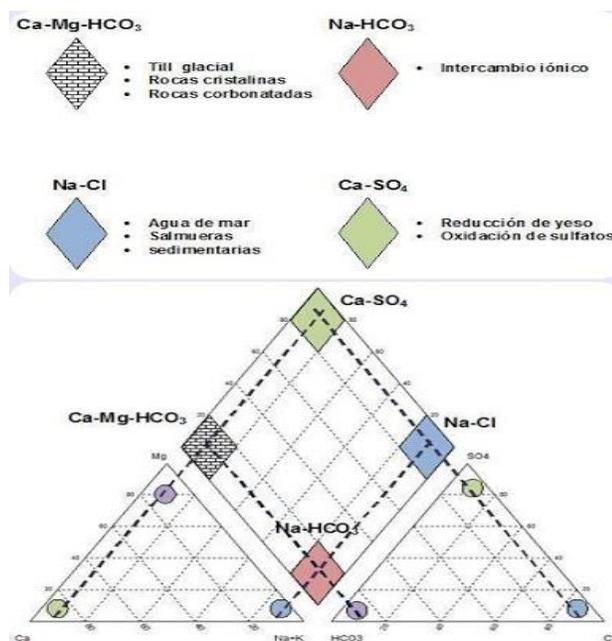


Ilustración 5. Esquema de diagrama de Piper.

Tomada de (www.aguaysig.com, 2018)

Así las cosas y producto de las composiciones deducidas de los iones se pueden presentar casos típicos de agua como los que se presentan en la ilustración 6.

Ilustración 6. Casos típicos de agua según Piper.



#### **4.2.5 CALIDAD DEL AGUA**

Si bien es difícil definir el concepto de calidad de agua, se parte de la premisa que se define de acuerdo al uso que se le vaya a dar a dicho recurso, es decir consumo doméstico, agrícola, etc.

Para poder establecer la afectación de la calidad de agua subterránea por parte de la fuente superficial al presentarse interacción, se realiza a partir de la caracterización física, química y bacteriológicas de las aguas; identificando en primer lugar las actividades económicas que se llevan a cabo en la zona de influencia de la investigación y el uso que se le da al agua del acuífero.

Atendiendo a la resolución 2115 de 2007 donde se establecen los criterios de calidad de agua para consumo humano donde se encuentran incluidas características físicas, químicas y microbiológicas y que hacen parte del IRCA- índice riesgo de la calidad de agua para consumo humano, que permite valorar la incidencia sobre la salud por el no suministro de agua potable a la población.

Para el caso puntual de los acuíferos la calidad de agua se puede ver afectada por descargas puntuales o difusas. Una fuente puntual se presenta por el escape de un tanque, un relleno sanitario o una laguna. Cuando se produce una contaminación proveniente de puntos de difícil localización, como es el caso de contaminación por pesticidas, fertilizantes, entre otras, se dice que se tiene una fuente difusa.

Además, el tipo de contaminante que puede introducirse al agua son sustancias radioactivas, metales, nutrientes, sustancias orgánicas o inorgánicas o contaminación de tipo biológica.

Todos los contaminantes son potencialmente dañinos para la salud humana y muchas veces los niveles de tolerancia son muy pequeños.

Los contaminantes biológicos más importantes son las bacterias patógenas, los virus y los parásitos. Este tipo de contaminación proviene de fosas sépticas, redes de alcantarillado y rellenos sanitarios.

Los acuíferos tienen una cierta capacidad de autodepuración, mayor o menor según el tipo de roca y otras características. Las sustancias contaminantes, al ir el agua avanzando entre las partículas del subsuelo, se filtran y dispersan y también son neutralizadas, oxidadas, reducidas o sufren otros procesos químicos o biológicos que las degradan. De esta manera el agua va limpiándose.

Cuando la estructura geológica del terreno facilita una zona amplia de aireación, los procesos de depuración son más eficaces. También es muy favorable la abundancia de arcillas y de materia orgánica.

Es muy importante, de todas formas, tener en cuenta que las posibilidades de depuración en el acuífero son limitadas y que el mejor método de protección es, por tanto, la prevención. No contaminar, controlar los focos de contaminación para conocer bien sus efectos y evitar que las sustancias contaminantes lleguen al acuífero son los mejores métodos para poder seguir disfrutando de ellos sin problemas.

Cuando un acuífero está contaminado y hay que limpiarlo el proceso es muy difícil y muy costoso. Se han usado procedimientos que extraen el agua, la depuran y la vuelven a inyectar en el terreno, pero no siempre son eficaces y consumen una gran cantidad de energía y dinero.

**Vulnerabilidad a la Contaminación.** El término vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, se usa para representar las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante (Foster, 1987). El riesgo a la contaminación resulta de dos factores: la carga contaminante y la vulnerabilidad natural a la contaminación. La carga contaminante se puede controlar pero la vulnerabilidad no. La

contaminación del agua subterránea puede ocurrir por accidente o por negligencia. La mayoría de los incidentes de contaminación se dan por sustancias dejadas en la superficie de los acuíferos, ya sea que se almacenen en ella o que caigan accidentalmente. Hay cuatro maneras para que la contaminación llegue a los acuíferos: infiltración, recarga, migración directa o intercambio entre acuíferos.

Los principales factores que inciden en la vulnerabilidad del acuífero son: el tipo de suelos de la zona vadosa o no saturada, el tipo de acuífero, la recarga, profundidad de los niveles freáticos, la topografía y la conductividad del acuífero. La determinación de la vulnerabilidad de un acuífero, sirve como base para implementar políticas de protección de las aguas subterráneas y para un manejo óptimo del recurso.

La preocupación por la contaminación de las aguas superficiales se relaciona principalmente a los acuíferos no confinados, especialmente donde su nivel freático es poco profundo (CEPIS, 1991). Por lo tanto, es indispensable conocer de primera mano la geología y lito estratigrafía de la zona de estudio, y resaltar que para determinar una contaminación del agua superficial al acuífero hay que tener presente que los perfiles del suelo atenúan activamente muchos, aunque no todos, los contaminantes del agua y que la dispersión hidrodinámica que acompaña al flujo de aguas subterráneas resulta en dilución de los contaminantes persistentes y móviles, especialmente, en la zona saturada de los acuíferos (CEPIS, 1987).

Las principales consecuencias probadas se dan en el incremento de las concentraciones de nitratos, en el aumento en la frecuencia de los episodios de contaminación por solventes orgánicos sintéticos, de los desinfectantes y de los patógenos fecales (CEPIS, 1987).

Entre los compuestos orgánicos sintéticos deben considerarse los plaguicidas ya que presentan una alta sorción en los suelos y limitan las pérdidas por volatilización de las aguas subterráneas (CEPIS, 1987). Para el caso del ión

nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) procede de la descomposición de la materia orgánica, contaminación de vertimientos urbanos, industriales, abonos agrícolas y ganadería, en pequeña proporción, del agua lluvia. Muchas veces es un indicador de contaminación. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas varía ampliamente, aunque no suele sobrepasar los 10mg/L. (Rave, 2009).

En este sentido es importante destacar que el agua subterránea en el área de Facatativá tiene diferentes usos como consumo humano y riego, que son reglamentados mediante la resolución 2115 de 2007 y el Decreto 1594 de 1984 donde se definen los requerimientos mínimos de calidad para su uso. Es así que es imperativo determinar la influencia que ejerce la fuente superficial en el acuífero.

Según el CEPIS tanto la disposición directa de agua al suelo y el uso de las aguas residuales para irrigación agrícola o de recreo tendrán grandes impactos sobre el agua subterránea, donde existan acuíferos freáticos, así mismo se ha demostrado que la infiltración es un método efectivo de tratamiento de las aguas residuales, sobre todo en la remoción de microorganismos patógenos. (CEPIS, 1994)

### **Estandarización de datos**

Para analizar y procesar los datos mediante métodos descriptivos como el histograma se requiere tener todos los datos en una sola escala, por lo cual se procede a utilizar el método de estandarización de datos.

La normalización o estandarización significa ajustar los valores medidos en diferentes escalas respecto a una escala común (Andrés Schuschny, Humberto Soto , 2009). En otros casos, la normalización puede referirse a ajustes más sofisticados donde la intención es conseguir que todas las distribuciones de probabilidad se ajusten a una escala de valores, además que permitan la

comparación de los valores normalizados con conjuntos de datos de manera que elimina los efectos de influencias (Andrés Schuschny, Humberto Soto , 2009). En la presente investigación se realizó para las pruebas fisicoquímicas el siguiente método de estandarización:

$$X' = \frac{X - X \text{ min}}{X \text{ max} - X \text{ min}}$$

Donde,

X': valor estandarizado

X: valor a estandarizar

Xmin: menor valor de la serie

Xmax: mayor valor de la serie

Este tipo de estandarización, comprime los datos de entrada entre unos límites empíricos (el máximo y el mínimo de la variable).

De esta forma comparamos los datos dimensionalmente mediante un histograma, las variables fisicoquímicas obtenidas en las muestras de aguas y los caudales del río Botello.

## 5. HIPÓTESIS

### Preguntas de investigación

1. ¿Se presenta infiltración de agua contaminada del río Botello hacia el acuífero en la zona de estudio?
2. ¿Cuál es el origen, dirección y flujo del acuífero?,
3. ¿Cuál es la incidencia de la contaminación del río en los pozos de producción de agua subterránea para el acueducto de Facatativa?

Si se presenta infiltración de agua del río Botello en la dirección del acuífero, y las concentraciones de cloruros, sulfatos, nitratos, coliformes totales, plata, cadmio, plaguicidas organoclorados y organofosforados son altas, entonces estas variables en los pozos tendrán también concentraciones elevadas respecto a los valores máximos aceptables señalados en la resolución 2115 de 2007 o los valores límites permisibles fijados en las guías vigentes para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud – OMS.

H1: Existe conectividad entre el río Botello y el acuífero de Facatativá

H0: No existe conectividad entre el río Botello y el acuífero de Facatativá

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1 GENERAL**

Evidenciar la interacción entre el río Botello y el acuífero de Facatativá.

### **6.2 ESPECIFICOS**

1. Representar la presencia, distribución, origen y dirección del flujo del agua subterránea.
2. Analizar e interpretar los modelos conceptuales geológico, hidrológico, hidrogeológico e hidrogeoquímico en el área de estudio.
3. Establecer la relación de las características fisicoquímicas y bacteriológicas entre el agua superficial y subterránea.
4. Presentar recomendaciones para el manejo integral del recurso hídrico.

## **7. MATERIALES Y MÉTODOS**

## 7.1 Descripción del área.

El municipio de Facatativá se encuentra ubicado en el costado occidental de la Sabana de Bogotá tiene alrededor de 150.000 habitantes y su vocación económica es agropecuaria y de servicios. Se abastece de agua con la fuente superficial que corresponde al río Botello y subterránea con 7 pozos perforados que se utilizan principalmente en épocas de escasez; en el municipio se encuentran perforados alrededor de 436 pozos de extracción para usos de riego, doméstico y ganadería según el censo de la Subdirección de Patrimonio Ambiental de la CAR. Teniendo en cuenta que son múltiples las actividades productivas que se desarrollan en el territorio y que de ellas se generan vertimientos directos sobre las fuentes hídricas superficiales, que a su vez pueden estar conectadas con los acuíferos. Surge la necesidad en esta investigación de determinar la interacción entre el río Botello y el acuífero de la cuenca hidrogeológica de Facatativá, la existencia de carga contaminante que aporta al agua subterránea.

El río se encuentra contaminado ya que es receptor de varios vertimientos de tipo doméstico, así como también se ve afectado por la escorrentía y aspersion de fertilizantes y plaguicidas que se aplican a los cultivos que se encuentran en las márgenes.

Según datos suministrados por la empresa AGUAS DE FACATATIVÁ SAS ESP quién monitorea las fuentes de abastecimiento y en este caso el río Botello, para el cual reporta que presenta valores para coliformes fecales de 1100 NMP/100ml, para coliformes fecales de  $5.04 \times 10^3$  NMP/100ml y para E. Coli de  $1.058 \times 10^3$  NMP/100ml lo cual se evidencia contaminación por descargas domésticas y materia orgánica.

Inicialmente, se recopilaron métodos y fuentes de información primaria citados en estudios realizados por instituciones oficiales encargadas de estos temas y por la academia. Se utilizaron, datos recogidos en campo para realizar pruebas de laboratorio que indiquen la composición geoquímica y los contaminantes del agua en su paso por el centro urbano del Municipio de Facatativá.

En este sentido, el análisis geoquímico permitió conocer origen del agua subterránea y por lo tanto la dirección del flujo subterráneo. De otra parte, se recopiló y analizó información del área de estudio referente a las características geológicas (análisis litoestratigráfico, geología estructural y geología económica); hidráulicas (referente a pruebas de bombeo e inventario de pozos), hidrológicas (análisis del ciclo hidrológico a fin de determinar un balance hídrico y los valores de infiltración), finalmente, se realizó el análisis de parámetros como cloruros, sulfatos, coliformes totales, plata, cadmio, plaguicidas organoclorados y organofosforados y nitratos que permitirá establecer la influencia de la fuente de agua superficial al acuífero.

## 7.2 ALCANCE Y MÉTODO.

Se debe tener en cuenta que los acuíferos son en general **sistemas heterogéneos**, complejos, segmentados y, frecuentemente multicapas, que pueden estar interconectadas o no.

Inicialmente, se recopilaron métodos y fuentes de información primaria citados en estudios realizados por instituciones oficiales encargadas de estos temas y por la academia. Se utilizaron, datos recogidos en campo para realizar pruebas de laboratorio que indicaron la composición geoquímica y los contaminantes del río en su paso por el centro urbano del Facatativá y de los pozos.

En este sentido, el análisis geoquímico permitió conocer origen del agua subterránea y por lo tanto la dirección del flujo subterráneo. De otra parte, se recopiló y analizó información del área de estudio referente a las características geológicas (análisis litoestratigráfico, geología estructural y geología económica); hidráulicas (referente a pruebas de bombeo e inventario de pozos), hidrológicas (análisis del ciclo hidrológico a fin de determinar un balance hídrico y los valores de infiltración), finalmente, se realizaron análisis de parámetros como cloruros, sulfatos, coliformes totales, plata, cadmio, plaguicidas organoclorados y

organofosforados y nitratos que permitirá establecer la influencia de la fuente de agua superficial al acuífero.

Esta relación existente entre el río Botello y el acuífero de la cuenca Balsillas, se investigó a partir del siguiente método:

**Con base en el modelo geológico disponible del área de estudio.** Se conoció el tipo de textura y estructura de la roca, las cuales a su vez determinaron variables como la porosidad, la permeabilidad, la capacidad de almacenamiento y la capacidad específica. Se determinó principalmente mediante métodos directos como las evaluaciones geológicas disponibles y los registros de perforaciones.

**Caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas presentes en la región,** de acuerdo con su capacidad para almacenar y permitir el flujo de agua subterránea, las cuales dependen de las características hidráulicas del suelo y subsuelo. La evaluación contempló el reconocimiento de los tipos de acuíferos, sus características hidráulicas (permeabilidad, porosidad, capacidad específica, caudales de explotación, rendimiento o productividad.)

**Proceso de la información hidrológica disponible orientada hacia:**

- a) El cálculo de la infiltración y recarga hacia los acuíferos se realizó mediante la aplicación de la ecuación del balance hídrico.
- b) La evaluación hidrológica incluye la determinación de la distribución espacio-temporal de la recarga, la dinámica del flujo, y el balance hídrico

**Evaluación y análisis de información de niveles piezométricos con el fin de construir la red flujo y determinar el movimiento del agua subterránea.**

**Modelo hidrogeológico conceptual (MHC) el cual se representó en una sección hidrogeológica (escala 1:25.000).** En dicho modelo se representó la presencia, distribución y comportamiento general del agua subterránea.

El MHC es el instrumento básico para planificar el aprovechamiento de las aguas subterráneas. Requiere tener un conocimiento mínimo de las características físicas y químicas del acuífero y de su dinámica. El MHC se construye a partir de información geológica (estratigrafía y estructura), hidroclimática, uso de trazadores e inventarios de puntos de agua (pozos).

### **Mapa hidrogeológico del área de estudio**

#### **Muestreos de puntos de agua superficial y subterránea para hacer análisis de laboratorio de parámetros seleccionados de acuerdo con las características físicas, químicas y bacteriológicas del agua del río Botello.**

Se realizó un muestreo que implicó la ejecución de análisis de laboratorio físicoquímicos y bacteriológicos en las aguas superficiales y en los pozos para determinar el grado de contaminación y la carga contaminante que tiene el acuífero y los resultados se compararon con los obtenidos en el río Botello.

#### **Muestreo de puntos de agua superficial y subterránea para hacer análisis hidrogeoquímicos mediante técnicas de Stiff y Piper.**

## **8. DESARROLLO DE TRABAJO**

### **8.1 GEOLOGÍA**

Es de anotar que la información geológica de la presente investigación está fundamentada principalmente en el estudio realizado por el INGEOMINAS y consolidado en la plancha 227 La Mesa y su memoria explicativa detallada por Jorge Acosta y Carlos E. Ulloa en el año 2001. De igual manera, está soportada en el Plan de Ordenamiento Territorial del municipio de Facatativá formulado en el año 2001.

De otra parte, para mayor comprensión del presente capítulo; en el anexo 1 se encuentra la plancha No. 1 Geología de Facatativá la cual fue elaborada por los autores con base en la información del (INGEOMINAS, 2001).

El municipio de Facatativá se encuentra ubicado en la subcuenca del río Balsillas, que a su vez se ubica en el sector meridional de la Provincia Fisiográfica de la cordillera Oriental, donde afloran rocas sedimentarias de la edad Cretácica, Paleógena - Neógena y Cuaternaria, las cuales fueron afectadas por fallas y pliegues producto de la tectónica compresiva que originó el levantamiento de la cordillera (Ecoforest Ltda. & Planeación estratégica Ltda., 2008).

El municipio se caracteriza por tener una zona plana donde se encuentra ubicado el casco urbano y una zona montañosa circundante conformada por rocas de las formaciones Arenisca Dura, Pleaners y Labor y Tierna principalmente.

### 8.1.1 ESTRATIGRAFÍA

#### Descripción general

En Facatativá y en sus estribaciones afloran rocas sedimentarias cuyas formaciones presentes corresponden a la edad Cretácica Superior, entre las que se encuentran la Formación Plaeners (Ksglp), la Formación Labor y Tierna (Ksglt), la Formación Arenisca Dura (Ksgd). La Formación seca (Kpgs) y la Formación Guaduas (KPgg) pertenecientes al cretácico Superior y Holoceno con unos 66.4 millones de años.

Ya para el periodo Cuaternario correspondiente al Holoceno se presentan depósitos aluviales conformados por terrazas altas (Qta) y llanuras aluviales (Qlla) sobre todo en las zonas por donde discurren sus principales afluentes y acentuándose en la zona céntrica del municipio. Ver tabla 1.

Tabla 1. Estratigrafía de Facatativá

UNIDADES DE TIEMPO			EDAD *	LITOLOGIA		
				UNIDADES	NOMENCLATURA	DESCRIPCION
C E N O Z	CUATERNARIO	HOLOCENO	0.01	DEPOSITOS CUATERNARIO S	Qta	Terrazas altas
		PLEISTOCENO	1.6		Qlla	Llanura aluvial
	NEOGENO	PLIOCENO	5.3			

I O C E N O	PALEOGENO	MIOCENO	23.7					
		OLIGOCENO	36.6					
		EOCENO	57.8					
		PALEOCENO	66.4					
	MESOZOICO	CRETACICO	SUPERIOR	144	GRUPO GUADALUPE	Formación Seca	Kpgs	Arcillolita y lodolita pardo grisáceo a rojo, con nódulos de caliche, intercalaciones de arena de cuarzo, de grano fino en capas cubetiformes.
						Formación Labor y Tierna	Ksglt	Arenita de cuarzo, grano fino a medio en capas gruesas.
					Formación Plaeners	Ksgpl	Limolita silícea y chert, en capas delgadas a medias con intercalaciones de lodolita y arenita de cuarzo de grano fino en capas delgadas a medias.	
					Formación Arenisca Dura	Ksgd	Arenita de cuarzo de grano fino, en capas delgadas a muy gruesas, con intercalaciones de limolitas silíceas.	
					Formación Guaduas	KPgg	Parte superior: arcillolita abigarrada, con capas de arenita de cuarzo de grano fino.	
			Parte inferior: arcillolita, limolita y arenita de cuarzo con capas de carbón.					
INFERIOR								

Tomado de: (INGEOMINAS, 2001)

- **Grupo Guadalupe**

El nombre Guadalupe fue utilizado por primera vez por Hettner, 1892 (en Hubach, 1957), quien le asignó el rango de Piso de Guadalupe a las areniscas de la parte alta del Cretácico, que se encuentran en los cerros orientales del área de Bogotá. Hubach (1931) fija el límite Guadalupe - Villeta, ubicándolo por encima de un nivel de caliza fosilífera, llamado Nivel de *Exogira mermeti* o Conjunto Chipaque, el cual se observa a lo largo de la carretera Chipaque - Cáqueza. Este mismo autor divide la unidad en un conjunto inferior arcilloso y otro superior arenoso; posteriormente

eleva el Guadalupe a la categoría de grupo y a cada conjunto al rango de formación, denominándolo Guadalupe Inferior y Guadalupe Superior, además, subdivide la Formación Guadalupe Superior en tres miembros llamados de base a techo: Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca Tierna. Renzoni (1962, 1968) redefine esta unidad estratigráfica, elevando la Formación Guadalupe Superior al rango de grupo y coloca la base sobre la última ocurrencia de lodolitas negras de la Formación Chipaque y su techo en la primera ocurrencia de arcillolitas de la Formación Guaduas; además, divide el grupo en tres formaciones denominadas Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna, estableciendo como sección de referencia la secuencia que aflora a lo largo del carreteable Choachí - Bogotá, entre la quebrada Raizal y en la hoya de la quebrada del Rajadero.

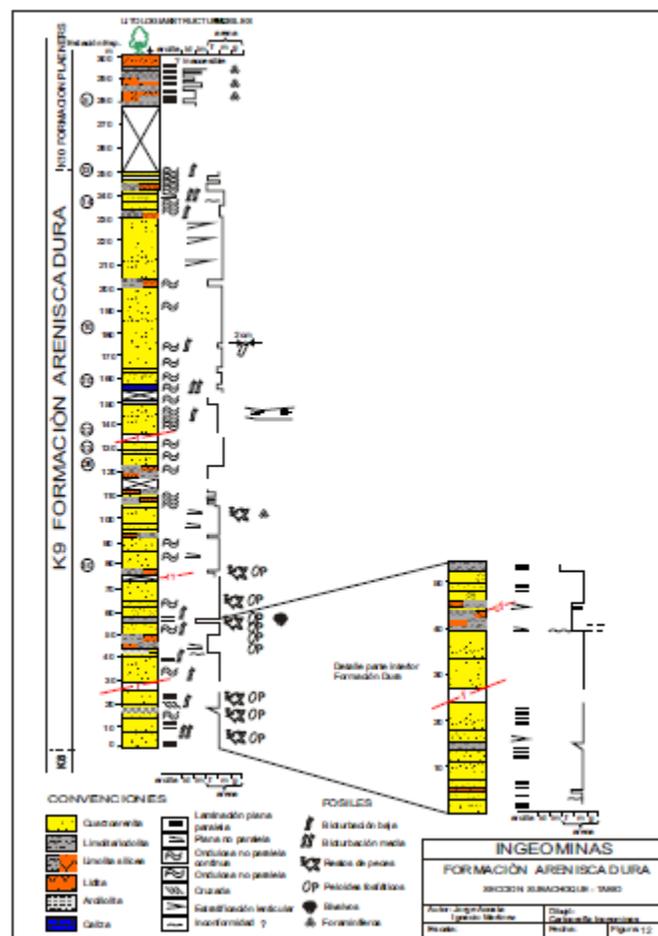
Se emplea aquí esta unidad en el sentido de Renzoni (1962, 1968), es decir, limitada en su base por la última ocurrencia de las lodolitas del Grupo Villeta y en su techo por la primera ocurrencia de las lodolitas de la Formación Guaduas. El Grupo Guadalupe, en general, es netamente arenoso y como se mencionó anteriormente, es dividido de base a techo en las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna, las cuales son descritas a continuación:

- **Formación Arenisca Dura (Ksgd).**

La Formación Arenisca Dura es la unidad litoestratigráfica inferior del Grupo Guadalupe y su nombre se debe a Hubach (1931), quien empleó el término como Miembro Arenisca Dura, estableciendo como localidad tipo la angostura del río San Francisco de Bogotá “arriba del puente de la carretera de circunvalación”. Renzoni (1962) la eleva al rango de Formación Arenisca Dura y propone como sección de referencia la secuencia de areniscas cuarzosas, de grano fino, con niveles de liditas que aflora a lo largo de la carretera Choachí - Bogotá. Pérez & Salazar (1971) proponen como sección tipo la secuencia que aflora por el carreteable al cerro del Cable, al oriente de la ciudad de Bogotá.

Se levantó una columna estratigráfica de esta unidad en la sección Subchoque-Tabio (ilustración 7). Aflora aquí la Formación Arenisca Dura en su totalidad, con un espesor de 250 m. Su base está marcada por la primera aparición de potentes capas de cuarzoarenita, inmediatamente encima de las lodolitas y limolitas de cuarzo de la Formación Conejo, unidad infrayacente. Consiste la unidad de cuarzoarenitas de grano fino, en capas que varían entre muy delgadas y muy gruesas (metro 170 a metro 200, ilustración 7), lenticular a plano paralelas.

Ilustración 7. Columna estratigráfica sección Subchoque - Pacho



Fuente (INGEOMINAS, 2001)

- **Formación Plaeners (Ksgpl).**

Hubach (1931) utiliza inicialmente el término Plaeners, bajo la denominación de nivel, horizonte y posteriormente en 1957, con la categoría de miembro, para

referirse a la secuencia arcillosalidítica, que se localiza en la parte media de la Formación Guadalupe Superior. Renzoni (1968) eleva el Miembro Plaeners a la categoría de Formación Plaeners y propone como secciones de referencia la cantera Bella Suiza, cerca de Usaquén en la ciudad de Bogotá y la carretera Bogotá - Choachí, en la bajada hacia las cabeceras de la quebrada Raizal, en las cuales la unidad litoestratigráfica se presenta completa. Pérez & Salazar (1971) proponen como sección tipo la secuencia que aflora en el cerro comprendido entre las quebradas Rosales y La Vieja. Esta unidad se caracteriza por la presencia de liditas, con delgadas intercalaciones de lodolitas y arcillolitas laminadas, comúnmente silíceas. La estratificación es casi invariablemente paralela en capas muy delgadas a delgadas y rara vez medias. La roca fresca es gris, con abundantes foraminíferos del género *Siphogenerinoides*; la bioturbación es escasa a nula y la laminación paralela continua, es un rasgo constante. El espesor total estimado en cortes geológicos es de 100 m.

- **Formación Labor y Tierna (Ksglt).**

Los términos Labor y Tierna fueron utilizados por primera vez con sentido estratigráfico por Hubach (1931) para designar la parte arenosa superior del Guadalupe; posteriormente, en 1957, el mismo autor eleva estos términos a la categoría de miembros, pertenecientes a la Formación Guadalupe Superior. Renzoni (1962, 1968) es quien propone el nombre y el rango de esta unidad litoestratigráfica, para representar la parte superior del Grupo Guadalupe, estableciendo como sección de referencia la secuencia que aflora en la carretera Choachí - Bogotá, antes de llegar al páramo, en la quebrada Rajadero. Se agrupan aquí las formaciones Labor y Tierna siguiendo criterios cartográficos y se hace referencia al trabajo de Hernández (1990), quien calcula un espesor aproximado de 147 m para las dos unidades. Su base está marcada por la primera ocurrencia de arenitas sobre las liditas de la Formación Plaeners, mientras que su techo está dado por la primera ocurrencia de arcillolitas de la Formación Guaduas.

Litológicamente se caracteriza por la ocurrencia de arenitas de cuarzo de grano fino a medio, en capas medias a gruesas y su geometría es lenticular. Intercalaciones de lodolitas y limolitas de cuarzo, a veces silíceas, ocurren esporádicamente.

- **Formación Guaduas (KTg)**

El nombre de Guaduas se debe a Hettner, 1892 (en Hubach, 1957), para referirse a la unidad de lodolitas y arenitas, comprendidas entre el Grupo Guadalupe y la Formación Cacho; este mismo autor establece, además, la localidad tipo en Guatativa. Su base está marcada por la primera aparición (extensiva) de arcillolitas, sobre las arenitas del Grupo Guadalupe, mientras que su techo está representado por la primera aparición de arenitas subarcósicas a sublíticas (facies tipo Bogotá), pues arenitas con facies tipo Cacho (de cuarzo) no se observaron en el área de estudio. Sin embargo, al norte de Facatativá aflora en el sinclinal el Dintel.

Mojica et al. (1978) levantaron algunas columnas de la Formación Guaduas en el área de Subachoque y calcularon su espesor entre 700 y 900 m, para efectos de cartografía y recursos minerales (carbones). Dichos autores dividieron esta unidad en dos segmentos, uno inferior constituido principalmente de arcillolitas, limolitas, arenitas y carbón y el otro superior constituido por arcillolitas abigarradas principalmente, con algunas capas de arenitas y carbón hacia la base y el techo.

La unidad consta en general de arcillolitas laminadas a no laminadas, gris claro a abigarradas, con intercalaciones de cuarzoarenitas grises, de grano medio a fino y algunas capas de carbón.

- **Formación Seca (KTs)**

El nombre de Seca proviene de la quebrada Seca (Cambao), según De Porta (1966). Dicho autor no menciona con claridad sus estratos de límite, pero es claro que la unidad se halla limitada en su base por la Formación Cimarrona y en su techo por la Formación Hoyón, que tiene como sección tipo la carretera Cambao - San Juan de Río Seco y como sección de referencia la que se encuentra sobre la carretera Honda - Guaduas. Su límite inferior no es visible según la plancha 227 (Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero - Ambiental y Nuclear- INGEOMINAS, 2001), por encontrarse afectado por la Falla del Alto del Trigo, aunque su límite superior está marcado por la última ocurrencia de lodolitas, color pardo grisáceo, inmediatamente debajo de los conglomerados polimícticos de la Formación Hoyón. A lo largo del carretable Vianí - quebrada Calambata la Formación Seca tiene un espesor aproximado de 700 m, de los cuales se levantaron los 520 m superiores. Allí la unidad consta de lodolitas pardo-grisáceas, con intercalaciones de arenitas y limolitas.

- **Depósitos cuaternarios**

Según el INGEOMINAS (2001) en la Plancha 227 es posible dividir en dos regiones con depósitos cuaternarios diferentes, así:

- I. **Región de la Sabana.**

En la región de la Sabana se presentan depósitos cuyos componentes principales son gravas y arenas que forman terrazas altas claramente diferenciables y separables en tres unidades (van der Hammen et al., 1973), de más antigua a más joven, así: Formación Tilatá, Formación Subachoque, Formación Sabana.

Un segundo tipo lo constituyen los depósitos aluviales recientes (ríos Chicú, Subachoque y Bogotá, por ejemplo) que geomorfológicamente dan terrazas bajas. Un tercer tipo son depósitos de talud indiferenciados, constituidos por bloques de areniscas embebidos en una matriz areno-arcillosa.

Para el área del Distrito Especial de Bogotá, Caro & García (1988) hacen una división más detallada (con fines geotécnicos), de estos depósitos cuaternarios, así:

❖ Complejo de conos, 2) Terrazas altas, 3) Terrazas bajas, 4) Terrazas aluviales, 5) Conos de derrubios, 6) Coluviones y talud, 7) Material de relleno de excavación y 8) rellenos de basura. Esta división se utilizó para completar la cartografía del extremo sur-oriental, de la Plancha (Caro & García, 1988).

## II. Región de la Vertiente Occidental.

Se ha seguido aquí las divisiones hechas por Romero (1986), así:

- **Terrazas.** Constituidas por grandes bloques subangulares a subredondeados de arenisca, generalmente, inmersos en una matriz arenoarcillosa.
- **Depósitos de talud indiferenciados.** Son generalmente antiguos depósitos coluviales, flujos estabilizados y flujos activos. Están constituidos, ya sea por material arcilloso casi exclusivamente o por bloques de areniscas en una matriz arenoso-arcillosa.
- **Depósitos aluviales recientes.** Ocurren sólo muy localmente y están constituidos por bloques pequeños subredondeados de areniscas, liditas y calizas en matriz areno-arcillosa.

De acuerdo a lo anterior, en la zona de estudio se presentan depósitos de Terraza Alta (Qta) las cuales están constituidas por gravas, arenas y arcillas, que se distribuyen a lo largo del valle del río Botello en la vereda el Corzo. Su expresión morfológica corresponde a terrazas con 15 metros de espesor. Su edad es del Plehistoceno – Holoceno.

Respecto a los depósitos Aluviales en la zona de estudio corresponde a sedimentos fluviales de grano fino. Localmente puede contener limos, y en áreas

fangosas, arcillas orgánicas diatomíticas. En el valle del río Botello y Balsillas entre otras se generan bajas y llanuras de inundación las cuales han aflorado particularmente en la vereda Paso Ancho, Moyano y Pueblo Viejo.

## **8.1.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL**

Las rocas que circulan a la Sabana de Bogotá están constituidas principalmente por arenisca, lutitas y arcillitas de edad Cretácica a Terciaria. El patrón estructural principal tiene orientación N-S a NE-SW, con amplios sinclinales y anticlinales estrechos. Los pliegues tienen frecuentemente forma asimétrica con estratos volcados en uno de los flancos, pudiendo estar acompañados por extensos sistemas de fallas longitudinales (Julivert, 1963). A una escala menor, la estructura geológica está principalmente controlada por complejas fallas. Diferentes fallas pueden estar interceptándose, creando bloques irregulares con movimientos de cabeceo y basculamiento propios (Burgl, 1958; Gómez, 1985). Es de destacar que en el área de estudio se distinguen dos eventos de fallamiento. (Hidroconsulta Ltda., 2001)

### **I. Fallas**

De acuerdo a la región enmarcada por la Plancha 227 La Mesa (Instituto de Investigación e Información Geocientífica, Minero - Ambiental y Nuclear-INGEOMINAS, 2001) se encuentra ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental colombiana y conforma parte de su zona axial, así como su flanco occidental. Presenta una alta complejidad tectónica, debido a que hacia esta latitud la cordillera sufre un marcado estrechamiento; por esta razón, para la descripción del presente ítem, la zona se dividirá en tres bloques; cada uno de estos bloques presentan características estructurales propias y está separado del

adyacente por fallas regionales; estos bloques se llamarán de oriente a occidente, así:

Sabana de Bogotá, Anticlinorio de Villeta y Sinclinorio de Guaduas (Ilustración 8). A continuación se describe el de Sabana de Bogotá.

La Sabana de Bogotá es la región más extensa en la plancha 227; cubre un 65% del área; esta zona abarca desde el límite oriental de la plancha, hasta la Falla de Zaragoza-Corraleja; la región se puede dividir en dos sectores, uno sur y otro norte: el sector sur se encuentra localizado desde la carretera Bogotá - Madrid - Facatativá - Albán, al norte, hasta el río Bogotá, al sur, donde se presenta la Falla de Zaragoza, a la altura de la vereda del mismo nombre; esta falla, que limita por el sur la zona, es una estructura de cabalgamiento que tiene una dirección N 50° W y vergencia hacia el suroeste; a la altura del cerro Pan de Azúcar, esta falla cambia de dirección a N10°W y se convierte en el frente de cabalgamiento de Corraleja. Al norte del río Bogotá y asociadas al trazo de la Falla de Zaragoza se observa fallas de cabalgamiento y pliegues de dirección N25°W a N30°W; la relación angular entre estas estructuras con la Falla de Zaragoza indicaría que esta última ha tenido un desplazamiento lateral con sentido sinistral.

Sistemas de fallas de Facatativá. Corresponden a fallas de cabalgamiento con dirección N50° W, con vergencia nororiental terminan al sur contra la falla de Santa Bárbara (Ecoforest Ltda. & Planeación estratégica Ltda., 2008).

Ilustración 8. Principales rasgos de estructurales de Facatativá



cerro Cuadrado, al sur se observa el cabeceo contra la vereda Moyano (Robles & Saenz, 1991).

- **Sinclinal del Dintel**

Esta estructura presenta una dirección N20° E, constituidas por el grupo Guadalupe y en su núcleo la Formación Guaduas; su flanco oriental se ve interrumpido por la falla de Sabaneta. El cierre del sinclinal se ve afectado por varias fallas que lo hacen un bloque separado y complejo, basculado hacia el sur (Robles & Saenz, 1991).

### **8.1.3 GEOMORFOLOGIA**

Según el Plan de Ordenamiento Territorial de Facatativá (Alcaldía Municipal de Facatativá, 2001), a nivel de geomorfología se destacan los siguientes modelados: estructural, lagunar, aluvial, de disección y de extensión local.

La descripción litológica que a continuación se hace se basó en una revisión bibliográfica, un análisis fotogeológico y en visitas de campo:

**Tramo Madrid – Facatativá.** En este sector se distinguen dos subtramos. El primero, corresponde al sector Madrid – Cartagenita, donde la secuencia está conformada, de arriba abajo, por una capa de humus con espesor oscilando entre 0.9 m y 1.6 m. Inmediatamente debajo se encuentra una secuencia de arcilla carmelita a gris, con espesor medido de 5 m. El segundo, comprende el tramo Cartagenita – Facatativá, en este tramo la vecindad de la vía a las montañas conlleva a la presencia de depósitos coluviales conformados por bloques y grandes bloques de arenisca en una matriz arcillo – arenosa; hay predominio de

los bloques, condición clasto soportada. Estos coluviones están cubiertos por una capa de humus cuyo espesor medio es de 1.0 m.

Sin embargo, se puede realizar un análisis más profundo atendiendo al Plan de Ordenamiento de la subcuenca del río Balsillas (Ecoforest Ltda. & Planeación estratégica Ltda., 2008), donde se presenta la siguiente información a fin de presentar la geomorfología de la zona de estudio.

El río Andes (Checua o Botello) recoge el agua del occidente y norte de Facatativá, desde las divisorias con el río Villeta –Negro. Este río luego de unirse con el Subachoque, recibe el nombre de Serrezuela.

La subcuenca del río Botello se organiza a partir de las estructuras de plegamiento y fallamiento del sustrato sedimentario. En este sentido el río Andes –Serrezuela fluyen al sureste siguiendo el control de la falla de rumbo de Facatativá – San Cristóbal y a partir de Madrid el río Balsillas retoma la dirección al sur para unirse al río Bogotá.

### **Sistemas morfogénicos**

De acuerdo con la metodología general propuesta para la cuenca del río Bogotá, un sistema morfogénico identifica un espacio caracterizado por unas formas estructurales y de modelado (actuales o heredadas) en el que funcionan unos procesos además relacionados con las condiciones bioclimáticas y las formas de ocupación social del espacio geográfico.

## **8.2 HIDROGEOLOGÍA**

La información que se presenta en esta investigación es extractada en su mayoría del estudio realizado por Hidroconsulta Ltda, que consistió en la recopilación y el análisis detallado de un considerable número de estudios y proyectos que contienen información geológica, inventario de pozos, geofísica, hidrogeoquímica,

hidráulica de pozos y evaluación hidrogeológica, elaborada para el área por entidades estatales y particulares, con cuya base se desarrolló un modelo hidrogeológico conceptual del área de influencia del municipio. En el desarrollo de este modelo, se procedió a agrupar las unidades litoestratigráficas de acuerdo a sus características hidráulicas, definiéndose las unidades hidrogeológicas representadas en el mapa hidrogeológico (ver anexo 2. plancha No. 2 Hidrogeología Subcuenca río Botello) y cortes o perfiles hidrogeológicos ilustración 9. Las unidades hidrogeológicas se clasificaron como sedimentos con flujo intergranular con muy baja a mediana productividad a la cual pertenecen los acuíferos Aluviales (Qal), Sabana (Qs) y Tilatá (QTt); en rocas con flujo intergranular y esencialmente a través de fracturas a la cual pertenecen los acuíferos Arenisca Labor y Tierna (Ksglt) y Arenisca Dura (Ksgd) y los sedimentos y rocas con limitados o ningún recurso de agua subterránea representado por las unidades Depósitos Aluviales sin Diferenciar (Q), Guaduas (Tkgu) y Plaeners (Ksgpl). Los parámetros hidráulicos de las diferentes unidades hidrogeológicas se obtuvieron mediante la reinterpretación de datos de 31 pruebas de bombeo a caudal constante y recuperación, utilizando el programa Acuífer Test.

Utilizando el programa Aquachem (1998), se reinterpretaron los resultados de los análisis físico-químicos de muestras de agua proveniente de pozos que captan los acuíferos Formación Sabana (Qs), Formación Tilatá (QTt), Formación Guaduas (Tkgu) y del Grupo Guadalupe (Ksg). La caracterización físico-química del agua almacenada en cada acuífero y su probable origen, se determina a partir de la interpretación de los diagramas de Piper, generados por el programa Aquachem (1998), empleando sólo aquellas muestras cuyo balance iónico tuviera un error menor del 15%. De las 23 muestras reinterpretadas, 18 cumplen con el anterior requisito. La poca información referente a análisis físico-químicos recopilados en el área del municipio de Facatativá, sumada a la frecuencia de errores en el balance iónico calculado en gran parte de los análisis, no permite presentar la correlación de la información mediante perfiles hidrogeoquímicos.

En el informe se incorpora un resumen de los resultados del balance hídrico subterráneo realizado, mediante el empleo del modelo numérico desarrollado con base en el modelo Modflow, para la zona de influencia de los municipios de Funza, Mosquera, Madrid y Facatativá. La simulación de los actuales patrones de bombeo de los pozos en la zona evidencia la existencia de un “equilibrio inestable” entre la extracción y la recarga, el cual cambia hacia una inconveniente sobreexplotación del recurso natural subterráneo para el año 2010. Lo anterior se refleja en que los abatimientos actuales, del orden de 20 m a 40 m, pueden incrementarse, como mínimo en 10 m para el año 2010, haciendo cada vez más costosa e inconveniente la extracción de agua subterránea en el área.

El potencial de recarga por lluvia excedente en el área es muy bajo; además, los patrones actuales de bombeo de los pozos generan incrementos constantes de los abatimientos en la zona, como reflejo de una sobreexplotación del recurso subterráneo, pero los ríos y quebradas en el área contribuyen de manera importante al caudal total extraído por el bombeo de los pozos profundos, lo que impone la necesidad de formular y ejecutar proyectos de recarga artificial de los acuíferos en la zona de influencia del municipio mediante el represamiento de agua en los propios cauces, con pequeñas estructuras hidráulicas para garantizar la existencia de niveles de agua que aumenten la recarga natural actual.

Las unidades hidrogeológicas. Las formaciones geológicas presentes en el municipio de Facatativá se han dividido, de acuerdo con las características litológicas, tipo de porosidad y con el valor de la capacidad específica de las diferentes unidades acuíferas o no acuíferas, en los tres sistemas hidrogeológicos que se describen a continuación:

Las capacidades específicas de los principales acuíferos fueron calculadas a partir de pozos que tuvieran datos de pruebas de bombeo a caudal constante, las cuales fueron reinterpretadas mediante el programa AquiferTest (1997).

**Sedimentos con flujo intergranular con baja a alta productividad.** A este sistema pertenecen los siguientes acuíferos: Acuífero Tilatá con capacidades específicas entre 0.08 y 0.43 l/s/m; Acuífero Sabana (Qs) con capacidades específicas que varían desde 0.031 hasta 0.31 l/s/m y Depósitos Aluviales (Qal), el cual carece de datos hidráulicos debido a que en el área de estudio no hay pozos que capten este acuífero; por referencia en otras áreas de la Sabana de Bogotá, se estima una capacidad específica menor de 0.01 l/s/m (Ingeominas, 1993).

- **Acuífero Tilatá (QTt).** El acuífero Tilatá está constituido a la base por arenas de color blanco y blanco grisáceos, mal seleccionadas, cuarzosas, 10% de líticos y gravas finas a medias; al medio hay una alternancia de arenas cuarzosas de grano fino a medio y en ocasiones conglomeráticas con líticos negros y arcillas gris y verde, plástica. Al techo arenas de grano muy fino, cuarzosas con ligeras intercalaciones de arcilla gris.

El acuífero Tilatá (QTt) se depositó durante el Terciario-Cuaternario en un ambiente fluvio-lacustre en forma discordante sobre el acuífero Arenisca Labor y Tierna (Ksglt) de edad Cretácica y está cubierto por el Acuífero Sabana (Qs). Este acuífero es de extensión regional, continuo y de tipo confinado, presentando niveles piezométricos entre 5.5 y 74 m de profundidad. Es recargado por el agua lluvia infiltrada en los piedemontes mediante flujos regionales que posiblemente siguen la dirección de antiguos cauces enterrados. Probablemente también es recargado por flujos laterales provenientes del Acuífero Arenisca Labor y Tierna (Ksglt). La descarga ocurre a través de su explotación con pozos profundos que producen caudales entre 3.0 y 10 l/s con niveles dinámicos entre 30 y 80 m.

Según los parámetros hidráulicos obtenidos a partir del análisis de una prueba de bombeo, el valor de la transmisividad es de  $10 \text{ m}^2/\text{día}$ , el coeficiente de almacenamiento de  $2.0 \text{ E-}06$  y la conductividad hidráulica promedio de  $0.3 \text{ m/día}$ .

- **Acuífero Sabana (Qs).** Este acuífero cubre aproximadamente el 50% del área correspondiente al municipio de Facatativá, constituyendo el principal relleno cuaternario de la Sabana de Bogotá. Litológicamente está constituido por arcillas plásticas de color gris oscuro, con intercalaciones lenticulares de arena suelta, gravas y arena volcánica de color gris claro, registrándose además niveles de turba y lignito. Hacia la base se presentan arenas finas a gravas finas. El espesor de estos depósitos fluctúa entre 60 m y 230 m, pero considerando solamente sus intercalaciones arenosas, se plantea un espesor saturado de 170 m. El acuífero Sabana (Qs) es de ambiente lacustre depositado concordantemente sobre el acuífero Tilatá (QTt) y en algunos sectores se encuentra cubierto por los Depósitos Aluviales (Qal).

Generalmente, el acuífero Sabana (Qs) es de tipo confinado de extensión regional, multicapas, con nivel piezométrico que varía entre 3.5 y 30 m de profundidad. Es recargado a partir del agua lluvia que se infiltra en los piedemontes y se dirige hacia el Suroriente de la cuenca sedimentaria a través de flujos regionales profundos. Probablemente también es recargado mediante flujos regionales laterales, provenientes del acuífero conformado por las rocas del Grupo Guadalupe (Ksg). Su recarga artificial se produce a partir de la explotación, principalmente de pozos que producen caudales entre 0.1 y 3.5 l/s.

De acuerdo con los parámetros hidráulicos obtenidos de pruebas de bombeo la transmisividad del acuífero Sabana (Qs) varía entre 10 y  $15 \text{ m}^2/\text{día}$ , con un coeficiente de almacenamiento de  $6.0 \text{ E-}04$  y una conductividad hidráulica entre 0,1 y  $0,076 \text{ m/día}$ .

- **Acuífero Depósitos Aluviales (Qal).** Este acuífero se presenta rellenando los cauces de los ríos Los Andes y Botello, que atraviesan el municipio de Noroeste a Suroeste, y sus principales afluentes, constituidos por sedimentos de arenas, limos y gravas, con espesores que no superan los 10 m.

Es un acuífero discontinuo de extensión local de tipo libre, conformado por sedimentos no consolidados asociados a los cauces de las corrientes superficiales, de edad Cuaternaria. En este municipio este acuífero es captado por algunos con bajos caudales de extracción por lo general menores de 0,5 l/s, pero carecen de pruebas de bombeo, razón por la cual se desconocen sus parámetros hidráulicos.

**Rocas con flujo intergranular y esencialmente a través de fracturas con mediana a alta productividad.** A este sistema pertenecen los acuíferos Arenisca Labor y Tierna (Ksglt), con capacidad específica entre 0.40 y 0.58 l/s-m, y el Arenisca Dura (Ksgd), con capacidad específica entre 0.21 y 1.12 l/s-m.

- **Acuífero Arenisca Labor y Tierna (Ksglt).** Este acuífero aflora en la parte Norte y Central; sin embargo, se encuentra en la mayor parte del área municipal a diferentes profundidades. Está compuesto por areniscas blancas y pardo amarillentas de grano fino a medio en la base y gruesa a conglomerática en el tope, cuarzosas, interestratificadas con arcillolitas y limolitas silíceas depositadas en un ambiente marino. El espesor promedio de este acuífero es de 130 m. Es un acuífero continuo de extensión regional y de tipo confinado con porosidad primaria y secundaria por fracturamiento, donde los niveles piezométricos del agua se encuentra desde los 13 m hasta los 40 m de profundidad.

La recarga de este acuífero ocurre directamente a través del agua lluvia y del agua superficial infiltrada en sus áreas de afloramiento, dirigiéndose mediante flujos regionales profundos que convergen hacia el centro de la cuenca. Otra fuente de recarga posiblemente proviene de aguas termales que ascienden principalmente a través de fallas como la de Facatativá. Su descarga se sucede mediante flujos laterales que aportan agua a los acuíferos Sabana (Qs) y Tilatá (QTt) y a través de la explotación mediante pozos profundos que producen caudales desde 0,7 l/s hasta 11 l/s, con niveles dinámicos entre 15 m y 85 m.

Según el corte hidrogeológico B-B' ilustración 9 el citado acuífero se encuentra en el sector Occidental cerca a la Falla de Madrid, a una profundidad de aproximadamente 50 m, cubierto por el Acuífero Tilatá (QTt), profundizándose hacia el Oriente donde aparece a los 350 m. Como se anotó anteriormente, el espesor promedio es de 130 m, cubriendo a su vez al acuífero Arenisca Dura (Ksgd). Similar situación se puede observar en el corte B-B' de dirección Norte-Sur.

Los valores de la transmisividad fluctúan desde 10 m<sup>2</sup>/día hasta los 30 m<sup>2</sup>/día, el coeficiente de almacenamiento varía desde 2,0 E-07 hasta 2,0 E-05, en tanto que la conductividad hidráulica varía de 0,08 m/día hasta 1,0 m/día.

- **Acuífero Arenisca Dura (Ksgd).** Este acuífero aflora en la región Occidental, Sur y Central del área municipal; sin embargo, a diferentes profundidades se presenta en la mayor parte del área. Corresponde a una sucesión de areniscas de grano fino a medio, blancas a gris amarillentas, cuarzosas, cemento silíceo, duras y bien seleccionadas, interestratificadas con limolitas silíceas con foraminíferos y arcillolitas depositadas en un ambiente marino durante el Cretáceo.

Es un acuífero discontinuo de extensión regional, restringido a zonas fracturadas, de tipo confinado donde los niveles piezométricos varían desde los 2,5 m hasta los 60 m de profundidad. Su recarga ocurre únicamente en las áreas de afloramiento, cuando éstas se encuentran fracturadas, siguiendo el flujo subterráneo una dirección irregular a través de las fracturas. Su descarga se presenta mediante la explotación con pozos profundos los cuales, producen caudales entre 30 l/s y 70 l/s con niveles dinámicos desde 40 m hasta 84 m.

De acuerdo al corte hidrogeológico A-A' de dirección Este-Oeste (ilustración 9) el acuífero Arenisca Dura (Ksgd) tiene un espesor promedio de 300 m y se encuentra cubierto por el Acuífero Plaeners (Ksgpl), captándose a profundidades cercanas a los 400 m. Se aprecia además que este acuífero reposa sobre un basamento prácticamente impermeable constituido por la Formación Chipaque (Ksch) de edad Cretácica. Los valores de la transmisividad del acuífero varían desde 20 hasta 100 m<sup>2</sup>/día con coeficientes de almacenamiento entre 4.0 E-06 y 6.3 E-05.

**Sedimento y rocas con limitados o ningún recurso de aguas subterráneas.** A este sistema pertenecen los acuitardos Depósitos Aluviales Sin Diferenciar (Q), Guaduas (Tkgu) y Plaeners (Ksgpl). En general, son de extensión local, de tipo libre a confinado, que por su fina litología contienen limitados recursos de agua subterránea.

En el área del municipio de Facatativá el acuitardo Guaduas (Tkgu) presenta algunos niveles o intercalaciones arenosas que producen bajos caudales, generalmente entre 0.3 y 1.5 l/s a partir de niveles piezométricos entre 15 m y 54 m, con niveles dinámicos profundos, desde 48 m hasta 77 m. La transmisividad varía de 0,5 m<sup>2</sup>/día a 25 m<sup>2</sup>/día, el coeficiente de almacenamiento va desde 7,0 E-07 hasta 5,0 E-06 y la conductividad hidráulica fluctúa entre 3,0 E-08 y 5,0 E-05. (Tabla 5.6.1.2.4).

Los Depósitos Aluviales Sin Diferenciar (Q) son impermeables y no son explotados, razón por la cual se desconocen sus parámetros hidráulicos.

**Relación entre la tectónica y los acuíferos del área.** Desde el punto de vista de tectónica, el área del municipio de Facatativá se caracteriza por presentar dos sistemas de fallas bien definidas: Uno de dirección NNE, conocidas como fallas longitudinales, y otro de dirección  $45^{\circ}$  W a  $N60^{\circ}$ W, denominadas fallas transversales. El efecto de estos dos sistemas origina una tectónica de bloques hundidos y levantados.

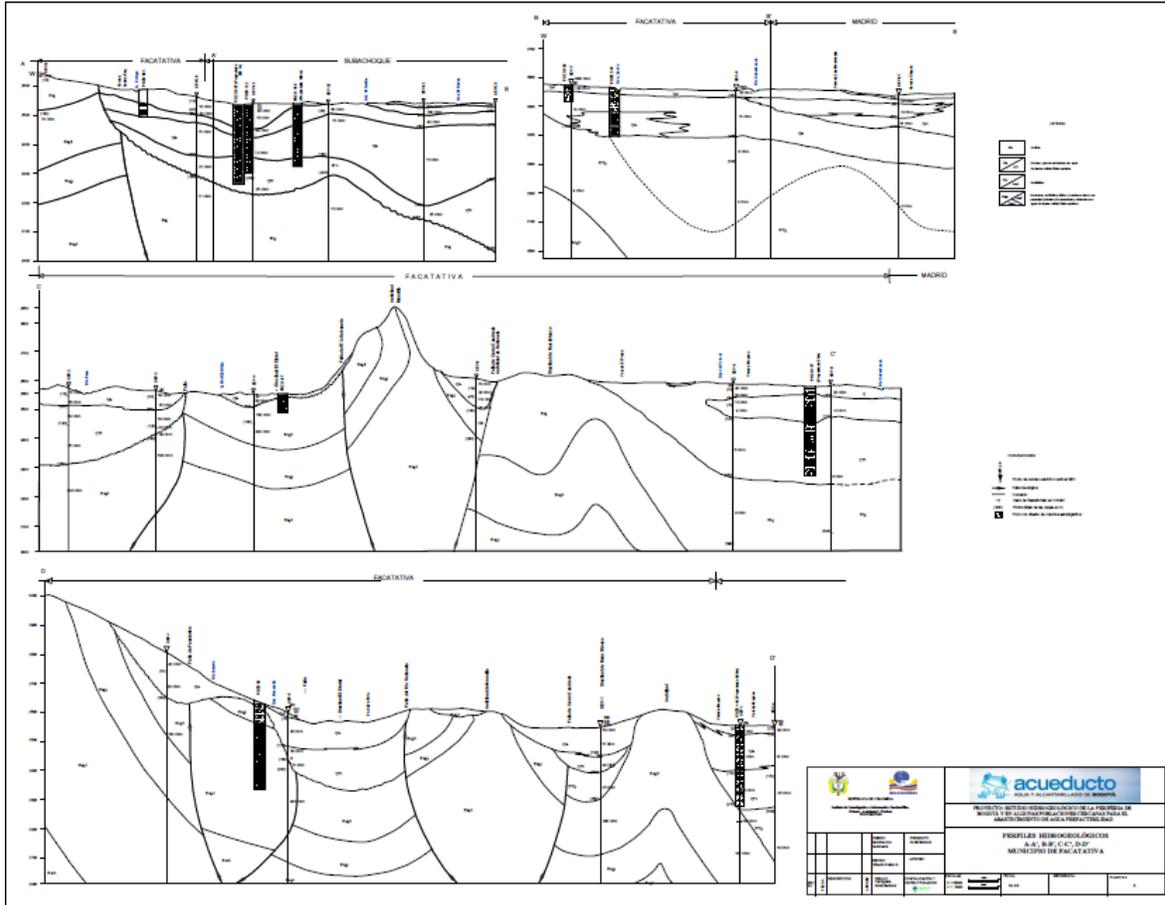
Las fallas longitudinales por lo general son de cabalgamiento con inclinación preferencial hacia el Oriente, desconociéndose el ángulo de inclinación, la magnitud del desplazamiento vertical y el grado de permeabilidad desarrollados en sus planos de fallas. A su vez, las fallas transversales son de rumbo, desconociéndose igualmente los tres parámetros anteriormente anotados.

Ambos sistemas de fallas afectan tanto a rocas Cretácicas como Terciarias. La principal falla longitudinal se conoce como la Falla de Sabaneta que pone en contacto las rocas Terciarias de la formación Guaduas (TKg) con la formación Arenisca Labor y Tierna (Ksglt) de edad Cretácica.

La falla transversal de mayor importancia en el área es la de Facatativá que afecta a rocas de Grupo Guadalupe (Ksg), cubierta en su mayor parte por los sedimentos Cuaternarios. En los cortes hidrogeológicos se infiere el valor de los ángulos de inclinación de las fallas como la magnitud de su desplazamiento vertical.

De acuerdo a la interpretación hidrogeológica, relacionada fundamentalmente con el comportamiento de los niveles estáticos de los pozos que captan los acuíferos Cretácicos, los cuales tienden recuperarse cuando cesa el bombeo, se deduce que aquellas fallas que afectan a estas rocas por lo general son de carácter permeable. Aquellas fallas que ponen en contacto las rocas Terciarias y Cretácicas se consideran de carácter impermeable.

Ilustración 9. Perfiles Hidrogeológicos de Facatativá



Fuente: Estudio hidrogeológico de la periferia de Bogotá y algunas zonas cercanas para el abastecimiento de agua prefactibilidad INGEOMINAS.

### 8.2.1 RED DE FLUJO

Conforme a los datos obtenidos mediante revisión bibliográfica y que se presentan en la tabla 2, se procede a construir la red de flujo con el fin de poder determinar desde esta herramienta la dirección del agua en el acuífero de Facatativá. Es de anotar que la información recolectada procede de los años 2006 y 2008, por lo que se recomienda a las entidades competentes realizar un monitoreo periódico y sistemático de los niveles estáticos, dinámicos y otros que son de suma importancia para el conocimiento y gestión del agua subterránea.

Tabla 2. Niveles estáticos fuentes subterráneas.

NOMBRE FUENTE	UBICACIÓN		NIVEL ESTÁTICO (m)	SISTEMA ACUÍFERO	UNIDAD GEOLÓGICA	PROFUNDIDAD (M)
	ESTE	NORTE				
Guapucha 3	74° 20' 51.3"	4° 49' 31.10"	29,6			
Guapucha 2	74° 21' 6.94"	4° 49' 35.10"	20			
San Rafael I	74° 22' 11.51"	4° 49' 24.02"	0			
San Rafael II			3,15			
San Rafael III	74° 21' 57.10"	4° 49' 59.50"	3,6			
Deudoro Aponte	74° 21' 8.90"	4° 49' 6.10"	14,93			
Manablanc a	74° 20' 52.70"	4° 48' 2.50"	37,95			
Cartagenita	74° 21' 13.40"	4° 46' 55.2"	49,4			
Moyano	975970	1022150	5,5	Cuaternario	Qta	200
Tierra Morada	976800	1028935	4,7	Terciario	Tkgu	7
Cartagenita	971651	1022187	7	Cuaternario	Cuaternario	10
El prado	971256	1023310	4,3	Cuaternario	Cuaternario	7,4
Piedras del Tunjo	969948	1024444	0	Cuaternario	Cuaternario	1,2

Fuente. Empresa Aguas de Facatativá - EAF SAS ESP.2008

Los datos reportados corresponden a sitios naturales como manantiales donde se mide directamente el nivel del agua y de sondeos artificiales donde se mide el nivel piezométrico por medio de una sonda eléctrica, es de anotar que se desconocen las condiciones de las mediciones realizadas, es decir si el acuífero se encontraba en equilibrio y si los tiempos de medición fueron cortos o no.

En el anexo 3. plancha No. 3 se presenta la red de flujo del acuífero de Facatativá, donde se aprecia cada punto georreferenciado con su correspondiente cota

piezométrica sobre un mapa de curvas de nivel a escala 1:40.000. Allí se aprecia con color morado las líneas de flujo y con naranja las líneas equipotenciales, con lo cual se representa la conformación de la superficie piezométrica del acuífero de Facatativá.

A partir de ésta plancha se procede a la interpretación y aplicación de las redes de flujo obtenidas como sigue:

❖ **Determinación de la dirección del movimiento de las aguas subterráneas.**

De acuerdo a la información disponible se pueden identificar dos redes de flujo:

La primera se ubicada en la zona céntrica del municipio, donde el agua se mueve de sur a norte, se puede afirmar que el río cede parte de su agua para alimentar el acuífero, indicando que en esta parte que el acuífero es efluente del río Botello.

En la otra sección ubicada en la zona oriental del municipio se aprecia que el flujo del agua se mueve en dirección oriente a occidente. Lo anterior, en las veredas de Moyano, Paso Ancho, Bermeo, Terra Grata y Tierra Morada.

❖ **Identificación de zonas de recarga y descarga**

De acuerdo al mapa de zonas de interés hidrogeológico (INGEOMINAS, 1995) anexo 4 se pueden identificar claramente las zonas de recarga ubicadas en la zona suroccidente y noroccidente del municipio, que corresponden a las veredas de pueblo viejo y La Tribuna, San Rafael y La Selva respectivamente.

En este sentido se pueden concluir que se identifican dos acuíferos en el municipio de Facatativá claramente definidos por las redes de flujo construidas, el primero corresponde al Sistema de acuífero del Cuaternario y el segundo corresponde al Sistema de acuífero de las areniscas del Guadalupe.

## **8.2.2 EVALUACION HIDROGEOQUIMICA**

El objeto de la evaluación hidrogeoquímica es poder identificar entre otras cosas el tipo de familia de aguas que presenta el municipio, así como poder identificar

posibles contaminaciones por la alta concentración de los iones evaluados principalmente cloruros, sulfatos y nitratos.

Para la evaluación hidrogeoquímica se realizó la revisión documental intensiva a fin establecer que información existe de los pozos, manantiales y aljibes se encuentran en el municipio. En este sentido se identificaron en información reportada por la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR e Instituto Geológico Colombiano (INGEOMINAS) un total de 18 pozos, 7 aljibes y 1 manantial, además de los 7 pozos con los que se abastece el acueducto de Facatativá; de ellos se obtuvo la información básica de ubicación, profundidad y de los principales iones que se relacionan en la tablas 3 y 4.

Tabla 3. Relación de pozos municipio de Facatativá

No.	Fuente	ESTE	NORTE	Vereda	Cuenca	Sis Acuifero	Und Geológica	Prof
1	Pozo	977120	1025720	Paso Ancho 1	SUBACHOQUE	CUATERNARIO	Qta	150
2	Pozo	977260	1025720	Paso Ancho			Qta	150
3	Pozo	977200	1024600	Granada 1			Qta	100
4	Pozo	977270	1023200	Granada 2			Qta	120
5	Pozo	975015	1022830	Moyano 1			Qta	192
6	Pozo	975970	1022150	Moyano 2			Qta	200
7	Pozo	976875	1021810	Moyano 3			Qta	115
8	Pozo	975720	1021700	Moyano 4			Qta	220
9	Pozo	976400	1021560	Moyano			Qta	180
10	Pozo	977560	1023200	Paso Ancho 2			Qta	178
11	Pozo	976780	1026630	Paso Ancho 3			Qta	52
12	Pozo	976750	1025980	Paso Ancho 4			Qta	90
13	Pozo	977120	1023070	Granada			Qtt	281
14	Pozo	975240	1027150	Cuatro Esquinas		TERCIARIO	Tkgu	180
15	Aljibe	976800	1028935	Tierra Morada			Tkgu	5
16	Pozo	971237	1020629	Cartagenita	RIO BOJACA	CRETACEO	Ksg	200
17	Pozo	972945	1022437	El Prado 1		CUATERNARIO	CUATERNARIO	40
18	Pozo	973571	1020192	El Corso 1				70
19	Pozo	973066	1021483	El Corso 2				

No.	Fuente	ESTE	NORTE	Vereda	Cuenca	Sis Acuifero	Und Geológica	Prof
20	Aljibe	971035	1021580	Manablanca				5
21	Aljibe	971651	1022187	Cartagenita 1				15
22	Aljibe	973000	1021300	El Corso				3.5
23	Aljibe	972815	1022700	El Prado 2				11
24	Aljibe	972699	1023925	El Prado 3				10
25	Aljibe	971256	1023310	El Prado				5
26	Manantial	969948	1024444	Piedras del Tunjo				

Fuente: (INGEOMINAS, 1991)

Tabla 4. Caracterización hidrogeoquímica de pozos en Facatativá

N o.	Fuente	Vereda	Sist Acuifero	Und Geológ	Pr of	Ca <sup>2+</sup> mg/L	Mg <sup>2+</sup> mg/L	Na <sup>+</sup> mg/L	K <sup>+</sup> mg/L	OH <sup>-</sup> mg/L	CO <sup>3-</sup> mg/L	HC O <sup>3-</sup> mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	NO <sup>3-</sup> mg/L	SO <sup>4-</sup> mg/L	FAMILIA DE AGUA
1	Pozo	Paso Ancho 1	CUATERNARIO	Qta	150	5	3.8	118	10	0	0	308	40.8	0	26.3	Sódica bicarbonatada
2	Pozo	Paso Ancho		Qta	150	7	6.2	95	20	0	0	261	29.8	4.9	24.4	Sódica bicarbonatada
3	Pozo	Granada 1		Qta	100	10.3	8.6	93.8	19.7	0	0	270	34	0	27.2	Sódica bicarbonatada clorurada
4	Pozo	Granada 2		Qta	120	9.2	5.3	99.6	44.4	0	0	283	25.4	0	22	Sódica bicarbonatada clorurada
5	Pozo	Moyano 1		Qta	192	7.2	6.4	15.4	8	0	0	134.6	6.8	0	14.6	Bicarbonatada
6	Pozo	Moyano 2		Qta	200	8.3	3.3	83.6	10.4	0	0	239	16.7	0	21.3	Sódica bicarbonatada
7	Pozo	Moyano 3		Qta	115	9	4.9	87.7	10.6	0	999	285	25.6	0.3	27.5	Bicarbonatada
8	Pozo	Moyano 4		Qta	220	20	3.3	76.7	21	0	0	231	21	0	25.4	Sódica bicarbonatada
9	Pozo	Moyano		Qta	180	10	3.5	75	21	0	0	236	24.2	0	28.4	Sódica bicarbonatada
10	Pozo	Paso Ancho 2		Qta	178	10.2	6.3	92	13.4	0	0	289	13.9	0	24	Sódica bicarbonatada
11	Pozo	Paso Ancho 3		Qta	52	1.7	1.5	66	7.2	0	0	166	10.5	0	19.8	Sódica bicarbonatada
12	Pozo	Paso Ancho 4		Qta	90	7.6	4.6	132	10.6	0	999	336	49.5	0	25.5	Bicarbonatada
13	Pozo	Granada		Qtt	281	8.8	3.9	105	9.4	0	0	254	52	0	18.4	Sódica bicarbonatada clorurada
14	Pozo	Cuatro Esquinas	TERCIARIO	Tkgu	180	28.8	7.4	40.9	1	0	0	152	4	0	63.4	Sódica cálcica bicarbonatada

N.º	Fuente	Vereda	Sist. Acuífero	Und. Geológico	Prof.	Ca <sup>2+</sup> mg/L	Mg <sup>2+</sup> mg/L	Na <sup>+</sup> mg/L	K <sup>+</sup> mg/L	OH <sup>-</sup> mg/L	CO <sup>3-</sup> mg/L	HC O <sup>3-</sup> mg/L	Cl <sup>-</sup> mg/L	NO <sup>3-</sup> mg/L	SO <sup>4-</sup> mg/L	FAMILIA DE AGUA
15	Aljibe	Tierra Morada		Tkgu	5	9.3	1.4	2.3	0.8	0	0	14.4	9.2	0.1	10.3	Cálcica clorurada bicarbonatada
16	Pozo	Cartagenita	CRETACEO	Ksg	200	44	2.9	3.9	4.8	0	0	189	1.6	0	15.7	Cálcica bicarbonatada
17	Pozo	El Prado 1	CUATERNARIO	CUATERNARIO	40	4	2.8	15	10.3	0	0	52	11	0	13.4	Sódica bicarbonatada
18	Pozo	El Corso 1			70	8.9	4.5	43	87.4	0	0	139	5.6	21.6	23.6	Sódica bicarbonatada
19	Pozo	El Corso 2				18	3.4	29.2	11.2	0	0	109	3.8	2.5	17.3	Sódica bicarbonatada
20	Aljibe	Manablanc a			5	40	3.8	5.2	11	0	0	179	1.2	0	18.7	Cálcica bicarbonatada
21	Aljibe	Cartagenita 1			15	74	23.5	105.6	115	0	0	205	152	60.8	97	Mixta clorurada bicarbonatada
22	Aljibe	El Corso			3.5	13.5	5	14.5	9.8	0	0	66	16.9	2	32.3	Mixta clorurada bicarbonatada
23	Aljibe	El Prado 2			11	20.8	5.1	6.7	1.9	0	0	69.6	2.3	0	40.3	Cálcica bicarbonatada sulfatada
24	Aljibe	El Prado 3			10	18.2	1.5	2.3	0.4	0	0	8.6	7.3	0	8.2	Cálcica
25	Aljibe	El Prado			5	4.3	0.4	1.4	0.4	0	0	5.3	1.9	0.1	2.6	Cálcica
26	Manantial	Piedras del Tunjo					24	1.6	392	3.7	0	0	62.4	4.4	0.3	12.9

Fuente: (INGEOMINAS, 1991)

En el anexo 5, la plancha No. 5 presenta la distribución espacial y composición química del acuífero de Facatativá que representan las familias de agua que conforman la zona de estudio. De este mapa se puede apreciar que en la parte occidental del municipio hacia las veredas de Tierra Morada, Tierra Grata, Moyano, Paso Ancho y Prado se presenta un patrón de similitud en las gráficas de stiff, lo que infiere que sus aguas son de carácter sódicas bicarbonatadas principalmente, con alto grado de mineralización e intercambio iónico. Sin embargo, causa curiosidad aquellas que se salen de dicho patrón y que corresponden a los pozos Granada, Granada 1, Granada 2, y Paso Ancho, los cuales presentan índices elevados de cloruros con valores hasta de 52 mg/L, con

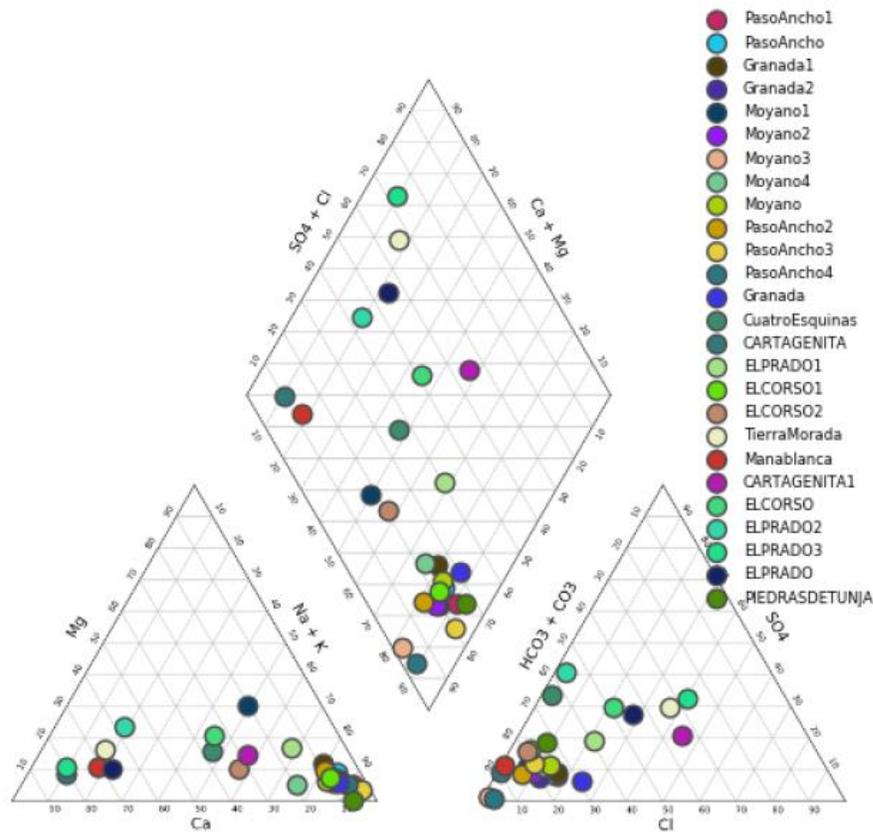
lo que se puede inferir procesos de contaminación por descargas domésticas o residuales; o en su defecto puede deberse las condiciones naturales del acuífero ya que el agua puede ganar iones durante su recorrido por el relleno sedimentario de la roca. Así mismo, sucede con el pozo Cuatro Esquinas el cual presenta concentraciones para sulfatos de 63.4 mg/L. Lo que generaría una recomendación de indagar exhaustivamente la alta concentración de cloruros atendiendo a la profundidad de los pozos.

Para la zona céntrica de la plancha 5 municipio de Facatativá predominan las aguas de la familia cálcica bicarbonatada, pero al igual que en el caso anterior los aljibes El Prado 2, el Corso y Cartagenita presentan valores elevados para sulfatos hasta de 97 mg/L y de cloruros hasta de 97 mg/L, que por ser superficiales pueden indicar contaminación directa por descargas de aguas residuales domésticas.

A partir de la ilustración 11 determinada por el método de Piper acuífero de Facatativá se puede corroborar los resultados obtenidos en el método de Stiff. Lo anterior debido a que al dibujar las proporciones de los iones en el rombo central que representa la composición deducida del agua subterránea, se puede apreciar que las aguas geoquímicamente similares quedaron agrupadas en la parte inferior del rombo que indica una composición principal de familias sódicas bicarbonatadas presentando intercambio iónico. Sin embargo, se presenta claramente la proyección que tienen El Corso, Tierra Morada y Moyano hacia cloruradas.

Cabe anotar también a manera de conclusión que debido a que predominan aguas de naturaleza bicarbonatada con alta concentración y que corresponden a aguas situadas en zonas de proximidad a las áreas de recarga, donde seguramente es menor el tiempo de residencia y/o presentan un recorrido más rápido, al situarse en su mayoría en zonas de infiltración con mayor pendiente. Lo anterior coincidiría con la secuencia de Chevotareb, la cual señala que aguas recién infiltradas son del tipo bicarbonatado y, a medida que aumenta su recorrido y tiempo de residencia, pasan a ser sulfatadas y finalmente cloruradas (San Juan López, 2015).

Ilustración 10. Clasificación de las aguas subterráneas acuífero de Facatativá



Fuente: autores. (gidahatari.com, 2018)

### 8.3 HIDROLOGÍA

La hidrología en la zona de estudio está determinada por su régimen climático característico, que a su vez está en estrecha relación con sus altitudes y que oscilan entre los 2600 y los 3500 msnm, con una altitud media 2730 msnm. Su topografía presenta relieves montañosos con predominio de relieves ondulados y fuertemente ondulados a fuertemente quebrados y escarpados constituyendo el 42.5% del área total. En la zona centro sur de la subcuenca del río Botello se

localiza la zona lacustre aluvial con relieves planos a ligeramente ondulados, la cual representa el 43.2% del área total de la subcuenca. Anexo 6. Hidrografía de Facatativá.

## **CUENCA HIDROGRÁFICA**

Facatativá es un municipio productor de agua y en la mayoría de su territorio presenta recarga de acuíferos. El territorio hace parte de la cuenca hidrográfica del río Bogotá donde se encuentra la subcuenca del río Botello y el río Subachoque.

La Subcuenca del río Botello nace en el Cerro Peñas del Aserradero, tiene una extensión de 20 kilómetros, abarcando 5.806 hectáreas, que constituyen el 37.22% del área total del municipio, atravesando las veredas La Tribuna, La Selva, Los Manzanos, Prado, Moyano y El Corzo. Sus afluentes son las quebradas La Pava, Mancilla, La Hierbabuena y algunos drenajes que nacen en los cerros del norte del municipio.

La subcuenca hidrográfica del río Botello hasta la zona de influencia del municipio de Facatativá está conformada por las micro cuencas de los ríos Los Andes, Pava y la quebrada Mancilla, las cuales son, además, alimentadas por un buen número de afloramientos naturales o nacederos existentes a diferentes cotas, a lo largo y ancho de sus cuencas, en razón de las formaciones geológicas presentes y de su estructura.

En sus cabeceras, aún existen algunas zonas, aunque reducidas, con cobertura vegetal nativa, lo cual establece condiciones favorables de protección parcial de las cuencas. La deforestación parece haber sido una constante en el pasado, por el desarrollo de actividades agrícolas y pecuarias, siendo estas últimas las de mayor énfasis en el uso actual de los suelos de estas cuencas. (Plan de Ordenamiento Territorial de Facatativá, 2002).

## **Climatología**

Con el fin de establecer la caracterización climatológica de la microcuenca del Botello, se seleccionaron las estaciones más cercanas localizadas en el área de estudio, y se determinaron la variabilidad espacial de la precipitación, la temperatura y la evapotranspiración.

Para la descripción cualitativa y distribución temporal de los parámetros climáticos, se seleccionaron las estaciones climatológicas Venecia, La Tribuna y El Tesoro que hacen parte de la subcuenca del río Balsillas y está localizada directamente en la microcuenca del río Botello.

### Información climatológica

Como se mencionó anteriormente se seleccionaron las estaciones climatológicas operadas por la Corporación Autónoma de Cundinamarca -CAR y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM localizadas en la microcuenca de la zona de estudio con el fin de homogeneizar y verificar la serie de datos y regionalizar algunos parámetros climáticos, tales como precipitación, evapotranspiración y temperatura. Ver Anexo 7. Plancha No. 7 Estaciones hidroclimatológicas.

A continuación, se presenta la tabla con las estaciones seleccionadas:

Tabla 5. Estaciones Hidroclimáticas seleccionadas

CAT	NOMBRE	CORRIENTE	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN (m.s.n.m)
CP	Venecia	Río Bojacá	Facatativá	0452 N	7425 W	2673
PG	La tribuna	Río Andes		0451 N	7425 W	2723
PM	Tesoro	Río Bojacá		0448 N	7419 W	2610
LM	El Recreo	Río Bojacá		0448 N	7420 W	2561
LM	Rebose Gatillo	Río Bojacá		0447 N	7422 W	2600

Fuente CAR

Convenciones: CP climatológica principal, PG pluviográfica. LM limnimétrica

## Verificación y complementación de la Información

Una vez recopilada la información, se procedió a verificar los datos faltantes de las series mensuales y su valor total multianual y los valores totales anuales, los cuales se completaron con el fin de obtener el valor más representativo de las series. Lo anterior se realizó para la precipitación con el método del inverso de la distancia (ver ecuación 1) y obtener el valor extrapolado para la zona de estudio más preciso. A partir del valor promedio mensual multianual se completaron los valores concernientes a caudales y evapotranspiración de las series anuales.

$$P_J = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{P_i}{(D_{ij})^2}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{(D_{ij})^2}} \quad \text{Ecuación 1}$$

Dónde: P= precipitación

D= distancia entre estaciones con respecto a la precipitación

A partir de esta expresión se asignaron valores a la precipitación en los meses donde estos no existen, teniendo en cuenta la distancia y distribución de las estaciones meteorológicas y su influencia sobre cada valor.

Otro método fue obtener el valor sacando el promedio aritmético de las series mensuales multianuales de la misma estación meteorológica.

## Precipitación

En la microcuenca se encuentran localizadas las estaciones pluviométricas y climatológicas de Venecia, La Tribuna y El Tesoro, las cuales se utilizaron para los análisis espaciales de precipitación; se usaron registros desde el año 1991 hasta el 2014 pues durante estos 15 años los registros se encontraban más continuos. Ver Anexo 7. Plancha No. 7 Estaciones hidroclimatológicas

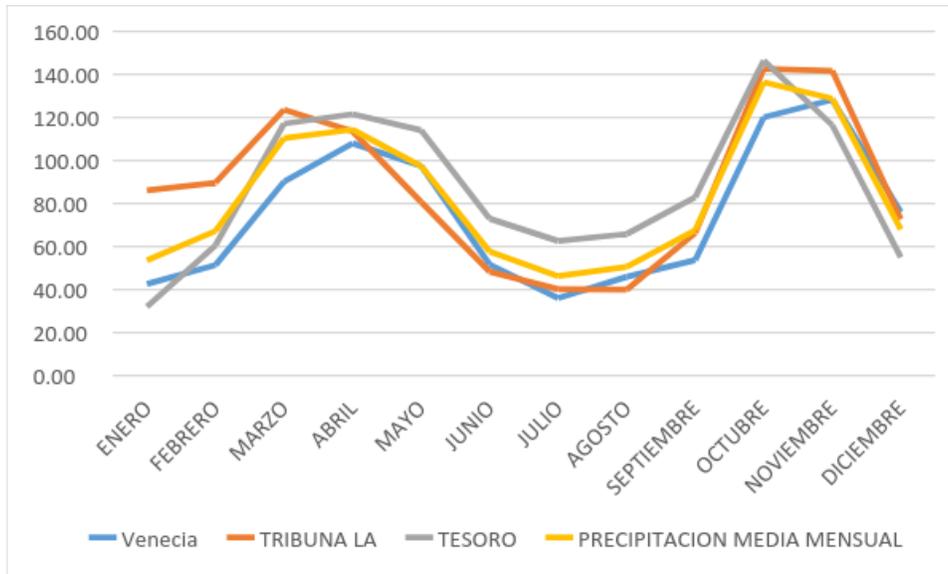
El comportamiento de la precipitación a lo largo del año, es de tipo bimodal (ilustración 12), que se genera por el paso de la zona de confluencia intertropical - ZCIT, tanto en el primer semestre del año, como en el segundo. El periodo húmedo en el primer semestre del año se presenta entre los meses de marzo,

abril y mayo, siendo abril el mes más húmedo, con un valor promedio de 114,37 mm; en el segundo semestre se presenta entre los meses de octubre a noviembre siendo octubre el más húmedo del año con un valor de 136,44 mm. El periodo de estiaje se extiende de diciembre a febrero, observándose a enero como el mes más seco, con un registro del orden de los 53.57 mm media mensual multianual y a mediados del año entre en los meses junio a septiembre, observándose que julio es el más seco, con un registro de 46.24 mm media mensual multianual. El valor total de la precipitación promedio anual multianual es de 998,07 mm, con valores máximos de 1670,1 mm anual multianual y valores mínimos con registros de 723,49 mm anual multianual. Ilustración 13.

Tabla 6. Precipitación mensual multianual por estación y su promedio

MES	ESTACION			PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL
	VENECIA	TRIBUNA	TESORO	
ENERO	42,57	86,11	32,02	53,57
FEBRERO	51,33	89,68	60,61	67,21
MARZO	90,19	123,58	117,15	110,31
ABRIL	107,97	113,56	121,58	114,37
MAYO	97,48	80,74	114,11	97,44
JUNIO	51,61	48,33	72,96	57,63
JULIO	35,96	40,18	62,57	46,24
AGOSTO	45,92	39,93	65,82	50,56
SEPTIEMBRE	53,70	66,26	82,90	67,62
OCTUBRE	120,08	142,68	146,56	136,44
NOVIEMBRE	128,25	141,74	116,40	128,80
DICIEMBRE	76,05	72,62	55,03	67,90

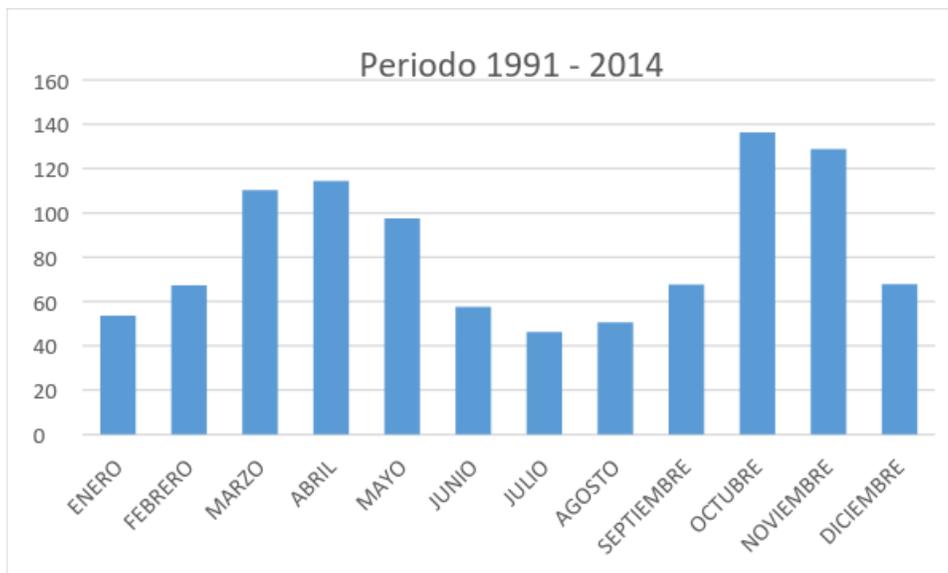
Ilustración 11. Precipitación mensual promedio en las estaciones: Venecia, la Tribuna y El Tesoro.



Fuente los autores

En la figura 2 se presenta la distribución temporal mensual multianual promedio de las estaciones Venecia, La Tribuna y El Tesoro.

Ilustración 12. Histograma precipitación media mensual multianual (mm)



Fuente: Los autores

## **Evapotranspiración.**

La evapotranspiración es la pérdida de humedad de una superficie por evaporación directa junto con la pérdida de agua por transpiración de las plantas. Se expresa en mm por unidad de tiempo.

Se determinó teniendo como referencia a la estación climatológica Venecia ubicada en la microcuenca del río Balsillas donde se trabajaron los valores mensuales de la serie, por ser la única estación ubicada en el área con información disponible. Ver tabla 7.

De otra parte, se completaron las series de datos multianuales, en los meses faltantes con el método de la media aritmética. Así mismo, se tomaron los datos mensuales durante 24 años desde 1991 hasta 2014 para completar los meses faltantes, esto debido a que en estas series se encontraba la mayor cantidad de datos tomados por la estación.

Para realizar las series de distribución temporal de la evapotranspiración, se tomaron los años desde 1991 hasta 2014, y así, unificar las series con las demás variables. La evapotranspiración es de tipo uniforme pues su variación a lo largo del año es del 20% con respecto a la evapotranspiración promedio mensual, presentando los registros más altos en los meses de marzo en el primer semestre del año, con un valor de 81,08 mm y en el segundo semestre en septiembre con un valor de 80,66 mm. El resto del año los valores fluctúan entre 70 y 74 mm. Ilustración 14.

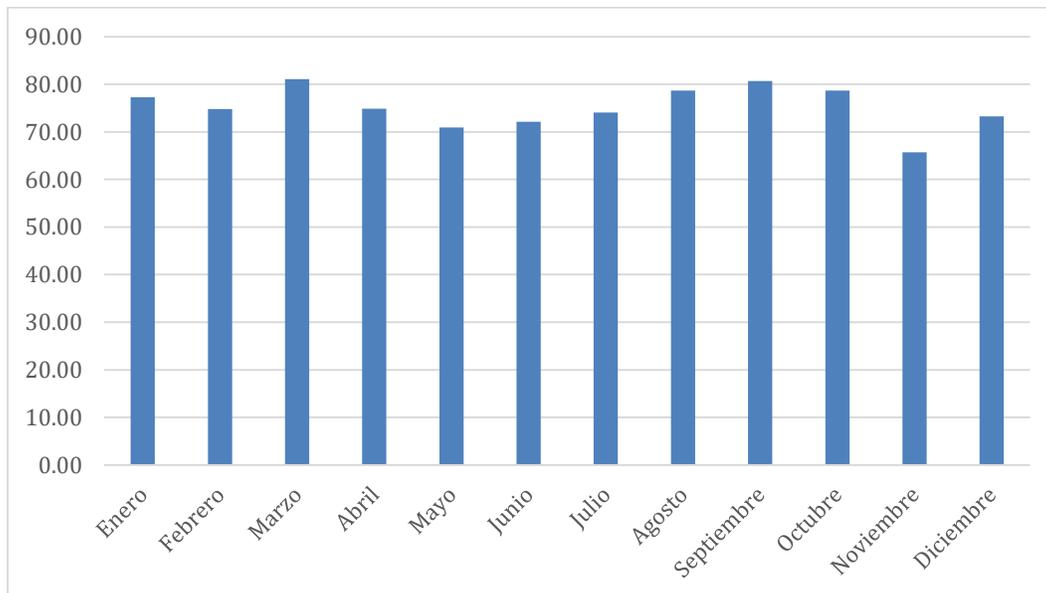
El valor total promedio anual multianual es aproximadamente 902,144 mm, con valores máximos de 1397,8 mm anuales y valores mínimos de 733,7 mm anuales. En general se puede afirmar que la precipitación anual es más alta que la evapotranspiración.

Tabla 7. Evapotranspiración mensual multianual estación Venecia

MES	Evapotranspiración (mm)
Enero	77,25
Febrero	74,77
Marzo	81,08
Abril	74,88
Mayo	70,91
Junio	72,14
Julio	74,09
Agosto	78,71
Septiembre	80,67
Octubre	78,70
Noviembre	65,71
Diciembre	73,24
Total anual	902.144

Fuente CAR.

Ilustración 13. Histograma evaporación media mensual



Fuente. Autores

### Escorrentía.

El colector principal de las aguas superficiales es el río Botello, el cual recoge las aguas de toda el área de influencia en la zona de estudio; con una extensión de 21,03 Km<sup>2</sup>. Área que corresponde a la denominada cuenca húmeda o “imbrífera” del río Botello.

Se tienen registros de caudales medios mensuales desde el año 1999 hasta 2014 periodo con el que se determinó el patrón de comportamiento hidrológico.

Para este análisis se tomaron los datos de caudales de las estaciones el Recreo y Rebose Gatillo, las cuales corresponden al área de la zona de estudio y es allí donde se realiza el balance hídrico. Ver Anexo 7. Plancha No. 7 Estaciones hidroclimatológicas.

Con un área de influencia sobre la zona de estudio de 21,03 Km<sup>2</sup> se realizó la transformación de datos y a partir de los valores de caudales mensuales multianuales se obtienen los valores de escorrentía mensual multianual, igualando unidades se procede a realizar el balance hídrico.

En la tabla 8. se presentan las variables para realizar el Balance Hídrico y la conversión realizada para igualar unidades de caudales (m<sup>3</sup>/s) en escorrentía (mm) mensual multianual por estación limnimétrica.

Tabla 8. Variables para realizar el balance Hídrico

MES	Caudal (Q) Rebose GATILLO (m <sup>3</sup> /s)	Precipitación (mm)	Caudal (Q) RECREO (m <sup>3</sup> /s)	Evapotranspiración EVT (mm)
Enero	0,41	53,57	0,36	81,50
Febrero	0,45	67,21	0,38	74,63
Marzo	1,07	110,31	0,62	81,62
Abril	1,88	114,37	0,63	76,09
Mayo	2,19	97,44	0,65	71,89

MES	Caudal (Q) Rebose GATILLO (m <sup>3</sup> /s)	Precipitación (mm)	Caudal (Q) RECREO (m <sup>3</sup> /s)	Evapotranspiración EVT (mm)
Junio	0,50	57,63	0,44	72,85
Julio	0,17	46,24	0,31	74,96
Agosto	0,12	50,56	0,27	80,54
Septiembre	0,06	67,62	0,28	77,90
Octubre	0,34	136,44	0,34	76,91
Noviembre	1,93	128,80	0,69	64,59
Diciembre	1,42	67,90	0,88	67,29
<b>PROMEDIO</b>	<b>0,88</b>	<b>83,17</b>	<b>0,49</b>	<b>75,07</b>

Fuente: autores

Tabla 9 . Conversión de unidades. Caudal (m<sup>3</sup>/s) a Escorrentía (mm).

Estaciones: Rebose Gatillo y El Recreo.

TRANSFORMACIÓN DE UNIDADES PARA BALANCE HÍDRICO					
MES	Q(REBOSE GATILLO) m <sup>3</sup> /s = (Q/A)*1000= mm	PRECIPITACIÓN mm	Q(RECREO) m <sup>3</sup> /s = (Q/A)*1000= mm	EVT mm	INFILTRACION mm
Enero	0,000020	53,57	0,359	81,50	-28,29
Febrero	0,000021	67,21	0,383	74,63	-7,81
Marzo	0,000051	110,31	0,619	81,62	28,06
Abril	0,000089	114,37	0,628	76,09	37,65
Mayo	0,000104	97,44	0,650	71,89	24,90
Junio	0,000024	57,63	0,444	72,85	-15,66
Julio	0,000008	46,24	0,305	74,96	-29,03
Agosto	0,000005	50,56	0,273	80,54	-30,26
Septiembre	0,000003	67,62	0,280	77,90	-10,56
Octubre	0,000016	136,44	0,343	76,91	59,18
Noviembre	0,000092	128,80	0,692	64,59	63,51
Diciembre	0,000068	67,90	0,880	67,29	-0,28

Fuente. Autores

### Balance Precipitación – Evaporación

Los volúmenes anuales precipitados son cercanos a los evapotranspirados, excepto para los meses de estiaje donde se presenta déficit hídrico.

Con el fin de determinar los meses de déficit y exceso en el año, se estableció el balance de precipitación vs evapotranspiración. Ilustración

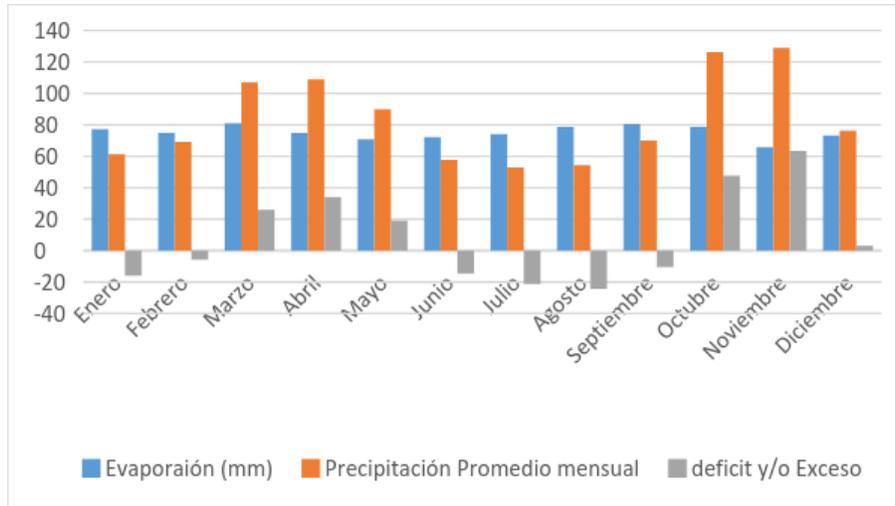
En las ilustraciones 15 y 16. Se presenta gráficamente el balance en el cual se observa claramente que, durante el periodo húmedo de marzo, abril y mayo y octubre y noviembre, la precipitación excede a la evapotranspiración. En el resto de los meses, se presenta un déficit marcado, para los meses de enero de 16,09 mm; de julio de 21 mm y agosto de 24 mm; los cuales alcanzan los valores más altos de déficit en el año.

Tabla 10. Déficit y/o exceso mediante la relación evapotranspiración y la precipitación

<b>MES</b>	<b>EVAPOTRANSPIRACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (MM)</b>	<b>PRECIPITACIÓN MEDIA MENSUAL MULTIANUAL (MM)</b>	<b>DÉFICIT Y/O EXCESO</b>
Enero	77,25	61,16	-16,09
Febrero	74,77	69,04	-5,73
Marzo	81,08	107,04	25,96
Abril	74,88	108,96	34,07
Mayo	70,91	89,93	19,01
Junio	72,14	57,68	-14,46
Julio	74,09	52,84	-21,25
Agosto	78,71	54,39	-24,32
Septiembre	80,67	70,07	-10,60
Octubre	78,70	126,41	47,71
Noviembre	65,71	129,07	63,36
Diciembre	73,24	76,39	3,15

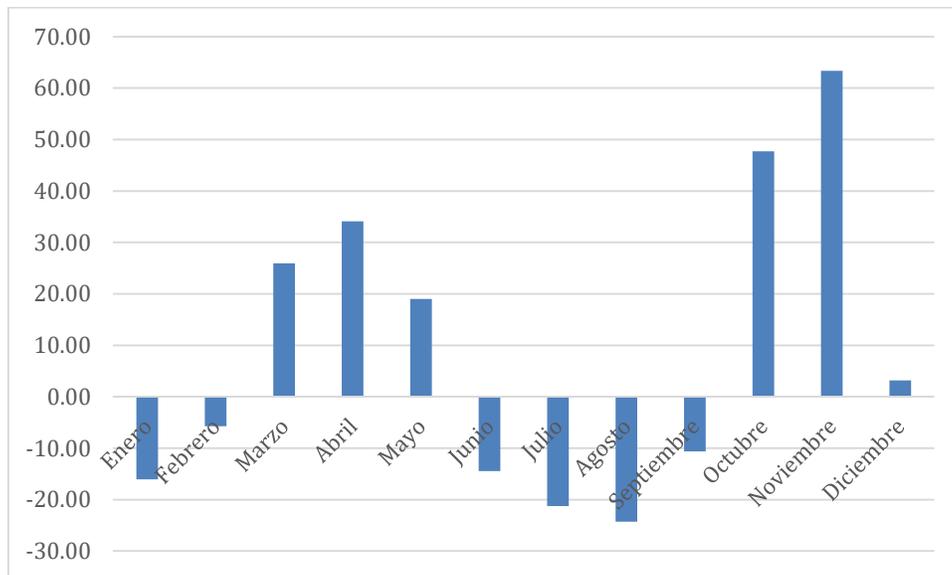
Fuente. Autores

Ilustración 14. Distribución temporal Balance Evaporación – Precipitación  
 – Periodo 1991 – 2014



Fuente: autores

Ilustración 15. Histograma de Déficit vs exceso



Fuente: autores

### Balances hidroclimáticos

Los balances hidroclimáticos permiten establecer el déficit o exceso de agua a nivel mensual y anual en una zona específica de estudio. Se calculó el balance hídrico para las estaciones seleccionadas dentro del área de la microcuenca, con los datos de precipitación y evapotranspiración potencial y se calculó por medio del método de Thornthwaite (Remeneiras, 1971).

La precipitación efectiva en el suelo se tomó generalizada, igual a la precipitación total, teniendo en cuenta que los balances se realizaron donde se localizaron las estaciones climatológicas, considerando una capacidad de campo de 50 mm y una humedad inicial de 50 mm (CAR, 2008)

De acuerdo con este método en la tabla 11 y en la ilustración 17 se presenta el balance hídrico para el año hidrológico, a partir de la precipitación media mensual multianual teniendo en cuenta las estaciones trabajada; lo anterior suponiendo una humedad en el suelo de 50 mm (CAR, 2008). Este valor concuerda con suelos franco y franco arcillosos, con humedades disponibles de aproximadamente 20 cm/m de suelo, y profundidad del suelo aproximadamente 30 cm.

Los excedentes de agua no indican necesariamente escorrentía durante todo el tiempo para su utilización. Cuando en el balance proyecta exceso, se refiere a que no hay pérdida en la capacidad de almacenamiento de humedad del suelo; ahora bien cuando la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación (déficit), no indica que el suelo haya llegado a una capacidad del suelo nula.

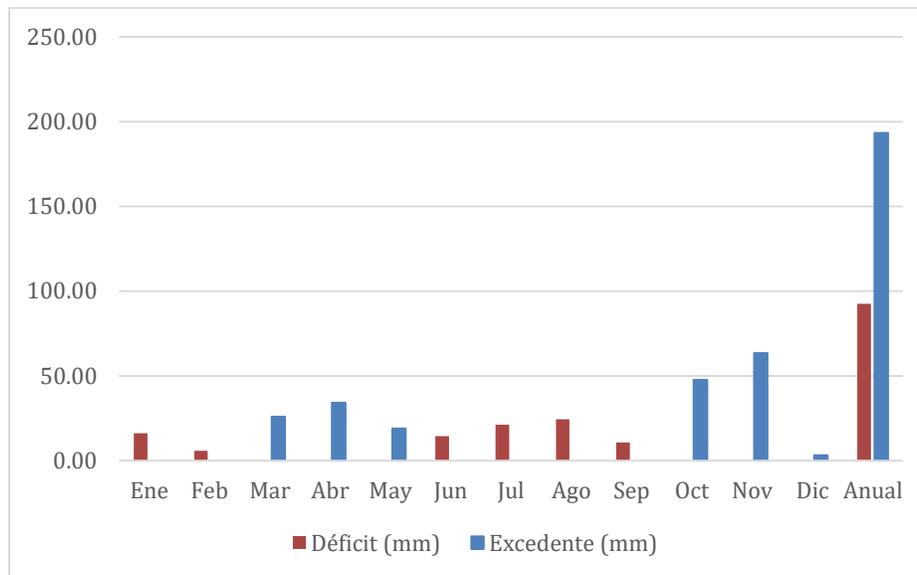
Tabla 11. Balance hidroclimático

Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo (50 mm)													
Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Precipitación (mm)	61,16	69,04	107,04	108,96	89,93	57,68	52,84	54,39	70,07	126,41	129,07	76,39	1002,96
Evapotranspiración (mm)	77,25	74,77	81,08	74,88	70,91	72,14	74,09	78,71	80,67	78,70	65,71	73,24	902,14
Pe - EVP (mm)	16,09	-5,73	25,96	34,07	19,01	14,46	21,25	24,32	10,60	47,71	63,36	3,15	
Reserva de humedad del suelo inicio (mm)	50,00	33,91	28,17	50,00	50,00	50,00	35,54	14,29	0,00	0,00	47,71	50,00	
Reserva de humedad del suelo final (mm)	33,91	28,17	50,00	50,00	50,00	35,54	14,29	0,00	0,00	47,71	50,00	50,00	
Déficit (mm)	16,09	5,73	0,00	0,00	0,00	14,46	21,25	24,32	10,60	0,00	0,00	0,00	92,45

Capacidad de almacenamiento de humedad del suelo (50 mm)													
Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
Excedente (mm)	0,00	0,00	25,96	34,07	19,01	0,00	0,00	0,00	0,00	47,71	63,36	3,15	193,26

Fuente autores

Ilustración 16. Balance Hídrico climático microcuenca del río Botello – periodo 1991 -2014



Fuente autores

Con el balance hidroclimático se corroboran los periodos de excedente y déficit hídrico, durante el año hidrológico en la zona de estudio perteneciente a la cuenca del río Botello; los periodos de excedente corresponden a dos épocas del año las cuales son de marzo - mayo y de octubre - noviembre. Los períodos de déficit de diciembre – febrero y de junio - septiembre. El año hidrológico presenta un excedente de 48% con respecto al déficit con valores de exceso de 193.3 mm con respecto al 92.5 mm de déficit en la zona de estudio.

### Caudales

El estudio hidrológico, se lleva a cabo para determinar el régimen de caudales, estableciendo los valores medios mensuales a través de la distribución temporal de los caudales medios, los valores máximos y mínimos, por medio de la serie de

extremos anuales, para establecer las curvas de duración de los caudales medios y mínimos mensuales, con los cuales se puede establecer el caudal ecológico de la corriente y la disponibilidad de agua en la microcuenca.

Tabla 12. Estaciones Limnimétricas seleccionadas

CÓDIGO	NOMBRE	CORRIENTE	MUNICIPIO	LATITUD	LONGITUD	ELEVACIÓN (m.s.n.m)
2120795	Altamira	Q. Mancilla	Facatativá	0450 n	7421 w	2636
2120756	Recreo el	Río Bojacá	Facatativá	0448 n	7420 w	2561
2120964	Rebose gatillo	Río Bojacá	Facatativá	0447 n	7422 w	2600

Fuente CAR

### **Verificación y complementación de la información**

A partir de las estaciones limnimétricas identificadas para las zonas de estudio y relacionadas en la tabla 9 se recopilaron y verificaron las series mensuales, los valores anuales y su valor total multianual, complementando los meses faltantes por medio del método de la media aritmética y poder obtener un valor representativo y confiable de cada estación.

### **Estudio de caudales**

Para el análisis de los caudales aportados se tomaron como base los valores registrados en las estaciones limnimétricas Rebose Gatillo y El Recreo localizadas en el área de estudio de la microcuenca del río Botello.

### **Caudales medios mensuales**

La distribución temporal de los caudales (tabla 11) también es de tipo bimodal en función de la precipitación, presentando los valores máximos en los meses de abril y mayo, siendo abril el mes con el mayor registro con un valor de 1,07 m<sup>3</sup>/s; y en

noviembre con el mayor registro de 1,13 m<sup>3</sup>/s. el periodo de estiaje se observa en los meses de enero, febrero valores de 0,26 m<sup>3</sup>/s y 0,31 m<sup>3</sup>/s respectivamente. En el segundo semestre se observa una disminución de los caudales en los meses de julio, agosto y septiembre. En el primer semestre se presentan los caudales sensiblemente más altos que en el segundo. El valor promedio anual es de 0,53 m<sup>3</sup>/s. Ilustración 18

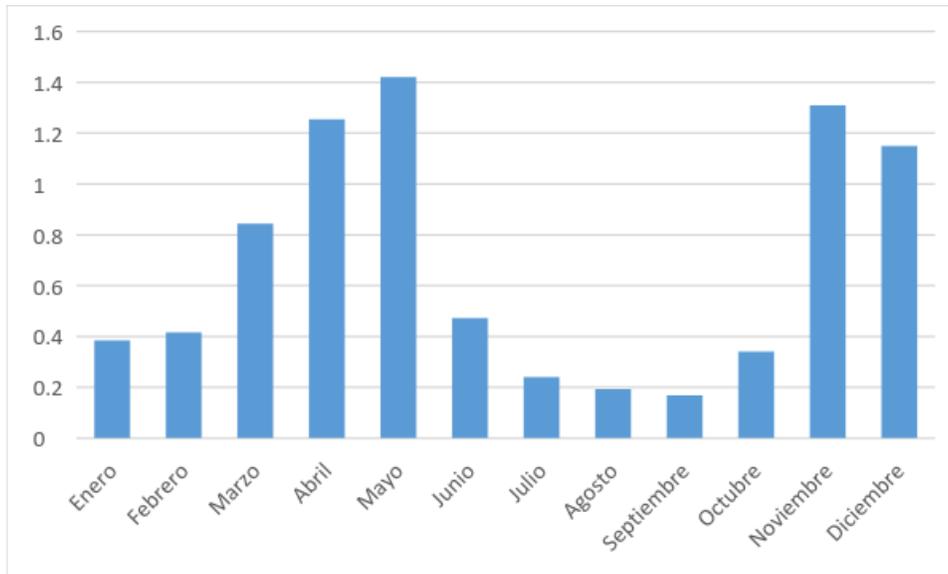
Tabla 13 . Caudales medios mensuales multianuales por estación limnimétrica

<b>MES</b>	<b>Caudal EI Recreo - m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal Rebose Gatillo- m<sup>3</sup>/s</b>	<b>Caudal medio mensual multianual - m<sup>3</sup>/s</b>
Enero	0,36	0,41	0,38
Febrero	0,38	0,45	0,42
Marzo	0,62	1,07	0,84
Abril	0,63	1,88	1,26
Mayo	0,65	2,19	1,42
Junio	0,44	0,50	0,47
Julio	0,31	0,17	0,24
Agosto	0,27	0,12	0,19
Septiembre	0,28	0,06	0,17
Octubre	0,34	0,34	0,34
Noviembre	0,69	1,93	1,31
Diciembre	0,88	1,42	1,15

Fuente los autores

En la ilustración, se presenta el histograma del promedio de los caudales medios donde se aprecia la distribución temporal a lo largo del año para las tres estaciones relacionadas en la tabla 12.

Ilustración 17. Histograma de caudales medios mensuales multianuales periodo 1991 - 2014



Fuente autores

### Balance hídrico superficial

A partir de la ecuación general de balance hídrico (2) donde se establece que las entradas son iguales a las salidas y acorde a los componentes para el caso de estudio se obtiene la ecuación 3, finalmente para las estaciones El Recreo y Rebose Gatillo donde se presume una zona de recarga por el afloramiento del acuífero, se aplica en la ecuación 2 se obtiene la ecuación 4.

$$\text{Entradas} = \text{salidas} \quad (2)$$

$$P = EVT + Q + I \quad (3)$$

$$\text{Precipitación} = \text{evapotranspiración} + \text{escorrentía superficial} + \text{infiltración} \quad (3)$$

$$\begin{array}{l} \text{ENTRADAS} \\ \text{PRECIPITACIÓN} + \text{Q.rebose gatillo} \end{array} = \begin{array}{l} \text{SALIDAS} \\ \text{Q.recreo} - \text{EVT} - \text{INF} \end{array} \quad (4)$$

La principal recarga de los acuíferos depende del caudal de escurrimiento superficial y de la infiltración de este al subsuelo. Es de fundamental importancia el conocimiento de los volúmenes escurridos.

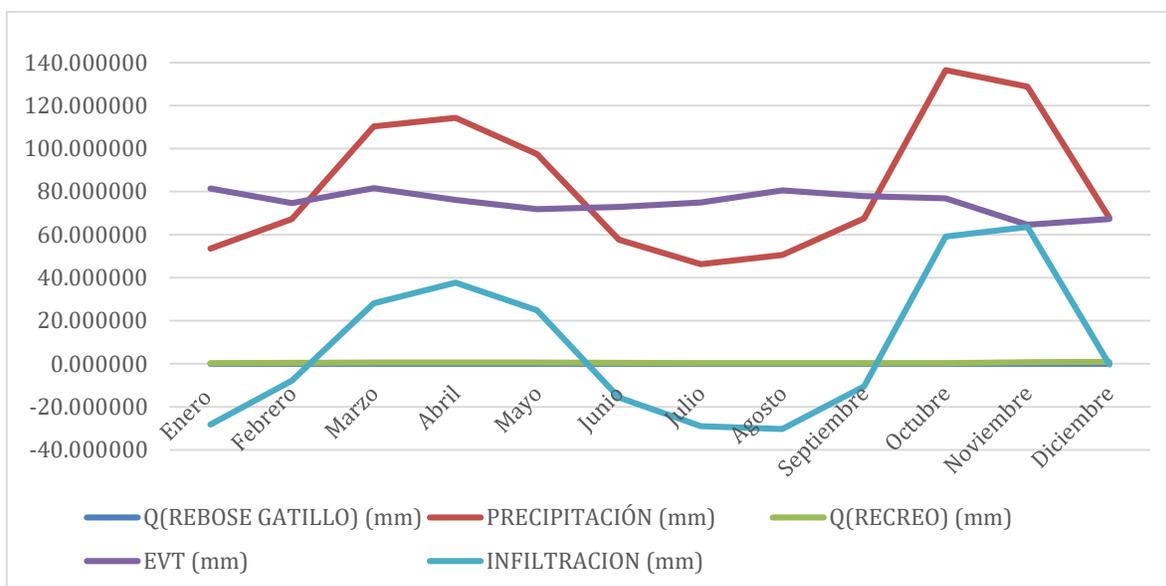
En la tabla 12 y la ilustración 19 se relacionan y grafican respectivamente los valores mensuales multianuales de la ecuación del balance para un año hidrológico.

Tabla 14. Balance hidrológico mensual multianual periodo 1991 -2014

Mes	Q(Rebose Gatillo) m <sup>3</sup> /s = (Q/A)*1000= mm	Precipitación (mm)	Q(Recreo) m <sup>3</sup> /s = (Q/A)*1000= mm	Evapotranspiración (mm)	Infiltración (mm)
Enero	0,000020	53,57	0,359	81,50	-28,29
Febrero	0,000021	67,21	0,383	74,63	-7,81
Marzo	0,000051	110,31	0,619	81,62	28,06
Abril	0,000089	114,37	0,628	76,09	37,65
Mayo	0,000104	97,44	0,650	71,89	24,90
Junio	0,000024	57,63	0,444	72,85	-15,66
Julio	0,000008	46,24	0,305	74,96	-29,03
Agosto	0,000005	50,56	0,273	80,54	-30,26
Septiembre	0,000003	67,62	0,280	77,90	-10,56
Octubre	0,000016	136,44	0,343	76,91	59,18
Noviembre	0,000092	128,80	0,692	64,59	63,51
Diciembre	0,000068	67,90	0,880	67,29	-0,28
	<b>0,000501</b>	<b>998,07</b>	<b>5,857</b>	<b>900,78</b>	<b>91,43</b>

Fuente autores

Ilustración 18. Comparación estimada de las variables de caudal, precipitación, evapotranspiración e infiltración periodo 1992 - 2014



Fuente autores

Del balance hidrológico, se puede conocer el estado de humedad de la cuenca la cual está suscrita al aporte de precipitación y a las pérdidas asociadas, de esa manera se puede clasificar el tipo de año hidrológico característico de la zona (húmeda, normal o seca) teniendo en cuenta su déficit o excedente anual.

La infiltración está en relación directa con la precipitación mensual; en temporadas de sequía la infiltración es cero, lo que quiere decir que en esos periodos el suelo pierde humedad y su flujo base desciende.

Tabla 15. Consolidado balance hídrico anual multianual

ECUACIÓN DE BALANCE HÍDRICO				
ENTRADAS		SALIDAS		
Q (rebose gatillo) + P		Q (recreo)- EVT - INF		
INFILTRACIÓN = Q (rebose gatillo) + P - Q (RECREO) – EVT				
BALANCE HÍDRICO				
Q(REBOSE GATILLO) (mm)	PRECIPITACIÓN (mm)	EVT (mm)	Q(RECREO) (mm)	INFILTRACION (mm)
0,0005008330	998,07	900,78	5,86	91,43

Fuente autores

Se obtuvo los valores del balance hídrico anual multianual para el año hidrológico, En la zona de estudio hay una infiltración positiva que aporta a la humedad del suelo y al flujo base a razón de 1.923.168 m<sup>3</sup>/año; esto porque la precipitación es mayor que la evapotranspiración en el balance total, lo cual se manifiesta como escorrentía sobre la superficie.

#### **8.4 EVALUACION FISICOQUIMICA Y BACTERIOLÓGICA**

Para este análisis se consideraron dos aspectos a saber:

El primero consiste en representar mediante histogramas la correlación entre la calidad de agua subterránea vs. caudal de agua del río Botello, es de anotar que solo se presentan las gráficas para los pozos que presentan mayor disponibilidad de información los cuales corresponde a San Rafael I, Deudoro Aponte y Guapucha II; y el segundo aspecto consiste en el análisis comparativo de los resultados de características físicas, químicas y bacteriológicas de agua superficial y subterránea de la zona de estudio.

##### **8.4.1 HISTOGRAMAS DE CALIDAD DE AGUA**

Anotando como primera medida que según resultados de calidad de agua para el río Botello reportados por la Empresa Aguas de Facatativá 2018 tabla 16, éste presenta contaminación en especial por carga bacteriológica. Lo que se pretende en este capítulo es poder correlacionar las características de calidad de la fuente superficial con las subterráneas y en particular conocer los posibles aportes de contaminantes que puedan llegar a los pozos por interacción con el río Botello.

Para lo anterior, se obtuvo del Sistema Único de Información de la Superintendencia de Servicios Públicos - SUI reportes de la calidad de agua de los pozos de abastecimiento (Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios, 2018) y con los valores de caudales determinados en el balance

hídrico para las mismas fechas de las del SUI, se construyeron hidrogramas relacionando caudales del río Botello vs. características de calidad de agua. Para poder presentar los datos gráficamente, se procede a realizar la normalización de los mismos mediante la aplicación de la ecuación 5 y expresar los datos en una misma escala. Por lo tanto, la información reportada en las siguientes tablas corresponde al valor normalizado solo para los fisicoquímicos.

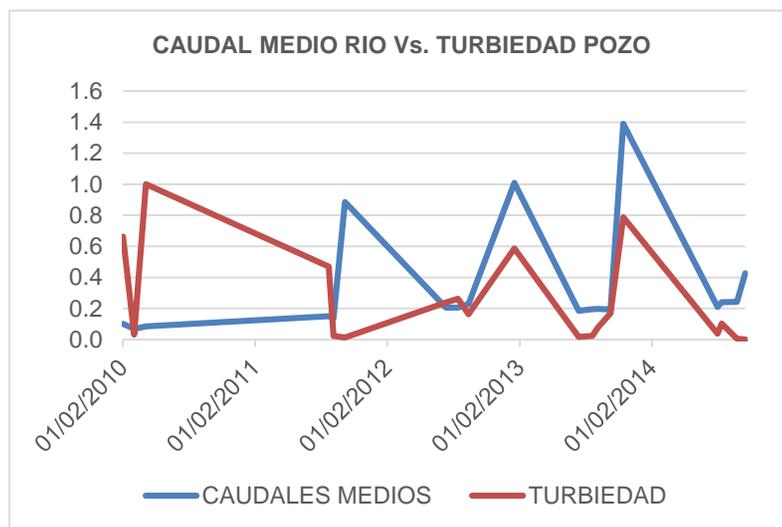
$$X' = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad \text{Ecuación 5}$$

A continuación, se presentan los valores de caudales medios del río Botello (m<sup>3</sup>/s) y los valores normalizados para cada característica elegida y la gráfica que representa el comportamiento de estas variables en el tiempo y un análisis general de los resultados obtenidos para cada pozo.

#### Pozo: San Rafael I

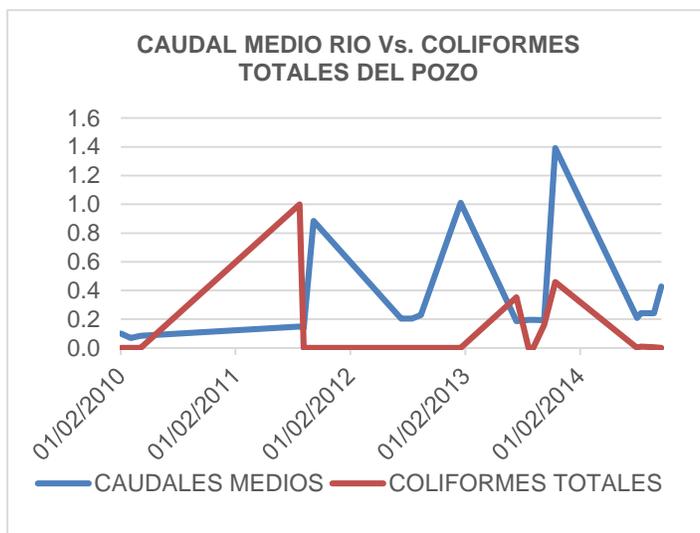
Característica: Turbiedad (UNT)

PERIODO DE MUESTREO	CAUDALES MEDIOS	TURB
01/02/2010	0,10	0,663
04/03/2010	0,07	0,031
05/04/2010	0,08	1,000
23/08/2011	0,15	0,471
05/09/2011	0,14	0,024
07/10/2011	0,89	0,012
11/07/2012	0,21	0,239
14/08/2012	0,21	0,262
12/09/2012	0,23	0,162
16/01/2013	1,01	0,587
13/07/2013	0,19	0,018
20/08/2013	0,20	0,023
04/09/2013	0,20	0,076
09/10/2013	0,19	0,169
13/11/2013	1,39	0,788
31/07/2014	0,21	0,037
12/08/2014	0,24	0,104
23/09/2014	0,24	0,004
16/10/2014	0,43	0,000



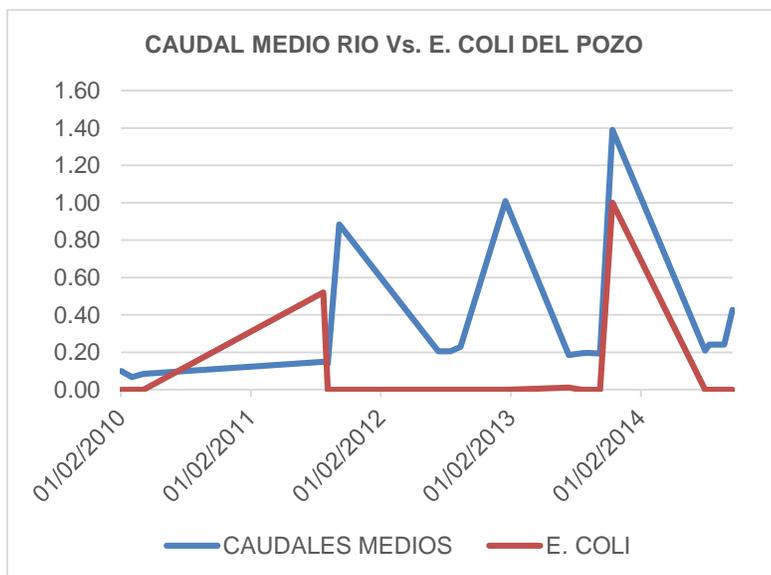
Característica: Coliformes Totales (UFC/100cm<sup>3</sup>)

FECHA	CAUDALES MEDIOS	UFC/100cm <sup>3</sup>
01/02/2010	0,10	0,000
04/03/2010	0,07	0,000
05/04/2010	0,08	0,000
23/08/2011	0,15	1,000
05/09/2011	0,14	0,000
07/10/2011	0,89	0,000
11/07/2012	0,21	0,000
14/08/2012	0,21	0,000
12/09/2012	0,23	0,000
16/01/2013	1,01	0,000
13/07/2013	0,19	0,352
20/08/2013	0,20	0,000
04/09/2013	0,20	0,000
09/10/2013	0,19	0,160
13/11/2013	1,39	0,460
31/07/2014	0,21	0,000
12/08/2014	0,24	0,010
23/09/2014	0,24	0,005
16/10/2014	0,43	0,000



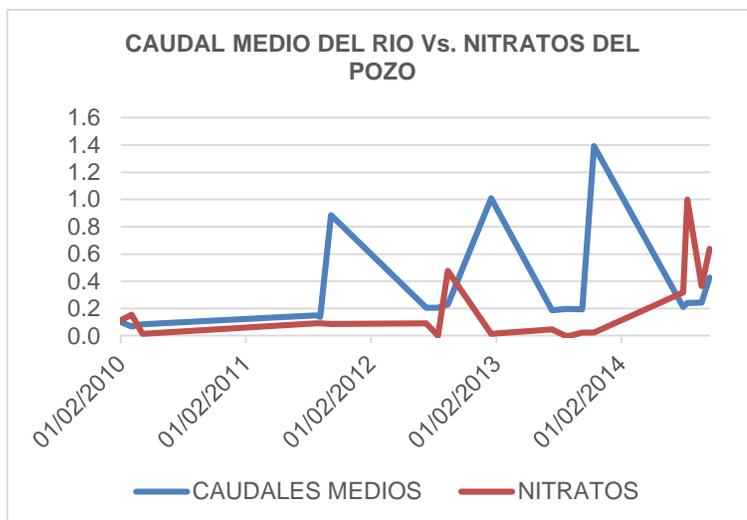
Característica: E Coli: (UFC/100cm<sup>3</sup>)

FECHA	CAUDAL MEDIO	E. COLI
01/02/2010	0,10	0,000
04/03/2010	0,07	0,000
05/04/2010	0,08	0,000
23/08/2011	0,15	0,520
05/09/2011	0,14	0,000
07/10/2011	0,89	0,000
11/07/2012	0,21	0,000
14/08/2012	0,21	0,000
12/09/2012	0,23	0,000
16/01/2013	1,01	0,000
13/07/2013	0,19	0,012
20/08/2013	0,20	0,000
04/09/2013	0,20	0,000
09/10/2013	0,19	0,000
13/11/2013	1,39	1,000
31/07/2014	0,21	0,000
12/08/2014	0,24	0,000
23/09/2014	0,24	0,000
16/10/2014	0,43	0,000



Característica: Nitratos (mg/L NO<sup>2</sup>)

FECHA	CAUDAL MEDIO	NITRATOS
01/02/2010	0,10	0,114
04/03/2010	0,07	0,155
05/04/2010	0,08	0,014
23/08/2011	0,15	0,091
05/09/2011	0,14	0,091
07/10/2011	0,89	0,086
11/07/2012	0,21	0,091
14/08/2012	0,21	0,000
12/09/2012	0,23	0,477
16/01/2013	1,01	0,014
13/07/2013	0,19	0,045
20/08/2013	0,20	0,000
04/09/2013	0,20	0,000
09/10/2013	0,19	0,023
13/11/2013	1,39	0,023
31/07/2014	0,21	0,318
12/08/2014	0,24	1,000
23/09/2014	0,24	0,364
16/10/2014	0,43	0,636



Para los años 2013 y 2014 de las series presentadas se puede apreciar una correlación entre las curvas de caudales y las de las características elegidas (turbiedad, coliformes totales y E. coli), lo que infiere una posible interacción entre el agua superficial y los pozos. Más aún cuando el pozo San Rafael I es saltante y podría estar influenciado por el caudal del río Botello y los afluentes que discurren por la zona aledaña al pozo. Sin embargo, para confirmar esta afirmación se debe conocer las condiciones de toma de muestras del pozo, así como el estado de mantenimiento y operación del pozo; toda vez que para los años 2010 y 2011 los comportamientos de las variables de estudio no presentan un comportamiento similar. Por lo cual no da certeza en la afirmación de la interacción.

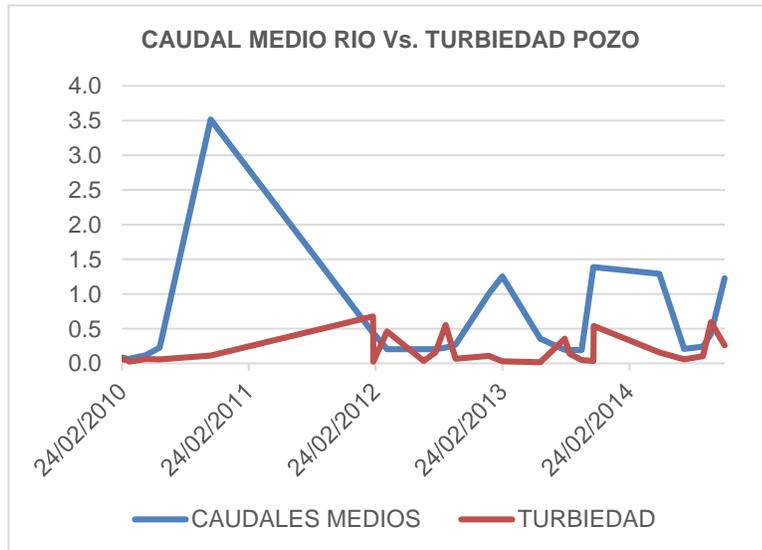
Para el caso de los nitratos se puede apreciar un leve incremento de la concentración en el acuífero desde principios de 2010 hasta finales de 2014, llegando a los 2.8 mg/L y en agosto de 2014 a 4.4 mg/L máximo reportado en el periodo de estudio. Sin embargo, se resalta que en el último análisis contratado por la Empresa Aguas de Facatativá SAS ESP para el año 2018 la concentración es de 0.1 mg/L, lo que indica que ésta ha disminuido de nuevo. Por lo que se

recomienda realizar seguimiento permanente a esta característica, que aunque sus valores no superan el máximo recomendado por la OMS y el máximo permisible por la resolución 2115 de 2007 en aguas destinadas para consumo humano. Es de anotar que incrementos de nitrato por encima de 10 mg/L en agua para consumo humano puede motivar el abandono del pozo como fuente de abastecimiento, además puede ocasionar numerosos casos de metahemoglobinemia y otras enfermedades similares, así como efectos adversos en procesos de industriales. Así mismo existe una seria preocupación de que los nitratos puedan estar acompañados por ciertos contaminantes orgánicos sintéticos y metales pesados, como cromato como lo sucedido en distrito General de San Martín en Buenos Aires Argentina (Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), 1987).

### Pozo Guapucha 2

Característica: Turbiedad (UNT)

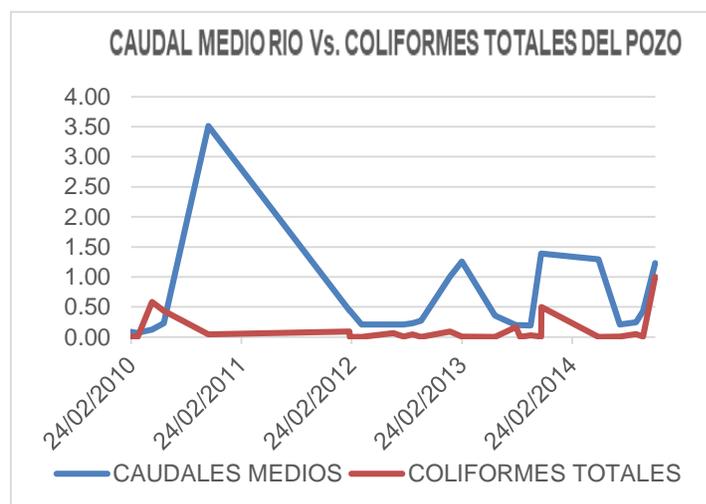
PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	UNT
24/02/2010	0,09	0,059
17/03/2010	0,07	0,028
11/03/2010	0,07	0,048
03/05/2010	0,12	0,064
12/06/2010	0,23	0,060
06/11/2010	3,52	0,115
16/02/2012	0,44	0,680
17/02/2012	0,44	0,027
28/03/2012	0,21	0,464
11/07/2012	0,21	0,037
14/08/2012	0,21	0,160
12/09/2012	0,23	0,553
11/10/2012	0,27	0,068
23/02/2013	1,26	0,030
12/06/2013	0,36	0,017
15/01/2013	1,01	0,108
21/08/2013	0,20	0,355
04/09/2013	0,20	0,141
09/10/2013	0,19	0,050
13/11/2013	1,39	0,543
12/11/2013	1,39	0,036
21/05/2014	1,29	0,159
31/07/2014	0,21	0,058



PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	UNT
23/09/2014	0,24	0,105
16/10/2014	0,43	0,594
25/11/2014	1,23	0,263

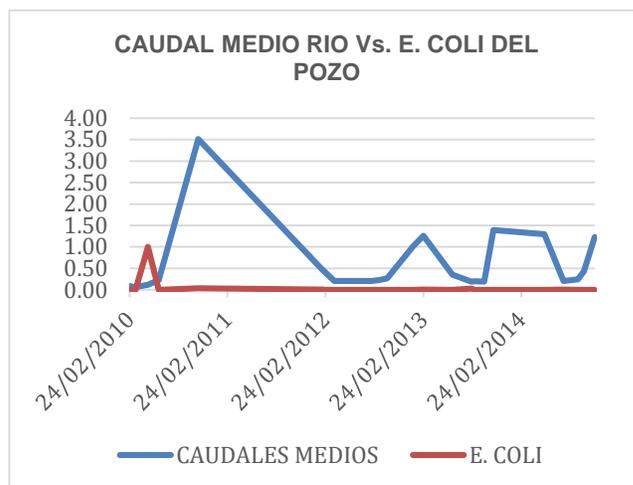
Característica: Coliformes Totales (UFC/100cm<sup>3</sup>)

PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	COLIFORMES TOTALES
24/02/2010	0,09	0,005
17/03/2010	0,07	0,002
11/03/2010	0,07	0,000
03/05/2010	0,12	0,581
12/06/2010	0,23	0,438
06/11/2010	3,52	0,043
16/02/2012	0,44	0,093
17/02/2012	0,44	0,001
28/03/2012	0,21	0,002
11/07/2012	0,21	0,063
14/08/2012	0,21	0,006
12/09/2012	0,23	0,043
11/10/2012	0,27	0,000
23/02/2013	1,26	0,006
12/06/2013	0,36	0,000
15/01/2013	1,01	0,090
21/08/2013	0,20	0,168
04/09/2013	0,20	0,000
09/10/2013	0,19	0,029
13/11/2013	1,39	0,500
12/11/2013	1,39	0,005
21/05/2014	1,29	0,001
31/07/2014	0,21	0,008
23/09/2014	0,24	0,050
16/10/2014	0,43	0,009
25/11/2014	1,23	1,000



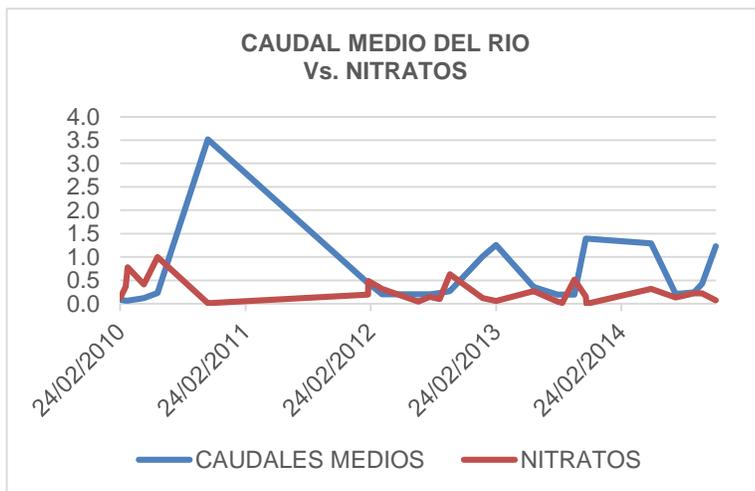
Característica: E Coli: (UFC/100cm<sup>3</sup>)

PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	E. COLI
24/02/2010	0,09	0,001
17/03/2010	0,07	0,000
11/03/2010	0,07	0,000
03/05/2010	0,12	1,000
12/06/2010	0,23	0,000
06/11/2010	3,52	0,034
16/02/2012	0,44	0,008
17/02/2012	0,44	0,000
28/03/2012	0,21	0,000
11/07/2012	0,21	0,000
14/08/2012	0,21	0,000
12/09/2012	0,23	0,000
11/10/2012	0,27	0,000
23/02/2013	1,26	0,006
12/06/2013	0,36	0,000
15/01/2013	1,01	0,000
21/08/2013	0,20	0,030
04/09/2013	0,20	0,000
09/10/2013	0,19	0,000
13/11/2013	1,39	0,000
12/11/2013	1,39	0,001
21/05/2014	1,29	0,000
31/07/2014	0,21	0,004
23/09/2014	0,24	0,000
16/10/2014	0,43	0,000
25/11/2014	1,23	0,000



Característica: Nitratos (mg/L NO<sup>2</sup>)

PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	NITRATOS
24/02/2010	0,09	0,129
17/03/2010	0,07	0,780
11/03/2010	0,07	0,366
03/05/2010	0,12	0,415
12/06/2010	0,23	1,000
06/11/2010	3,52	0,012
16/02/2012	0,44	0,195
17/02/2012	0,44	0,488
28/03/2012	0,21	0,317



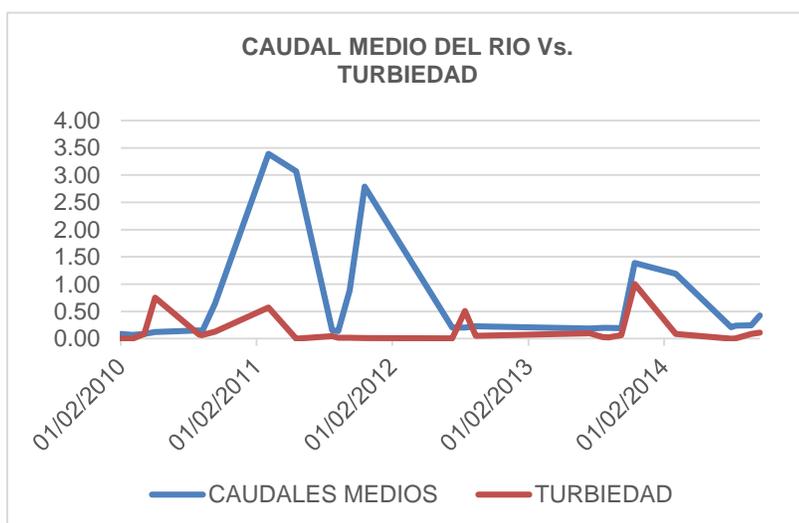
PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	NITRATOS
11/07/2012	0,21	0,049
14/08/2012	0,21	0,146
12/09/2012	0,23	0,098
11/10/2012	0,27	0,634
23/02/2013	1,26	0,061
12/06/2013	0,36	0,268
15/01/2013	1,01	0,122
21/08/2013	0,20	0,049
04/09/2013	0,20	0,020
09/10/2013	0,19	0,512
13/11/2013	1,39	0,000
12/11/2013	1,39	0,156
21/05/2014	1,29	0,317
31/07/2014	0,21	0,132
23/09/2014	0,24	0,220
16/10/2014	0,43	0,220
25/11/2014	1,23	0,073

A partir del análisis de las gráficas se puede inferir que la incidencia de las aguas superficiales sobre el pozo es muy baja o nula, lo anterior atendiendo a que la concentración de las características de turbiedad, coliformes y E. coli son bajas y el comportamiento de las curvas no es similar. Lo anterior, se puede justificar en el sentido que el pozo se encuentra a una profundidad en su nivel estático de 20 metros y en su zona perimetral no se presentan corrientes hídricas, ni vertimientos de agua conocidos.

### Pozo Deudoro Aponte

Característica: Turbiedad (UNT)

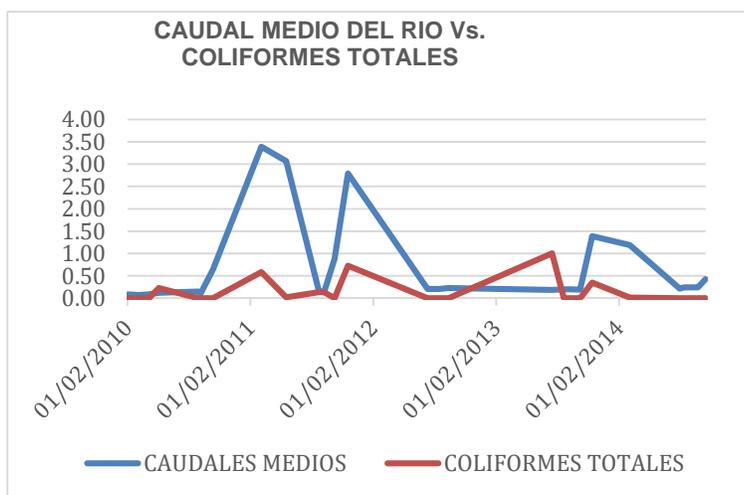
PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	TURBIEDAD
01/02/2010	0,09	0,002
04/03/2010	0,07	0,000
05/04/2010	0,08	0,088
04/05/2010	0,12	0,751
30/08/2010	0,15	0,073
06/09/2010	0,11	0,063
12/10/2010	0,64	0,130
05/03/2011	3,39	0,573



PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	TURBIEDAD
18/05/2011	3,07	0,001
23/08/2011	0,15	0,046
08/09/2011	0,14	0,016
09/10/2011	0,89	0,014
18/11/2011	2,79	0,011
11/07/2012	0,21	0,004
14/08/2012	0,21	0,506
12/09/2012	0,23	0,049
16/07/2013	0,19	0,096
20/08/2013	0,20	0,028
04/09/2013	0,20	0,023
08/10/2013	0,19	0,061
13/11/2013	1,39	1,000
04/03/2014	1,19	0,088
31/07/2014	0,21	0,001
12/08/2014	0,24	0,005
23/09/2014	0,24	0,087
16/10/2014	0,43	0,107

Característica: Coliformes Totales (UFC/100cm<sup>3</sup>)

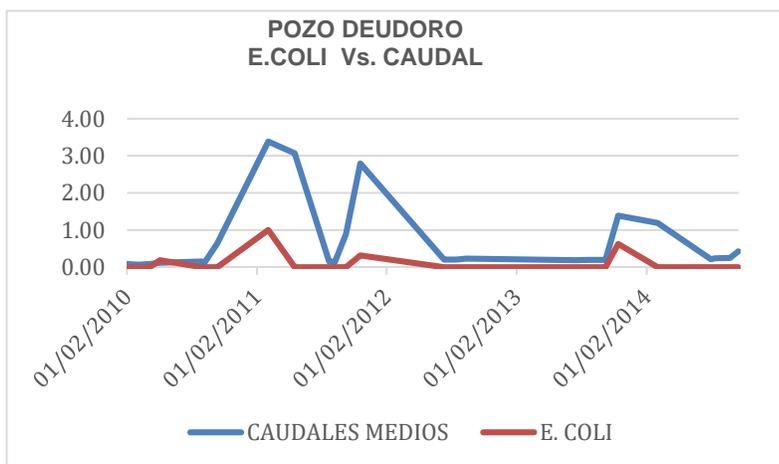
PERIODO DEL MUESTREO	CAUDAL MEDIO	COLIFORMES TOTALES
01/02/2010	0,09	0,000
04/03/2010	0,07	0,000
05/04/2010	0,08	0,000
04/05/2010	0,12	0,227
30/08/2010	0,15	0,000
06/09/2010	0,11	0,000
12/10/2010	0,64	0,000
05/03/2011	3,39	0,582
18/05/2011	3,07	0,018
23/08/2011	0,15	0,136
08/09/2011	0,14	0,136
09/10/2011	0,89	0,000
18/11/2011	2,79	0,727
11/07/2012	0,21	0,000
14/08/2012	0,21	0,000
12/09/2012	0,23	0,000
16/07/2013	0,19	1,000
20/08/2013	0,20	0,000
04/09/2013	0,20	0,000



PERIODO DEL MUESTREO	CAUDAL MEDIO	COLIFORMES TOTALES
08/10/2013	0,19	0,000
13/11/2013	1,39	0,345
04/03/2014	1,19	0,009
31/07/2014	0,21	0,000
12/08/2014	0,24	0,000
23/09/2014	0,24	0,000
16/10/2014	0,43	0,000

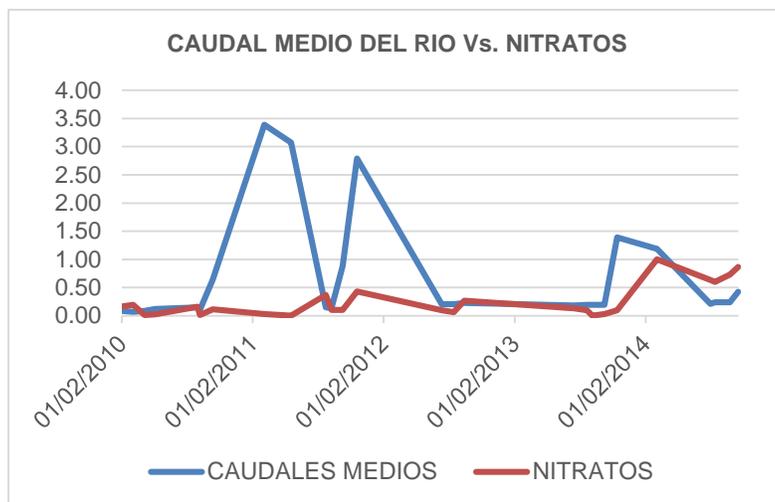
Característica: E Coli: (UFC/100cm<sup>3</sup>)

PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	E. COLI
01/02/2010	0,09	0,000
04/03/2010	0,07	0,000
05/04/2010	0,08	0,000
04/05/2010	0,12	0,188
30/08/2010	0,15	0,000
06/09/2010	0,11	0,000
12/10/2010	0,64	0,000
05/03/2011	3,39	1,000
18/05/2011	3,07	0,000
23/08/2011	0,15	0,000
08/09/2011	0,14	0,000
09/10/2011	0,89	0,000
18/11/2011	2,79	0,313
11/07/2012	0,21	0,000
14/08/2012	0,21	0,000
12/09/2012	0,23	0,000
16/07/2013	0,19	0,000
20/08/2013	0,20	0,000
04/09/2013	0,20	0,000
08/10/2013	0,19	0,000
13/11/2013	1,39	0,625
04/03/2014	1,19	0,000
31/07/2014	0,21	0,000
12/08/2014	0,24	0,000
23/09/2014	0,24	0,000
16/10/2014	0,43	0,000



Característica: Nitratos (mg/L NO<sup>2</sup>)

PERIODO DE MUESTREO	CAUDAL MEDIO	NITRATOS
01/02/2010	0,09	0,167
04/03/2010	0,07	0,197
05/04/2010	0,08	0,013
04/05/2010	0,12	0,023
30/08/2010	0,15	0,160
06/09/2010	0,11	0,017
12/10/2010	0,64	0,117
05/03/2011	3,39	0,033
18/05/2011	3,07	0,000
23/08/2011	0,15	0,367
08/09/2011	0,14	0,103
09/10/2011	0,89	0,107
18/11/2011	2,79	0,433
11/07/2012	0,21	0,100
14/08/2012	0,21	0,067
12/09/2012	0,23	0,267
16/07/2013	0,19	0,133
20/08/2013	0,20	0,100
04/09/2013	0,20	0,000
08/10/2013	0,19	0,033
13/11/2013	1,39	0,100
04/03/2014	1,19	1,000
31/07/2014	0,21	0,633
12/08/2014	0,24	0,600
23/09/2014	0,24	0,733
16/10/2014	0,43	0,867



Para este pozo se presenta una baja correlación desde el año 2010. Sin embargo, para las muestras realizadas de turbiedad y nitratos se aprecia un comportamiento similar en sus curvas, lo que puede significar una posible interacción. Como en el caso del pozo San Rafael I, el nitrato incrementa su concentración a finales de 2014, por lo que se recomienda su monitoreo permanente.



POZOS CARACTERISTICA / UNIDADES	GUAPUCHA		DEUDORO APONTE	CARTAGENITA	MANABLANCA	SAN RAFAEL		RIO BOTELLO
E. Coli – N.M.P /100ml	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	< 1	1,058 X10 E3
Plaguicidas - mg/L	0	0	0	0	0	0	0	0
Nitratos - mg/L N	0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	< 0.1	0.1	< 0.1	0.3
Sulfatos	<10	<10	<10	<10	<10	<10	17.4	<10
Cromo hexavalente	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	<0.02	N.R
Cadmio	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	N.R

Tomado de informe de monitoreo matriz agua superficial y subterránea Empresa Aguas de Facatativá 2018

N.R. no reporta dato

A partir de los resultados reportados por el laboratorio ANALQUIM LTDA se puede inferir que el río Botello presenta valores para cloruros y nitratos muy por debajo de los establecidos en la norma de calidad de agua para consumo humano, resolución 2115 de 2007, indicando que desde estas características el agua presenta buenas condiciones de calidad; atendiendo a la hipótesis planteada para la presente investigación y conforme a los resultados obtenidos por el laboratorio se puede corroborar la interacción entre las aguas superficiales y los pozos a partir de las dos características analizadas, en el entendido que las dos fuentes presentan valores prácticamente iguales. Lo cual puede inferir que con el paso de los años sus valores han permanecido equilibradas.

Respecto al E. coli reportados para el río Botello (1,058 X10 E<sup>3</sup> N.M.P /100 ml) y de acuerdo a los reportados los valores para los pozos de agua subterránea (< 1 N.M.P /100 ml) se evidencia que no hay incidencia directa sobre el acuífero de Facatativá en la zona de estudio o en su defecto la debido a la profundidad del acuífero las condiciones no son aptas para la presencia de estos microorganismos. Sin embargo, no se descarta que para aguas subsuperficiales o acuíferos libres la presencia de E. coli se manifieste, tal cual se presenta en los hidrogramas de calidad de agua del pozo vs caudal del río.

Finalmente, analizando los valores reportados para la característica de plaguicidas para las fuentes superficial y de los pozos se encuentra que el agua es susceptible

de ser usada como fuente de abastecimiento para consumo humano y actividades domésticas, lo anterior teniendo en cuenta los valores máximos permisibles en la resolución 2115 de 2007.

## 8.5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- **En la zona de estudio se identifican dos acuíferos:**

Sistema de acuífero del cuaternario, con profundidades de extracción registradas hasta de 220 m, cuyas formaciones geológicas son principalmente depósitos fluviales, aluviales, coluviales y de terraza alta.

Ésta unidad se caracteriza por presentar acuíferos discontinuos de extensión regional y local, conformados por sedimentos no consolidados. Pueden ser libres, semiconfinados o confinados y su productividad varía de alta a baja.

Sistema de acuífero de las areniscas del Guadalupe que corresponden a acuíferos continuos de extensión regional conformado por rocas sedimentarias consolidadas de ambiente marino con porosidad primaria y secundaria, que generalmente son de tipo confinado, de alta a baja productividad (INGEOMINAS, 2001).

- Conforme a los resultados más recientes de calidad de agua superficial y de los pozos de abastecimiento, se puede concluir que el río Botello se halla contaminado principalmente por cargas de materia orgánica que incide en la alta concentración bacteriológica. Así mismo, se establece que dicha carga bacteriológica no incide en el agua de los pozos.
- Sin embargo, las demás características analizadas presentan valores por debajo de los rangos establecidos en la normatividad vigente.
- El pozo San Rafael I es el que mayor refleja la interacción entre el agua subterránea y el agua del río Botello, lo anterior atendiendo a la correlación entre las curvas de caudales del río Botello y de calidad de agua del pozo.

Los demás pozos no presentan interacción con el río Botello. No se identifica interacción entre los pozos.

- Los pozos de abastecimiento de agua no presentan contaminación, por lo cual son aptos para el uso doméstico y de consumo humano.
- En la zona de estudio se presenta sobreexplotación del acuífero, en el entendido que el volumen de agua extraído por la Empresa Aguas de Facatativá SAS ESP para el caso 2015 fue de 2.301.751 m<sup>3</sup>, el cual es mayor al volumen de agua infiltrado calculado a partir del balance hídrico que corresponde a 1.923.168 m<sup>3</sup>/año. Lo anterior, implica un descenso continuo de los niveles piezométricos ratificando lo evidenciado por la CAR en el estudio “Cuantificación de las Aguas Subterráneas” donde se encontraron descensos pronunciados que superan los cinco (5) metros y hasta (20) metros en el sistema de acuíferos.
- A la red de monitoreo de aguas subterráneas con que cuenta la CAR, adicionar los pozos de la Empresa aguas de Facatativá SAS-ESP que no están incluidos y realizar por lo menos una vez al mes el monitoreo de los niveles estáticos, caudales y tiempos de operación del equipo de bombeo. Lo anterior, puede permitir conocer la disponibilidad de agua, los tiempos de recuperación o recarga del acuífero, así como también los máximos tiempo de explotación asegurando la sostenibilidad.
- Tramitar las concesiones de agua subterránea de los pozos que surten a la Empresa Aguas de Facatativá SAS ESP y con los cuales en épocas de verano intenso principalmente se abastecen cerca de 150.000 habitantes.
- Realizar seguimiento de sistemático de mínimo trimestral y durante dos años a las características físicas y químicas del agua de los pozos y además realizar un análisis del comportamiento de las mismas, toda vez que se evidencia que la empresa realiza control al agua de los pozos cuando se utilizan pero no se investigan los comportamientos aquellas características que reportan valores fuera de lo normal.

- Realizar pruebas de isotopos ambientales como el tritio, deuterio y O18 para determinar con certeza volúmenes de agua, tiempos de residencia, edad y dirección del agua subterránea.
- Teniendo en cuenta que la información es escasa y poco reciente, se recomienda realizar estudio que integre geología, hidrología, geoquímica, e hidrogeología para que el municipio tenga una herramienta para el manejo de las aguas subterráneas y del recurso hídrico
- Una vez que se disponga de la información requerida debe desarrollarse el modelo hidrogeológico conceptual del área y con base en este, las proyecciones de manejo y gestión del acuífero y de los pozos.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andrés Schuschny, Humberto Soto . (2009). *Guía metodológica diseño de indicadores comuestos de desarrollo sostenible* . Santiago de Chile : Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) .
- Bateman, A. (2017). Hidrología Básica y Aplicada. En A. Bateman. España: Grupo de investigaciones en transporte de sedimentos.
- CAR. (2008). *Elaboración del diagnóstico, prospectiva y formulación de la cuenca del río Bogotá, subcuenca del río Balsillas 2020*. Bogotá .
- CAR. (2008). *plan de manejo ambiental de agua subterránea en la sabana de Bogotá y zona crítica* . Bogotá: Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca .
- Centro panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (1987). *Contaminación de las aguas subterráneas, Un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el agua potable*. Lima, Perú.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (1987). *Contaminación de las aguas subterráneas, Un enfoque ejecutivo de la situación en América Latina y el Caribe en relación con el agua potable*. Lima, Perú.
- Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS). (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Una metodología basada en datos existentes*. Lima, Perú.
- CEPIS. (1994). *Impacto del uso y disposición de las aguas residuales en los acuíferos con referencia en América Latina*. Lima, Perú.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca - CAR. (2008). *Plan de manejo ambiental de agua subterránea en la Sabana de Bogotá y Zona Crítica*. Bogotá.
- Departamento Nacional de Estadísticas - DANE. (2009). *Censo de finca productoras de flores en 28 municipios de la Sabana de Bogotá y Cundinamarca*. Bogotá.
- Donado Garzón, L. D., Buitrago Carrillo, J. C., Vargas Quintero, M. C., & Granados Robayo, J. A. (s.f.). *Modelo hidrogeológico conceptual de la zona de recarga del acuífero Morroa (departamentos de Sucre y Córdoba)*.
- Emilio, C., & Llamas, M. (2001). *Hidrología Subterránea* (Segunda edición ed.). Barcelona: Ediciones Omega.
- Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá. (2013). *Metodología para la evaluación regional del agua -ERA. Documento síntesis*. Bogotá D.C.

- Empresa de Acueducto, Alcantarillado y Aseo de Bogotá. (2016). *Metodología para la Evaluación Regional del Agua (ERA) Documento síntesis*.
- gidahatari.com. (18 de Abril de 2018). <http://gidahatari.com>. Obtenido de <http://gidahatari.com/ih-es/ahora-puedes-hacer-diagramas-de-stiff-online-con-hatarichem>.
- IAEA, Organismo Internacional de Energía Atómica -. (2009). *Estudios de Hidrología Isotópica en América Latina 2006*. Viena, Austria.
- IDEAM. (2015). *Estudio Nacional del Agua*. Bogotá D.C.
- IDEAM. (14 de 06 de 2018). *IDEAM*. Obtenido de <http://www.ideam.gov.co/web/agua/modelacion-hidrogeologica>
- INGEOMINAS. (1991). *Hidrogeología de la cuenca del río Subachoque, sabana de Bogotá*. Bogotá: Ministerio de Minas y Energía Instituto Nacional de Investigaciones Geológicas-Mineras.
- INGEOMINAS. (1991). *Hidrogeología de las cuencas de los ríos Bojaca y Balsillas, Sabana de Bogotá*. Bogotá.
- INGEOMINAS. (1995). *Proyecto estudio en la periferia de Santa Fe de Bogotá y en algunas poblaciones cercanas para el abastecimiento de agua*. Bogotá.
- INGEOMINAS. (1996). *Estudio hidrogeológico en la periferia de Santafé de Bogotá y en algunas poblaciones cercanas para abastecimiento de aguas*. Santafé de Bogotá.
- INGEOMINAS. (2001). *Geología de la plancha 227 - LA MESA*. Bogotá.
- Martinez, J., Araúzo, M., & Valladolid, M. (2007). *Caracterización hidroquímica de las aguas superficiales y subterráneas en la cuenca del Oja-Tirón. Procesos de contaminación*. Madrid, España.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación*. Bogotá.
- Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de aguas subterráneas* (2 a ed.). Medellín, Antioquia: Universidad Nacional de Colombia.
- Otálvaro, M. V. (1999). *Hidráulica de Aguas Subterráneas*. Medellín : Universidad Nacional sede Medellín .
- Rave, J. C. (2009). *Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso aplicación:acuífero costero municipio de Turbo*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Colombia.

- Remeneiras. (1971). *Tratado de Hidrología Aplicada*. Barcelona: editores técnicos asociados.
- Rodriguez Navarrete, C. O. (1984). *Hidrogeología Básica*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodriguez, C. (1981). *Isótopos en Hidrología de Aguas Subterráneas*. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá D.C.
- Rodríguez, C. (1984). *Hidrogeología Básica*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Rodriguez, M. A. (2011). *Investigación de las subcuencas hidrogeológicas de la Sabana de Bogotá*. Universidad de Bogotá Jorge Tadeo Lozano, Bogotá.
- Romero Rojas, J. A. (2009). *Calidad del agua*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- San Juan López, A. R. (2015). <http://repositorio.uchile.cl>. Obtenido de <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/134999/Caracterizacion-hidrogeologica-de-recursos-hidricos-de-la-cuenca-de-Santiago.pdf?sequence=1>
- Santa Arango, D. P., Martinez, D. C., & Betancur Vargas, T. (2008). *Uso de la hidroquímica e isótopos ambientales para la evaluación de la conexión hidrológica entre el agua subterránea y el humedal Ciénaga de Colombia*. Medellín, Antioquia.
- Sierra Ramírez , C. A. (2011). *Calidad del agua*. Medellín: Ediciones de la U.
- Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios. (6 de 6 de 2018). *Sistema único de información de servicios públicos domiciliarios*. Obtenido de [http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=acu\\_tec\\_037](http://reportes.sui.gov.co/fabricaReportes/frameSet.jsp?idreporte=acu_tec_037)
- Vélez, M. V., & Rhenals, R. L. (2008). *Determinación de la recarga con isótopos ambientales en los acuíferos d Santa Fé de Antioquia*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín, Antioquia.
- www.aguaysig.com. (14 de 06 de 2018). [www.aguaysig.com](http://www.aguaysig.com). Obtenido de <https://www.aguaysig.com/2011/01/los-diagramas-mas-usados-para-la.html>