



Estudio de sistemas acuíferos de origen fluvio lacustre, como base para el análisis de la dinámica hidrogeológica en áreas de baja pendiente. Caso de estudio en la Cuenca media del Río Bogotá-Sector Parcelas Cota y Suba Occidental.

Sara Eulalia Chaparro Gordillo

11962214258

Universidad Antonio Nariño

Programa Hidrogeología Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

Estudio de sistemas acuíferos de origen fluvio lacustre, como base para el análisis de la dinámica hidrogeológica en áreas de baja pendiente. Caso de estudio en la Cuenca media del Río Bogotá - Sector Parcelas Cota y Suba Occidental.

Sara Eulalia Chaparro Gordillo

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Hidrogeología Ambiental

Director (a):

Ph.D. Diego Gomez

Línea de Investigación:

Gestión Integrada del Recurso Hídrico.

Grupo de Investigación:

GRESIA

Universidad Antonio Nariño

Programa Hidrogeología Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023

NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

_____.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de _____.

Firma del Tutor

Firma Jurado

Firma Jurado

Con todo mi amor y gratitud a Dios por iluminar mis sueños y permitirme verlos cumplidos. Al ángel y amor eterno José Esteban que me cuida desde lo más alto, junto a mi padre.

A mi esposo por su amor inquebrantable y apoyo incondicional, como regalo que Dios me ha dado.

A mi madre por su amor inspirador y motivo para seguir cumpliendo sueños.

A mis hermanas por darme la mano siempre para alcanzar nuevos escalones. Y a mi sagrada familia por creer tanto en mí.

AGRADECIMIENTOS

Las metas propuestas son el resultado del esfuerzo grande y pequeño que ejercen todos quienes nos aman y quienes nos rodean. Por eso agradezco el apoyo y dedicación brindada en todas la formas posibles en este recorrido por cumplir un sueño más.

Gratitud desde el marco profesional al Dr., Diego Felipe Gómez, y su pedagogía inspiradora desde la experiencia no solo académica si no técnica, facilitando además de las herramientas, la comprensión de la hidrogeología desde diferentes perspectivas. Al profesor Andrés Carvajal por estar atento al proceso y su gestión. También a mi colega Fernando Alvarado por su entusiasmo por las ciencias de la tierra y apoyar dinámicamente en uno de los procesos de recolección de información.

Personalmente agradezco a Dios, porque su gracia y bondad me permiten alcanzar nuevas metas. A mi amado hermanito que inspira en mí, aún desde lo más alto mi ganas de continuar avanzando, a mi padre porque creyó en mí siempre y a quien hoy sé que enorgullezco una vez más. A mi mami porque es ella, quien en su infinito amor soporta las bases de mis anhelos y por ser la razón para seguir soñando. Gratitud a mis hermanas y sobrinos por estar para mi cuando más los necesito y por sentir tanto cariño por mis logros.

Y mi gratitud enorme a mi esposo, por sus oraciones y esfuerzos para verme cumplir un sueño, por su compañía invaluable. Gratitud porque siempre con su gran amor me inspiro a no rendirme y dar lo mejor de mí, siempre tomados de la mano de Dios.

Y a todas y cada una de las personas que contribuyeron en esta gran experiencia, y que de pronto en este momento olvide mencionar.

RESUMEN

El estudio se desarrolla en el área metropolitana entre el Municipio de Cota y zona occidental de Suba - Fontanar de la Ciudad de Bogotá, y comprende la caracterización hidrogeológica por componentes, para la identificación y/o definición de la posible interconexión entre sistemas acuíferos asociados a Depósitos Fluvio Lacustres y el sistema hídrico - dinámico del Río Bogotá, utilizando metodologías de recopilación, identificación y validación a nivel general de acuerdo a cada componente a desarrollar, logrando una integración de sus resultados en un Modelo Hidrogeológico Conceptual. El cual se determina a partir de las condiciones geológicas- geofísicas que indican sedimentos que no presentan continuidad lateral, y se identifican capas de arenas saturadas, las cuales de acuerdo con el modelo hidrodinámico están siendo recargadas por los Cerros occidentales que limitan el área de estudio. Además de identificar mediante el modelo hidrogeoquímico, a partir de los análisis isotópicos (2H-O18), que la procedencia de la recarga es por aguas meteóricas a diferentes gradientes altitudinales, diferenciando el sistema acuífero de la dinámica del Río Bogotá. Considerando el recurso hídrico subterráneo de la zona de alta montaña como un aporte de posibles flujos ascendentes, además de la recarga puntual. Esto como base para análisis posteriores dada las condiciones de desarrollo que se prevé por las actividades antrópicas de infraestructura y desarrollo poblacional entre el Distrito y los municipios aledaños.

Palabras clave: Sistemas Acuíferos, Dinámica, Río Bogotá, Depósitos Fluvio – Lacustres, Recarga, Dirección de flujo, Isotopía, Gradiente altitudinal, interconexión, sistemas hídricos.

ABSTRACT

The study is developed in the metropolitan area between the municipality of Cota and the western area of Suba - Fontanar of the city of Bogotá, and includes the hydrogeological characterization by components, for the identification and/or definition of the possible interconnection between aquifer systems associated with Fluvio-Lacustrine Deposits and the hydro-dynamic system of the Bogotá River, using methodologies of compilation, identification and validation at a general level according to each component to be developed, achieving an integration of its results in a Conceptual Hydrogeological Model. With which the geological-geophysical conditions that indicate sediments that do not present lateral continuity are determined, and saturated sand layers are identified, which according to the hydrodynamic model are being recharged by the western hills that limit the study area. In addition to identifying through the hydrogeochemical model, from the isotopic analysis that the origin of the recharge is by meteoric waters at different altitudinal gradients, differentiating the aquifer system from the dynamics of the Bogota River. Considering the subway water resource of the high mountain zone as a contribution of possible upward flows, in addition to the punctual recharge. This will serve as a basis for further analysis given the development conditions that are foreseen due to anthropic infrastructure activities and population development between the district and the surrounding municipalities.

Key words: Aquifer Systems, Dynamics, Bogotá River, Fluvial-Lacustrine Deposits, Recharge, Flow direction, Isotopy, Altitudinal gradient, interconnection, water systems.

CONTENIDO

Pág.

RESUMEN	15
ABSTRACT.....	16
PRELIMINARES	1
LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO	1
1. INTRODUCCIÓN.....	3
2. OBJETIVOS.....	5
2.1 OBJETIVOS GENERALES	5
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	5
3. MARCO TEÓRICO	8
3.1 EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ	8
3.2 MODELO GEOLÓGICO- GEOFÍSICO	10
3.2.1 Contexto Geológico Regional	10
3.2.2 Contexto Geofísico.....	14
3.3 MODELO HIDRODINÁMICO.....	16
3.4 MODELO HIDROGEOQUÍMICO	18
3.4.1 Isótopos estables.....	18
3.4.2 Correlación entre contenido isotópico y gradiente altitudinal.....	20
3.5 MODELO HIDROLÓGICO	23
3.5.1 Información Hidro climática: Precipitación	24
3.5.2 Recarga Potencial	26
4. DISEÑO METODOLÓGICO	27
4.1 RECOPIACIÓN Y ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN	29
4.2 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS	30
4.2.1 Modelo geológico y geofísico	30
4.2.2 Modelo hidrogeoquímico	35
4.2.3 Modelo hidrodinámico (hidráulica del acuífero y dirección de flujo).....	37

4.2.4	Modelo Hidrológico	38
5.	RESULTADOS Y ANÁLISIS	40
5.1	MODELO GEOLÓGICO – GEOFÍSICO.....	40
5.1.1	Estratigrafía	40
5.1.2	Análisis de la información geológica – geofísica.....	53
5.2	MODELO HIDROGEOQUÍMICO	66
5.2.1	Isótopos estables	66
5.2.2	Gradiente altitudinal	69
5.3	MODELO HIDRODINÁMICO.....	72
5.3.1	Inventario de puntos de agua	73
5.3.2	Hidráulica del Acuífero	78
5.3.3	Clasificación de unidades hidrogeológicas.....	90
5.3.4	Dirección de flujo	92
5.3.5	Zonas de recarga y descarga.....	94
5.4	MODELO HIDROLÓGICO.....	97
5.4.1	Parámetros hidroclimáticos- Precipitación.....	97
5.4.2	Análisis y resultados de la recarga potencial.....	101
5.5	MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	104
6.	CONCLUSIONES.....	112
7.	RECOMENDACIONES	117
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
9.	ANEXOS.....	121

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 Localización del área de estudio Cota- Bogotá Cuenca Media Río Bogotá	2
Figura 2 Secuencia estratigráfica regional.	13
Figura 3 Mapa Geológico Regional.....	14
Figura 4 Diagrama de localización de SEVs cercanos a la zona de estudio.....	16
Figura 5 Vista general de las variaciones de 18O/16O en compuestos naturales.	19
Figura 6 Vista general de variaciones en composiciones naturales de Deuterio.	20
Figura 7 Esquema de variaciones de 18O en la precipitación en Colombia en función de la altitud.	21
Figura 8 Esquema de la lluvia en los valores de $\delta^{18}O$ y δD	22
Figura 9 Esquema ilustrativo del Ciclo hidrológico.....	23
Figura 10 Esquema ilustrativo de la subcuencas del área de estudio	24
Figura 11 Distribución espacial de las subcuencas evaluadas	25
Figura 12 Flujograma general del proceso a seguir	27
Figura 13 Flujograma general de todo el componente hidrogeológico	28
Figura 14 Flujograma del componente geológico	31
Figura 15 Registro fotográfico del equipo geoeléctrico en campo y su implementación en la zona.....	33
Figura 16 Esquema metodológico geoeléctrico tipo Schlumberger	34
Figura 17 Esquema metodológico geoeléctrico tipo Schlumberger	34
Figura 18 Registro fotográfico del procedimiento metodológico de Isotopía	36
Figura 19 Flujograma del Modelo Hidrogeoquímico.....	37
Figura 20 Flujograma del Modelo Hidrodinámico	38
Figura 21 Flujograma del Modelo Hidrológico	39
Figura 22 Mapa Geológico Local.....	42
Figura 23 Panorámica de las unidades geológicas que afloran en la zona de estudio, Cota- Bogotá.	43
Figura 24 Panorámica de los cerros asociados a la unidad Ksglt.....	44
Figura 25 Panorámica de la Formación Sabana.....	45
Figura 26 Columna litológica generalizada del Sondeo de referencia L2MB_EST11_PT_02	46
Figura 27 Panorámica de la Formación Chía (Qch)	47
Figura 28 Panorámica de la Formación Chía y apiques ejecutados en el área	48
Figura 29 Columna representativa de la Formación Chía, en cauce de lecho de Río Bogotá.....	49
Figura 30 Mapa de localización de los sondeos eléctricos verticales	55
Figura 31 Interpretación de Sondeo Eléctrico Vertical _ SEV 1 (Error 8.74%).....	56

Figura 32	<i>Correlación Sondeos eléctrico Vertical 1</i>	58
Figura 33	<i>Interpretación de Sondeo Eléctrico Vertical _ SEV 2 (Error 3.89%)</i>	59
Figura 34	<i>Correlación Sondeos eléctrico Vertical 2</i>	60
Figura 35	<i>Sección geológica- geofísica entre zona cercana a la pozo profundo y área circundante al Río Bogotá.</i>	63
Figura 36	<i>Perfil geológico sección A- A´</i>	65
Figura 37	<i>Perfil geológico sección C-C´</i>	65
Figura 38	<i>Interpretación de los datos isotópicos frente a la línea meteórica isotópica ..</i>	68
Figura 39	<i>Interpretación de los datos isotópicos frente a la línea meteórica mundial y local</i>	69
Figura 40	<i>Variación del gradiente altitudinal – Oxígeno dieciocho 18O‰</i>	70
Figura 41	<i>Variación del gradiente altitudinal – Deuterio 2H‰</i>	70
Figura 42	<i>Línea meteórica para Colombia definida por Rodríguez, para SGC</i>	72
Figura 43	<i>Inventario de puntos de agua recopilado de diferentes fuentes</i>	78
Figura 44	<i>Clasificación de terrenos por la permeabilidad</i>	79
Figura 45	<i>Valores típicos de permeabilidad para suelos</i>	83
Figura 46	<i>Valores típicos de conductividad hidráulica por diferentes autores y correlación con valores de la zona de estudio</i>	84
Figura 47	<i>Mapa de parámetro hidráulicos de conductividad hidráulica</i>	86
Figura 48	<i>Mapa de parámetro hidráulicos de la Sabana de Bogotá</i>	87
Figura 49	<i>Dirección de flujo local- Isopiezas</i>	93
Figura 50	<i>Mapa de Isopiezas y de Recarga</i>	95
Figura 51	<i>Promedio Mensual multianual de precipitación (mm)</i>	97
Figura 52	<i>Mapa de Isoyetas media mensual multianual (mm)</i>	101
Figura 53	<i>Recarga potencial media</i>	102
Figura 54	<i>Modelo Hidrogeológico Conceptual</i>	108
Figura 55	<i>Perfil Hidrogeológico-A-A´ – Modelo hidrogeológico Conceptual</i>	109
Figura 56	<i>Perfil Hidrogeológico-C-C´ – Modelo hidrogeológico Conceptual</i>	110
Figura 57	<i>Mapa hidrogeológico local</i>	111

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1 <i>Sondeos eléctricos verticales asociados a la zona de estudio</i>	15
Tabla 2 <i>Características técnicas del equipo</i>	32
Tabla 3 <i>Descripción y clasificación macro para las muestras con contenido arcillo limoso</i>	51
Tabla 4 <i>Descripción y clasificación macro para las muestras con contenido arenoso</i>	52
Tabla 5 <i>Coordenadas de ubicación de los Sondeos</i>	53
Tabla 6 <i>Correlación entre los sedimentos y la resistividad para el estudio</i>	54
Tabla 7 <i>Correlación entre los sedimentos y la resistividad para el estudio</i>	54
Tabla 8 <i>Resultados del proceso de resistividad SEV_1</i>	56
Tabla 9 <i>Resultados del proceso de resistividad_SEV2</i>	59
Tabla 10 <i>Coordenadas de los puntos de muestreo</i>	66
Tabla 11 <i>Datos Isotópicos obtenidos del muestreo representativo de la zona</i>	67
Tabla 12 <i>Información de los puntos de agua subterránea con reporte de niveles estáticos (NE)</i>	75
Tabla 13 <i>Compilación y análisis de parámetros hidráulicos asociados a las unidades geológicas de evaluación</i>	81
Tabla 14 <i>Parámetros hidráulicos correlacionados a los sedimentos del área de estudio, con base a valores típicos de referencia</i>	85
Tabla 15 <i>Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Transmisividad</i>	89
Tabla 16 <i>Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Capacidad Específica (CE)</i> 90	
Tabla 17 <i>Clasificación de unidades hidrogeológicas</i>	91
Tabla 18 <i>Promedio mensual y multianual de la precipitación por estación</i>	99
Tabla 19 <i>Calculo de la recarga potencial anual para el área de estudio (mm/año)</i>	103

Lista de Anexos

Anexo A Modelo Geológico- Geofísico	121
Anexo B Modelo Hidrogeoquímico.....	121
Anexo C Modelo Hidrodinámico.....	121
Anexo D Modelo Hidrológico	121
Anexo E Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	121

Lista de Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>ALOS PALSAR</i>	Advanced Land Observation Satellite
CAR	Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca
IDEAM	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
INGEOMINAS	Instituto Colombiano de Geología y Minería
IGAC	Instituto Geográfico Agustín Codazzi
SGC	Servicio Geológico Colombiano
SDA	Secretaría Distrital de Ambiente
SEV	Sondeo Eléctrico Vertical
SLMB	Segunda Línea del Metro de Bogotá

Lista de Símbolos

Abreviatura	Término
δ	Desviación relativa de una relación isotópica respecto a un estándar

PRELIMINARES

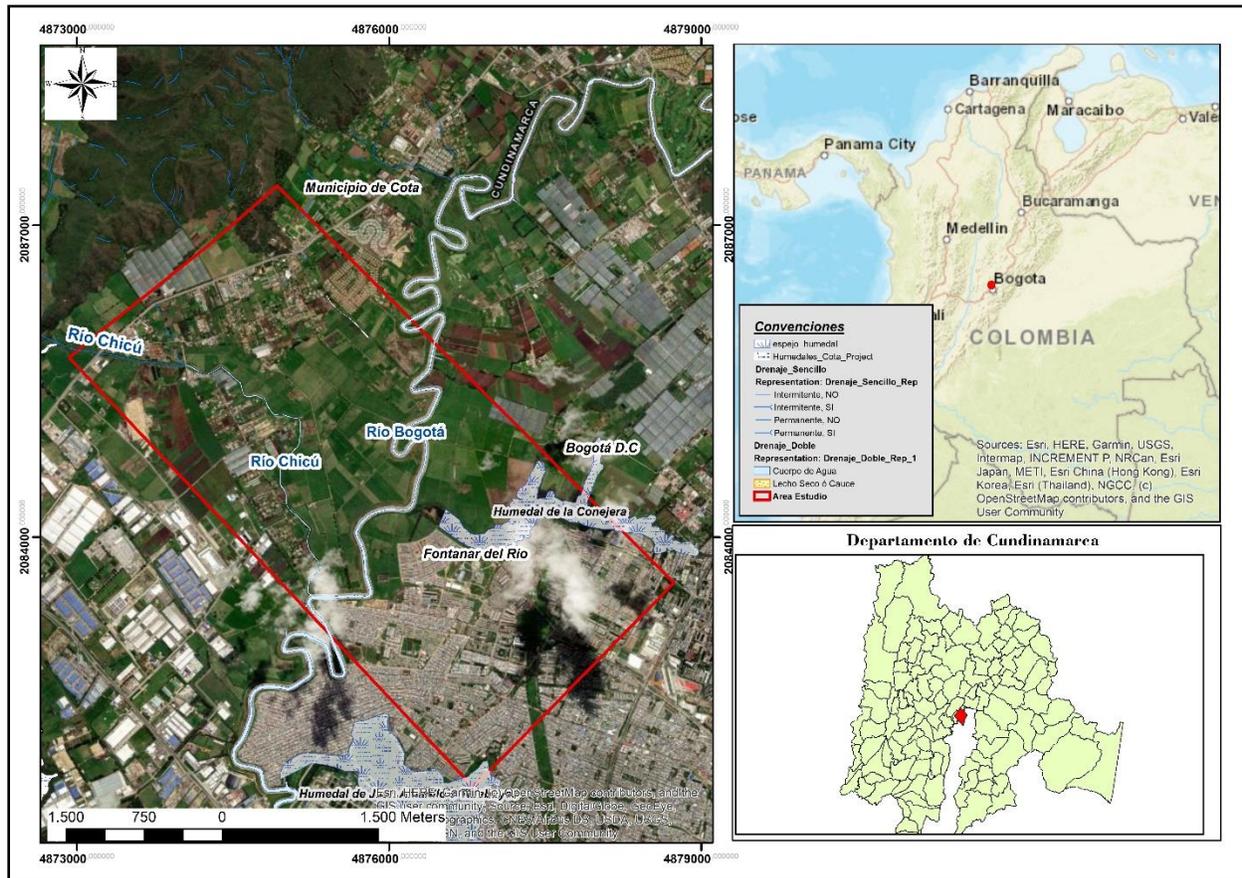
El estudio permite conocer las características hidrogeológicas de los Depósitos Cuaternarios de Origen Fluvio Lacustre que infrayacen a unidades más competentes y a partir de los cuales se pretende realizar un aporte para el conocimiento sobre la relación o interconexión entre sistemas acuíferos relativamente someros y la dinámica fluvial del Río Bogotá el cual, no solo desde el punto de vista de recurso hídrico, si no geomorfológico y geológico moldea las condiciones de las zonas que atraviesa a lo largo de su recorrido, donde el área seleccionada para evaluación presenta intervención antrópica y urbanística además, en cuyas zonas circundantes se prevé proyectos de infraestructura de gran relevancia. Razón por la cual establecer un análisis en la zona permitirá obtener una definición técnica base para un mejor desarrollo y planeación, tanto para la conservación de las fuentes hídricas subterráneas como del correcto aprovechamiento de estas y de la adecuada protección en desarrollo de intervenciones constructivas futuras.

LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

Geográficamente el área de estudio se ubica en el Municipio de Cota específicamente en la Vereda Parcelas y la zona occidental del Distrito Capital Bogotá, Suba Fontanar. Se encuentra ubicado en la Provincia de Sabana Centro dentro de la región Metropolitana de Bogotá y del Altiplano Cundiboyacense. Hidrográficamente se encuentra atravesado por el Río Bogotá, haciendo parte de la cuenca media de este, en la subcuenca del Río Chicú (zona occidental del Río Bogotá) y Sector Tibitoc- Soacha o también denominada subcuenca Salitre (zona oriental del Río Bogotá).

Figura 1

Localización del área de estudio Cota- Bogotá Cuenca Media Río Bogotá



Nota. Elaboración propia, 2023

1. INTRODUCCIÓN

La cuenca de la Sabana de Bogotá corresponde a una gran estructura sedimentaria cuyas características litológicas incluyen materiales heterogéneos de carácter anisotrópico que definen condiciones particulares variantes, se encuentra disectada por uno de los afluentes principales como lo es el Río Bogotá, el cual recorre la Sabana sobre extensos rellenos sedimentarios, y para la zona de estudio, corresponden a depósitos de origen fluvial y lacustre. Por tanto este estudio tiene como finalidad realizar una caracterización hidrogeológica que permita conocer características del proceso particular de interconexión entre este sistema hídrico superficial y el sistemas acuífero, en zonas proyectadas como de interés para la infraestructura del área metropolitana del distrito capital.

De acuerdo con lo que relaciona la (Pontificia Universidad Javeriana & Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017): “Todos los estudios realizados hasta el momento han aportado nuevo conocimiento hacia la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual del área asociada a los acuíferos de Bogotá, sin embargo, todos ellos están enmarcados en un enfoque clásico. El acuífero de Bogotá D.C representa un acuífero urbano de gran complejidad, en el que, para llegar a un modelo conceptual adecuado, es requerido considerar los procesos particulares que suceden en acuíferos someros que se extienden bajo un área urbanizada. Estos procesos son afectados por las intervenciones que se realizan en el subsuelo, como la instalación de infraestructura de servicios públicos (acueducto, alcantarillado, energía), la construcción de obras subterráneas, la extracción de agua subterránea en la construcción de sótanos, el cambio del material de los primeros metros para construcción de la malla vial”.

El recorrido del río Bogotá a lo largo de la Sabana de Bogotá juega un papel muy importante, teniendo en cuenta que este define diferentes características, tanto hidrológicas, hidráulicas, morfológicas y paisajísticas. Sin embargo, no se conoce la interacción de este con los sistemas acuíferos asociados a las unidades hidrogeológicas que caracterizan la Sabana, definidas por depósitos Cuaternarios de gran relevancia. Dada la gran longitud que recorre el Río Bogotá con características similares a las mencionadas, para el presente estudio se evalúa el área metropolitana entre el Municipio de Cota (zona noroccidental en la Vereda Parcelas, aguas abajo de la cuenca media del Río Bogotá) y zona occidental de Suba – en inmediaciones de Fontanar del Río de la Ciudad de Bogotá.

En la Sabana de Bogotá se han realizado diferentes análisis y estudios hidrogeológicos con enfoque conceptual y numérico, aplicados a diferentes temáticas que van desde alcances ambientales, de aprovechamiento de los recursos hídricos subterráneos y de intervención antrópica. Sin embargo, no se describe el comportamiento hidrogeológico de los sistemas acuíferos asociados al ambiente geológico y dinámica fluvial del Río Bogotá. Por ello es necesario evaluar los posibles escenarios de interconexión río - acuífero, teniendo como base las condiciones geológicas, hidrológicas, hidráulicas e hidroquímicas actuales de los sistemas hídricos superficiales y subterráneos presentes al noroccidente de la ciudad de Bogotá, donde se prevé el desarrollo de infraestructura de transporte, dado el desarrollo poblacional y de movilidad tanto de la ciudad como de la zona intermunicipal.

Razón por la cual se lleva a cabo un análisis a partir de un modelo conceptual definido por los componentes geológico, hidrológico, hidrodinámico el cual incluye parámetros hidráulicos y dirección de flujo e hidrogeoquímico.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVOS GENERALES

Realizar la caracterización hidrogeológica conceptual para los sistemas acuíferos de baja pendiente de origen Fluvio – Lacustre y como base para analizar la posible interconexión con la dinámica fluvial de la cuenca del Río Bogotá, específicamente, para el caso de estudio en la Cuenca media del Río Bogotá (Subcuenca Chicú, y Tibitoc- Soacha/Salitre).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Componente geológico

- ✓ Actualizar la cartografía geológica cuaternaria disponible en el área de estudio mediante mapa a escala mínimo 1:15.000 a partir de análisis de sensores remotos y trabajo de campo.
- ✓ Elaboración de secciones geológicas que permitan diferenciar los materiales geológicos presentes y su disposición estructural.
- ✓ Realizar caracterizaciones litológicas de los materiales geológicos presentes en la secuencia sedimentaria asociada a la unidad fluvial derivados de la dinámica del Río Bogotá, mediante caracterización petrográfica macroscópica a partir de material recolectado mediante dos apiques.

Componente Geofísico

- ✓ Generar un modelo geológico- geofísico, mediante correlación de litología con el fin de conocer la geometría del acuífero, mediante la ejecución de dos SEV'S.

- ✓ Generar un perfil geológico – geofísico que permita conocer la distribución de los materiales y la definición de capas o niveles saturados.
- ✓ Conocer la relación de los materiales aledaños al cauce del Río Bogotá y los sedimentos, que distan de este.

Componente hidrología subterránea

- ✓ A partir de información secundaria, determinar la recarga potencial al acuífero (infiltración) para el área de estudio y mediante información oficial realizar la espacialización de la precipitación, a través de un mapa de Isoyetas, mediante el método de interpolación Kriging.

Componente Hidrodinámico (Hidráulico y Dirección de flujo)

- ✓ A partir de recopilación de información secundaria, determinar los parámetros hidráulicos (conductividad, transmisividad, capacidad específica, etc.) asociados a los materiales geológicos presentes en el modelo geológico. Esto mediante correlaciones con valores teóricos y típicos tanto de los Depósitos Cuaternarios como de la litología asociada.
- ✓ Describir la evolución conceptual de la dinámica del agua subterránea en términos de zonas de recarga, tránsito y descarga, de acuerdo con la información de niveles piezométricos para la generación de isopiezas, mediante método de interpolación.
- ✓ Determinar la dirección y tipos de flujo local subterráneo presentes en la zona objeto de caracterización.

Componente hidrogeoquímico

- ✓ Determinar áreas de recarga, y posibles interconexiones entre el sistema acuífero y el sistema de drenaje del Río Bogotá, mediante la aplicación de análisis de Isotopos estables (Deuterio, O18).

Componente hidrogeológico conceptual

- ✓ Describir la dinámica acuífero-sistema de drenaje en la cuenca de baja pendiente del Río Bogotá en su parte media, a partir del desarrollo y generación de la caracterización conceptual hidrogeológica 3D. A través de la integración de los resultados de todos los componentes evaluados.

3. MARCO TEÓRICO

3.1 EVOLUCIÓN DEL CONOCIMIENTO HIDROLÓGICO EN LA CUENCA MEDIA DEL RÍO BOGOTÁ

La Sabana de Bogotá cuenta con varios estudios hidrogeológicos realizados por INGEOMINAS, hoy Servicio Geológico Colombiano (SGC) durante las últimas décadas, los cuales en su gran mayoría están enfocados en actualizar la información hidrogeológica con fines de abastecimiento y aplicación en la ingeniería.

En estudios hidrogeológicos desarrollados entre 1989 y 1993, mediante el Convenio CAR-INGEOMINAS, se genera información geológica, geofísica y de caracterización hidrogeológica con el fin de proporcionar a la CAR los conocimientos técnicos suficientes para el manejo adecuado de las aguas subterráneas en su jurisdicción. Para llevar a cabo este estudio, el área total de la Sabana de Bogotá se dividió en nueve subcuencas superficiales.

De acuerdo con lo que menciona (Bermudes, Velandia, & INGEOMINAS, 2010) “En cada una de ellas se adelantó el estudio hidrogeológico y se calcularon los recursos y los reservas de aguas subterráneas, evaluándose potenciales escenarios de escasez del recurso hídrico en algunas subcuencas. El estudio aportó información básica muy valiosa sin embargo, su principal inconveniente fue de carácter conceptual debido a que cada subcuenca se trató como unidad hidrogeológica independiente y en cierto modo “cerrada”, desconociendo los límites hidrogeológicos reales y por consiguiente afectando el balance real de agua. El alcance de este estudio no permitió aclarar las incertidumbres existentes a cerca del funcionamiento de los acuíferos de la Sabana de Bogotá”.

No obstante en el documento para el *Modelo Hidrogeológico Conceptual del Acuífero subsuperficial o somero en el perímetro urbano del Distrito Capital* (Pontificia Universidad Javeriana & Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017), mencionan que dentro de los antecedentes se encuentra lo definido por Rodríguez (1986) a través de un estudio de datación del agua subterránea, donde se concluye que los acuíferos de la sabana de Bogotá están conformados por agua relativamente vieja y que la recarga a estos sistemas no es substancial. En contraste, Lobo-Guerrero y Uzcátegui (1992) sugieren que debido a los descensos desarrollados durante los últimos años debería existir algún tipo de recarga en el acuífero. La posición de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón - JICA (EAAB-JICA, 2009), sobre la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo de esta región se aparta de las demás, ya que concluye que en esta región existen suficientes recursos hídricos subterráneos, es decir la recarga (132 mm/año) es mucho mayor del aprovechamiento subterráneo, resultado que según JICA justifica la construcción de pozos adicionales en zonas poco explotadas.

Por otra parte, en el estudio hidrogeológico de (Pontificia Universidad Javeriana & Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017) se menciona que, el estudio realizado por PNUD-DAMA-Hidrogeocol (1999), cuyo objetivo era elaborar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del área de jurisdicción del DAMA (Distrito Capital), presenta un balance hídrico donde la recarga real para el área de Bogotá y los bombeos de agua subterránea son similares, ambos del orden de $1\text{ m}^3/\text{s}$, siendo la recarga potencial del orden de $2\text{ m}^3/\text{s}$. Hidrogeocol considera que los descensos pronunciados de niveles piezométricos que se observan en muchos pozos se pueden explicar con la recarga pequeña, las bajas a media permeabilidades de los acuíferos y su bajo coeficiente de almacenamiento.

Las simulaciones numéricas sugieren que los tiempos de tránsito desde la zona de recarga hasta la ciudad son del orden de 10,000 años, lo que sugiere que agua subterránea con miles de años no necesariamente implica que esta no se mueva.

El antecedente más reciente según (Pontifica Universidad Javeriana & Alcaldía Mayor de Bogotá, 2017), está asociado al estudio desarrollado por la SDA (2013), en el que se desarrolló un modelo conceptual del área urbana del Distrito Capital con base en el análisis de variables climatológicas y estimación del balance hídrico, levantamiento geológico de detalle a escala 1:25.000, generación de un mapa de curvas de igual espesor de los depósitos cuaternarios, elaboración de mapas de isopiezas para diferentes temporadas, interpretación de pruebas de bombeo para la estimación de los parámetros y procesamiento de datos hidrogeoquímicos e isotópicos (2H, O18) de diferentes tipos de agua (lluvia, superficial, subterránea). La recarga, estimada por tres métodos diferentes presenta valores para el área de estudio que varían entre 70 y 157 mm/año. Los valores encontrados son ese sentido similares a la estimada por JICA (2009).

3.2 MODELO GEOLÓGICO- GEOFÍSICO

3.2.1 Contexto Geológico Regional

El estudio se encuentra determinado por las características geológicas que han definido la Sabana de Bogotá, en diferentes condiciones de sedimentación para rocas que van desde el Cretácico superior hasta el Cuaternario, ver Figura 2. De acuerdo con lo que menciona (Montoya & Reyes & INGEOMINAS, 2005), las rocas más antiguas están representadas en las formaciones Chipaque, Simijaca, La Frontera, y Conejo (Turoniano-Santoniano); definidos en ambientes marinos con la depositación de 1.200 m aproximados de secuencia.

A partir del Campaniano las condiciones de sedimentación varían y se deposita en zonas distales la Formación Lidita Superior y la Formación Arenisca Dura en zonas proximales y continúa la sedimentación en el Campaniano Superior con la Formación Plaeners; la regresión se completa y deja como último registro marino la Formación Labor y Tierna y la parte inferior de la Formación Guaduas, posteriormente se da la sedimentación continental tipo fluvial.

Los sucesos consecutivos de sedimentación de origen fluvial del Paleógeno y Neógeno dan origen a las Formaciones Cacho, Bogotá, Regadera y Tilatá. Luego debido a los procesos tectónicos y el levantamiento de la Cordillera Oriental son afectadas dichas formaciones y se da la posible sedimentación de la actual Cuenca de la Sabana de Bogotá. Según Montoya & Reyes & INGEOMINAS, (2005) una vez se da dicho evento, quedan registros de algunos vestigios, tales como la Formación Chorrera, Marichuela con la posterior sedimentación de esta cuenca con las Formaciones Subachoque, Río Tunjuelito y Formación Sabana.

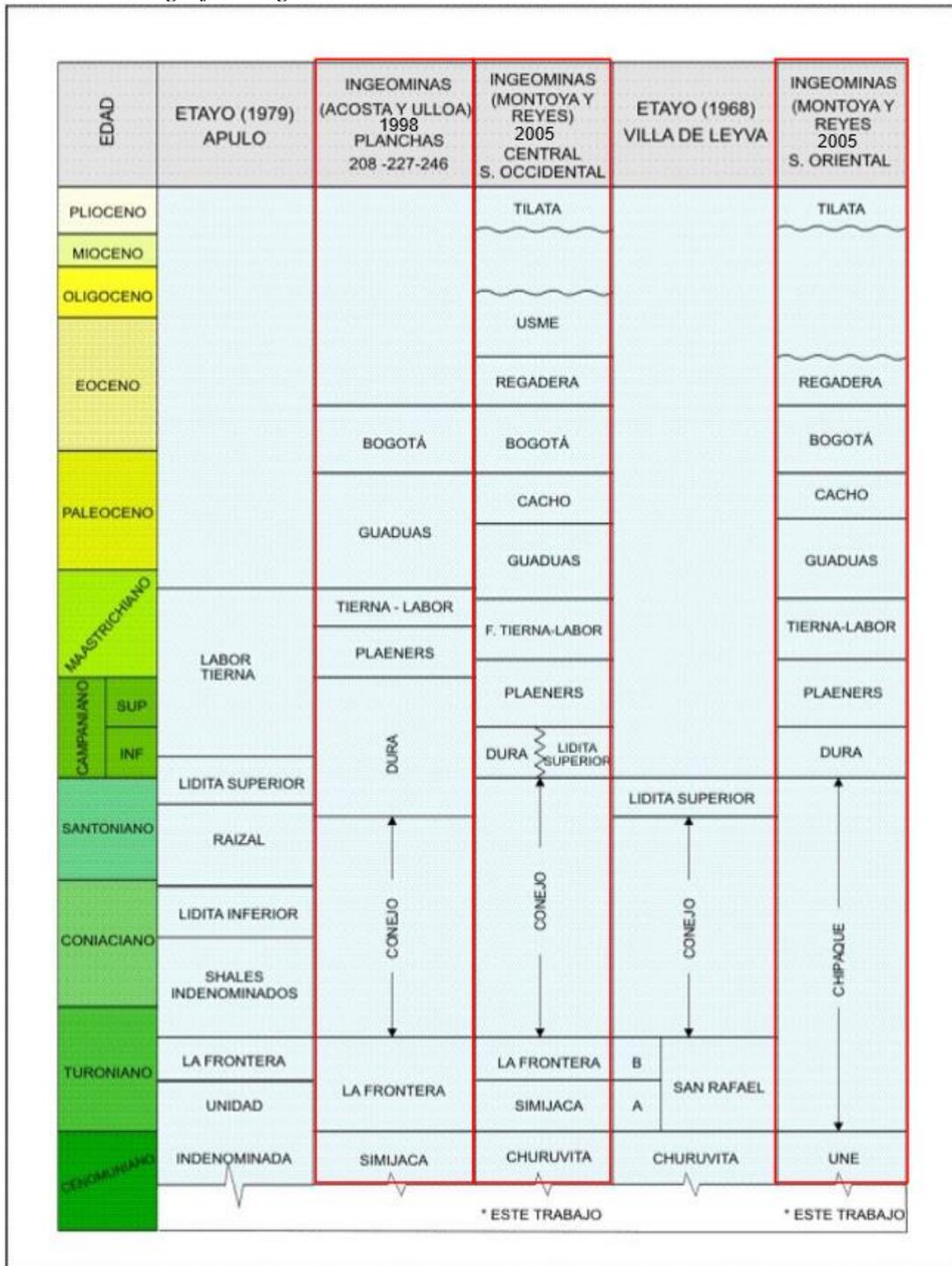
Esta última de origen lacustre (Formación Sabana) es la de mayor representación en la Sabana de Bogotá y parte de la zona de estudio, así como los depósitos de llanura de inundación del Río Bogotá, y Río Chicú, denominado hoy Formación Chía. El depósito lacustre cuaternario de la Sabana de Bogotá según (Padilla & Calderon & INGEOMINAS, 2004), en el centro de la cuenca alcanza 300 m de espesor disminuyendo hacia los bordes, donde se diferencia por presentar mayor recurrencia de gran contenido de materia orgánica, encontrándose discordantemente sobre un basamento sedimentario representado por una secuencia de rocas de origen marino, transicional y continental con edades entre el Cretácico, Terciario, Paleógeno y Neógeno.

La Sabana de Bogotá establece dos estilos estructurales diferenciables, según (Montoya & Reyes & INGEOMINAS, 2005) el primero, localizado en el flanco oriental de la Cordillera Oriental, al oriente del sinclinal de Checua, con fallas de cabalgamiento con vergencia al Oriente. El segundo estilo estructural se presenta al occidente, esta caracterizado por fallas de cabalgamiento con vergencias al occidente.

Según (Velandia & De Bermúdez, 2002), en el informe de Fallas Longitudinales y Transversales en la Sabana de Bogotá, describen que los principales rasgos tectónicos distinguidos en los alrededores de la Sabana de Bogotá son los que tienen una dirección NE y que se distinguen en los Cerros Orientales de la Sabana y en los escarpes que la bordean hacia el occidente. Mencionan además la existencia de fallas bajo la cobertera Cuaternaria, las cuales sugieren pueden ejercer control en el comportamiento hidrogeológico y cuyo efecto reciente sobre los depósitos cuaternarios estaría por evaluarse con estudios más detallados de neotectónica y geofísica.

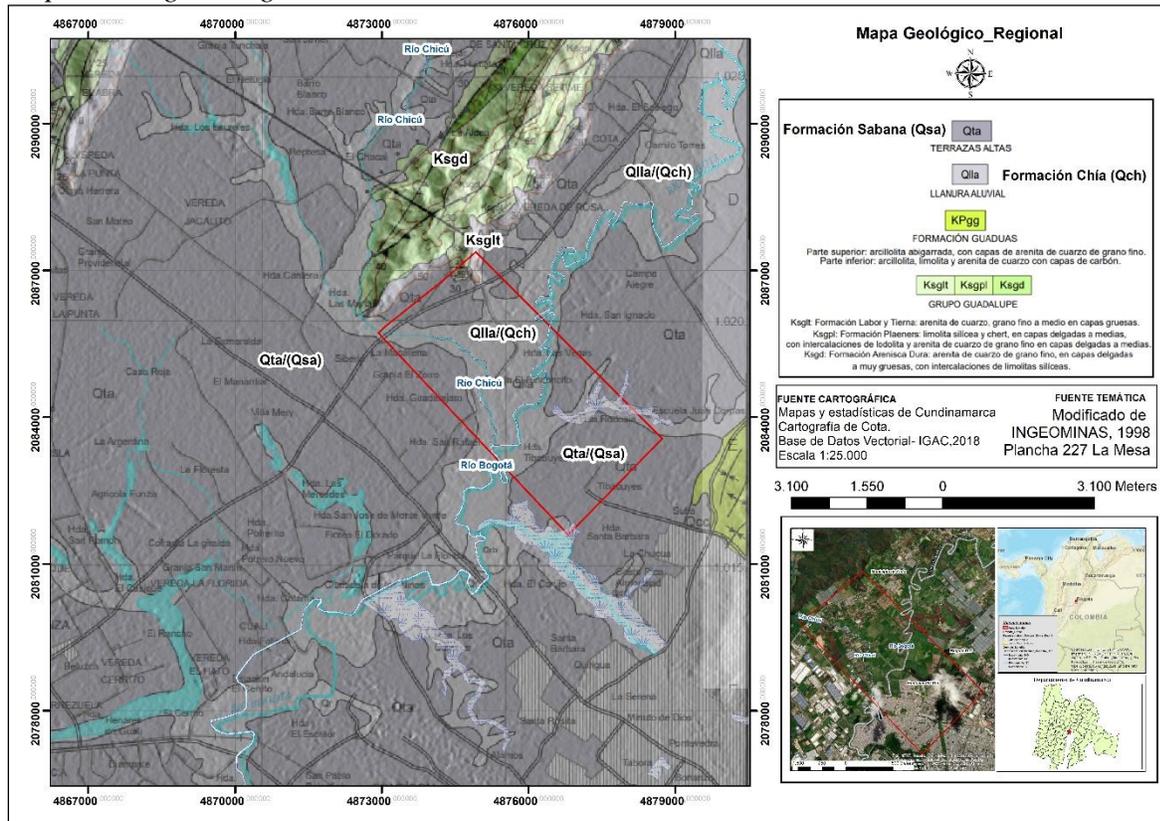
De acuerdo con lo que menciona (Veloza & SDA, 2012), la tectónica de la Sabana de Bogotá, sobre la zona de estudio corresponde al Bloque localizado al norte de la Falla de Usaqué, y en (Padilla & Calderon & INGEOMINAS, 2004), se considera la zona de estudio influenciada por la Falla de Usaqué, la cual es una prolongación, ya que esta, se encuentra definida en los cerros orientales, y sobre la planicie se presenta cubierta por los depósitos Cuaternarios, cuyo espesor registrado alcanza los 300m. El INGEOMINAS la clasifica como potencialmente activa, con tasa de movimiento baja, Cruza la Sabana de Bogotá en dirección S60°E, y se prolongan dentro de los cerros orientales por el sector de Usaqué.

Figura 2
Secuencia estratigráfica regional.



Nota. Modificado 2023, de Geología de la Sabana de Bogotá (Montoya & Reyes & INGEOMINAS, 2005).

Figura 3
Mapa Geológico Regional.



Nota. Modificado 2023, de (Ulloa et al & INGEOMINAS, 1999)

3.2.2 Contexto Geofísico

La geofísica en la sabana de Bogotá está definida por métodos geoelectricos, tanto Sondeos Eléctricos Verticales como de Magnetotelúrica principalmente, y han sido desarrollado por entidades oficiales como la CAR y la SDA. En el estudio desarrollado por (Veloza & SDA, 2012), se reportó una malla de 30 sondeos ejecutados, los cuales se ubicaron espacialmente verificando que solo dos de ellos (ver Figura 4) están cercanos o en inmediaciones a la zona de estudio, y corresponden a los SEVs denominados SEV6 y SEV7, a continuación se relaciona los resultados obtenidos (ver Tabla 1) para los diferentes materiales alcanzando profundidades de exploración de hasta de 500 y 400 m respectivamente, con aperturas de AB 1000 y 800 m. Como se mencionó la CAR también ha ejecutado ensayos geoelectricos

a través de métodos magnetotelúricos con una red para toda la cuenca de la Sabana de Bogotá, sin embargo dicha información es de tipo muy regional, sin puntos cercanos al área de estudio, no obstante se logra verificar que a nivel de correlación con los materiales sedimentarios las zonas con baja saturación se encuentran entre rangos de 7000 a 900 (ohm/m), arenas y grava saturadas 900-210 (ohm/m), arenas saturadas, arenas arcillosas y arcillas arenosas 210-14 y niveles arcillosos 14 – 1.3(ohm/m), datos extraídos del informe (CAR & Consorcio Magneto, 2018).

Tabla 1

Sondeos eléctricos verticales asociados a la zona de estudio

Sondeo eléctrico vertical N°6 SEV-6			
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohm/m	m	m	
9802	0,1	0,1	Suelo arenoso
80,7	1,8	1,9	Arenas Saturadas
17,3	3,1	5	Arcillas
26,9	13,2	18,2	Arcilla arenosa
17,8	40	58,2	Arcilla
36,9	82	140,2	Arcilla arenosa
18,3	>359,8	>500	Arcillolitas
Sondeo eléctrico vertical N°7 SEV-7			
Resistividad	Espesor	Prof.	Litología
Ohm/m	m	m	
54,6	0,6	0,6	Suelo arenoso arcilloso
508	0,5	1,1	Suelo arenoso
36,1	1,4	2,5	Arcilla arenosa
27,1	20,6	23,1	Arcilla arenosa
16	40,5	63,6	Arcilla
29,2	77,9	141,5	Arcilla arenosa
25,5	>258	>400	Arcillolitas

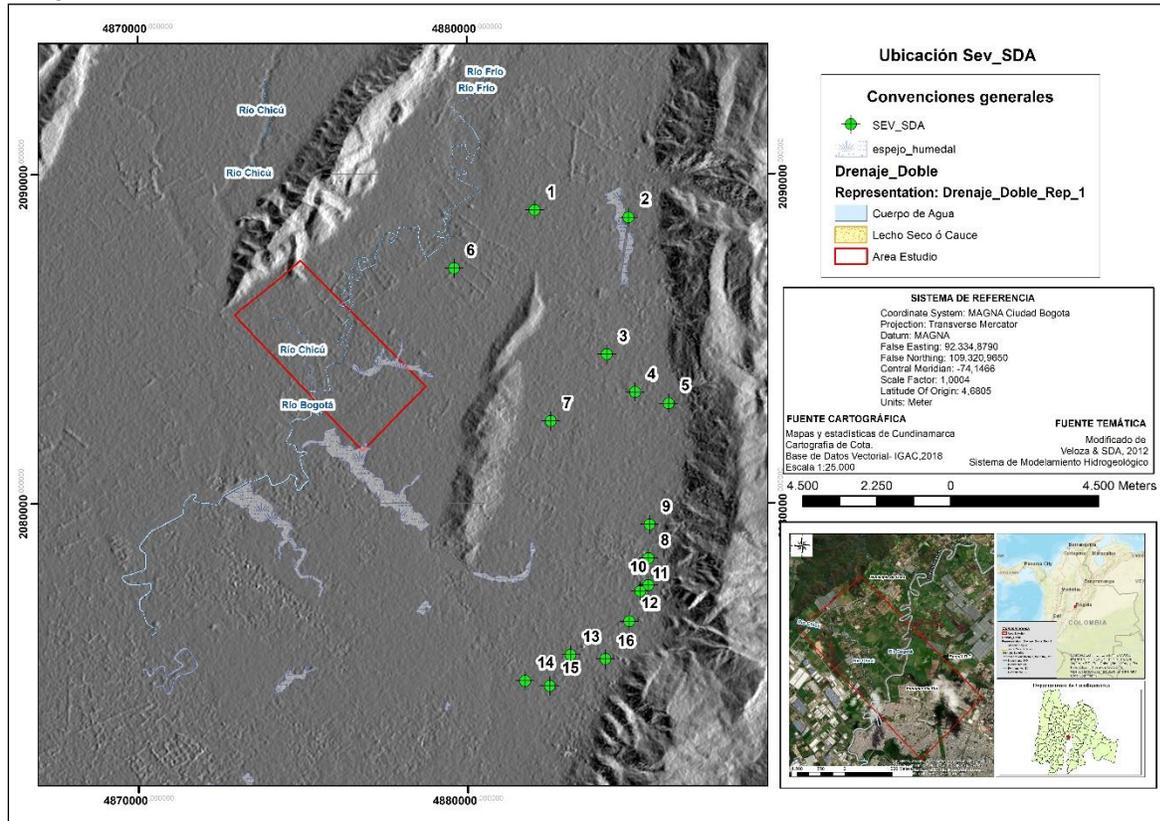
Nota. Modificado 2023, (Veloza & SDA, 2012) pág. 126

Esta información permitió verificar los rangos característicos para la composición litológica que conforma el área de estudio, así como de su correlación con los depósitos Cuaternarios.

Además de validar que a las profundidades de exploración ejecutadas no se encontraron valores correlacionables con el sustrato rocoso, solo hasta los 400 m aproximadamente.

Figura 4

Diagrama de localización de SEVs cercanos a la zona de estudio



Nota. Modificado 2023

3.3 MODELO HIDRODINÁMICO

Para el modelo hidrodinámico y en particular para la evaluación de los parámetros hidráulicos se tuvo en cuenta la clasificación de permeabilidad para terrenos de (Emilio Custodio & Manuel Ramon Llamas, 1983), a partir de este se puede obtener datos básicos sobre la condición de los acuíferos y la correlación con el tipo de material.

Además, evaluando las diferentes categorizaciones tipo que se le asignan a la conductividad hidráulica, como (Sanders, 1998), y (Doménico, 1998).

De acuerdo con lo que menciona el (FDN & MOVIUS, 2023), las formaciones geológicas existentes corresponden a Depósitos de Llanura de Inundación (Qlla) y a Depósitos Lacustres o Formación Sabana (Qta), cuyas unidades hidrogeológicas asociadas son Acuíferos de Baja Productividad, con sedimentos granulares finos en el primer caso y sedimentos de granulometrías finas en el segundo.

Según los análisis de permeabilidad que reporta (FDN & MOVIUS, 2023), en ambos casos los materiales son de muy baja permeabilidad, dado que presentan conductividades hidráulicas que oscilan entre $1,0 \times 10^{-9}$ m/s y $5,0 \times 10^{-11}$ m/s. Estos valores según los autores mencionados son equivalentes a valores típicos en barreras de baja permeabilidad, las cuales se utilizan para evitar el flujo a través de materiales permeables, como por ejemplo un depósito de arena, que típicamente puede tener valores de conductividad hidráulica del orden de $1,0 \times 10^{-3}$ m/s a $1,0 \times 10^{-4}$ m/s.

Según el análisis de (FDN & MOVIUS, 2023), particularmente en los niveles finos que corresponde en general con las arcillas, lentes de arenas finas y materia orgánica de la formación Sabana (Qta), obtuvieron valores máximos de permeabilidad entre 1×10^{-6} m/s y 1×10^{-9} m/s relacionadas dentro de una unidad hidrogeológica de muy baja permeabilidad.

Todo lo anterior con reportes de la posición del nivel freático a lo largo del trazado de la Segunda Línea del Metro de Bogotá (SLMB) que se caracteriza por ser somera a una profundidad promedio de 1,7 m, esto para el caso de la Formación Sabana.

3.4 MODELO HIDROGEOQUÍMICO

El modelo hidrogeoquímico se desarrolla como base para la definición del origen y análisis de las zonas de recarga y descarga del estudio, por lo que se desarrolla a partir de la evaluación isotópica del Deuterio ($2H$) y Oxígeno Dieciocho ($O18$).

La hidrogeoquímica trata del origen, los procesos, la evolución y la composición del agua natural almacenada en las unidades hidrogeológicas, que mediante análisis fisicoquímicos permite identificar la dinámica de los flujos subterráneos desde las zonas de recarga, su paso a lo largo de las zonas de tránsito y finalmente su sitio de descarga, (Alejandro Perez, 2021).

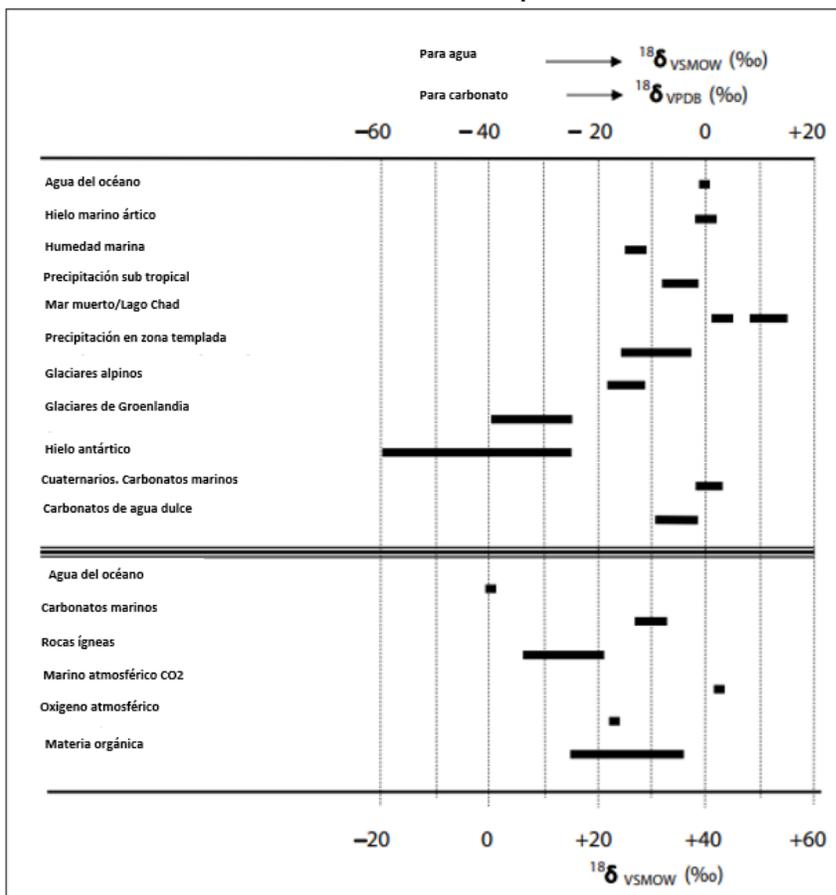
3.4.1 Isótopos estables

De acuerdo con lo que menciona (Rodríguez, 2004), la forma idónea de interpretar resultados isotópicos estables está basada en “la identificación del rango de la línea meteórica isotópica local, la cual no se encuentra generalmente disponible, particularmente en zonas en donde no se han realizado estudios previos. En tales casos, la línea meteórica regional puede resultar de gran ayuda en la interpretación y evaluación de los análisis de muestras de agua representativas de los hidrosistemas investigados (naturales o artificiales.)”.

Según los conceptos técnicos y académicos de libros de isotopía como (IAEA, 2001), los valores de $18O$ muestran variaciones naturales dentro de un rango de casi 100‰, como se indica en la Figura 5. El $18O$ es a menudo enriquecido en lagos (salinos) sujetos a un alto grado de evaporación, mientras que las precipitaciones a gran altitud y en climas fríos, especialmente en la Antártida, es bajo en $18O$. En general, en el ciclo hidrológico en los climas templados se encuentran con un rango de $18O$ que no supera el 30‰, (IAEA, 2001).

Figura 5

Vista general de las variaciones de $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ en compuestos naturales.



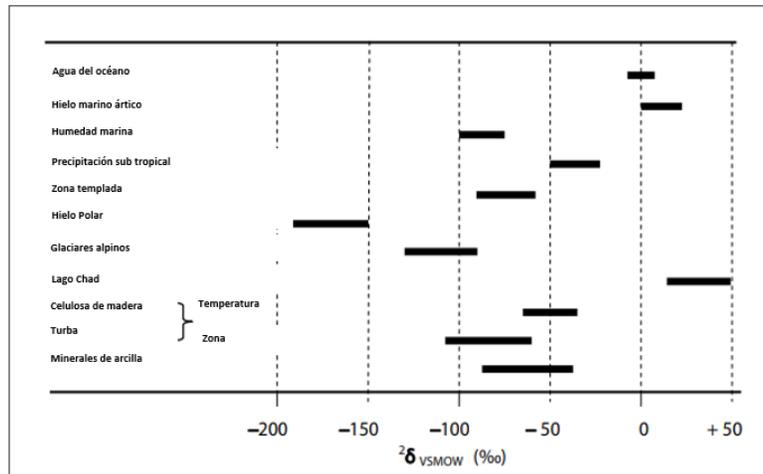
Nota. (IAEA, 2001), pág. 85- rangos son indicativos para la mayoría de los materiales mostrados. La relación entre las escalas VPDB (Estándar internacional de Viena) y VSMOW (Agua oceánica media estandarizada de Viena) se da en escalas.

En cuanto al Deuterio la (IAEA, 2001) menciona: “El elemento químico hidrógeno consta de dos isótopos estables, ^1H y ^2H (D o Deuterio), con una abundancia de aproximadamente 99,985 y 0,015% y una relación isotópica $^2\text{H}/^1\text{H} \approx 0.00015$. Esta relación isotópica tiene una variación natural de aproximadamente 250%, mayor que las variaciones de $^{13}\delta$ y $^{18}\delta$, debido a las diferencias de masa relativamente mayores entre los isótopos”, ver Figura 6.

Al igual que con el ^{18}O , se observan altas concentraciones de ^2H en aguas superficiales muy evaporadas, mientras que las bajas ^2H en el hielo polar. Variaciones de alrededor del 250 ‰ están presentes en parte del ciclo hidrológico.

Figura 6

Vista general de variaciones en composiciones naturales de Deuterio.



Nota. (IAEA, 2001), pág. 92 Los rangos son indicativos para la mayoría de los materiales mostrados

3.4.2 Correlación entre contenido isotópico y gradiente altitudinal

Este estudio tiene en cuenta para el análisis por gradiente altitudinal la evaluación realizada por (Rodríguez, 2004), quien menciona que mediante análisis isotópicos en diferentes lugares geográficos de Colombia se realizó una depuración y procesamiento con el fin de hacer una correlación de los valores expresados en unidades de desviación (δ) con la altitud. Obteniendo una relación gráfica del efecto de altitud en Colombia, como se muestra en la siguiente ecuación:

$$\delta O^{18} = -0.0024 H - 3.1$$

Esta ecuación sirve para establecer que a nivel regional, existe un cambio en el contenido de O^{18} en la precipitación, del orden de 0.5 unidades (δ) por cada 200 m de variación en la

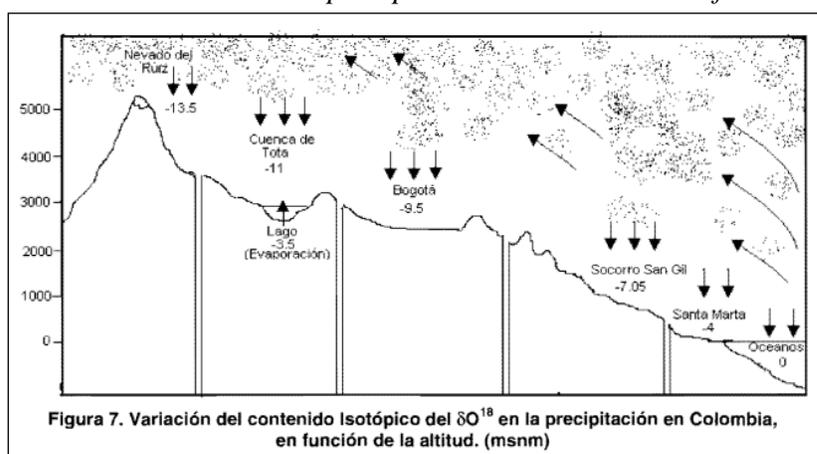
altitud sobre el nivel del mar. De igual manera para el Deuterio (Rodríguez, 2004), establece la siguiente ecuación:

$$\delta H^2 = -0.0186 H - 19$$

Por tanto para Colombia, puede calcularse que en promedio, por cada 200 m de diferencia de altitud sobre el nivel del mar, existe un cambio del contenido isotópico de 2H, del orden de 4 unidades (8). En la Figura 7, se presenta de manera esquemática, la variación del contenido isotópico del O18 en la precipitación, para varias regiones de Colombia, en función de la altitud, donde se logra identificar que los valores típicos están alrededor de (-9.5) para zonas como Bogotá.

Figura 7

Esquema de variaciones de 18O en la precipitación en Colombia en función de la altitud.



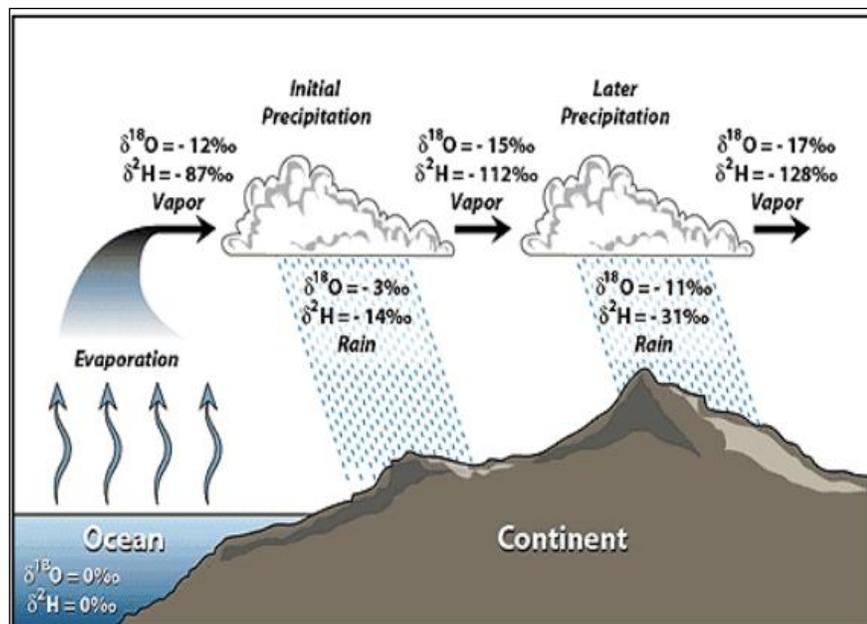
Nota. Fuente (Rodríguez, 2004).

Otros conceptos de la definición de variación altitudinal realizado en Colombia corresponden a lo definido por (Malo, Alfaro, & SGC, 2017) quienes definen que: “El efecto continental en la composición isotópica del agua de precipitación consiste en la disminución en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD en el interior de los continentes, con relación a las zonas más próximas a la costa a la misma latitud”, como se ilustra en la Figura 8.

“Esta variación se debe a que las nubes van descargando los isótopos pesados en las primeras precipitaciones, y cuando se introducen al continente quedan empobrecidas en isótopos pesados. (Raya, 2003)”. Otro de los efectos que considera (Malo, Alfaro, & SGC, 2017) es el efecto altitud, fenómeno en el cual los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de la precipitación se van haciendo más negativos a medida que se incrementa la altitud, denominado como efecto o gradiente altitudinal. Las lluvias más ligeras se generan por el fraccionamiento durante la condensación del vapor de agua a lo largo del gradiente de altitud. En general, el empobrecimiento observado con la altura es en realidad un efecto de la condensación múltiple, (Raya, 2003). Según (Malo, Alfaro, & SGC, 2017), con base en estudios realizados en diferentes regiones del mundo, se determinó que el $\delta^{18}\text{O}$ disminuye entre -0.10 y -0.5 ‰ por cada 100 m que aumente la altitud y el δD disminuye entre -2.5 y -4 ‰ por cada 100 m que aumente, también la altitud Clark & Fritz, 1997).

Figura 8

Esquema de la lluvia en los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD



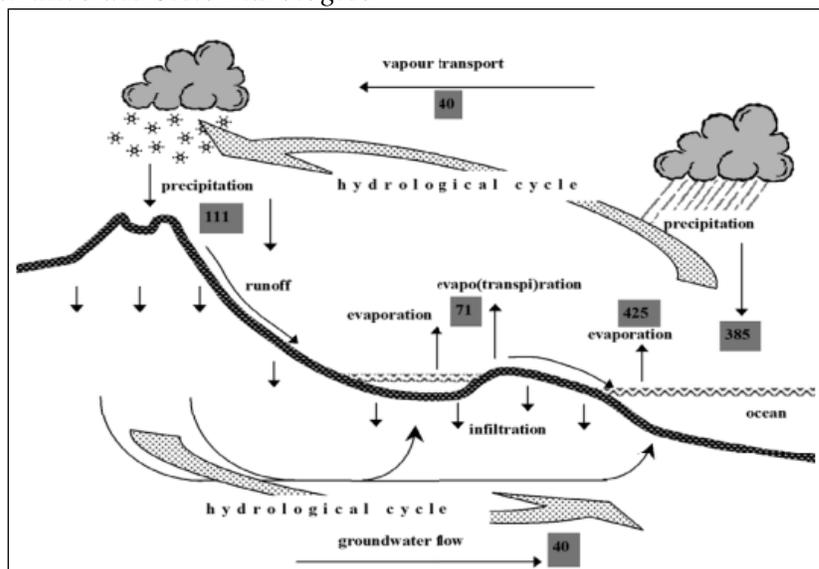
Nota. Fuente, (Malo, Alfaro, & SGC, 2017) Basados en Hoefs 1997 y Coplen et al 2000 en Sahra 2016

3.5 MODELO HIDROLÓGICO

La evaluación de las características hidrológicas de una zona determinada permiten conocer las condiciones en las que se genera el ciclo hidrológico y los aportes del recurso hídrico que logran llegar a las zonas saturadas del subsuelo, de esta manera establecer la recarga potencial y de infiltración, como componente para incluir dentro del análisis hidrogeológico. En el área de estudio y de acuerdo con entidades oficiales como SDA y CAR, son dos subcuencas las que definen en el área donde predomina la cuenca media del Río Bogotá.

Figura 9

Esquema ilustrativo del Ciclo hidrológico

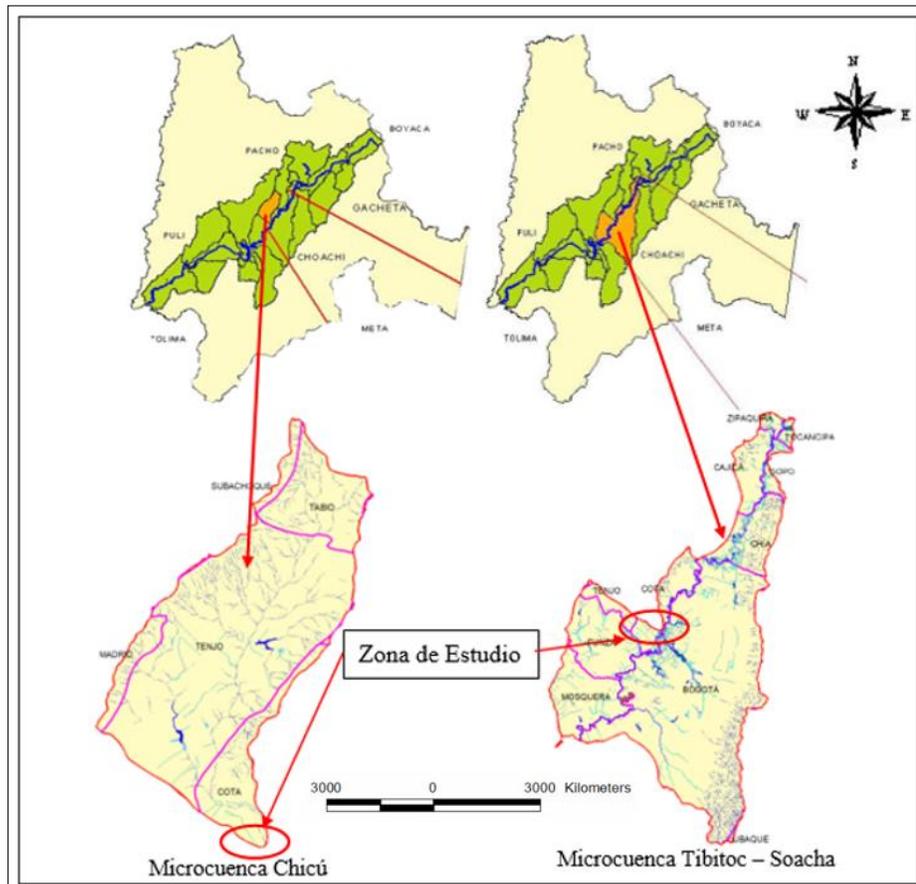


Nota. Fuente (IAEA, 2001)Pg.26

Como se mencionó, la cuenca dentro de la cual se realiza el estudio corresponde a la Cuenca media del río Bogotá, cuya división hidrográfica corresponde a las subcuencas asociadas con el Río Chicú y Tibitoc – Soacha (la cual según el SDA se denomina Salitre), a continuación se presenta un gráfico esquemático de la relación de las subcuencas con el área de evaluación, ver Figura 10.

Figura 10

Esquema ilustrativo de la subcuencas del área de estudio



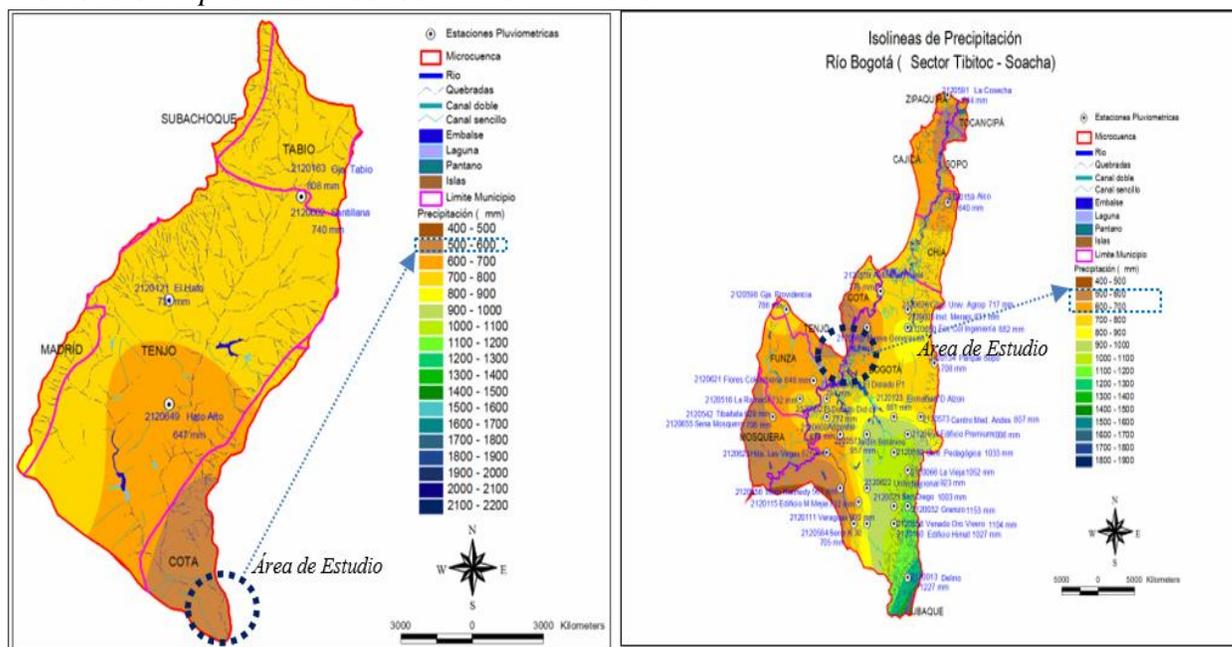
Nota: Modificado, 2023 (CAR & Ecoforest Ltda., 2006) & (CAR, Ecoforest Ltda, & Planeación Ecológica Ltda., 2006)

3.5.1 Información Hidro climática: Precipitación

Una de las principales variables de evaluación dentro del balance hídrico, es reportada por (CAR & Ecoforest Ltda., 2006) en las subcuencas del Río Chicú al occidente del área de estudio, con valores entre 500 mm y 600 mm en el municipio de Cota, según el estudio, la de menor rango para toda la subcuenca, esto de acuerdo con su distribución espacial. En cuanto a la distribución temporal a lo largo del año es de tipo bimodal, generada por el paso de la zona de confluencia intertropical, en los dos semestres del año. Presenta un valor promedio anual de 830,8 mm con precipitaciones máximas que alcanzan los 1200 mm y mínimos de 550 mm.

Para la Subcuenca de Tibitoc – Soacha en su distribución espacial, la (CAR & Ecoforest Ltda., 2006) reportan valores para zonas próximas a Cota entre los 600mm y los 700 mm, y en la zona urbana del Distrito Capital de la misma subcuenca registran valores entre 900 mm y 1100 mm, con una precipitación media para la subcuenca de 800 mm, esto. En cuanto a la distribución temporal al igual que la subcuenca del Río Chicú presentan un carácter bimodal, presentando un periodo húmedo en los meses de abril y mayo para el primer semestre y en el segundo octubre noviembre. Los periodos de estiaje son reportados entre diciembre y febrero como los más secos, con valores por debajo de los 60 mm. En la Figura 11 se presenta la variación espacial de la precipitación mediante Isoyetas de las subcuencas evaluadas en el área de estudio.

Figura 11
Distribución espacial de las subcuencas evaluadas



Nota: Modificado, 2023 (CAR & Ecoforest Ltda., 2006) & (CAR, Ecoforest Ltda, & Planeación Ecológica Ltda., 2006)

3.5.2 Recarga Potencial

La fuente principal de la recarga a los acuíferos es la infiltración profunda del agua lluvia, y esta tiene un carácter intermitente, la recarga se produce en forma discontinua, con mayor intensidad en unas épocas que en otras y de forma variable según los años, (Emilio Custodio & Manuel Ramon Llamas, 1983).

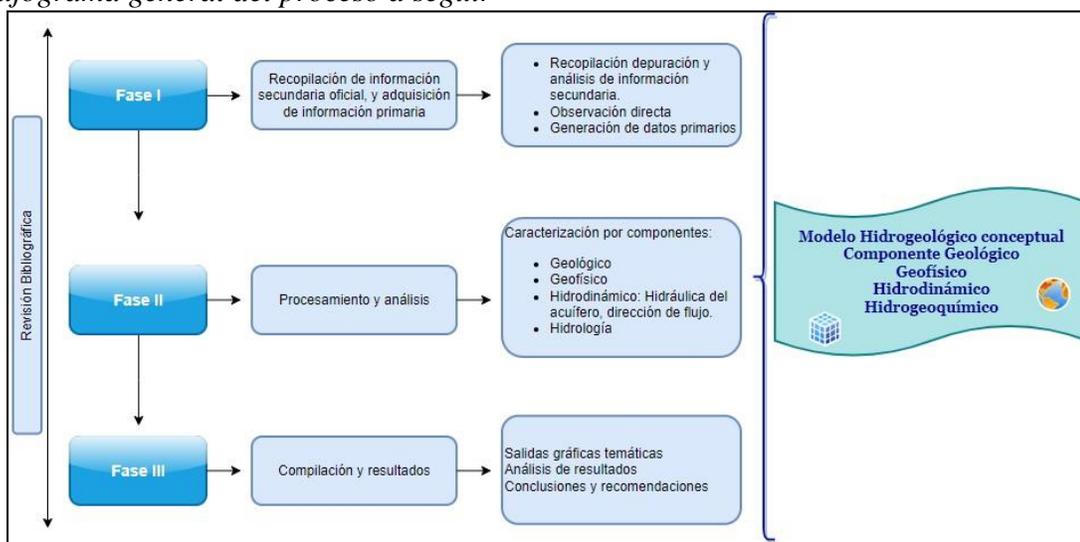
La recarga natural de los acuíferos es un término básico del balance hídrico. Su conocimiento y evaluación constituye un problema extremadamente complejo que requiere identificar los mecanismos a través de los cuales tiene lugar dicho proceso, así como el tipo y distribución espacial de las diferentes fuentes de agua que intervienen en cada evento de recarga (Custodio, 1977).

En los estudios realizados por la CAR para las dos subcuencas en mención, se identificaron balances hidroclimáticos donde establecen un déficit o exceso de agua a nivel mensual y anual, así como un excedente (mm), incluyendo la precipitación, la evapotranspiración potencial, obteniendo así datos anuales para la Subcuenca Río Chicú de 80.9 mm, con excedente 0 mm. (CAR & Ecoforest Ltda., 2006). Para la Subcuenca Tibitoc – Soacha se registran déficit de 00 mm y excedentes de 51.7 mm, según (CAR, Ecoforest Ltda, & Planeación Ecológica Ltda., 2006), encuentran épocas del año en las que la evapotranspiración potencial es mayor que la precipitación, aunque no necesariamente indican que el suelo haya llegado a una capacidad nula.

4. DISEÑO METODOLÓGICO

Con el fin de alcanzar los objetivos propuestos se siguió una metodología secuencial definida a partir de los diferentes componentes que conforman el estudio hidrogeológico y contemplando tres fases principales, ver Figura 12. Lo anterior teniendo en cuenta la integración de información secundaria y primaria como validadores para la caracterización hidrogeológica y posibles interconexiones con el sistema hídrico fluvial de la subcuencas del Río Bogotá en la parte media - Sector Parcelas Cota y Suba occidental.

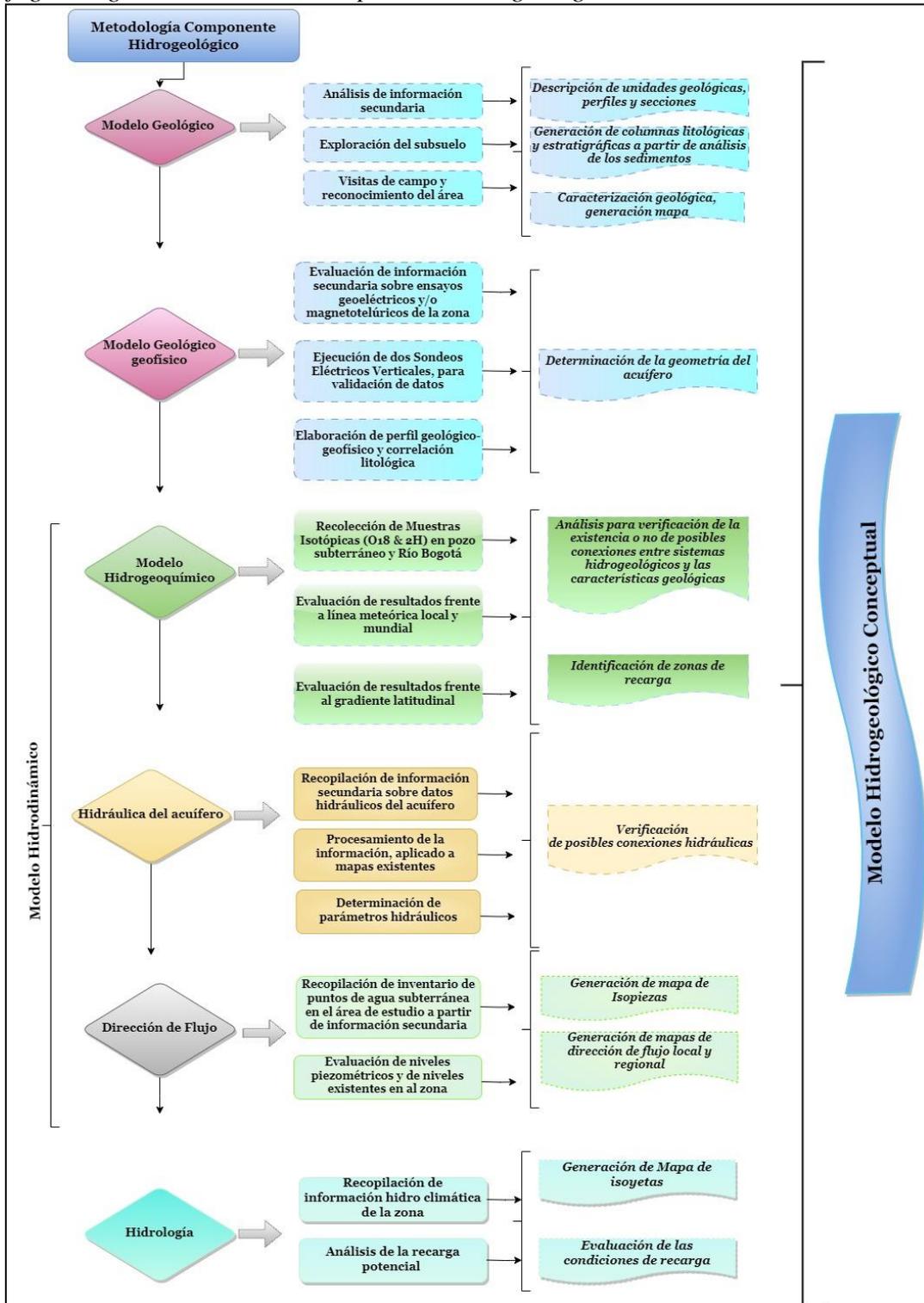
Figura 12
Flujograma general del proceso a seguir



Nota. Elaboración propia, 2023

Como se observa en la Figura 13, además de las fases que se siguieron para el desarrollo del estudio, se evalúa cuatro componentes o submodelos principalmente, los cuales definen temáticas detalladas y son la base dentro del modelo hidrogeológico conceptual, por lo que a continuación se relaciona de manera detallada la metodología de cada uno de estos.

Figura 13
Flujograma general de todo el componente hidrogeológico



Nota. Elaboración propia, 2023

4.1 RECOPIACIÓN Y ADQUISICIÓN DE INFORMACIÓN

La recopilación de información se realizó principalmente de las bases de datos y sitios web de información pública de entidades oficiales como lo son SGC, SDA, METRO DE BOGOTÁ - L2MB, IDEAM, IGAC, mapas y estadísticas de la Gobernación de Cundinamarca, así como información de artículos técnicos y científicos dentro de los que se destacan tesis de grado, artículos de revisión, entre otros.

La recopilación de información secundaria incluyó una revisión detallada por cada componente procurando obtener la data cruda de los resultados encontrados en cada estudio, esto con el fin de realizar una interpretación específica para la zona de estudio, como es el caso del inventario de puntos de agua subterránea con información hidrodinámica disponible tanto de la SDA del Distrito como de la CAR, a partir de los cuales se elaboran insumos como la dirección de flujo y el modelo hidráulico.

La adquisición de información se complementó con las diferentes visitas de campo, de reconocimiento en inspección donde se verificaron las condiciones geológicas imperantes del terreno y se actualiza la caracterización geológica local. Se diferencian los rasgos geomorfológicos asociados, y se definen las zonas con mejor acceso y disposición para la realización de los sondeos eléctricos verticales SEVs. Además se logra la ubicación y permiso de uno de los puntos de agua subterránea de donde se realizó la extracción de agua para muestreo isotópico, así como, se definió la ubicación de los sitios donde se ejecutaron los apiques para análisis de sedimentos.

Las muestras de agua se recopilan teniendo en cuenta los protocolos para su almacenamiento y traslado, así como los lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación

regional del agua, (IDEAM & Min_Ambiente, Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA, 2013).

4.2 PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS

Esta fase corresponde a la caracterización de cada componente y por tanto la definición metodológica para llevarlos a cabo, razón por la cual a continuación se describen.

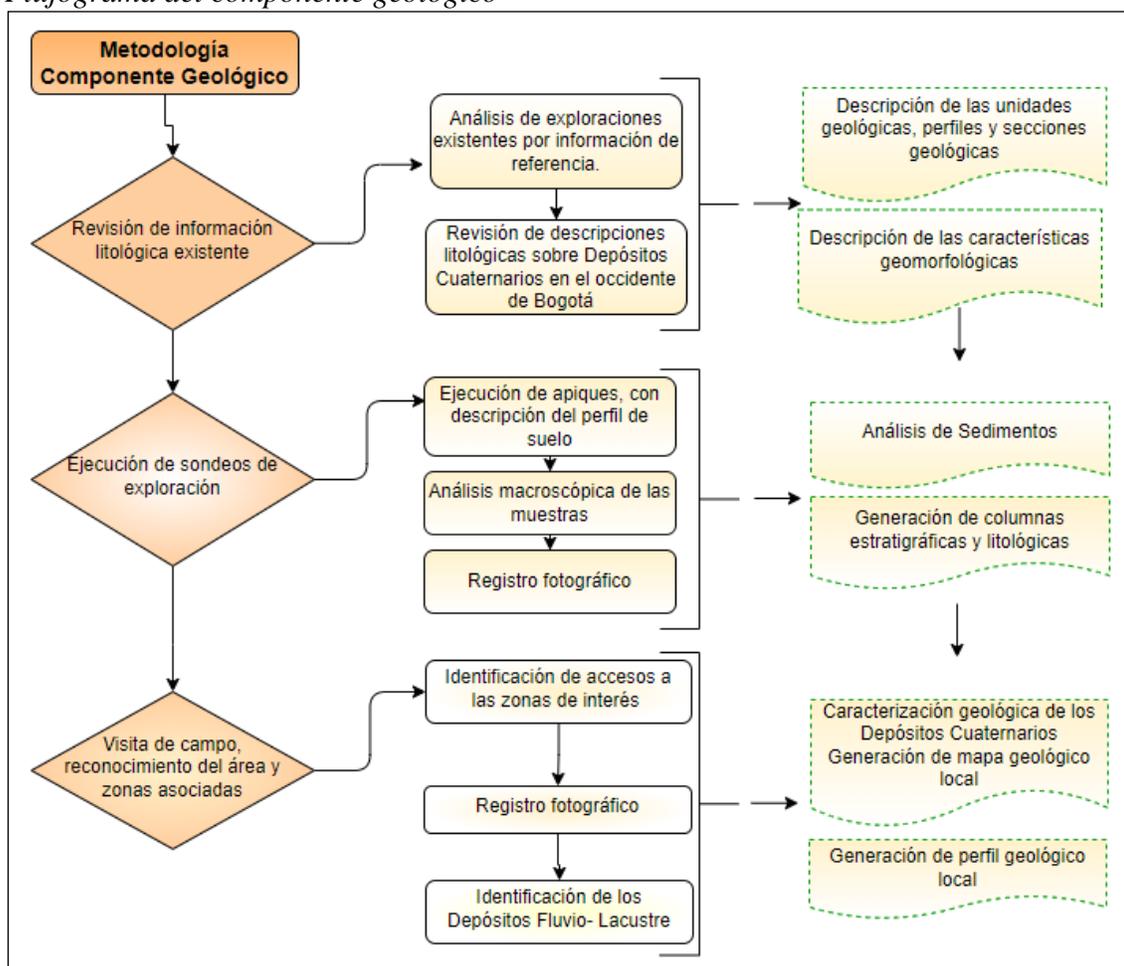
4.2.1 Modelo geológico y geofísico

Este componente se integra teniendo en cuenta que una de las variables para su procesamiento y análisis se desarrolla desde patrones de correlación litológica a partir de los cuales se generan perfiles y mapas geológicos. Con la geología corroborada en campo (utilizando GPS Garmin Etrex 10 como instrumento de geoposicionamiento), los elementos como cartografía base y modelos de elevación digital, para el caso modelo de sombras y DEM de ALOS PALSAR, resolución 12.5 m se genera la actualización de la caracterización geológica, con la definición de mapas y perfiles a través de los cuales se define los contactos entre unidades, distribución espacial, espesores y el trazo de los rasgos estructurales.

La evaluación geológica se desarrolla inicialmente con el análisis de la cartografía existente, en la revisión de diferentes secciones geológicas relacionadas al área de estudio, así como la búsqueda de algunos sondeos de exploración del subsuelo. Posteriormente con la caracterización propia y los elementos cartográficos se valida y actualiza la geología local, incluyendo análisis detallado de los sedimentos y generando descripciones del perfil encontrado así como columnas litológicas soportadas en la información propia (mediante dos apiques de 1.5 m) y la de exploración secundaria.

Con la información definida y actualizada se obtiene el mapa geológico local y la sección geológica de la zona, y por tanto la configuración del modelo geológico. En la Figura 14 se presenta el flujograma que sintetiza la metodología empleada para la definición del componente geológico.

Figura 14
Flujograma del componente geológico



Nota. Elaboración propia, 2023

Asociado al modelo geológico se evalúa la ejecución de los Sondeos Eléctricos Verticales SEVs, cuya información se deriva de la realización de dos ensayos geoelectrónicos mediante el equipo resistividad eléctrica *Geoamp 202*, ver Figura 15.

Corresponde a un equipo geofísico para la exploración de aguas subterráneas cuyo criterio geoelectrico mide el potencial que presentan las rocas al paso de una corriente eléctrica, de acuerdo con lo que menciona (Sebastian Alvarado, 2022) este equipo se compone de una unidad central y un transformador para la conversión de 300 voltios a un voltaje de corriente continua, para la inyección de corriente al medio (para el caso terreno natural, en la Sabana de Bogotá), cuenta con 2 carretes designados como A y B y dos más denominados M y N, como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 2
Características técnicas del equipo

Características técnicas del equipo	
Nombre del equipo	Geo-Amp 202
Longitud de A B	600 metros
Longitud de M N	200 metros
Fuente de Alimentación	12 voltios DC
Voltaje de salida	200 Voltios
Corriente de salida Max	2.5 Amperios

Nota, Fuente: (Sebastian Alvarado, 2022)

Por tanto el principio geofísico utilizado para el sondeo corresponde al arreglo geométrico tipo Schlumberger que consiste en diferentes medidas de AB y MN fijos desde los cuales se realizan diferentes medidas con referencia a un punto fijo, (Ernesto Orellana, 1982).

Figura 15

Registro fotográfico del equipo geoelectrico en campo y su implementación en la zona



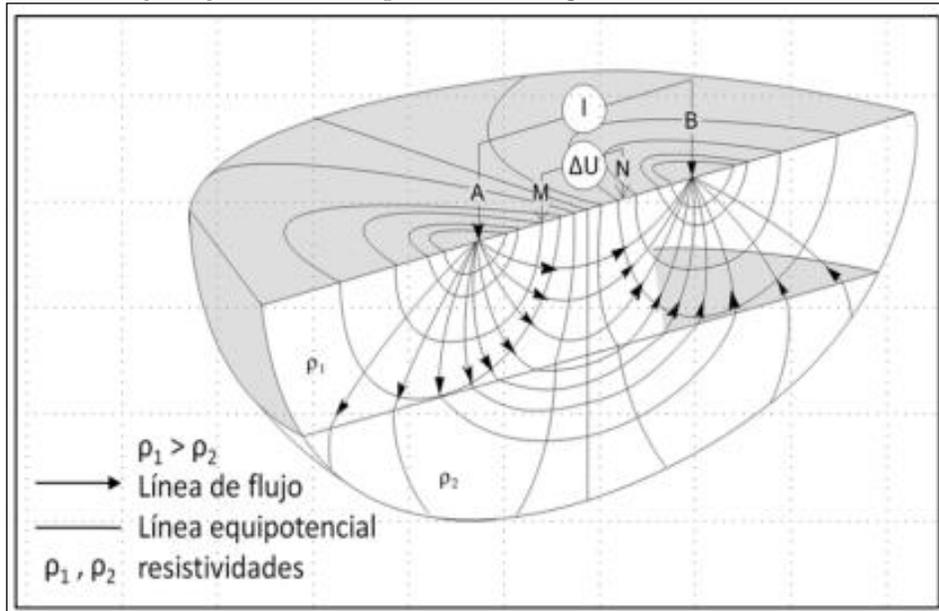
Nota. Elaboración propia, 2023. Coordenadas de los puntos, Sev_1 E= 4874906, N= 2085021; Sev_2 = E= 4875526, N= 2083976 – Vereda Parcelas - Cota Cundinamarca.

Como menciona (Sebastian Alvarado, 2022), el arreglo geométrico del modelo se basa en los movimiento y posiciones de los electrodos A-B, M-N, de modo que se presente una diferencia de potencial, hasta realizar empalmes cuando se presente una caída severa de potencial, simulando la distribución mostrada en la Figura 16.

El resultado son valores de intensidad y voltaje a partir de los cuales se realiza procesamiento en el software IP2WIN obteniendo mediante la ley de Ohm y arreglo Schlumberger, valores de resistividad aparente (ρ), los cuales de acuerdo con la interpretación de diferentes curvas se obtiene valores de resistividad para diferentes capas, la cuales se correlacionan tanto valores típicos para diferentes materiales (W. Lowrie,2007), y las características litológicas que definen el área de estudio.

Figura 16

Esquema metodológico geoeléctrico tipo Schlumberger

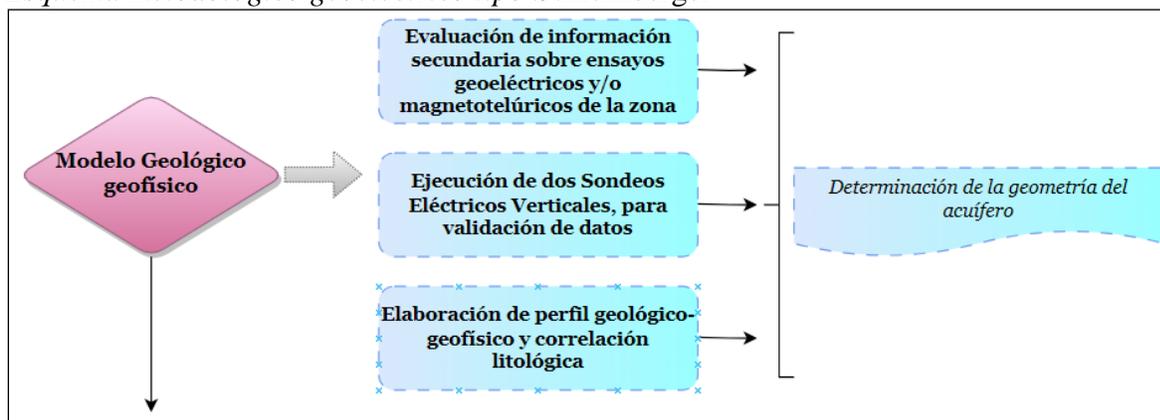


Nota. Elaboración propia, 2023.

En la Figura 17 se relacionan los procesos ejecutados para lograr la determinación de la geometría del acuífero a partir de la evaluación de información existente, la correlación con la geología de la zona y la generación de perfiles geológico- geofísicos.

Figura 17

Esquema metodológico geoeléctrico tipo Schlumberger



Nota. Elaboración propia, 2023.

4.2.2 Modelo hidrogeoquímico

El proceso metodológico que se implementó consistió en realizar un muestreo representativo a las dos tipos de fuente a evaluar, una en un pozo de agua subterránea (PZ_ET), ubicado en la Vereda Parcelas en el Municipio de Cota y la otra muestra de la fuente superficial, tomada sobre el cauce del Río Bogotá. El protocolo de muestreo consistió en la selección de los puntos de interés para muestreo isotópico, realizando la identificación y codificación de las muestras mediante rotulación incluyendo la georreferenciación, fecha y principales particularidades, esto conservando las condiciones de almacenamiento como lo es utilización de envases de plástico de polietileno de alta densidad con doble tapa con cierres positivos, volumen 250 ml suficiente para la correcta evaluación del Deuterio ($2H$) y $18O$ (Oxígeno dieciocho). El criterio de muestreo del agua para análisis isotópicos se tomó a partir de la guía recomendada por el Organismo Internacional de Energía Atómica- Global Network of Global Network of Isotopes del 2014. A continuación se describen los principales procesos para llevar a cabo la definición del componente hidroquímico.

- La fecha de recolección de la muestra 16 de Septiembre de 2023, considera época de mayor precipitación, de acuerdo con las tendencias de los histogramas bimodales que caracterizan las zona.
- Se tomo en cuenta los protocolos de muestreo con envases de plástico de polietileno de alta densidad con doble tapa para evitar pérdidas por filtración y evaporación.
- Posterior al correcto embalaje las muestras son enviadas al laboratorio ambiental de la Universidad de Waterloo en Canadá, bajo la cadena de custodia del personal encargado y responsable del análisis.

A continuación se presentan los registros fotográficos del muestreo, tanto en la fuente subterránea en pozo de agua subterránea en la vereda Parcelas del Municipio de Cota (Foto superior); como superficial en el cauce del Río Bogotá (Foto inferior), ver Figura 18.

Figura 18

Registro fotográfico del procedimiento metodológico de Isotopía

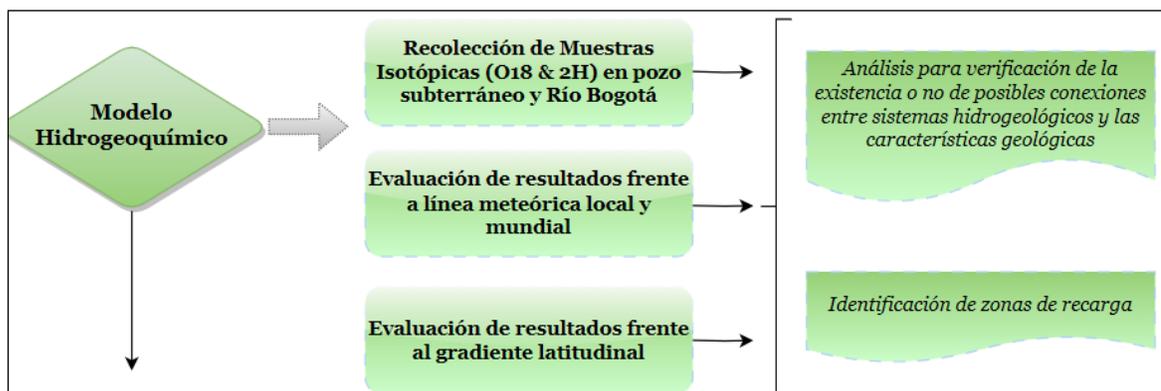


Nota. Elaboración propia, 2023. Coordenadas de los puntos, Pz_ET E= 4875103, N=2085102; Bogotá E=4875101, N= 2085115 – Vereda Parcelas - Cota Cundinamarca.

En la Figura 19 se presenta el flujograma que representa las condiciones anteriormente mencionadas.

Figura 19

Flujograma del Modelo Hidrogeoquímico



Nota. Elaboración propia, 2023.

4.2.3 Modelo hidrodinámico (hidráulica del acuífero y dirección de flujo)

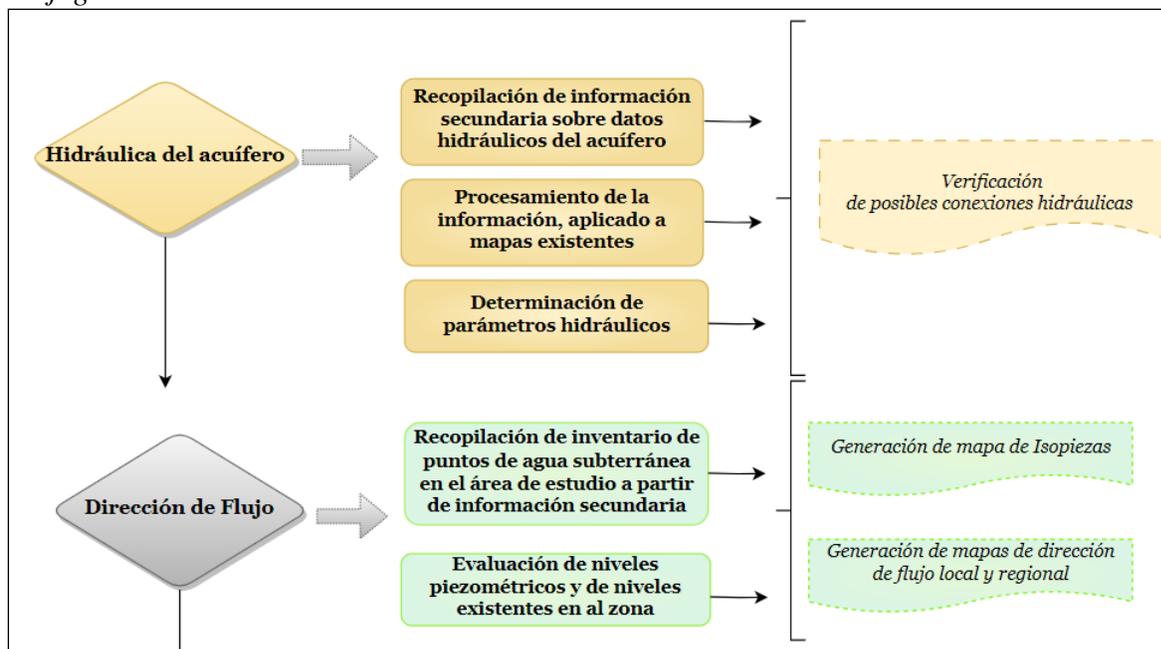
El proceso metodológico para el Modelo Hidráulico consistió en la recopilación detallada y exhaustiva de los datos hidrogeológicos de la información oficial de los entes ambientales y del Distrito, en los cuales se recopiló y depuro con el mayor número de puntos de agua subterránea con datos reportados y en lo posible actualizados, de niveles estáticos (NE), Conductividad hidráulica (K), Transmisividad (T), espesor de la unidad de captación (E-máximo), Caudal (Q), Capacidad específica (Ce) entre otros.

Una vez recopilada la información se contrasta con las clasificaciones de la literatura oficial, para el caso, con la tabla de clasificación de permeabilidad para terrenos de (Emilio Custodio & Manuel Ramon Llamas, 1983). Así como también se contrasta los datos recopilados, se evalúa la cartografía generada por entidades oficiales respecto a la conductividad hidráulica en mapas con dicha variable, y se revisan otras fuentes de categorización como lo son (Casagrande & Fadum, 1940) y (Sanders, 1998).

En cuanto al Modelo de dirección de Flujo, una vez se recopiló la información del mayor número de pozos con reporte de nivel estático se procedió a la interpolación de los datos mediante el método Kriging, en el Software Surfer y ArcGIS, esto con el fin de generar el mapa de Isopiezas y determinar las direcciones de flujo.

A continuación se relaciona el flujo diagrama Figura 20 que sintetiza el proceso a seguir y los resultados.

Figura 20
Flujograma del Modelo Hidrodinámico



Nota. Elaboración propia, 2023.

4.2.4 Modelo Hidrológico

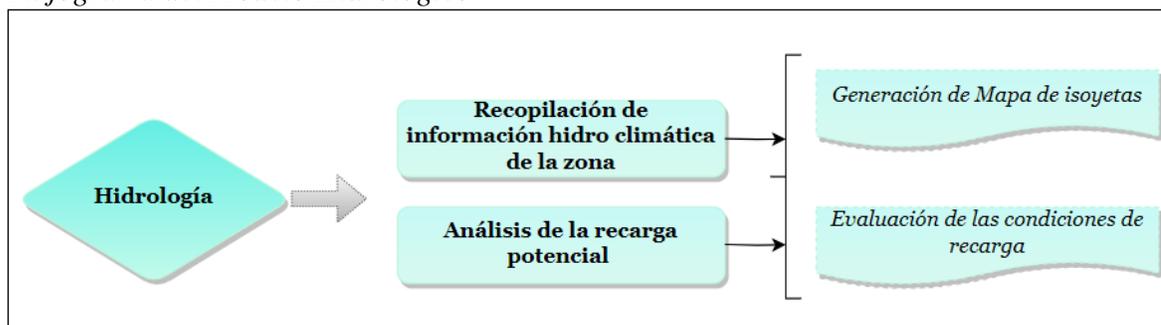
A partir de los datos recopilados de las estaciones climatológicas administradas y operadas por el IDEAM y la CAR se definieron los parámetros de precipitación total mensual (mm). Previo al procesamiento de datos se realizó un análisis exploratorio de datos de la precipitación con métodos gráficos, (series de tiempo, diagrama de caja, gráfica de doble masa y gráfica de normalidad), que permitieron identificar tendencias, cambios en tiempo y

homogeneidad de las series pluviométricas, lo que condujo a la selección y agrupación de las estaciones a trabajar. La validación de datos se realizó siguiendo los lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua del (IDEAM, 2013). Una vez se tiene el análisis de las estadísticas para la precipitación se genera el mapa de Isoyetas, mediante la interpolación Kriging en el Software ArcGIS y comprobado en Surfer, el cual permite interpretar la distribución estadística de esta en la zona de estudio.

A partir de la información de referencia se evalúa la recarga potencial de la zona y se realiza balance hídrico para conocer las variables de recarga que tienen interacción con el sistema acuífero o con las unidades hidrogeológicas presentes en el área.

A continuación se relaciona la flujo diagrama Figura 21 que sintetiza el proceso a seguir y los resultados.

Figura 21
Flujograma del Modelo Hidrológico



Nota. Elaboración propia, 2023.

5. RESULTADOS Y ANÁLISIS

5.1 MODELO GEOLÓGICO – GEOFÍSICO

Teniendo en cuenta el análisis de información geológica de referencia asociados a la zona de estudio, y de las observaciones directas en las diferentes jornadas de campo, además de la evaluación visual de los sedimentos encontrados en los dos apiques (ver Figura 28 y Figura 29) se logra realizar la caracterización geológica de los Depósitos Fluvio Lacustres y de la geología general que incluye la definición de las unidades de roca que definen el área de estudio, como de la disposición de estas en el subsuelo.

La definición de las características estructurales y la distribución litoestratigráfica superficial derivan la construcción del mapa geológico local, que junto con la estructuración de 2 perfiles geológicos facilitan la definición del marco de geológico 2D y 3D, a través de los cuales se muestran las características más relevantes como la geometría del modelo geológico -geofísico.

5.1.1 Estratigrafía

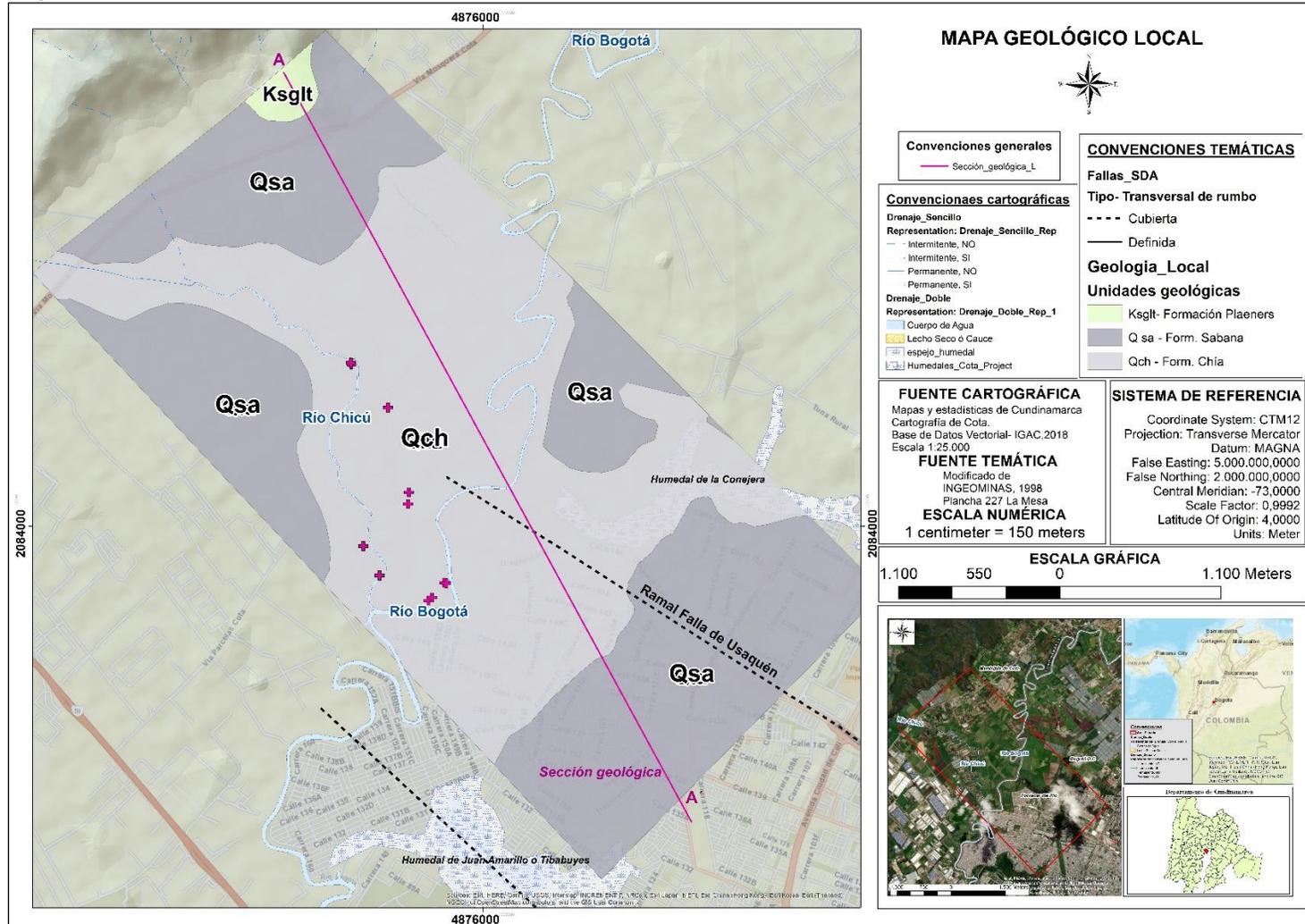
La zona de estudio que como se ha mencionado corresponde a parte del sector Parcelas del Municipio de Cota y zona occidental de Suba, en la cuenca media del Río Bogotá, sobre los que se disponen los sedimentos relacionados con los ambientes de la cuenca de la Sabana de Bogotá. La cual se encuentra limitada al occidente por los cerros de Majuil de Cota y al oriente por los cerros de La Conejera, estos últimos definidos por rocas competentes del Cretácico.

Teniendo en cuenta la información de referencia y disponible del SGC, CAR y estudios detallados del SLMB, se realizó la verificación en campo de sitios de acceso, tomando muestras de mano de los sedimentos del Depósito Cuaternario, para la descripción macroscópica de las estructuras sedimentarias, interestratificaciones, tamaño de grano, redondez, color, entre otras. La cartografía base se realizó con base a las planchas 227 y 228 del SGC y al mapa geológico del SDA en el estudio (Veloza & SDA, 2012); con toda la información integrada se logra la elaboración del mapa geológico, ver Figura 22.

El mapa se elabora a escala 1:15.000 y corresponde a unidades en orden cronoestratigráfico a la Formación Labor y Tierna (Ksglt) del Grupo Guadalupe de edad cretácica, y a los Depósitos Cuaternarios de Las Formaciones Sabana (Qsa) de origen Lacustre y Chía (Qch) de origen Fluvial, este último asociado a los sedimentos derivados de la dinámica del Río Bogotá y Río Chicú.

El área de estudio está definida tomando en cuenta las fronteras hidrogeológicas que para el caso corresponden a los límites entre contactos geológicos de baja y alta pendiente, por lo que a nivel local no se observa afloramientos de la Formación Guaduas (Ksgp) al oriente del área de estudio. Sin embargo se menciona como un atributo geológico general, al corresponder a un rasgo geomorfológico prominente de pendientes muy altas que contrastan con las zonas de planicies de la cuenca de la Sabana de Bogotá.

Figura 22
Mapa Geológico Local

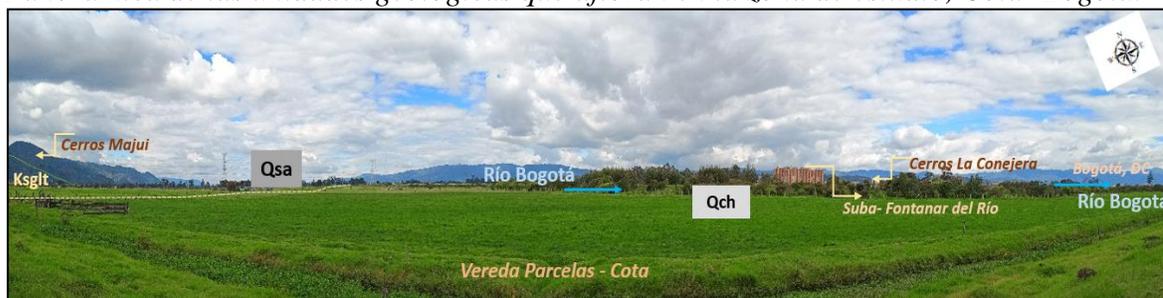


Nota. Elaboración propia, 2023

En la Figura 23 se observa las unidades geológicas características del área de estudio, tomadas desde la zona plana en la Vereda Parcelas, Cota. Se observa el contraste entre la zona de alta pendiente y la planicie con pendientes que varían desde 35° a 2° respectivamente.

Figura 23

Panorámica de las unidades geológicas que afloran en la zona de estudio, Cota- Bogotá.



Nota. Elaboración propia, 2023. Coordenadas E= 4875354, N=2084099; cota =2567

A continuación, se describe cronoestratigráficamente las unidades geológicas que caracterizan la zona de estudio, de la más antigua (Rocas de Cretácico – del Grupo Guadalupe) a la más joven (Depósitos Cuaternarios).

5.1.1.1 Grupo Guadalupe

Formación Plaeners (Ksglt)

Esta formación aflora al occidente del área de estudio en la sección más prominente sobre el eje vial, corresponde a unas areniscas cuarzosas ligeramente friables, presentan estratificación cruzada. De acuerdo con lo que menciona (Padilla & Calderon & INGEOMINAS, 2004) se depositó en un ambiente litoral durante el Maastrichtiano temprano a medio. Es importante como acuífero y proporciona la mayor parte de la llamada “arena de peña” para la construcción.

En el área y de teniendo en cuenta las imágenes satelitales, en la parte alta de los cerros se observa degradación del material, acelerado probablemente por zonas desprovistas de vegetación.

Figura 24

Panorámica de los cerros asociados a la unidad Ksglt



Nota. Modificado Imagen Satelital Google Earth

5.1.1.2 Formación Sabana (Qsa)

Este Depósito se identifica claramente mediante el modelo digital de elevación (DEM), donde se observa un aspecto aterrazado, lo que se asocia con los Depósitos de Terraza alta producto de la acumulación de sedimentos transportados, que probablemente sufrieron disección y erosión hídrica además de cambios en el nivel base local. De acuerdo con lo que menciona (Padilla & Calderon & INGEOMINAS, 2004) fue depositada en un lago por lo que se le atribuye un Origen Lacustre. Presenta un relieve ondulado suave a levemente inclinado, disectado por las principales fuentes hídricas como el Río Bogotá y el Río Chicú.

En el Municipio de Cota se identifica como una secuencia arcillosa y arcillo limosa de color gris pardo (10Y 5/1), se observan húmedas, de consistencia firme y de alta plasticidad.

Además de presentar lentes arenosos de grano fino, redondeados a sub redondeados que no presentan continuidad lateral.

Figura 25

Panorámica de la Formación Sabana



Nota. Elaboración propia, 2023. Coordenadas E= 4875185, N=2083864; Vista desde Vereda Parcelas – Cota, Departamento de Cundinamarca.

Con el fin de tener un análisis de mayor alcance en cuanto a la litología que define a esta unidad se revisó la información de referencia disponible en la página oficial - Web para el Metro de Bogotá y se encontró dentro de los documentos de estructuración del Proyecto Segunda Línea del Metro de Bogotá, diferentes puntos de exploración de hasta 60 m de profundidad con registro geológico (FDN & METRO DE BOGOTÁ, 2022), a partir del cual se realizaron análisis de los sedimentos encontrados, como los que se mencionan a continuación:

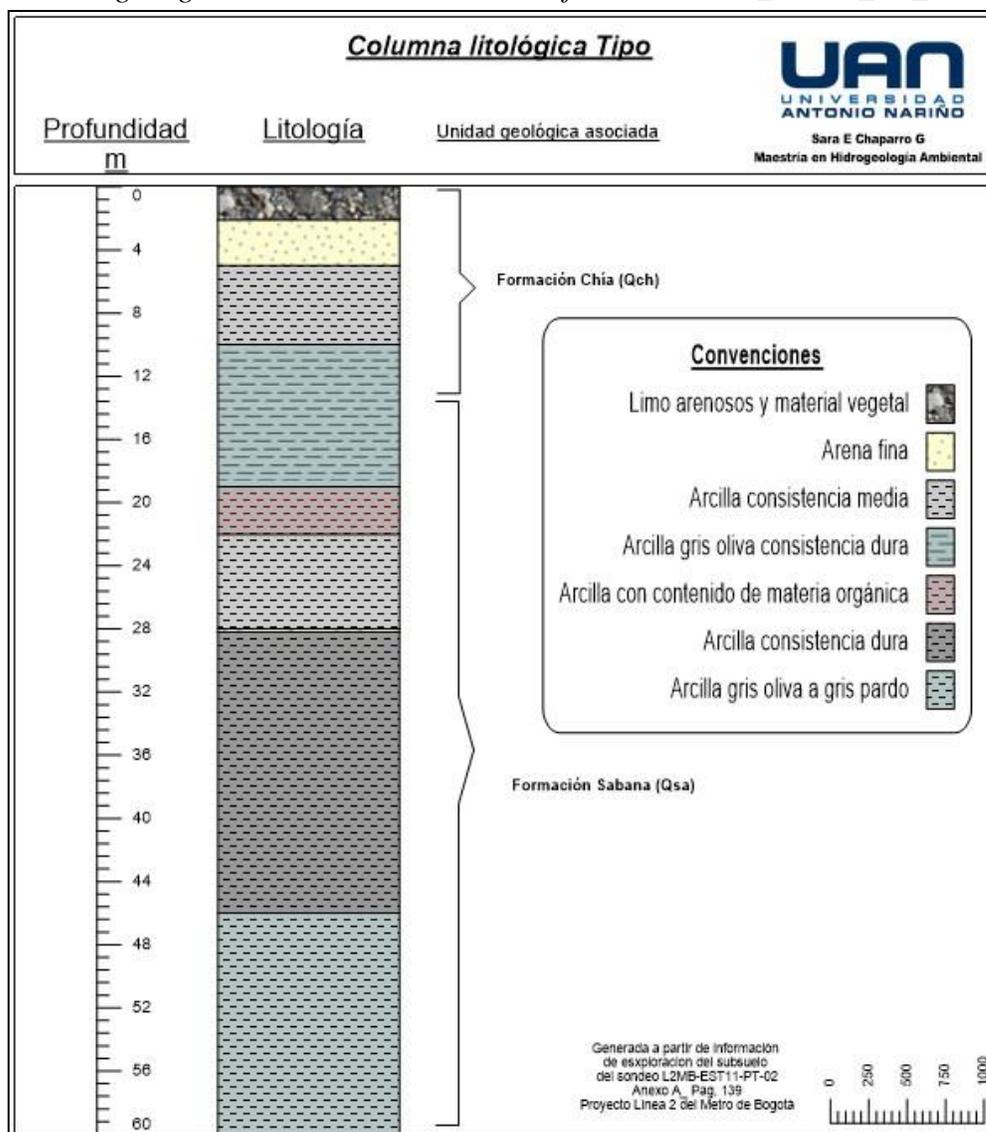
Hacia la capa de techo, presenta un nivel limo arenoso y de material vegetal hasta aproximadamente los 2m, posteriormente una capa de arena fina parcialmente saturada,

hasta los 5m; en la parte media y hasta los 28m se presenta un banco potente de arcillas de consistencia media a dura, con un lente arcilloso con contenido de materia orgánica.

Entre los 28 - 28.50 m nuevamente un lente de arenas finas, y hacia la base hasta los 60 m arcillas de consistencia dura color gris oliva a pardo; en la Figura 26 se presenta la columna litológica que define la secuencia antes mencionada.

Figura 26

Columna litológica generalizada del Sondeo de referencia L2MB_EST11_PT_02



Nota. Elaboración propia, 2023. Coordenadas: E= 4876287,7; N=2083515,1

5.1.1.3 Formación Chía (Qch)

Este depósito corresponde a sedimentos fluviales derivados de las zonas de inundación del Río Bogotá, se encuentra suprayaciendo a la Formación Sabana. Su morfología es de pendientes suaves (no superan los 4°) por debajo del nivel base; denominadas en las diferentes referencias como Terrazas Bajas o Llanuras de inundación, son resultado de la dinámica del Río Bogotá y Chicú, en la Figura 27 se observan varias panorámicas a lo largo del Río Bogotá relacionadas a la Formación Chía.

Figura 27

Panorámica de la Formación Chía (Qch)



Nota. Elaboración propia, 2023. Coordenadas Fotografía Superior: E= 4874988; N=2080427. Coordenadas Fotografía Inferior: E= 4875495; N=2084231. (Sup. Panorámica de los sedimentos asociados al cauce del Río Bogotá); (Inf, Llanura aluvial asociada a la dinámica que ha dejado el Río Bogotá, hoy Formación Chía).

Con el fin de conocer la composición de los sedimentos de origen fluvial, se realizaron dos apiques de 1,50 m, uno en la zona de relación del cauce en la llanura de inundación del Río

Bogotá y el otro en la parte más distal del mismo donde cambia la expresión morfológica, como se indica en la Figura 28. En el primero (S1_RB) a nivel general se encontraron sedimentos principalmente arcillo limosos, arenosos y arcillosos, logrando obtener muestras representativas, y en el segundo (S1_RB), se encontraron limos y gran cantidad de material de carácter orgánico. Razón por la cual se le dará relevancia al apique (S1_RB), siendo el de mayor interés por las condiciones litológicas que presenta.

Figura 28

Panorámica de la Formación Chía y apiques ejecutados en el área



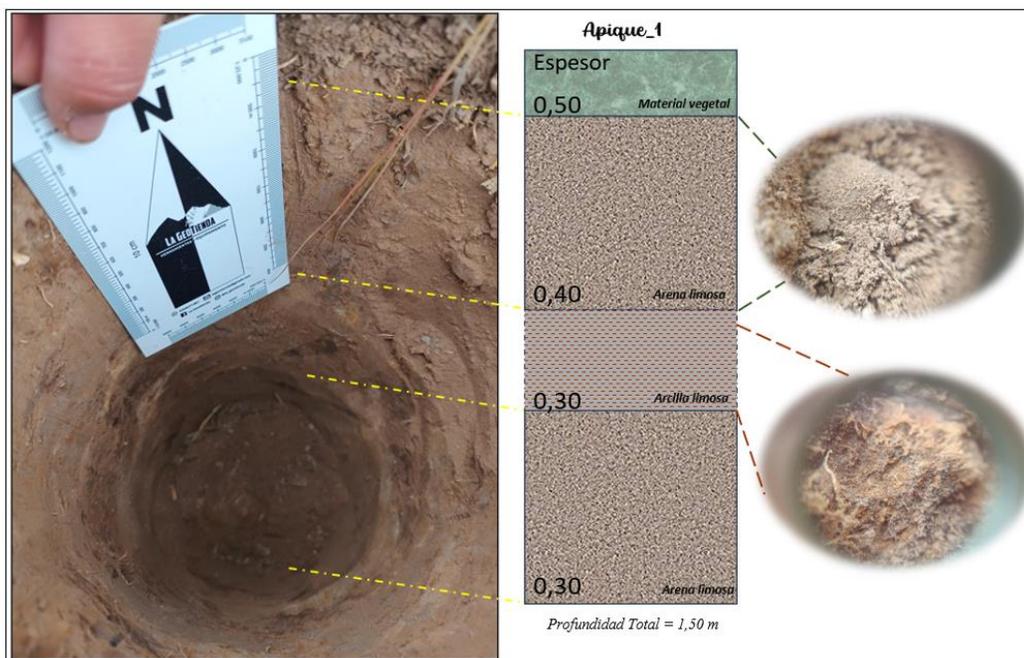
Nota. Elaboración propia, 2023 (Foto Sup, Apique-1 realizado sobre los sedientos del cauce y barra de cauce del Río Bogotá); (Foto Inf, Apique_2 realizado en la zona más distal del Río Bogotá en la Formación Chía).

En el apique (S1_RB) se encontró en la capa de techo limosa en matriz arenosa y con contenido de materia orgánica, seguido una capa arenosa de granos finos sub redondeados

de densidad relativa suelta, en la parte media arcilla limosa de plasticidad media a baja, caracterizada por presentar óxidos de hierro y hacia la base se repite el nivel arenoso, como se muestra en la Figura 29.

Figura 29

Columna representativa de la Formación Chía, en cauce de lecho de Río Bogotá



Nota. Elaboración propia, 2023

Para complementar la descripción del perfil de suelo, se realizó un análisis macroscópico que consistió en la descripción morfológica de los sedimentos encontrados y su posterior clasificación de acuerdo con las diferentes definiciones técnicas como lo son (Robert L. Folk, 1980) y la clasificación definida por el (SGC & MINMINAS, 2017) con base en (Comet et al, 2010). A partir de los cuales se logró identificar el tipo de contacto entre granos, el empaquetamiento y sorteamiento entre partículas, la morfología de los granos o partículas, redondez y esfericidad, características de superficie, entre otros. A continuación se presentan la descripciones y clasificaciones de los sedimentos tanto arcillosos como arenosos que se encontraron en el apique (S1_RB), ver Tabla 3, y Tabla 4.

Tabla 3

Descripción y clasificación macro para las muestras con contenido arcillo limoso

Registro fotográfico de la muestra	Descripción
	<p>Corresponde a arcillas de consistencia alta, con algo de humedad, en presencia de limos y minerales de cuarzo, color (2,5 YR 4/1 gris pardo). Se observa óxidos de hierro y material orgánico de color (5YR 3/8 Café oscuro a 10YR 7/6 amarillo oscuro). Los granos se presentan bien seleccionados de baja esfericidad, son sub redondeados y equidimensional. De contacto puntual a flotante.</p>
	
	
	

Nota. Elaboración propia, 2023 (Cabe mencionar que la imagen corresponde a una muestra de arcillas limosas, obtenida del Apique_1 en diferentes panorámicas, por lo que la descripción es única).

Tabla 4
Descripción y clasificación macro para las muestras con contenido arenoso

Registro fotográfico de la muestra		Descripción
		<p>Corresponde a arenas limosas, con alto contenido de cuarzo, color (2,5 YR 4/1 gris pardo). Consiste en arenas densas con algo de contenido de humedad. Los granos son sub redondeados de baja esfericidad, equidimensional de superficie rugosa. El contacto entre granos es principalmente de tipo puntual y algunas veces cóncavo-convexo.</p>
		<p>Los granos presentan un sorteamiento entre bien seleccionado a muy bien seleccionado.</p>

Nota. Elaboración propia, 2023 (Cabe mencionar que la imagen corresponde a una muestra de arenas limosas, obtenida del Apique_1 en diferentes panorámicas, por lo que la descripción es única).

5.1.2 Análisis de la información geológica – geofísica

Como se mencionó dentro del componente geológico se desarrolla la definición geoelectrica a través de dos Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), a partir de los cuales se obtiene la geometría del acuífero y se correlacionan las unidades geológicas en el subsuelo. El criterio de ubicación se basó en la cercanía al pozo de agua subterránea inventariado (de donde se extrajo muestra isotópica), así como la distribución espacial del sondeo en inmediaciones del Río Bogotá, y de los sedimentos derivados de la dinámica de este, como lo son la Formación Chía, ver Tabla 5.

Tabla 5

Coordenadas de ubicación de los Sondeos

SEV	Coordenada E	Coordenada N
SEV_1	4874906	2085021
SEV_2	4875526	2083976

Nota, Elaboración propia, 2023. Sistema de coordenadas Origen Nacional_CTM12

Los dos sondeos eléctricos verticales tuvieron una apertura de AB 300 m, con arreglo Schlumberger simétrico, y la geolocalización se presenta en la Figura 30.

Con la información obtenida se generaron las interpretaciones de la resistividad aparente obtenida en (Ω/m) y está se correlaciono con toda la caracterización geológica antes mencionada, por lo cual se revisaron diferentes clasificaciones para materiales como las que mencionan (Telford, 1990), (G, j. 1, 2013) & (Sánchez San Roman, 2017) para valores de resistividad para suelos y rocas.

Obteniendo a una correlación tipo, basado principalmente en la categorización que indica (Sánchez San Roman, 2017) en su libro de Hidrología Superficial y subterránea (ver Tabla 6). Este autor menciona. “Los valores de resistividad en un roca están determinados más que

por su composición mineralógica, por el agua que contienen, fundamentalmente por la porosidad y salinidad”.

Tabla 6

Correlación entre los sedimentos y la resistividad para el estudio

Tipo de sedimento, litología	Resistividad (Ω/m)
Rocas ígneas y metamórficas inalteradas	> 100
Rocas ígneas fuertemente diaclasadas	100 -1000
Calizas y areniscas	100 y > 1000
Arcillas	1 -10
Limos	10 -100
Arenas	100- 1000
Gravas	200 - > 1000

Nota, Elaboración propia, 2023.

Bajo la anterior premisa y teniendo en cuenta las condiciones litológicas que se encontraron tanto en la exploración del subsuelo en información secundaria como de la existente, se determina para el estudio el siguiente rango de resistividades, teniendo en cuenta que se trata de materiales principalmente arcillosos y arenosos los que caracterizan el área de estudio, ver Tabla 7.

Tabla 7

Correlación entre los sedimentos y la resistividad para el estudio

Tipo de sedimento, litología	Resistividad (Ω/m)
Arenas Saturadas	121-277
Arcillas de consistencia media	25-84
Arcilla limosa	7-34
Arcilla con contenido de materia orgánica	84-121
Arcillas arenosas	277-563

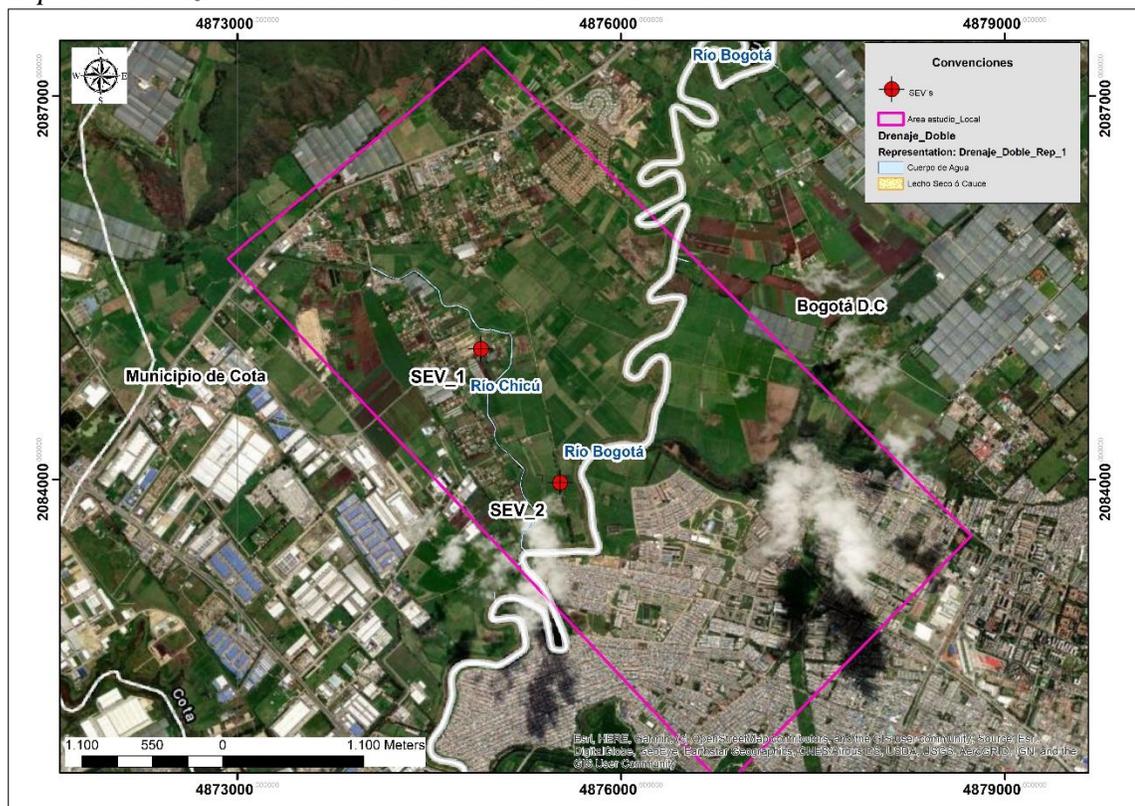
Nota, Elaboración propia, 2023.

Tratándose de un estudio hidrogeológico, los valores definidos para las arenas saturadas son correlacionables con resistividades moderadamente mayores (dentro de los rango encontrados en el estudio) al tratarse de materiales detríticos, ya que la resistividad aumenta

con el tamaño del grano, indicando mayores permeabilidades. Para las arcillas se asignaron los valores más bajos al ser materiales finos y menos resistivos. Estas difieren de las arcillas con contenido de materia orgánica y arcillas arenosas teniendo en cuenta que los rangos resistivos aumentan al contener porcentajes considerables de detritos y de material orgánico.

Figura 30

Mapa de localización de los sondeos eléctricos verticales



Nota, Elaboración propia, 2023. Sistema de coordenadas Origen Nacional_CTM12

La anterior definición se realizó a partir de la generación de curvas de resistividad aparente, mediante el software Ipi2Win, el cual utilizó el método geofísico y arreglo geométrico tipo Schlumberger, verificando que en la inserción de capas tuviera una confiabilidad de no superar errores mayores al 10%.

En la Figura 31 se presenta el diagrama de interpretación con diferentes curvas para el SEV_1, con un porcentaje de error del 8.74% con multicapas tipo H-K (es decir $\rho_1 > \rho_2 < \rho_3$ así como $\rho_1 < \rho_2 > \rho_3 \dots$); consiste en 10 capas de litologías en condiciones variables, los cuales de acuerdo con el arreglo geofísico mencionado alcanzó una profundidad de exploración de 150m, tal como se indica en la Tabla 8.

Figura 31

Interpretación de Sondeo Eléctrico Vertical _ SEV 1 (Error 8.74%)

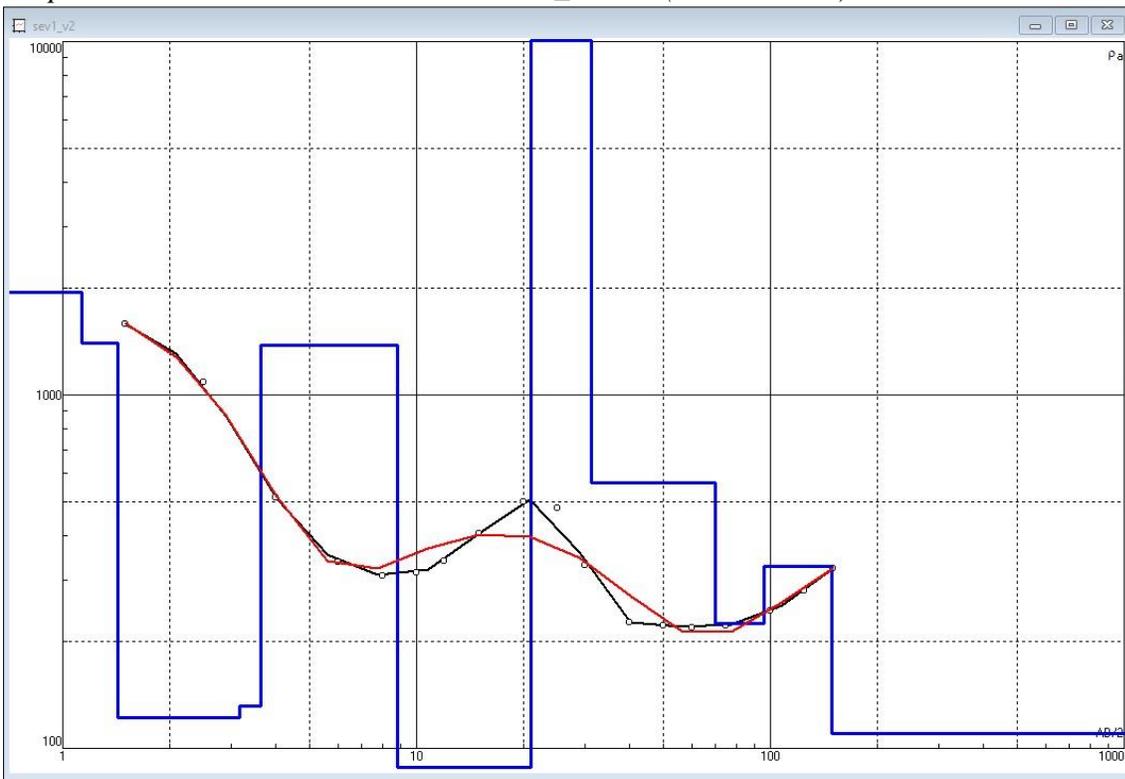


Tabla 8

Resultados del proceso de resistividad SEV_1

N	Ω/m	h	d	Alt
1	1952	1,13	1,13	-1,129
2	1406	0,306	1,43	-1,435
3	122	1,73	3,16	-3,164
4	132	0,461	3,62	-3,625
5	1381	5,2	8,82	-8,82
6	25	6,71	15,5	-15,53
7	83,8	5,53	21,1	-21,07

N	Ω/m	h	d	Alt
8	10926	10	31,1	-31,09
9	563	38,7	69,8	-69,83
10	225	26	95,8	-95,79
11	326	53,9	150	-149,7
12	110			

Nota, Elaboración propia, 2023. Software de desarrollo- IPI2WIN

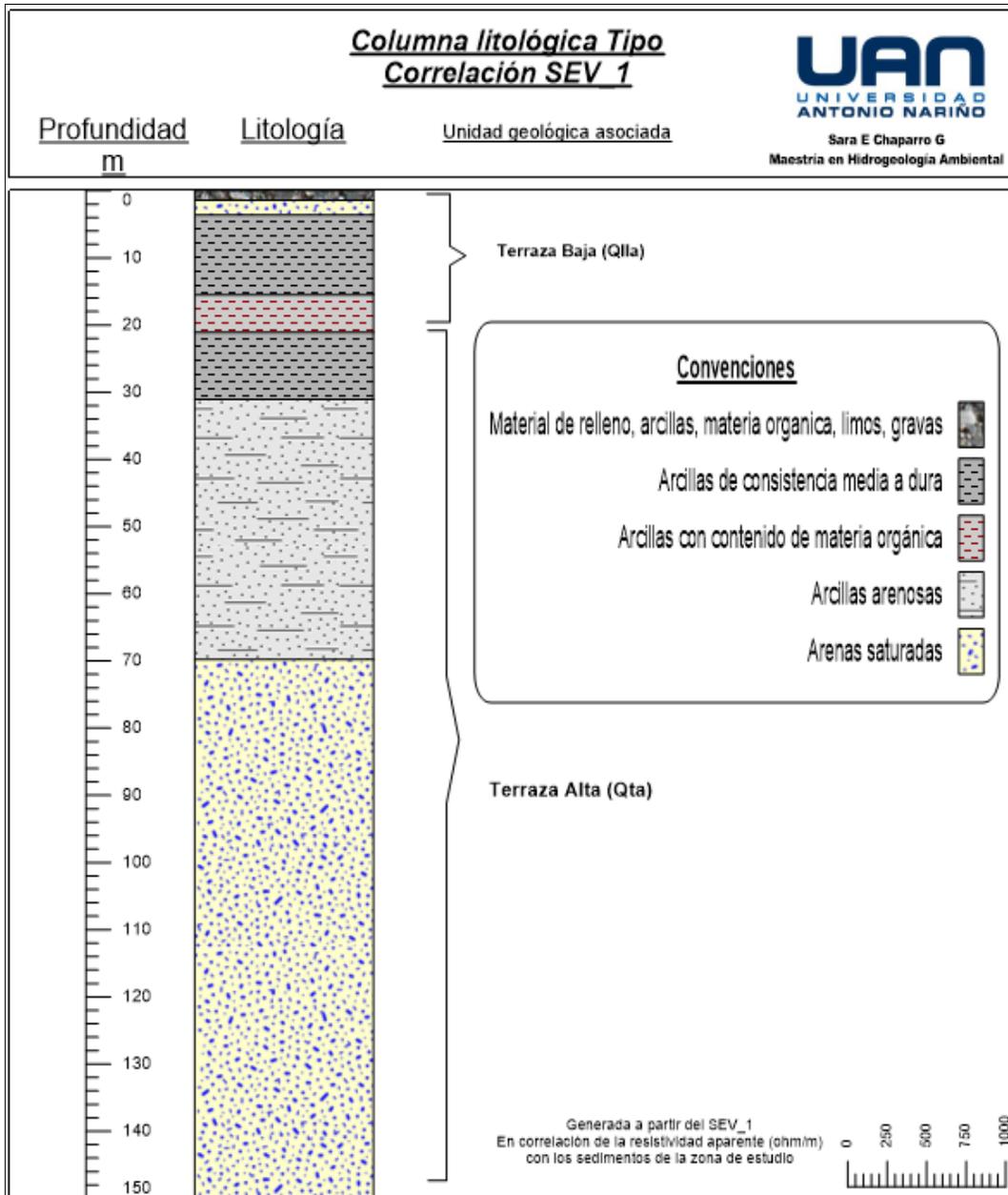
Con los valores obtenidos mediante la interpretación de las resistividades en multicapas de hasta 10 niveles, los espesores (h), identificados en la Tabla 8 y los rangos establecidos para cada litología se construye una columna litológica tipo, como la que se muestra en la

Figura 32, la cual corresponde a una secuencia arcillosa, con intercalación de niveles arenosos, los cuales de acuerdo con la correlación geofísica corresponden a arenas saturadas.

La descripción corresponde a una capa de techo hasta el 1.4 m de material de relleno, limos, gravas y materia orgánica. Seguido de un nivel hasta los 3.6 m de arenas saturadas, a partir de allí hasta los 15.5m arcillas de consistencia dura, intercalada con una capa hasta los 21.1m de arcillas con contenido de materia orgánica, y finalmente hacia la base una alternancia entre arcillas y arcillas arenosas, que finaliza con un banco destacable de arenas saturadas.

Es importante destacar que este SEV1 se ejecutó en inmediaciones a un Pozo de agua subterránea, en tuberías de dos pulgadas, con profundidad estimada (por el propietario) de 80m para los filtros, cuyo uso es doméstico y se encuentra en uso hace aproximadamente cuarenta años. Se infiere por tanto a partir de la interpretación geológica – geofísica que en la Vereda Parcelas, existe un nivel acuífero de carácter confinado del Depósito Cuaternario de la Formación Sabana.

Figura 32
Correlación Sondeos eléctrico Vertical 1

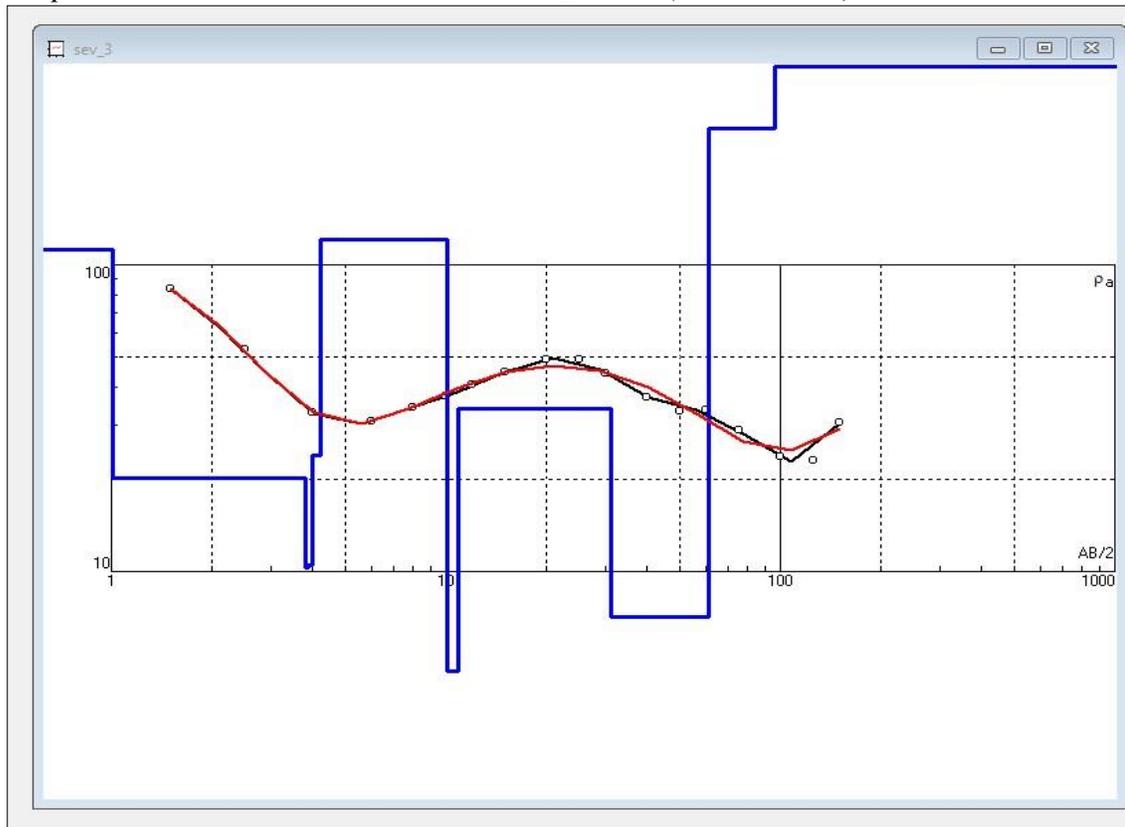


Nota, Elaboración propia, 2023.

En la Figura 33 se relaciona el SEV_2, con interpretación de curvas tipo K principalmente. Consiste en 10 capas de litologías heterogéneas, los cuales de acuerdo con el arreglo geofísico Schlumberger, alcanzo una profundidad de exploración de 96 m.

Figura 33

Interpretación de Sondeo Eléctrico Vertical _SEV 2 (Error 3.89%)

**Tabla 9**

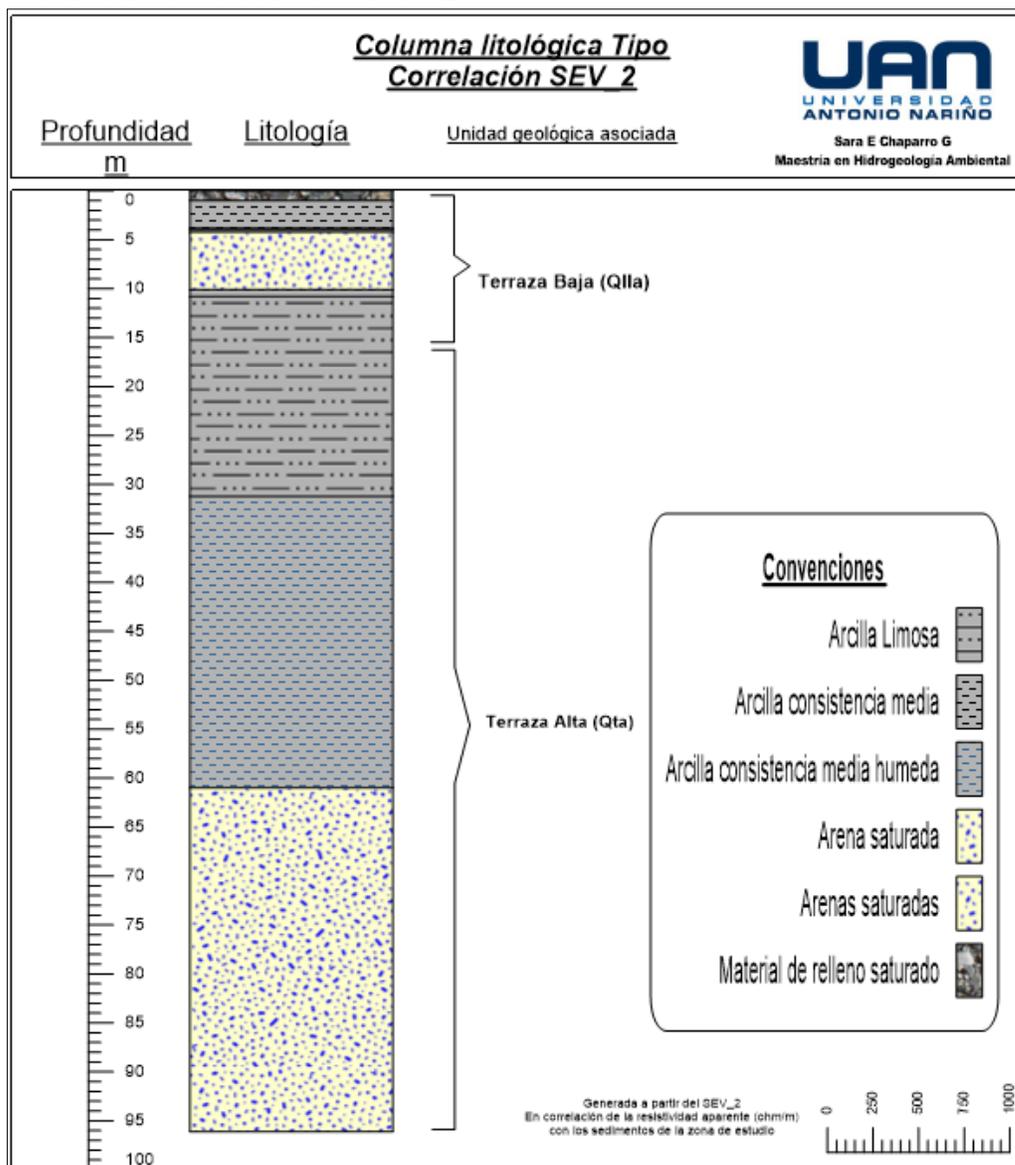
Resultados del proceso de resistividad _SEV2

N	Ω/m	h	d	Alt
1	112	1,01	1,01	-1,014
2	20,1	2,8	3,81	-3,812
3	10,3	0,0692	3,88	-3,881
4	10,5	0,104	3,98	-3,985
5	23,8	0,239	4,22	-4,224
6	121	5,84	10,1	-10,07
7	4,73	0,778	10,8	-10,85
8	33,9	20,4	31,2	-31,23
9	7,09	29,8	61	-60,99
10	277	35,1	96,1	-96,1
11	3074			
12				

Nota, Elaboración propia, 2023. Software de desarrollo- IPI2WIN

Con los valores obtenidos mediante la interpretación de las resistividades en multicapas de hasta 10 niveles, los espesores (h), identificados en la Tabla 9 y los rangos establecidos para cada litología se construye una columna litológica tipo, como la que se muestra en la Figura 34, la cual corresponde a una secuencia arcillo-arenosa, con intercalación de niveles arenosos de menor espesor comparados con el primer SEV1.

Figura 34
Correlación Sondeos eléctrico Vertical 2



Nota, Elaboración propia, 2023.

La descripción de la columna litológica correspondería a una capa de techo hasta el 1.0 m de material de relleno saturado, seguido de un nivel hasta los 4m de arcillas de consistencia media, a partir de allí hasta los 10.0 m un nivel de arenas saturadas. Posteriormente una alternancia entre arcillas y arcillas limosas hasta los 61m, y finalmente hacia la base un banco destacable de arenas saturadas.

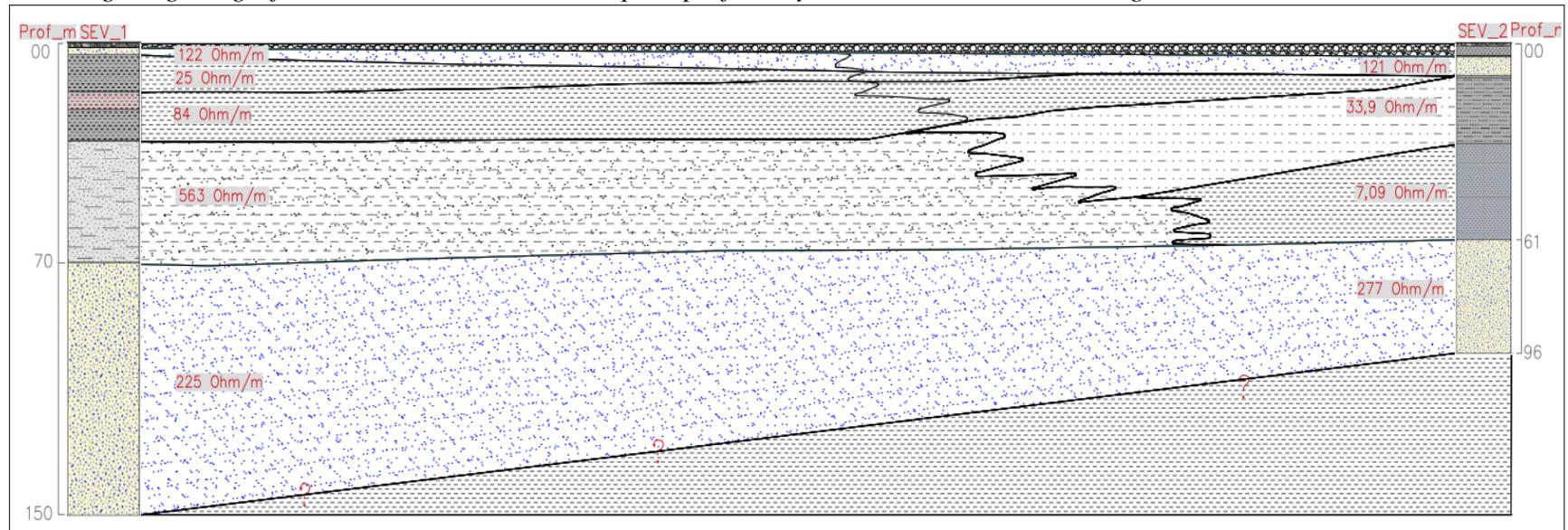
Este estudio ha considerado de acuerdo con la definición heterogénea de los materiales, y las características texturales que los primeros 15m corresponden a sedimentos de llanura de inundación como sedimentos asociados a la Formación Chía. Los cuales siguiendo la secuencia estratigráfica y la correlación litológica suprayacen a la Formación Sabana que se definiría hasta los 150m.

Los valores de resistividad asociados a arenas saturadas en los primeros niveles de los dos sondeos exploratorios se correlacionan con el nivel freático, en el sistema de acuífero libre.

Con toda la información y realizando una proyección de los sondeos eléctricos en la zona se genera un perfil – geológico geofísico, mediante la espacialización de las columnas, y la topografía del terreno en AutoCAD Civil (ver Figura 35), donde se aprecia la geometría de las capas identificando posibles cambios de facies, en materiales finos y detríticos que no presentan continuidad lateral. Excepto en las capas de base con características de arenas saturadas, del cual se puede inferir se desarrolla el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en la zona, de carácter confinado. Se evidencia que el sondeo más cercano al cauce del Río Bogotá_SEV2, presenta una condición mucho más arenosa, que el SEV1 cuyo nivel arenoso es menor y donde predomina los materiales arcillosos, particularmente con contenido de óxidos de hierro.

Figura 35

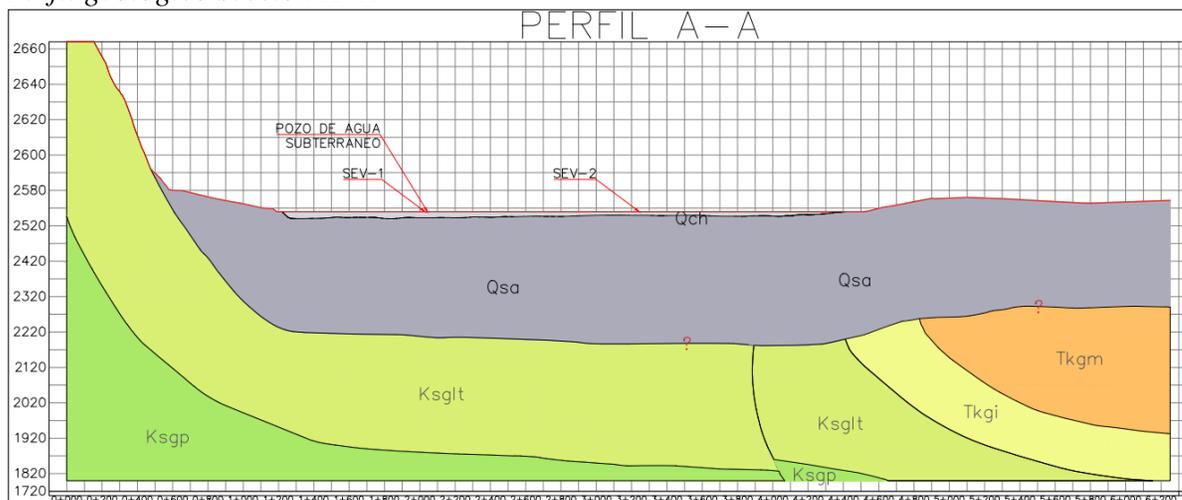
Sección geológica- geofísica entre zona cercana a la pozo profundo y área circundante al Río Bogotá.



Nota, Elaboración propia, 2023.

Con toda la información anteriormente desarrollada y tomando los sondeos eléctricos como validadores de los espesores y profundidades de los niveles asociados a los Depósitos Cuaternarios hasta los 150 m se genera el perfil geológico de toda el área de estudio, mediante AutoCAD Civil incluyendo además la información de referencia de la plancha 227 (Ulloa et al & INGEOMINAS, 1999) y el mapa geológico de (SDA & Veloza, 2012) respecto a la disposición de las capas del subsuelo, aplicadas a las condiciones imperantes del terreno, (ver Figura 36).

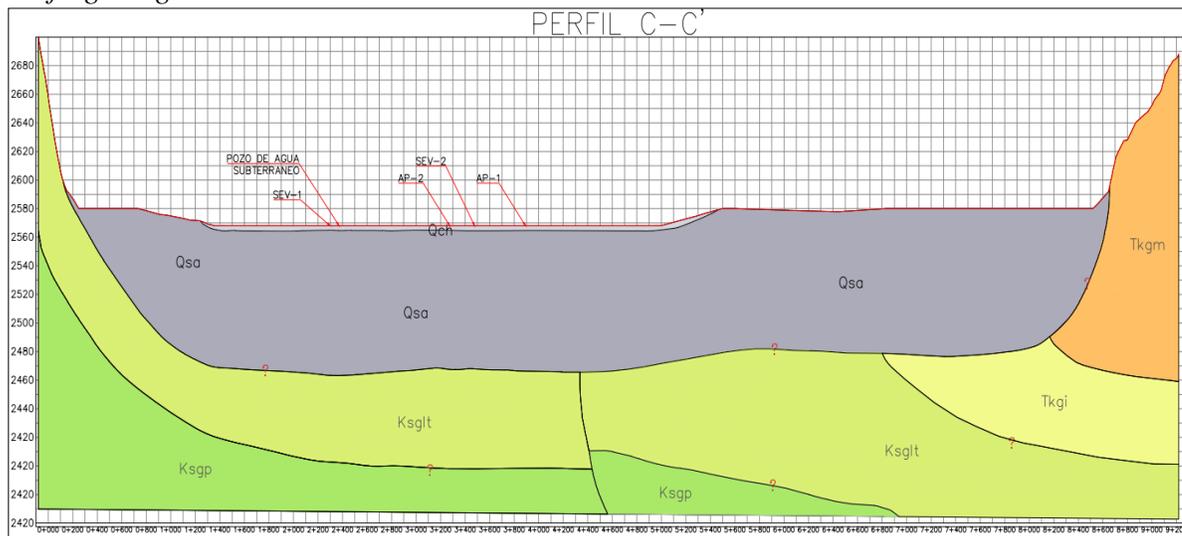
Figura 36
Perfil geológico sección A-A'



Nota, Elaboración propia, 2023.

Para comprender de manera general los límites morfológicos que actúan como barreras hidrogeológicas se traza el perfil C- C', mediante el cual se observa la disposición de las capas más regionales hacia la zona oriental del área de estudio, ver Figura 37.

Figura 37
Perfil geológico sección C-C'



Nota, Elaboración propia, 2023.

5.2 MODELO HIDROGEOQUÍMICO

La hidrogeoquímica y para el caso la isotopía, constituye una de las herramientas que mejor permite validar la distribución de los elementos químicos en el agua subterránea. Tiene como propósito ayudar en la comprensión de las condiciones hidrogeológicas tanto de formación como de evolución del agua subterránea (Rojas Pérez, 2018). Los isótopos para el estudio constituyen una de las herramientas imprescindibles, para la evaluación de las posibles conexiones entre los sistemas acuíferos y los superficiales.

5.2.1 Isótopos estables

Para la zona de estudio se evaluó la composición de los isótopos estables Deuterio ($2H$) Y Oxígeno dieciocho ($18O$) los cuales proporcionan información sobre el tipo de agua y sus diferencias altitudinales, el tránsito de esta en el subsuelo, las zonas de recarga y descarga, las cuales en general facilitan investigaciones sobre el origen del agua subterránea. Las coordenadas de los puntos de muestreo se presentan a continuación, ver Tabla 10.

Tabla 10

Coordenadas de los puntos de muestreo

ID	Tipo de fuente	Lugar	Coord_X	Coord_Y	Elevación	Total Muestra
ISO-R-BOGOTA-E-T-SCH	Superficial	Río Bogotá	4874988	2080427	2562	1
ISO-PZ-E-T-SCH	Subterráneo	Pozo_ Vereda Parcelas	4875103	2085102	2569	1

Nota, Elaboración propia, 2023.

En la Tabla 11 se muestra los resultados obtenidos de dos muestras representativas, obtenidas de la zona de estudio la primera corresponde a un pozo profundo de aproximadamente 80 m, en la Vereda Parcelas del Municipio de Cota, aguas abajo del Río

Bogotá (margen derecho, y el segundo corresponde a una muestra recolectada del cauce del mismo Río.

Tabla 11

Datos Isotópicos obtenidos del muestreo representativo de la zona

Sample	Date	Lab#	$\delta^{18}\text{O}$	Reslt	Repat	$\delta^2\text{H}$	Result	Repe at	E3 H	Resu lt	\pm 2σ	Repe at	\pm 2σ
			<u>H2O</u>	<u>VSMOW \pm</u>		<u>H2</u>	<u>VSMOW \pm</u>				$\pm 0.8 \text{ T.U.}$		$\pm 0.8 \text{ T.U.}$
				<u>0.2‰</u>		<u>O</u>	<u>0.8‰</u>						
ISO-R- BOGOT A-E-T- SCH	5/10/20 23	51394 2	X	-9,39		X	-65,19						
ISO-PZ- E-T-SCH	5/10/20 23	51394 3	X	- 10,89		X	-74,00						

Nota, Elaboración propia, 2023

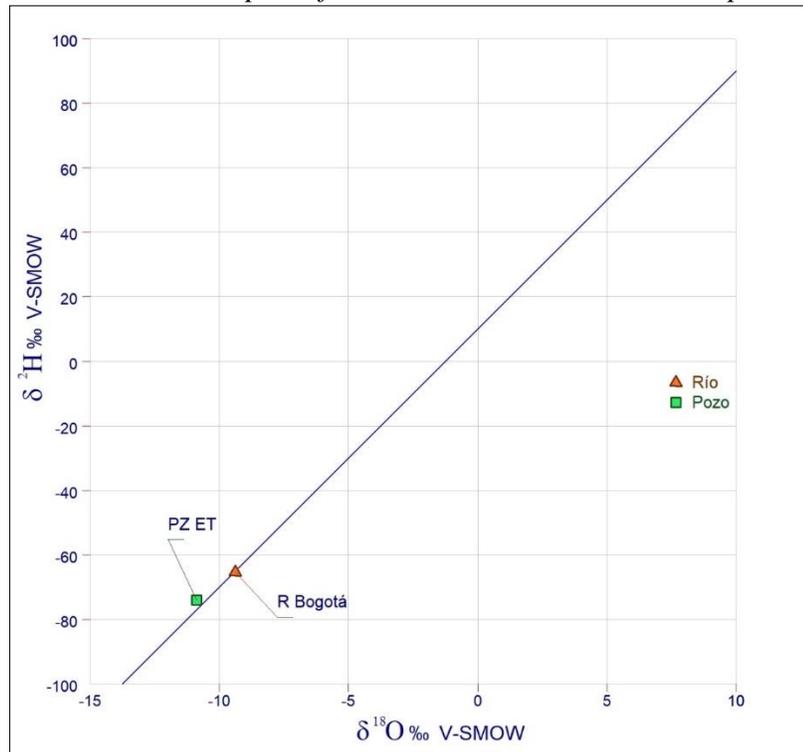
El análisis de los datos se realiza a partir de la línea meteórica isotópica para ello se utilizó el software Diagrammes, obteniendo la Figura 38. Allí se observa que los dos puntos de muestreo se encuentran sobre la línea por lo que se infiere corresponden a aguas meteóricas locales, las cuales no presentan una evaporación diferencial.

Con el fin de validar el resultado se realizó una gráfica por regresión lineal utilizando la ecuación definida por (Rodríguez, 2004) teniendo en cuenta, $r = 0.994$ y un 99% de intervalo de confianza de la pendiente.

$$2\delta = (8.03 \pm 0.28) 18\delta + 9.6$$

Figura 38

Interpretación de los datos isotópicos frente a la línea meteórica isotópica



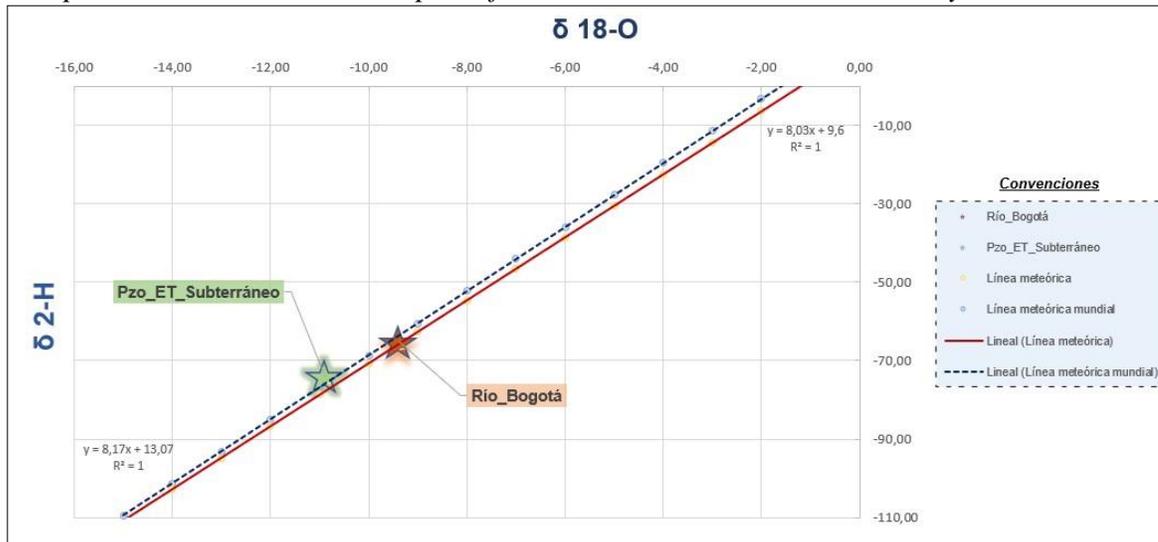
Nota, Elaboración propia, 2023

En la Figura 39 se puede observar como la línea meteórica local coincide con la línea meteórica mundial, lo que sugiere su fácil utilización como base de esta interpretación. Y de igual manera se observa la misma distribución que se determinó mediante Diagrammes. Donde la ubicación del contenido isotópico sobre la línea meteórica, indica aguas de poco tránsito, sobre todo el punto muestreado para el Río Bogotá, ya que la mayor parte del agua que se descarga allí se infiere de carácter juvenil, derivadas de aguas meteóricas.

Que además están relacionadas con épocas de periodos máximos de precipitación como es el caso de los isotopos evaluados en el Pozo subterráneo ya que los valores se hacen más negativos y ligeros en relación con las características del agua del rio Bogotá, identificando zonas de procedencia de recarga localizadas a mayores alturas.

Figura 39

Interpretación de los datos isotópicos frente a la línea meteórica mundial y local



Nota, Elaboración propia, 2023

5.2.2 Gradiente altitudinal

Además de la evaluación frente a la línea meteórica se revisó el gradiente altitudinal de las muestras, generando gráficos por cada tipo de isótopo, esto mediante la ecuación de correlación entre contenido isotópico y altitud, la cual para el O18; corresponde a:

$$\delta O^{18} = -0.0024 H - 3.1$$

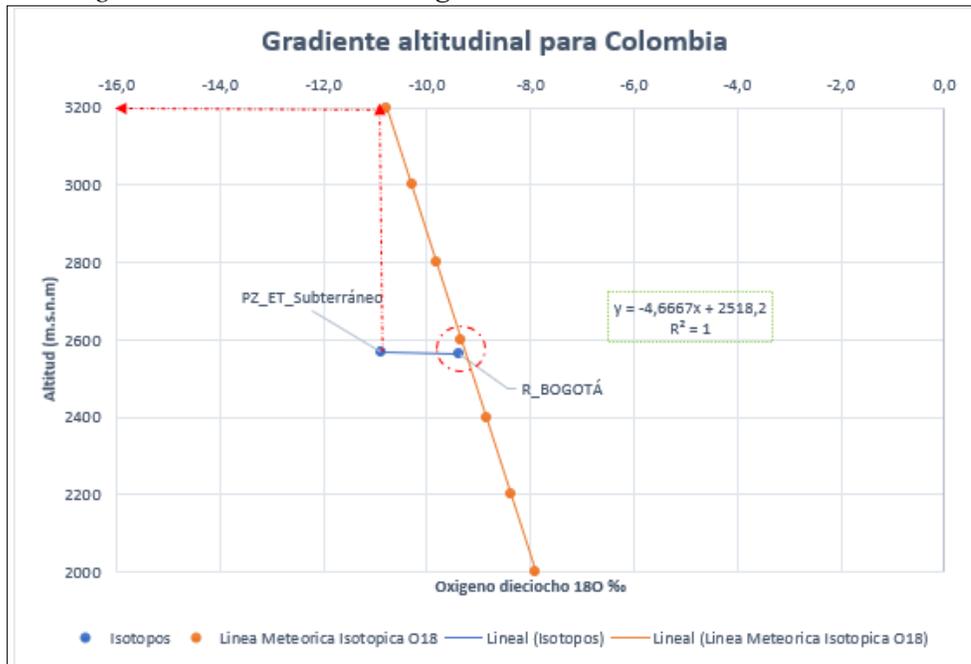
Y para el Deuterio (2H) es:

$$\delta H^2 = -0.0186 H - 19$$

Validando que las aguas meteóricas no provienen de la misma altura, lo que estaría ratificando lo que define el modelo hidrodinámico donde se observa mediante las líneas de flujo que la recarga, para la zona occidental (aguas abajo del Río Bogotá) proviene de los Cerros Majuil en el municipio de Cota. Por el contrario la recarga del Río Bogotá es puntual a menor altitud. Resultados que indican que no hay una interconexión entre los dos hidrosistemas, ver **Figura 40** y **Figura 41**.

Figura 40

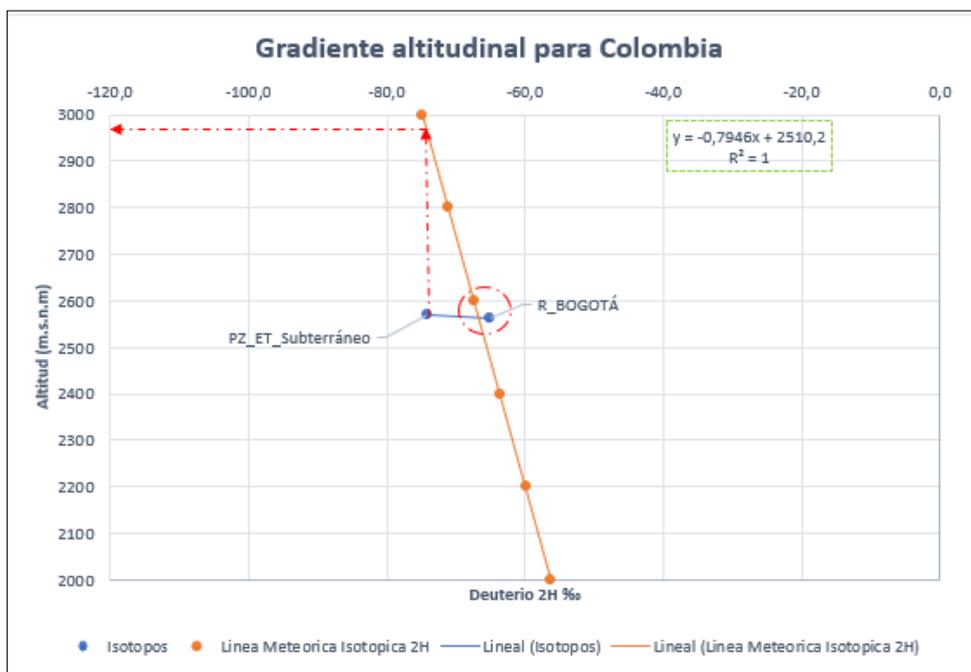
Variación del gradiente altitudinal – Oxígeno dieciocho 18O‰



Nota, Elaboración propia, 2023

Figura 41

Variación del gradiente altitudinal – Deuterio 2H‰



Nota, Elaboración propia, 2023

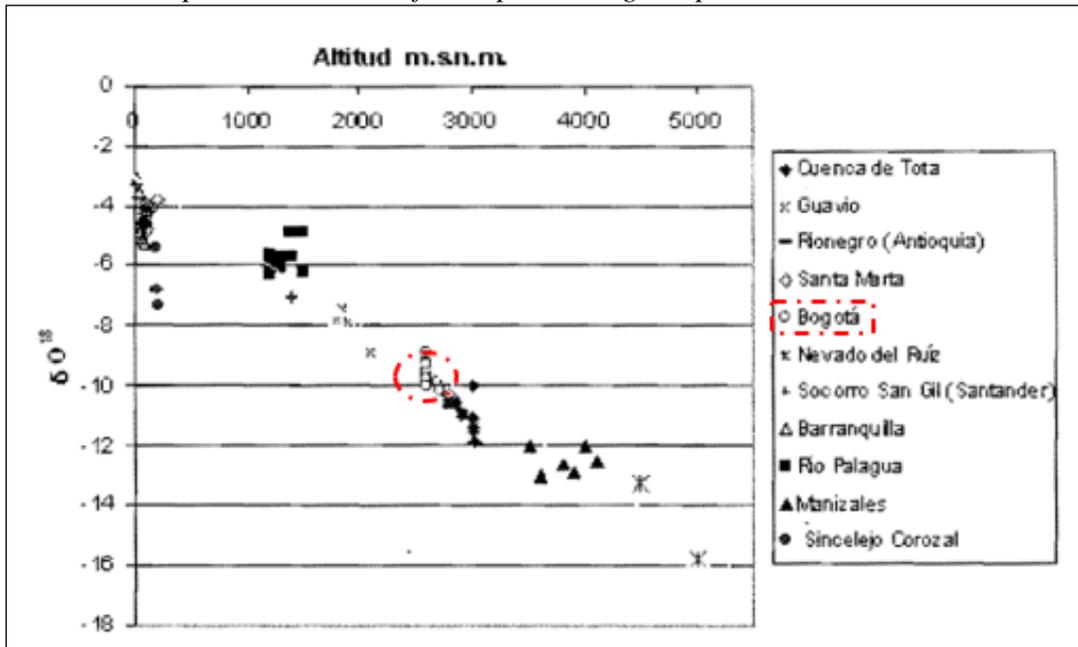
Los valores obtenidos mediante la isotopía con Deuterio ($2H$) y el oxígeno dieciocho ($O18$) permiten establecer, debido al efecto altitud que dada la precipitación en la zona, las concentraciones isotópicas muestreadas en el pozo profundo se van haciendo más negativos a medida que incrementa la altitud. Indicando que el agua de recarga para el pozo de extracción subterránea proviene de zonas de mayor altitud, como es el caso las áreas de alta montaña correspondientes al Cerro Majuil ubicadas al occidente del área de estudio. Estableciendo además que las concentraciones isotópicas para el Río Bogotá son menos negativas acercándose a la línea del efecto altitud en Colombia, lo que indicaría una diferencia marcada entre los dos tipos de agua, además de inferir una tendencia de recarga puntual para el sistema hídrico superficial, ver Figura 40 y Figura 41

De este análisis además se puede inferir que las rocas más consolidadas, para el caso Formación Labor y Tierna, que infrayace a los Depósitos Cuaternarios, pueden estar favoreciendo flujos ascendentes a través de procesos tectónicos, que estrían recargando las capas más profundas de los depósitos no consolidados, entre los cuales además se prevé haya una interconexión a nivel multicapa, dado que los materiales que componen el modelo geológico son heterogéneos y presentan de acuerdo con el modelo hidráulico, características anisotrópicas.

El análisis de la línea meteórica para Colombia de (Rodríguez, 2004), presenta de manera esquemática, la variación del contenido isotópico del $O18$ en la precipitación, para varias regiones de Colombia, en función de la altitud, ver Figura 42. Identificado que los valores obtenidos en este estudio corresponden y están dentro de los rangos reportados por Rodríguez, para la ciudad de Bogotá.

Figura 42

Línea meteórica para Colombia definida por Rodríguez, para SGC



Nota, Modificado, 2023 (Rodríguez, 2004).

5.3 MODELO HIDRODINÁMICO

La caracterización hidrodinámica en el estudio incluye el análisis de la hidráulica del acuífero, y la dirección de flujo, mediante los cuales se logra evaluar el potencial para almacenar y transmitir agua de los sedimentos que constituyen los depósitos recientes, y de las rocas presentes en el área de estudio. Teniendo en cuenta que la zona corresponde a un relieve plano de gran extensión constituido por los Depósitos de origen fluvio – lacustre limitado al occidente por rocas de moderada importancia hidrogeológica se infiere que dichas características definen la distribución actual de los puntos de agua subterránea de los cuales se hace extracción del recurso hídrico.

Para la definición de las unidades hidrogeológicas y la elaboración del mapa hidrogeológico, se realizó una clasificación de las unidades geológicas según su comportamiento

hidrogeológico (definición de Acuíferos, Acuicludos, Acuitardos o Acuífugos), siguiendo los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, adoptando la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) “Leyenda Internacional de los Mapas Hidrogeológicos”(UNESCO, 1983) y el Servicio Geológico Colombiano SGC.

Este se basa en la asignación de categorías hidrogeológicas a partir de la cobertura de los acuíferos, de su condición regional o local, del potencial de las rocas y/o sedimentos para almacenar y transmitir agua subterránea, en función de la composición, edad, permeabilidad y capacidad específica de cada unidad litológica.

Por otro lado, para la evaluación de los niveles estáticos como insumo para la determinación de las isoyetas, se recopiló la mayor información posible de los registros más actualizados de entidades oficiales como la CAR y la SDA, así como de inventarios de monografías realizados en la zona. Se encontró que el periodo de evaluación de los datos estaba entre los años 2002 al 2021. Dicha información se integró con la geología y las condiciones hidrológicas generando el modelo hidrodinámico.

5.3.1 Inventario de puntos de agua

Para el inventario de puntos de agua se revisó la base de datos de la CAR, donde se encontró que el área de estudio entre el Municipio de Cota en la Vereda Parcelas y zona occidental de Bogotá contiene un total de 126 puntos de los cuales 87 se encuentran en uso, sin embargo no reportan medición de niveles.

No obstante para lograr la recopilación de información con parámetros hidráulicos, se revisó la base de datos del estudio generado por (Veloza & SDA, 2012) donde se reporta 89 Pozos, de los cuales 47 son relacionados al área de estudio con información completa de NE, ND,

T, K, entre otros. Con dicha información se revisa además un monitoreo de niveles de agua de la subcuenca Salitre Torca (SDA, Informe de Brigada de Niveles Estáticos - Cuenca Salitre Torca, 2021) en piezómetros que se reportaban en el estudio del 2012, lo que permite la actualización de los niveles, y la complementación de estos. Aunado a esto se revisa el inventario de puntos reportado en la monografía del Municipio de Cota por (Soler Pedreros & Universidad Libre, 2015), con el reporte de 12 pozos con información de NE más reciente, obteniendo así una malla de datos lo suficiente para cubrir la zona de estudio.

Como resultado se obtiene que al menos el 80% de los pozos captan agua de sistemas acuíferos de los Deposito Fluvio – Lacustres. Con profundidades que varían entre los 60 a 180 m promedio, reportando excepciones donde alcanzan los 404 m y corresponde a niveles de unidades cretácicas. A continuación se relaciona la tabla con el inventario aplicable para la zona de estudio, ver Tabla 12.

Tabla 12*Información de los puntos de agua subterránea con reporte de niveles estáticos (NE)*

Código	Nombre del Pozo	X_CMT12	Y_CMT12	COTA	NE_(m)	ISOPIEZA_AE
pz-01-0026	FINCALAGLORIANO.1	4885106,76	2088902,8	2589	23,90	2565,10
PZ-01-0031	JARDINESDEPAZ	4884749,4	2086376,0	2580	6,30	2573,70
PZ-01-0069	MONASTERIOBENEDICTINODETIBATI	4885098,3	2084871,0	2578	3,98	2574,02
pz-01-0076	SEDESOCIALYDEPORTIVANIMAJAYNO.1	4885526,74	2089337,1	2723	0,00	2723,00
pz-11-0028	CLUBELRANCHONO.1	4884307,73	2085510,9	2580	10,56	2569,44
pz-11-0045	MEGAOUTLET	4884358,14	2086194,0	2580	8,33	2571,67
pz-11-0051	COLEGIOSANVIATORNO.2	4884571,13	2087363,9	2580	16,00	2564,00
pz-11-0052	GIMNASIODELOSANDESNO.1	4884135,85	2087264,1	2580	19,98	2560,02
pz-11-0080	CAFAMNO.2	4884255,05	2087470,2	2579	35,59	2543,01
pz-11-0096	LAENSEÑANZANO.2	4883325,2	2086654,7	2580	19,58	2560,42
pz-11-0112	HYUNDAINO.1	4884914,73	2089631,9	2580	16,67	2563,33
pz-11-0140	JARDINESDELRECUERDO	4884537,23	2086816,1	2580	11,49	2568,51
pz-11-0214	ESCUELACOLOMBIANADEINGENIERÍA	4884326,21	2086562,5	2580	76,35	2503,65
pz-11-0222	CLUBCAMPESTREGUAYMARAL	4884312,68	2091233,1	2568	20,15	2547,85
pz-11-0144	ESCUELACOLOMBIANADEINGENIERÍA	4884181,13	2086667,8	2580	14,26	2565,74
pz-11-0147	CONGREGACIÓNSRADELSANTÍSIMONO.1	4884002,9	2085328,5	2580	10,73	2569,27
pz-11-0221	COLSUBSIDIONO.2	4885003,17	2091024,4	2601	19,41	2581,59
pz-11-0223	SANÁNGELONO.2	4884173,68	2088511,3	2579	23,38	2555,62
pz-11-0047	CAFAMNO.1	4884289,26	2087459,2	2580	21,32	2558,28
pz-11-0195	COLEGIOSANVIATORNO.3	4884584,02	2087358,0	2580	15,20	2564,80
pz-11-0190	CEMEX	4885054,68	2090378,9	2592	23,91	2568,09
pz-11-0108	CLUBELRANCHONO.2	4884219,66	2085678,7	2580	10,56	2569,44
pz-01-0011	PARMALAT	4884300,61	2083927,6	2580	6,80	2573,20
pz-01-0012	LASVEGAS	4884001,36	2082558,1	2580	6,70	2573,30
pz-01-0069	MONASTERIOBENEDICTINODETIBATI	4885098,31	2084871,0	2578	6,24	2571,76

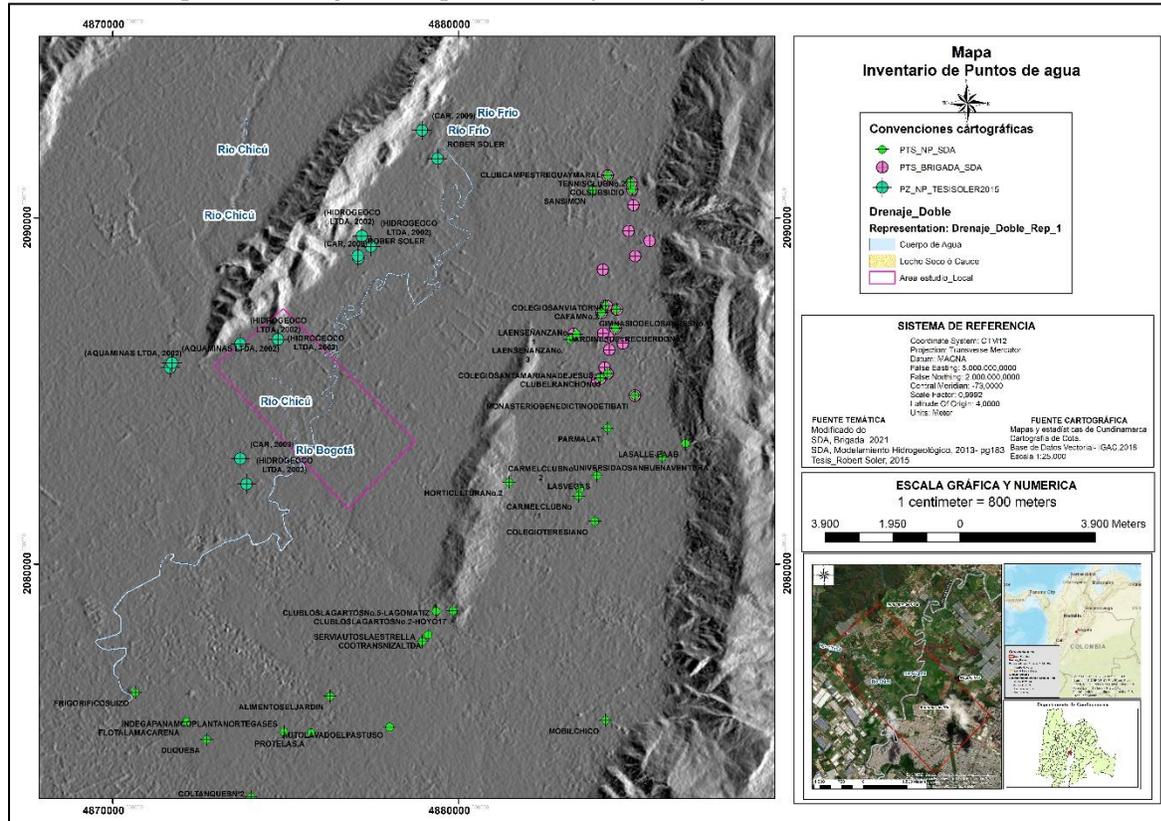
pz-01-0072	LASALLE-EAAB	4886560,81	2083487,3	2748	0,00	2748,00
pz-01-0075	COLEGIOTERESIANO	4883940,33	2081233,8	2580	8,72	2571,28
pz-10-0027	COOTRANSNIZALTDA	4879117,75	2077954,9	2568	12,29	2555,71
pz-10-0028	SERVIAUTOSLAESTRELLA	4878950,33	2077757,7	2568	12,43	2555,57
pz-11-0011	CARMEL CLUB No 2	4883514,01	2082178,0	2580	12,65	2567,35
pz-11-0012	CARMEL CLUB No 1	4883470,8	2081969,9	2580	4,65	2575,35
pz-11-0014	HORTICULTURANo.2	4881462,12	2082362,8	2580	25,14	2554,86
pz-11-0026	CLUBLOSLAGARTOSNo.2-HOYO17	4879835,67	2078648,8	2583	15,60	2567,40
pz-11-0028	CLUBELRANCHONo1	4884307,73	2085510,9	2580	15,66	2564,34
pz-11-0033	COLSUBSIDIO	4884981,41	2091034,0	2605	26,03	2578,97
pz-11-0051	COLEGIOSANVIATORNo.2	4884571,13	2087363,9	2580	22,13	2557,87
pz-11-0052	GIMNASIODELOSANDESNo.1	4884135,86	2087264,1	2580	26,24	2553,76
pz-11-0058	CLUBCAMPESTREGUAYMARAL	4884312,68	2091233,1	2568	22,60	2545,40
pz-11-0080	CAFAMNo,2	4884255,05	2087470,2	2579	52,21	2526,39
pz-11-0095	LA ENSEÑANZA No. 1	4883406,41	2086644,5	2580	21,13	2558,87
pz-11-0097	LA ENSEÑANZA No. 3	4883227,74	2086488,7	2580	21,75	2558,25
pz-11-0140	JARDINESDELRECUERDONo.2	4884537,24	2086816,1	2580	15,04	2564,96
pz-11-0148	COLEGIOSANTAMARIANADEJESUS	4884098,06	2085382,2	2580	13,83	2566,17
pz-11-0180	CLUBLOSLAGARTOSNo.5-LAGOMATIZ	4879350,22	2078632,2	2575	1,00	2573,60
pz-22-0010	SANSIMON	4883875,65	2090802,8	2576	37,52	2538,48
P-1	(HIDROGEOCO LTDA, 2002)	4874774,3	2086496,7	2580	29,1	2550,9
P-2	(HIDROGEOCO LTDA, 2002)	4877202,52	2089486,0	2580	41,1	2538,9
P-3	(HIDROGEOCO LTDA, 2002)	4873863,31	2082315,6	2570	33,5	2536,5
P-4	(HIDROGEOCO LTDA, 2002)	4877461,87	2089175,8	2580	34,6	2545,4
P-5	(HIDROGEOCO LTDA, 2002)	4873684,74	2086363,5	2580	36,5	2543,5
P-6	(AQUAMINAS LTDA, 2002)	4871659,88	2085677,1	2577	26,7	2550,3

P-7	(AQUAMINAS LTDA, 2002)	4871710,07	2085816,9	2579	31,0	2548,0
P-8	(CAR, 2009)	4878942,28	2092537,4	2592	40,1	2551,9
P-9	(CAR, 2009)	4877101,56	2088839,6	2579	40,0	2539,0
P-10	(CAR, 2009)	4873686,56	2083046,5	2568	20,0	2548,0
P-11	ROBER SOLER	4877087,69	2088917,6	2580	63,5	2516,5
P-12	ROBER SOLER	4879391,7	2091719,2	2568	45,0	2523,0

Nota, Modificado de (Veloza & SDA, 2012), r (Soler Pedreros & Universidad Libre, 2015), (SDA, Informe de Brigada de Niveles Estáticos - Cuenca Salitre Torca, 2021)

En la **Figura 43** se relaciona el inventario de puntos de agua recopilado con información completa de parámetros hidráulicos, como insumo para los posteriores análisis de isopiezas.

Figura 43
Inventario de puntos de agua recopilado de diferentes fuentes



Nota, Elaboración propia, 2023

5.3.2 Hidráulica del Acuífero

Con el fin de establecer el comportamiento hidráulico de los materiales geológicos presentes en el área de estudio, y poder tener una premisa del comportamiento del agua subterránea o subsuperficial a través de un medio geológico se realizó la caracterización hidráulica a partir de información secundaria obtenida de diferentes autores, quienes realizaron caracterizaciones generales de parámetros hidráulicos de forma general para los materiales geológicos similares a los encontrados en el área de estudio.

Los valores de referencia de los diferentes parámetros fueron tomados de la literatura técnica disponible y comparados con los reportados por diferentes entidades oficiales, logrando así la categorización de estos para el área de estudio.

5.3.2.1 Conductividad hidráulica (K)

En la Tabla 13 se relaciona una compilación de algunos parámetros hidráulicos como permeabilidad, y transmisividad, definidos en estudios de la CAR y SDA, asignados a diferentes unidades geológicas, como las de interés para este estudio. Esta información se contrasta con la clasificación de permeabilidad para terrenos, Custodio & Llamas.

Figura 44

Clasificación de terrenos por la permeabilidad

Permeabilidad (m/día)	10^4	10^3	10^2	10^1	1	10^{-1}	10^{-2}	10^{-3}	10^{-4}	10^{-5}	10^{-6}
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena		Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas			
Categorización	Buenos acuíferos				Acuíferos pobres			Impermeables			
Capacidad de drenaje	Drenan bien				Drenan mal			No drenan			

Nota, Modificado de (Emilio Custodio & Manuel Ramon Llamas, 1983)

En la Figura 44 se observa resaltado en colores las condiciones que de acuerdo a la Tabla 13, aplican para la clasificación de terrenos según la permeabilidad, indicando que para la Formación Chía (color verde) corresponde a sedimentos arenosos y arcillosos que drenan mal y son categorizados como acuíferos pobres, basado en los rangos de permeabilidades reportados que varían entre $4.08 - 3.99 \times 10^{-2}$ (m/d).

Tabla 13

Compilación y análisis de parámetros hidráulicos asociados a las unidades geológicas de evaluación

Nota, Elaboración propia, 2023

Autor	Formación	Material	K(m/s)- Max	K(m/s)- Min	K(m/d)- Max	K(m/d)- Min	NE_Pro (m)	T(m2/ día)	Espesor máx.
FDN & MOVIUS, SLMB_2023	Formación Sabana	Arcillas, lentes de arena finas y materia orgánica	1,00E-06	1,00E-09	8,64E-02	8,64E-05	1,7		
AMB & SDA, 2018 (PUJ-SDA 2017)	Formación Sabana	Arcillas orgánicas, arcillas arenosas y arenas	1,16E-05	4,60E-05	1,00E+00	3,97E+0		30-204	320
FDN & UT EGIS, 2021	Formación Sabana	Arcillas, arenas y arcillas limosas	1,16E-06	2,31E-07	1,00E-01	2,00E-02		10-80	
AMB & SDA, 2018 (PUJ-SDA 2017)	Formación Chía								10
SOLER & U_LIBRE, 2015	Formación Chía		4,72E-05	4,62E-07	4,08E+00	3,99E-02			
SOLER & U_LIBRE, 2016	Formación Chía			7,06E-06		6,10E-01			
CAR	Depósito de terraza Alta/ Form Sabana	Arcillas, arenas y arcillas limosas			4,50E+00	4,00E-01	16,42 - 58,58	5-20	250
CAR	Depósito de terraza Alta/Form Sabana	Arcillas, arenas y arcillas limosas			3,50E+00	1,50E-01	0,50-72	0,15-3,5	500
	Formación Labor Tierna	Areniscas y arcillolitas	9,25E-05	1,16E-05	7,99E+00	1,00E+00		16-360	600
	Arenisca Dura	Areniscas, lutitas ya arcillolitas		9,26E-06		8,00E-01		2-356	420
AMB & SDA, 2018 (PUJ-SDA 2017)	Formación Guaduas	Arcillolitas, areniscas y mantos de carbón						2,13- 20,4	1100
	Plaeners	Arcillolitas, limolitas silíceas y liditas	1,10E-04		9,50E+00			9,60	100

La Formación Sabana presenta una variación de la conductividad hidráulica entre $1 - 8 \times 10^{-5}$ (m/d), que lo clasifica entre arenas, arcillas, y limos entre acuíferos pobres a impermeables, que drenan mal o no drenan. En la Tabla 13 se reportan además valores de permeabilidad para las Formaciones más competentes como lo son La Formación Labor y Tierna con permeabilidades entre los 7.99 y 1,0 (m/d), definidos como buenos acuíferos que drenan bien, y otras unidades como la Formación Arenisca dura con permeabilidades de hasta 8.0×10^{-1} m/d.

Además de la clasificación por Formaciones antes mencionada se realizó la categorización por litologías, de dos fuentes diferentes, como se muestra en la Figura 45 y Figura 46

Figura 45

Valores típicos de permeabilidad para suelos

	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1
	m/s											
Coefficient of permeability (log scale)	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	10	100
	cm/s											
	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	1	
	ft/s											
Permeability:	Practically impermeable	Very low			Low		Medium			High		
Drainage conditions:	Practically impermeable	Poor			Good							
Typical soil groups:	CC → GM →		SM			SW →		GW →				
	CH	SC	SM-SC	MH		MC-CL		SP →		GP →		
Soil types:	Homogeneous clays below the zone of weathering		Sils, fine sands, silty sands, glacial till, stratified clays				Clean sands, sand and gravel mixtures				Clean gravels	
			Fissured and weathered clays and clays modified by the effects of vegetation									

Note: the arrow adjacent to group classes indicates that permeability values can be greater than the typical value shown.

Nota, Modificado de (FDN & METRO DE BOGOTÁ, 2022) Casagrande, Fadum, 1940

Dichas tablas establecen rangos de acuerdo con lo composición litológica permitiendo correlacionar los materiales característicos del área de estudio con los valores típicos de conductividad hidráulica, ver Tabla 14.

Figura 46

Valores típicos de conductividad hidráulica por diferentes autores y correlación con valores de la zona de estudio

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sanders
Sedimentos	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁶	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500				1 a 100
	Arena media	0,1 a 50	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	
	Arena fina	0,02 a 20			0,01 a 1	
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻² a 1	10 ⁻² a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
	Arcilla	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻⁷			
Rocas Sedimentarias	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, dolomías	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed.(Shale) fracturadas/alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalinas	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁵
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 a 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
	Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
	Gabro alterado	0,05 a 0,3				

Nota, Modificado 2023, de (Alcaldía Mayor de Bogotá D.C & SDP, 2018)

En la Tabla 14.se presentan rangos tanto en unidades de m/s como de m/d dada la clasificación según cada autor. Para el idóneo manejo en este estudio se evalúan los valores en términos de (m/d), encontrando que las arcillas limosas presentan valores típicos entre 1,0 y 8.64×10^{-4} , las arcillas de consistencia media varían entre 8.64×10^{-2} y 1×10^{-6} , las arenas saturadas entre 8.64 a 1×10^{-2} , arcillas arenosas 1×10^{-2} y 8.64×10^{-3} y finalmente la materia orgánica entre 8.64×10^{-3} y 1×10^{-6} .

Esta categorización se ajusta y valida la definición litológica de la zona puesto que asigna valores de permeabilidad baja a materiales arcillosos y alta a las arenas, indicando que es a través de dichas capas que se da el flujo de agua subterráneas en la zona.

Tabla 14

Parámetros hidráulicos correlacionados a los sedimentos del área de estudio, con base a valores típicos de referencia

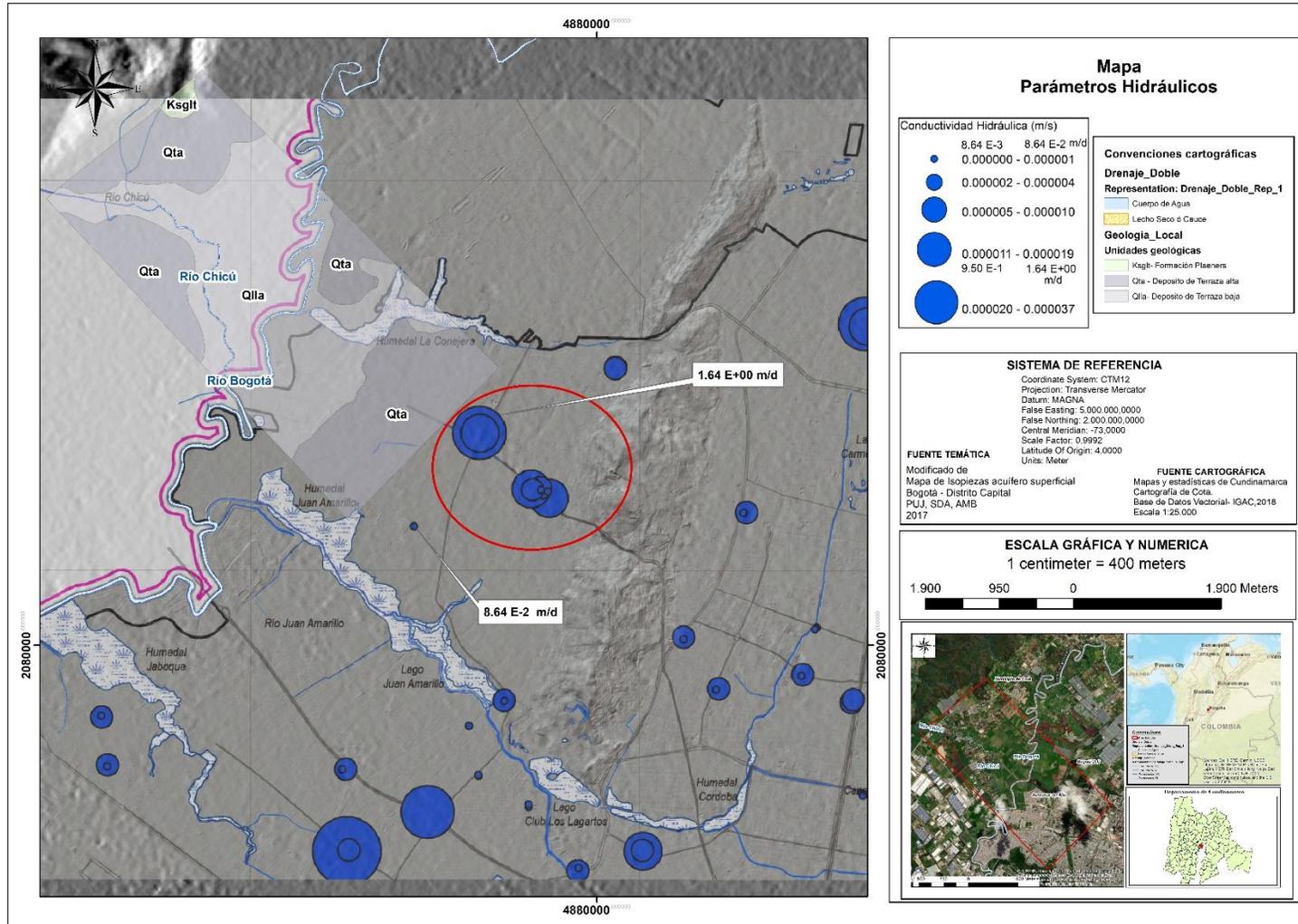
ID	Material	UT MOVIUS, 2022				Valores típicos recopilados - Doménico			
		Valores tipo_ K(m/s)		Valores tipo_ K(m/d)		Valores tipo_ K(m/s)		Valores tipo_ K(m/d)	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min
1	Arcillas limosa	1,00E-05	1,00E-08	8,64E-01	8,64E-04	1,16E-05	1,16E-09	1,00E+00	1,00E-04
2	Arcilla consistencia media	1,00E-06	1,00E-09	8,64E-02	8,64E-05	1,16E-08	1,16E-09	1,00E-03	1,00E-06
3	Arena saturadas	1,00E-03	1,00E-05	8,64E+01	8,64E-01	2,31E-04	1,16E-09	2,00E+01	1,00E-02
4	Arcillas arenosas	1,00E-05	1,00E-07	8,64E-01	8,64E-03	1,16E-07	1,16E-09	1,00E-02	1,00E-03
5	Arcillas con contenido de materia orgánica	1,00E-07	1,00E-09	8,64E-03	8,64E-05	1,16E-08	1,16E-09	1,00E-03	1,00E-06

Nota, Elaboración propia, 2023

Además de la categorización por unidad geológica y por litología se tomó información de referencia para contrastar la zona de estudio con la geo espacialización de algunos autores, respecto a la conductividad hidráulica. Obteniendo los mapas de Conductividad Hidráulica de información base como, (Veloza & SDA, 2012) donde los rangos proyectados a la zona de estudio corresponden a valores entre 1.64 a 9.50×10^{-1} m/d para los materiales más permeables y 8.64×10^{-3} a 8.64×10^{-2} para los menos permeables, ver Figura 47.

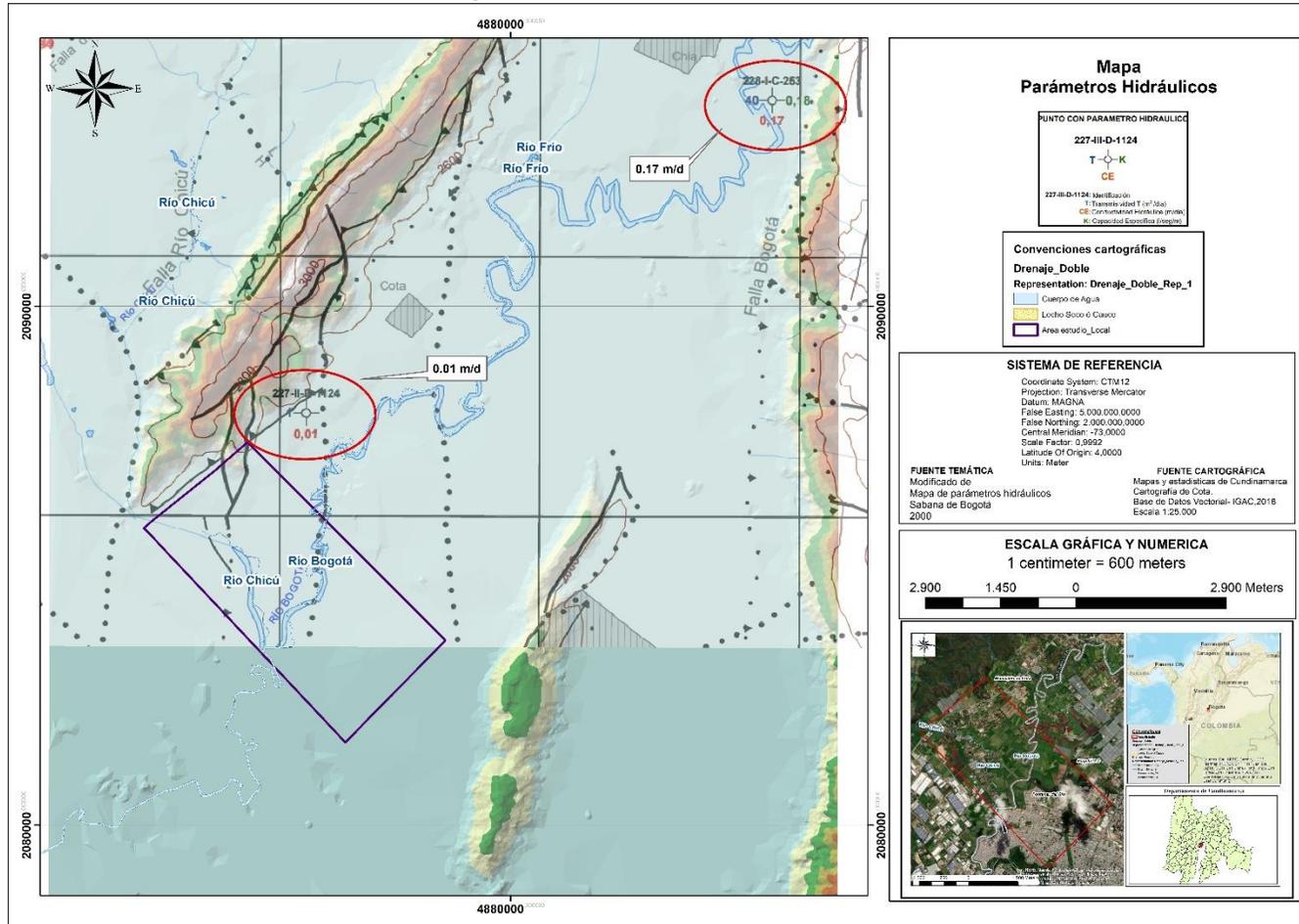
No obstante en la Figura 48 la Conductividad Hidráulica reportada en el mapa del (INGEOMINAS & IAEA, 2000) muestra valores de conductividad para la cuenca media del Río Bogotá entre los 1×10^{-2} a 1.7×10^{-1} m/d, indicando según la clasificación de (Emilio Custodio & Manuel Ramon Llamas, 1983) que corresponden a acuíferos entre bueno a pobres.

Figura 47
 Mapa de parámetros hidráulicos de conductividad hidráulica



Nota, Modificado 2023, de (Veloza & SDA, 2012)

Figura 48
 Mapa de parámetros hidráulicos de la Sabana de Bogotá



Nota, Modificado 2023, de (INGEOMINAS & IAEA, 2000)

De acuerdo con el análisis anterior se puede definir que los materiales tanto a nivel de formación geológica como de capas litológicas presentan una categorización que varía entre acuíferos buenos a acuíferos pobres, sin embargo sus rangos entre valores de permeabilidad son variables, dada las condiciones heterogéneas de los materiales sugiriendo un carácter anisotrópico de las mismas.

5.3.2.2 Transmisividad (T)

En la Tabla 15 se relaciona los rangos de Transmisividad utilizados para clasificar las unidades hidrogeológicas, de acuerdo con la capacidad de almacenar o transmitir agua por el medio hidrogeológico.

Tabla 15

Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Transmisividad

Unidad Hidrogeológica	Clasificación	Transmisividad (m ² /día)	Conductividad hidráulica (m/d)
Acuicludo o Acuífugos	Impermeables	1,00E-06 a 1,00E-04	Aquellas formaciones geológicas que no contienen agua ni la pueden transmitir
Acuitardos	Poco permeables	1,00E-04 a 1,00E-02	Formaciones geológicas que conteniendo apreciables cantidades de agua la transmiten muy lentamente, que, sin ser aptos para el aprovechamiento de captaciones subterráneas.
Acuífero	Permeable	1,00E-02 a 1,00E+04	Estrato o formación geológica que permite el almacenamiento y circulación del agua por sus poros y/o grietas. Son económicamente explotables.

Nota, Tomado y modificado de Custodio y Llamas, 1983.

5.3.2.3 Capacidad específica (CE)

La capacidad específica y de acuerdo con los lineamientos del Atlas hidrogeológico de Colombia se clasifican en 3 tipos como se indica en la siguiente tabla.

Tabla 16
Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Capacidad Específica (CE)

Tipo	Característica Hidrogeológica	CE (l/s/m)	
A1	Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular	Alta	5,00E+00 y 2,00E+00
A2		Media	2,00E+00 y 1,00E+00
A3		Baja	1,00E+00 y 5,00E-02
B1	Rocas con flujo esencialmente y a través de fracturas (rocas fracturadas y/o carstificadas)	Media	5,00E+00 y 1,00E+00
B2		Baja	1,00E+00 y 5,00E-02
C1	Sedimentos y rocas con limitados a ningún recurso de aguas subterráneas	Muy baja	< 5,00E-02
C2		Muy baja a ninguna	

Nota, Tomado y modificado de SGC, 2016

5.3.3 Clasificación de unidades hidrogeológicas

La definición de las unidades hidrogeológicas para la zona de estudio es el resultado de la diferenciación de las unidades geológicas de acuerdo con sus condiciones hidrogeológicas, basados en sus características litológicas, valores de sus principales parámetros hidráulicos (Transmisividad, Permeabilidad, Capacidad Específica) además de la clasificación del tipo de acuífero al que pertenecen. Se clasifican de acuerdo con los lineamientos propuestos en los estándares internacionales, adoptando la nomenclatura de la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (IAH) “Leyenda Internacional de los Mapas Hidrogeológicos” (UNESCO, 1983) y el Servicio Geológico Colombiano SGC.

En la Tabla 17 se presenta la caracterización hidrogeológica de las diferentes unidades según su comportamiento hidrogeológico, definidas a partir de su capacidad para transmitir, almacenar.

Tabla 17

Clasificación de unidades hidrogeológicas

U_GEOLÓGICA	UNIDAD HIDROGEOLOGICA	CARACTERÍSTICAS DE LOS ACUÍFEROS	CONDICIÓN HIDROGEOLOGÍCO	CE (l/s/m)	T (m ² /d)	K (m/d)
B. ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE A TRAVÉS DE FRACTURAS (ROCAS FRACTURADAS Y/O CARSTIFICADAS)						
Formación Labor y Tierna	B2	Acuíferos continuos de extensión regional, de mediana productividad, conformados por rocas sedimentarias, de ambiente marino y continental. Acuíferos libres y confinados con aguas de buena calidad química.	Confinado	3,0E-1 -5,0	16-360	9,25E-5 - 7,99
A. SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR						
Formación Sabana	A2	Acuíferos continuos de extensión regional, de mediana productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial, lacustre. Acuíferos generalmente confinados con aguas de buena calidad química para el consumo humano.	Confinado	3,0E-2 - 2,0E-1	10-80	8,64 E-2 - 8,64E-5
Formación Chía	A1	Acuíferos discontinuos de extensión local, de baja productividad, conformados por sedimentos cuaternarios y de ambiente fluvial. Acuíferos libres y confinados con aguas de regular calidad química para consumo humano.	Libre	No registra	No registra	3,99E-02

Nota, Elaboración propia, 2023

5.3.4 Dirección de flujo

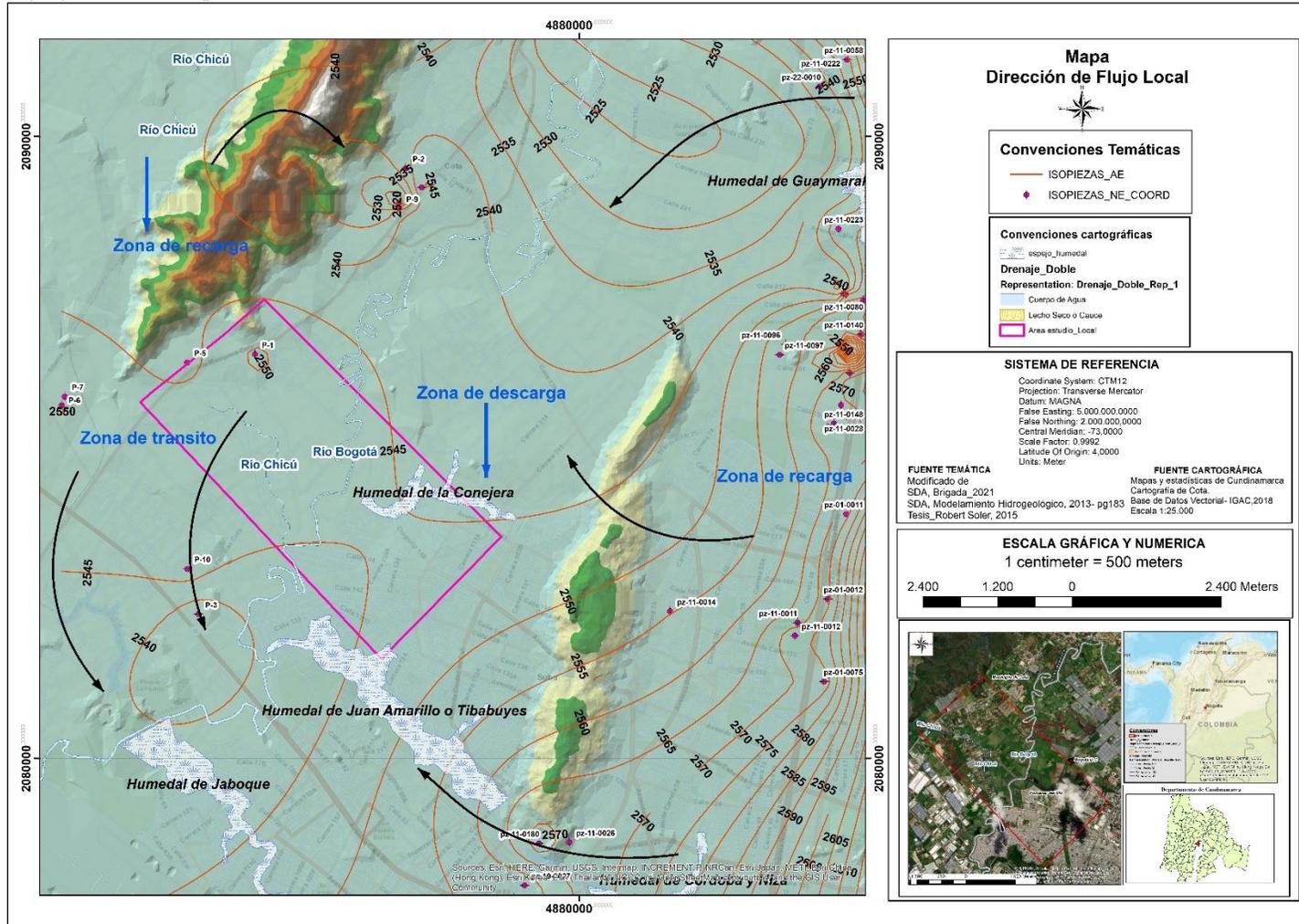
La dirección de flujo en la zona es uno de los componentes hidrogeológicos que facilitan la interpretación en cuanto a las posibles interconexiones de los sistemas acuíferos y las fuentes hídricas superficiales. Es por lo que además de integrar la información de parámetros hidráulicos se evalúa la geología como uno de los componentes más relevantes dado que su configuración geométrica aporta a la definición y esquematización de la red de flujo local y hasta regional, en la zona de estudio.

En la Figura 49 se presenta el Mapa de Isopiezas a partir del cual se identifica que la dirección de flujo tiene una componente vertical desde la zona más occidental en los Cerros Majuil, los cuales actúan como una divisoria hidrogeológica. Indicando además que desde dicha zona se produce la recarga de los sistemas acuíferos para el caso de las capas más arenosas identificadas en el modelo geológico- geofísico.

Por otro lado y teniendo en cuenta que se evaluaron puntos hidrogeológicos regionales en inmediaciones a los cerros orientales se observa una dirección preferencial del flujo subterráneo desde esta zona hacia el noroccidente, en dirección del Río Bogotá.

Por otro lado es importante destacar que la zona de estudio se encuentra limitada por los Cerros de La Conejera, cuyas características litoestratigráficas corresponden a rocas de la Formación Guaduas, la cual está definida como acuitardo de bajo a nulo interés hidrogeológico, no obstante el gran sistema que deriva de la configuración geológica de los cerros facilita el paso del flujo de agua subterránea hasta el Río Bogotá. El cual de acuerdo con el trazo de las líneas equipotenciales presenta un carácter de Río perdedor.

Figura 49
Dirección de flujo local- Isopiezas



Nota, Elaboración propia, 2023

5.3.5 Zonas de recarga y descarga

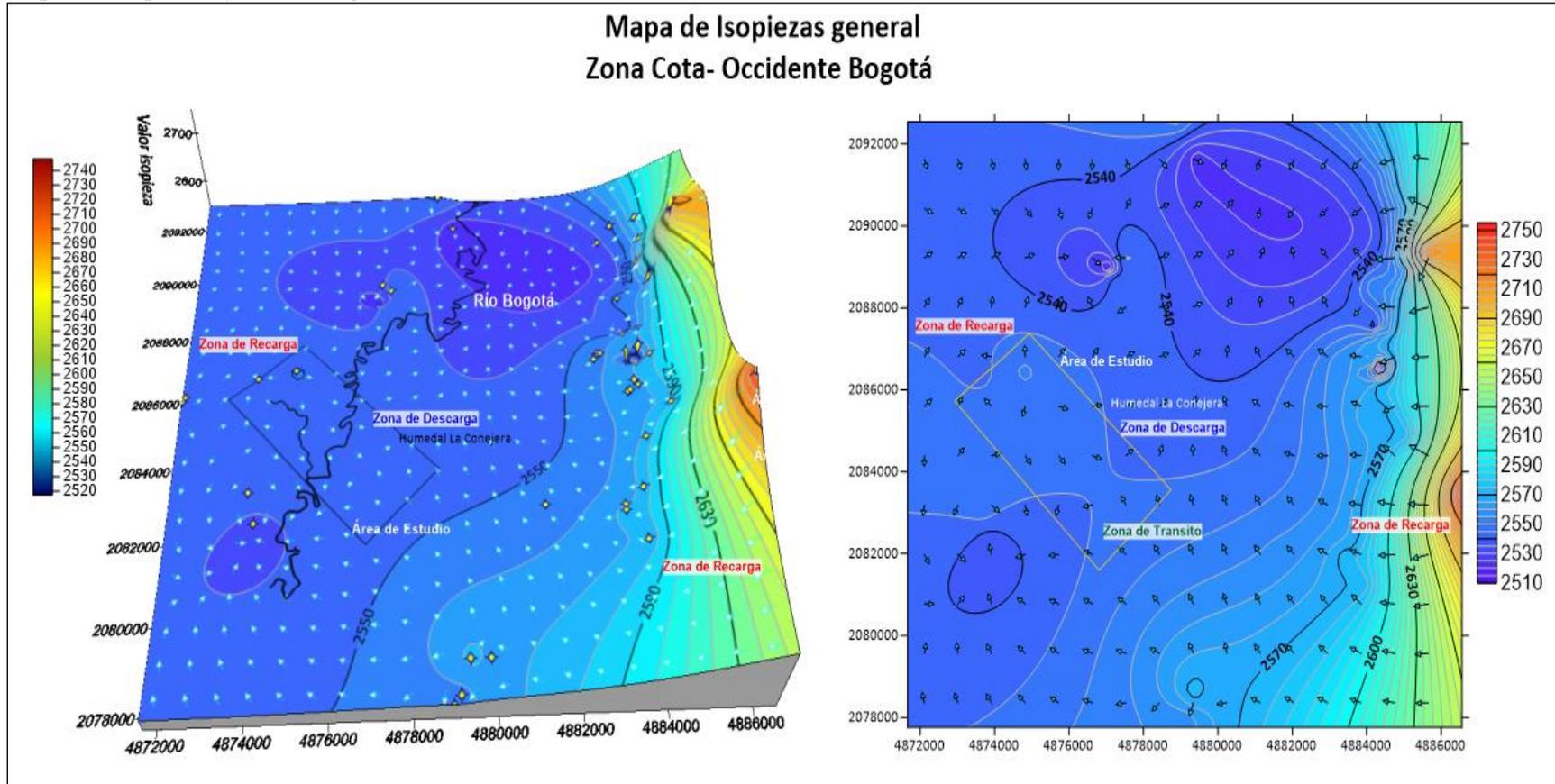
En la Figura 50 se observa el modelo tridimensional de la red de flujo, donde se aprecia de manera detallada la dirección de flujo sobre el área de estudio en relación con el relieve general que lo circunda.

Se evidencia que la recarga se da desde los Cerros Majuil que además por la orientación estructural de sus capas favorece la recarga a los sistemas acuíferos profundos, esto dado que la sentido del flujo es en sentido WE en dirección del Río Bogotá.

Sin embargo aunque los Cerros de La Conejera no corresponden a unidades hidrogeológicas de importancia por sus características litológicas, los cerros orientales si conforman un sistema acuífero que actúa como recarga y direcciona el flujo en sentido oriente - occidente EW. Cabe mencionar que el modelo grafico presentado en la Figura 50 es una representación de las isopiezas y no la topografía del terreno, sin embargo al vincularlo coincide con las zonas de mayor relieve.

La zona de tránsito corresponde a la zona de planicie extensa, cruzada por el Río Bogotá y Chicú sobre la que se emplazan los depósitos cuaternarios. Finalmente en el área se observa una dirección local que va en sentido norte – sur la cual se correlaciona con la zona de descarga que presenta el área de estudio que corresponde al humedal la Conejera.

Figura 50
Mapa de Isopiezas y de Recarga



Nota, Elaboración propia, 2023

5.4 MODELO HIDROLÓGICO

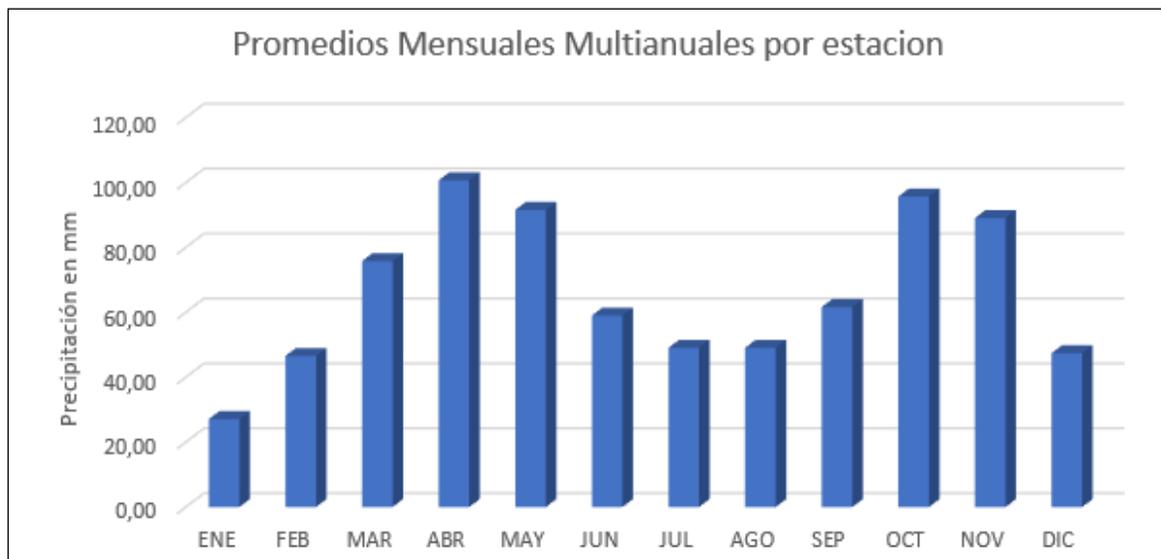
La zona se encuentra localizada en la cuenca media del río Bogotá, y el área de estudio se encuentra inmerso en los límites de la subcuenca del Río Chicú y la subcuenca de Tibitoc – Soacha, por lo cual para los análisis se tienen en cuenta las dos áreas hidrográficas mencionadas.

5.4.1 Parámetros hidroclimáticos- Precipitación.

En relación con la localización de la zona de estudio se tuvieron en cuenta los estudios desarrollados, para las subcuencas del Río Chicú y de Tibitoc – Soacha, de los cuales se obtuvieron los datos de las precipitaciones medias anuales multianuales, en las estaciones próximas al área de estudio, ver Figura 51.

Figura 51

Promedio Mensual multianual de precipitación (mm)



Nota, Elaboración propia, 2023

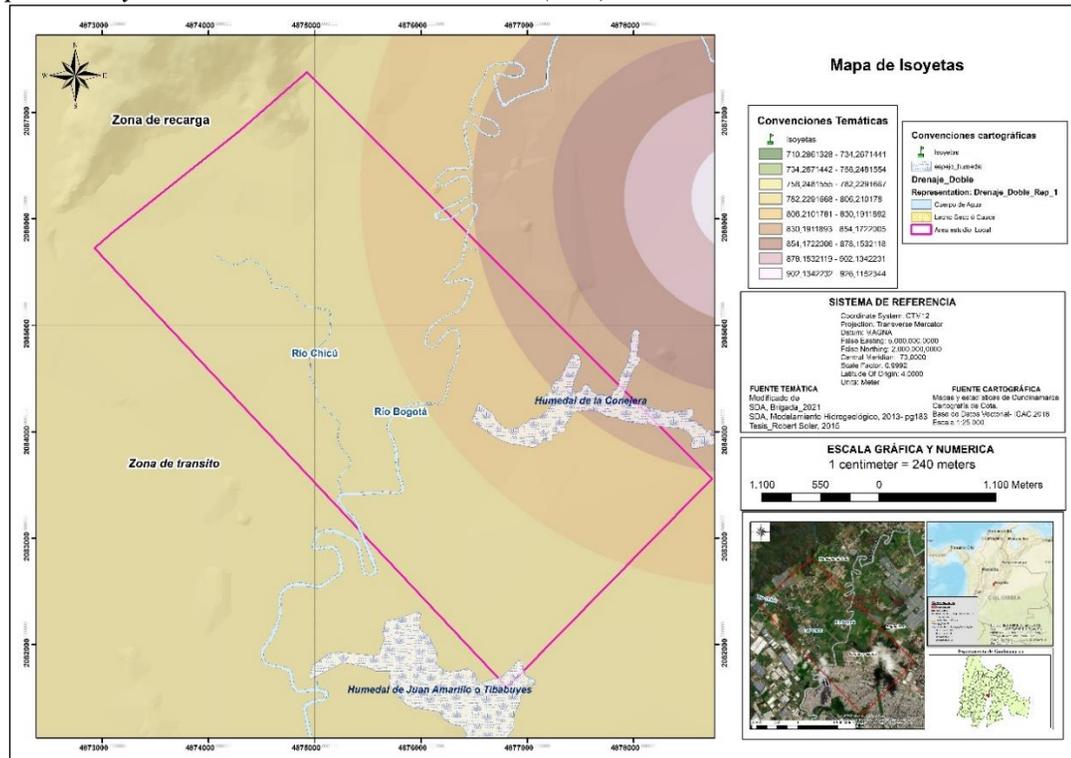
Los datos de precipitación por estaciones empleados en la evaluación de la precipitación se encuentran relacionados en la Tabla 18.

Tabla 18*Promedio mensual y multianual de la precipitación por estación*

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTALES
<i>Apto Guaymaral</i>	26,04	50,40	63,57	94,96	86,06	53,28	39,67	40,04	61,01	104,93	81,66	44,84	746,46
<i>Flores Colombia</i>	30,31	41,75	83,55	96,34	86,47	59,97	45,03	46,88	55,81	91,37	74,72	49,29	761,50
<i>Hato Alto</i>	19,67	36,90	83,89	103,34	74,51	44,57	47,38	55,47	66,27	71,39	71,14	49,77	724,28
<i>Hato El</i>	18,59	40,34	64,44	105,98	97,46	58,66	48,37	48,64	62,28	94,32	77,01	38,96	755,04
<i>Nueva Generación</i>	37,87	66,01	100,58	109,92	98,43	66,35	55,61	51,29	59,76	104,94	124,46	51,28	926,51
<i>Gja. Providencia</i>	30,91	46,19	81,82	105,22	104,10	71,36	55,38	48,97	62,88	104,65	98,65	51,41	861,53
<i>Ramada La</i>	23,98	40,38	59,19	88,33	83,00	51,76	38,27	42,60	63,51	95,25	80,16	43,25	709,69
<i>Santillana</i>	29,59	50,34	69,37	101,30	102,57	66,20	62,95	58,86	61,56	98,64	104,73	50,61	856,73
<i>Max</i>	37,87	66,01	100,58	109,92	104,10	71,36	62,95	58,86	66,27	104,94	124,46	51,41	958,73
<i>Min</i>	18,59	36,90	59,19	88,33	74,51	44,57	38,27	40,04	55,81	71,39	71,14	38,96	637,71
<i>Promedio</i>	27,12	46,54	75,80	100,67	91,57	59,02	49,08	49,09	61,63	95,69	89,07	47,43	792,72

Nota: Nota, Elaboración propia, 2023

Figura 52
Mapa de Isoyetas media mensual multianual (mm)



Nota, Elaboración propia, 2023

5.4.2 Análisis y resultados de la recarga potencial

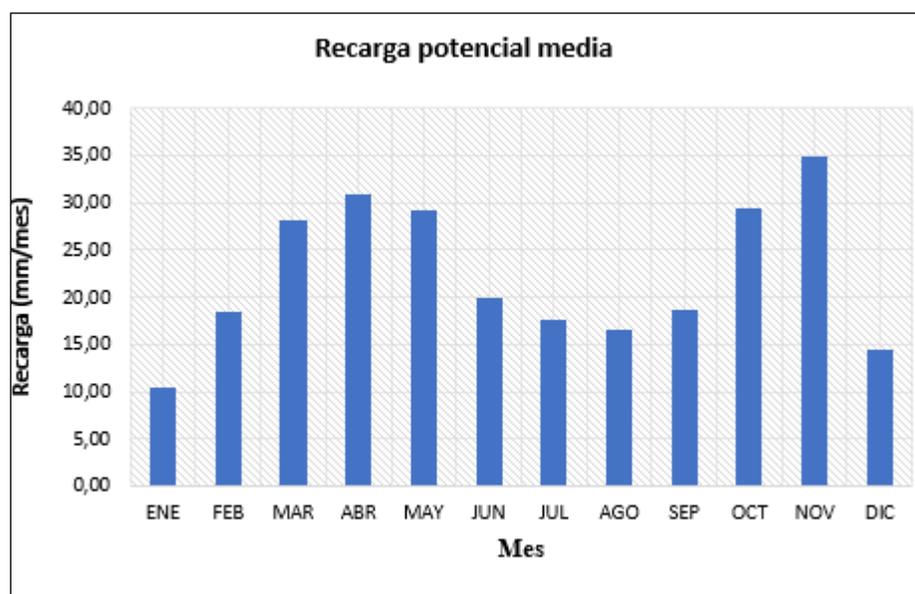
La recarga se define como la entrada de agua que se infiltra hasta alcanzar las zonas saturadas, donde comienza a hacer parte de las reservas subterráneas, según (Balk, 1988), esta entrada puede darse de dos maneras, por un movimiento descendente del agua debido a las fuerzas de gravedad y luego de presentarse un movimiento horizontal del flujo debido a las diferentes condiciones hidráulicas de las capas que constituyen el perfil del suelo.

Para lograr la evolución de esta variable hidrológica, se parte de la definición del Balance hídrico, que la FAO, 2000 define como cálculo de los valores relativos de entrada y salida de aguas, flujo y el volumen de agua. Por lo cual se adopta la metodología para determinar el balance hídrico del agua en un volumen de suelo, la planteada por Gunther Schosinsky (2006) en "Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de

suelos” el cual incluye la intercepción superficial, la infiltración, la evapotranspiración lluvia neta que se infiltra como variables para determinar la recarga potencial en el acuífero.

Teniendo en cuentas las condiciones de las dos subcuencas y con la información de referencia técnica y académica disponible se realiza un cálculo de la recarga potencial para la zona de estudio, obteniendo como resultado un análisis que simula el comportamiento bimodal de la precipitación, indicando la relación directa de la precipitación con dicha recarga, como se indica en la Figura 53.

Figura 53
Recarga potencial media



Nota: (CAR, Ecoforest Ltda, & Planeación Ecológica Ltda., 2006)

Se incluye en el análisis de la recarga potencial el valor máximo de precipitación siendo esta la condición más crítica en la evaluación del modelo hidrológico. De tal manera se obtiene como resultado en las dos subcuencas un valor de recarga potencial al acuífero de 254,14 mm/año, como se muestra en la Tabla 19.

Tabla 19*Calculo de la recarga potencial anual para el área de estudio (mm/año)*

Parámetro	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	Total
(10) P (mm)	37,9	66,0	100,6	109,9	104,1	71,4	62,9	58,9	66,3	104,9	124,5	51,4	958,73
(11) Ret (mm)	5,0	7,9	12,1	13,2	12,5	8,6	7,6	7,1	8,0	12,6	14,9	6,2	109,3
(12) Pi	10,5	18,5	28,2	30,8	29,2	20,0	17,6	16,5	18,6	29,4	34,9	14,4	254,14
(13) ESC [mm]	22,4	39,6	60,3	65,9	62,4	42,8	37,8	35,3	39,7	62,9	74,6	30,8	543,84
(14) T [°C]	20,0	18,0	19,0	15,0	16,0	18,0	19,0	20,0	21,0	16,0	15,0	19,0	17,91
(15) Ps [%]	2,3	2,5	3,8	3,8	3,2	2,0	1,2	3,6	3,2	4,5	3,6	3,7	3,06
(16) ETP [mm]	40	40	64	56	49	33	21	62	57	70	54	62	607,96
(16) Hsi [mm]	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,00
ETPR [mm/mes]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
(17) HD [mm]	3,0	11,0	20,7	23,3	21,7	12,5	10,1	9,0	11,1	21,9	27,4	6,9	15,60
ETR1 [mm/mes]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
(18) ETR [mm]_Cál	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
(18) ETR [mm]	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,00
(19) HSf [mm]_Cál	85,5	93,5	103,2	105,8	104,2	95,0	92,6	91,5	93,6	104,4	109,9	89,4	98,10
(19) HSf [mm]	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,0	75,00
(20) Rp [mm/mes]	10,47	18,50	28,19	30,81	29,18	20,00	17,64	16,50	18,57	29,41	34,88	14,41	254,14

Nota: Nota, Elaboración propia, 2023

5.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El área de estudio se ubica en el Municipio de Cota específicamente en la Vereda Parcelas y la zona occidental del Distrito Capital Bogotá, Suba Fontanar. Presenta características morfológicas definidas por zonas de alta pendiente como los Cerros Majuil y Cerros de la Conejera, los cuales limitan el área de evaluación, correspondiente a planicies generalmente de inundación. Hidroclimáticamente corresponde a una zona de clima frío, al encontrarse a una altura sobre el nivel del mar promedio de 2600. Tiene una tendencia bimodal de las precipitaciones, dado que se encuentra el área de confluencia de la zona intertropical.

El modelo surge a partir de la inquietud sobre la geometría de los acuíferos en zonas con confluencia de ríos de características sedimentológicas dinámicas importantes como el Río Bogotá, esto aunado a las actividades antrópicas que desarrolla la expansión urbanística (infraestructura) en áreas como Bogotá y su área metropolitana. Dado lo anterior se establece como propósito la caracterización hidrogeológica conceptual para los sistemas acuíferos de origen Fluvio – Lacustre y los posibles escenarios de interconexión con la dinámica fluvial de la cuenca media del Río Bogotá, obtenido el Modelo Hidrogeológico Conceptual mostrando en la Figura 54.

Mediante el modelo geológico – geofísico se conoce las características estratigráficas de la zona, las cuales corresponden a una secuencia sedimentaria de rocas y sedimentos con características de porosidad primaria que van desde el Cretácico hasta el Neógeno cuaternario, donde las unidades que afloran corresponden a la Formación Chía y Depósitos de la Formación Sabana. Los cuales suprayacen unidades más competentes con espesores

de hasta 300m, cubriendo unidades de roca como el Grupo Guadalupe en especial Formación Labor y Tierna.

La configuración e interacción de la geología y los análisis de sedimentos logran la identificación de la geometría para las capas que configuran los Depósitos Fluvio Lacustres, (teniendo en cuenta que son estos los de mayor interés hidrogeológico para este estudio) identificando posibles cambios de facies, en materiales finos y detríticos que no presentan continuidad lateral. Indicando además que los materiales sobre los que se emplaza el Río Bogotá difieren de sus características texturales y litológicas de los demás sedimentos que conforman los Depósitos Fluvio Lacustres.

A partir de la definición del modelo geológico – geofísico se infiere que las rocas del cretáceo que infrayacen a los Depósitos Cuaternarios, pueden estar favoreciendo flujos ascendentes que recargan las capas más profundas de los depósitos no consolidados, dadas las características multicapa de materiales heterogéneos y anisotrópicos

El modelo hidrogeoquímico es una de las herramientas que mejor permite la comprensión de los sistemas acuíferos y superficiales, mediante la aplicación de isotopos estables (O^{18} & H^2) muestreados en los dos hidrosistemas. A partir de los cuales se determina que mediante la correlación de los datos con la línea meteórica local y mundial, dichas concentraciones isotópicas corresponden a aguas meteóricas locales, las cuales no presentan una evaporación diferencial, indicando además aguas de poco tránsito, sobre todo las de recarga en el punto de muestro en el río Bogotá.

El Modelo Hidrogeoquímico además establece, debido al efecto altitud que dada la precipitación en la zona, las concentraciones isotópicas muestreadas en el pozo profundo se

van haciendo más negativos a medida que incrementa la altitud. Indicando que el agua de recarga para el pozo de extracción subterránea proviene de zonas de mayor altitud, como es el caso las áreas de alta montaña correspondientes al Cerro Majuil. Estableciendo además que las concentraciones isotópicas para el Río Bogotá son menos negativas acercándose a la línea del efecto altitud en Colombia, lo que indicaría una diferencia marcada entre los dos tipos de agua.

De tal manera que la caracterización hidrogeológica e hidrogeoquímica determina que no existe una interconexión entre los dos sistemas tanto acuífero como superficial al provenir de diferentes altitudes de recarga, y con concentraciones isotópicas diferentes de precipitación, lo que permite la toma de decisiones a nivel de demanda por parte de las comunidades y autoridades encargadas de su gestión, como se indica en los perfiles hidrogeológicos mostrados en las Figura 54, Figura 55 y Figura 56.

Este modelo está en línea con los resultados del modelo hidrológico, en el cual se reportan dos subcuencas para el área de estudio una asociada al Río Chicú (margen derecha aguas abajo del Río Bogotá) y la otra Sector Tibitoc -Soacha (margen izquierdo), donde el aporte de precipitaciones con reportes oficiales está en promedio de 800 mm de carácter bimodal, en el cual la recarga potencial (calculada, 254 mm/año), presenta la misma tendencia de la precipitación, validando la existencia de agua meteóricas en la zona.

En cuanto al modelo hidrodinámico evaluado desde los parámetro hidráulicos de conductividad hidráulica y transmisividad, se encontró que los materiales tanto a nivel por formación geológica (depósitos cuaternarios) como de capas litológicas presentan una categorización que varía entre acuíferos buenos a acuíferos pobres, donde los rangos entre

valores de permeabilidad son notablemente variables, dada las condiciones heterogéneas de los materiales sugiriendo un carácter anisotrópico de los mismos.

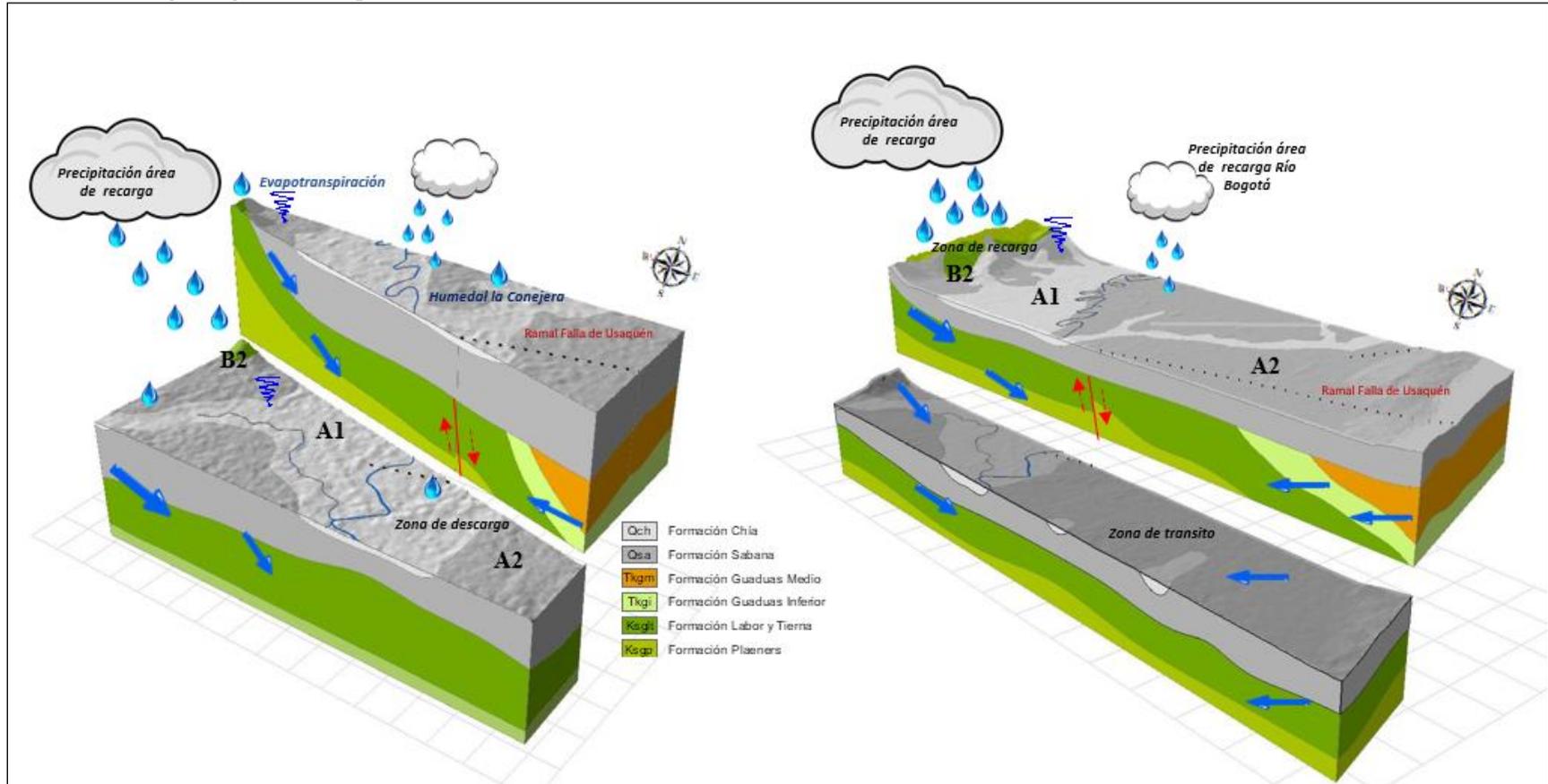
La dirección de flujo determinada a partir del mapa de isopiezas y los niveles estáticos reportados en entidades oficiales para pozos profundos, permite identificar que la dirección de flujo tiene una componente vertical desde la zona más occidental en los Cerros Majuil, los cuales actúan como una divisoria hidrogeológica, ver Figura 57.

Indicando además que desde dicha zona se produce la recarga de los sistemas acuíferos para el caso de las capas más arenosas identificadas en el modelo geológico- geofísico. Esta interacción del modelo hidrodinámico con el modelo geofísico (realizado mediante los Sondeos Eléctricos Verticales) facilita no solo la interpretación de la recarga y la geometría de las capas, sino que además valida la definición de los niveles saturados y la dirección de los flujos subterráneos al coincidir con la orientación de las capas y la definición morfológica de los sedimentos.

La dirección de flujo local en la zona se ve definida además por el flujo regional teniendo en cuenta que se evaluaron puntos hidrogeológicos sobre la Sabana, en inmediaciones a los cerros orientales mediante los cuales se observa una dirección preferencial del flujo subterráneo desde esta zona hacia el noroccidente, en dirección del Río Bogotá, los cuales aportan flujos locales a la zona de estudio (en la margen izquierda aguas abajo del Río Bogotá).

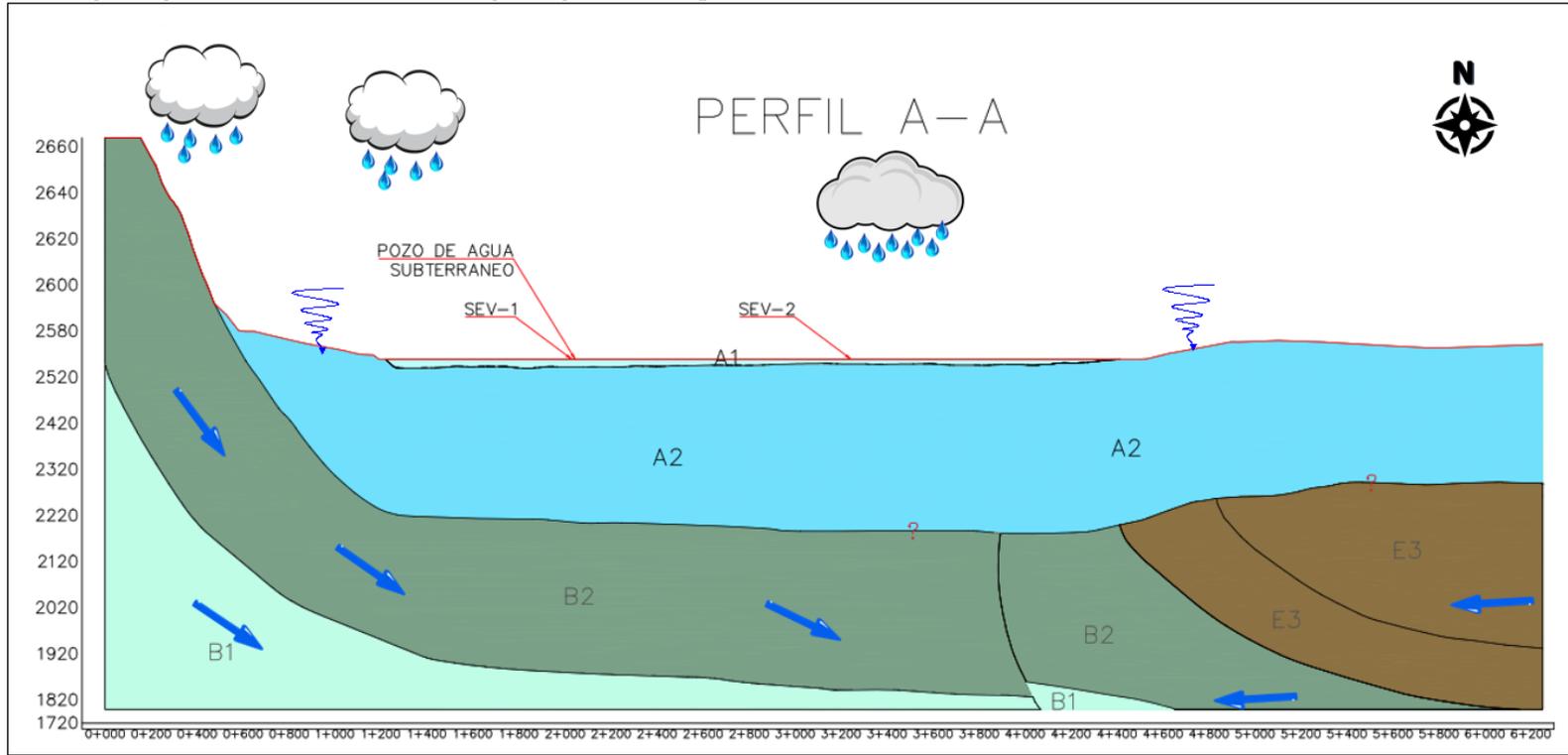
Otra característica que se logró observar de las isopiezas es que localmente existe una zona de descarga, puesto que los vectores de dirección tomaban sentidos locales hacia el norte, lugar donde se encuentra el Humedal La Conejera.

Figura 54
Modelo Hidrogeológico Conceptual



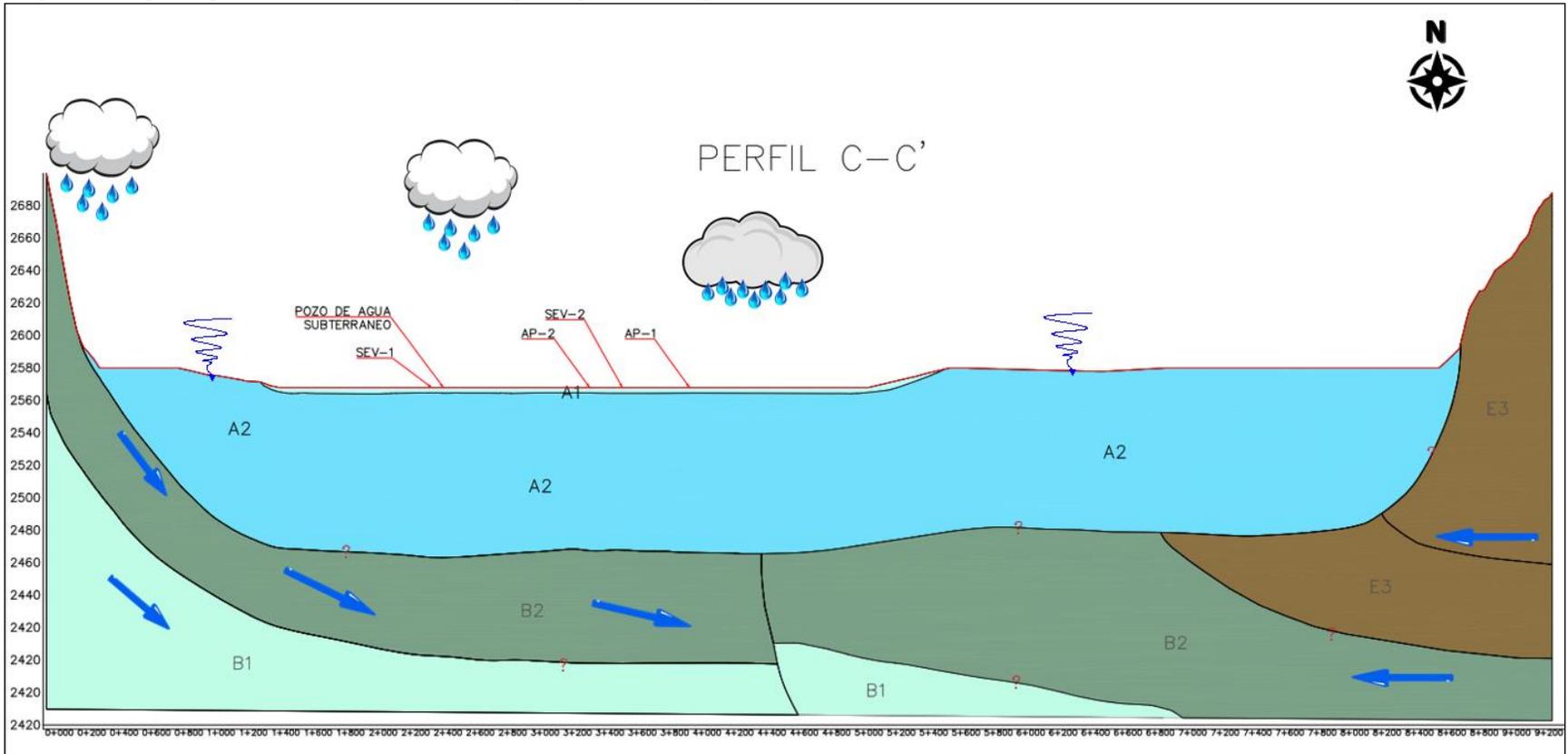
Nota: Nota, Elaboración propia, 2023

Figura 55
Perfil Hidrogeológico-A-A' – Modelo hidrogeológico Conceptual



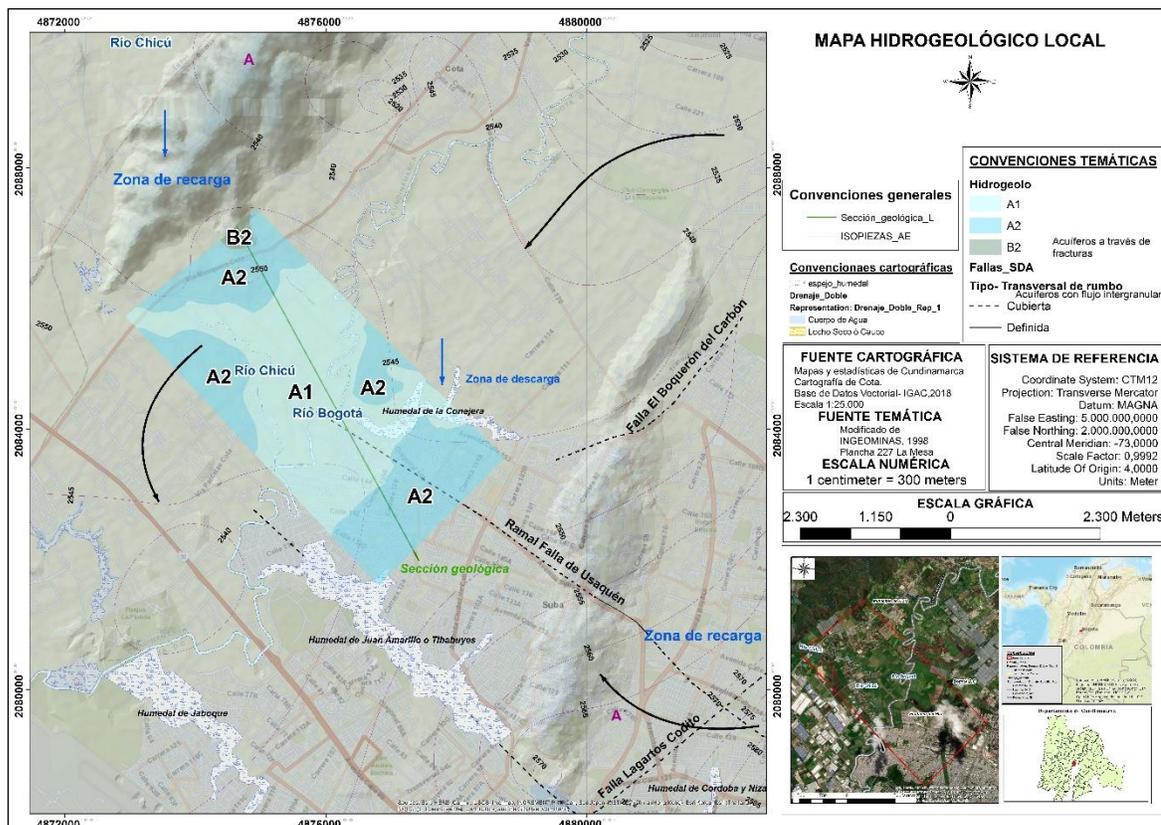
Nota: Nota, Elaboración propia, 2023

Figura 56
Perfil Hidrogeológico-C-C' – Modelo hidrogeológico Conceptual



Nota: Nota, Elaboración propia, 2023

Figura 57
 Mapa hidrogeológico local



Nota: Nota, Elaboración propia, 2023

6. CONCLUSIONES

- ✓ De acuerdo con la interacción de todos los componentes evaluados y los resultados obtenidos, es importante destacar que el conocimiento y validación de los diferentes escenarios que conllevan a la recarga de los acuíferos deben ser analizados detalladamente, tanto para su preservación como para la adecuada gestión del recurso hídrico subterráneo. Lo anterior como una herramienta útil en zonas, donde se prevé desarrollo urbanístico, vial, y de infraestructura entre otros, siendo una línea base para las ciudades y las entidades gubernamentales que vigilan el uso adecuado de los recurso naturales hídricos.
- ✓ Desde el componente geológico se logra por tanto la actualización de la cartografía geológica, mediante los recorridos de campo y su validación a través de los análisis de imágenes satelitales para el caso el uso del modelo digital de elevación DEM (ALOS PALSAR de 12.5 m de resolución), obtenido como resultado el mapa geológico a escala 1: 15.000.
- ✓ Mediante las dos secciones geológicas (A-A' & C-C') se logró identificar la disposición estructural en la zona, validando la influencia de posibles fallas en los Depósitos Cuaternarios, los cuales no presentan indicios de neotectónica en la zona y donde fallas como el Ramal de la Falla de Usaquén se encuentra cubierta por 300m, de espesor de los Cuaternarios. Permitiendo además verificar la disposición de la capas de la Formación Labor y Tierna la cual actúa como zona de recarga.
- ✓ El modelo geológico- geofísico permitió identificar la geometría de las capas que configuran los Depósitos Fluvio Lacustres, identificando posibles cambios de facies, en materiales finos y detríticos que no presentan continuidad lateral. Excepto en las

capas base con características de arenas saturadas, que actúan como acuíferos de carácter confinado del cual se puede inferir se desarrolla el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en la zona. Se evidencia que el sondeo más cercano al cauce del Río Bogotá_SEV2, presenta una condición mucho más arenosa, que el SEV1 cuyo nivel arenoso es menor y donde predomina los materiales arcillosos, particularmente con contenido de óxidos de hierro.

- ✓ Mediante el modelo geofísico y una vez revisada la geología de detalle, se logra realizar una correlación de las resistividades frente a los materiales que definen el área de estudio, reconociendo capa de arenas saturadas (niveles acuíferos libres y confinados) con resistividades que varían entre 121-277 (Ω/m), arcillas de consistencia media con 24-84 (Ω/m), arcillas limosas 7-34 (Ω/m), y arcillas con contenido de materia orgánica (84-121). Con la información de correlación de materiales y resistividades se genera un perfil geológico – geofísico a través del cual se identifica características de la geometría de la capas que componen los Depósitos Fluvio Lacustres, identificando un cambio de facies y la no continuidad lateral de las capas.
- ✓ La evaluación por correlación de materiales con las resistividades, facilito la obtención de columnas litológicas con las cuales se construyó el perfil geológico-geofísico, identificando un cambio variable entre los sedimentos aledaños y sobre los que se emplaza el Río Bogotá, siendo más arenosos que arcillosos, diferenciables de los sedimentos que distan de este de contenido mayoritario de finos, (arcillas y limos de gran espesor).

- ✓ Del modelo geológico geofísico análisis se puede inferir que las rocas del cretáceo que infrayacen a los Depósitos Cuaternarios, pueden estar favoreciendo flujos ascendentes que recargan las capas más profundas de los depósitos no consolidados, dadas las características multicapa de materiales heterogéneos y anisotrópicos.
- ✓ Para el modelo Hidrológico y teniendo en cuentas las condiciones de las dos subcuencas que abarcan la zona de estudio (Subcuenca del Río Chicú y Subcuenca Tibitoc- Soacha) se logra la obtención de variables para el cálculo de la recarga potencial con un resultado de 254 mm/año para la zona de estudio, obteniendo además como resultado un análisis que simula el comportamiento bimodal de la precipitación (800mm), indicando la relación directa de la precipitación con dicha recarga.
- ✓ Para el modelo Hidrodinámico y de acuerdo con el análisis de parámetros hidráulicos (conductividad, transmisividad, y capacidad específica) se pudo definir que los materiales tanto a nivel de formación geológica como de capas litológicas presentan una categorización que varía entre acuíferos buenos a acuíferos pobres, sin embargo sus rangos entre valores de permeabilidad son notablemente variables (entre $8.64E-2$ a $8,64E-5$), dada las condiciones heterogéneas de los materiales sugiriendo un carácter anisotrópico de los mismos.
- ✓ La hidráulica de los acuíferos permitió definir la clasificación de las unidades hidrogeológicas, tanto de la Formación Sabana (A2) como la Formación Chía (A1) las cuales se categorizaron como sedimentos con flujo esencialmente intergranular, y se diferencian entre sí porque los primeros presentan una importancia *media* y los últimos *baja*.

- ✓ Se concluyo además mediante el modelo hidrodinámico que la zona de recarga corresponde a los cerros occidentales del área de estudio, denominado Cerros Majuil, cuya disposición de las capas de la Formación Labor y Tierna, sobre las cuales se desarrolla, tienen una pendiente favorable sobre los Depósitos Cuaternarios, los cuales corresponden a las zonas de tránsito del flujo subterráneo. Se identifico también que la zona de descarga para el área de estudio es el Humedal La Conejera donde se observa flujos locales que llegan hasta este punto.
- ✓ A partir el Mapa de Isopiezas se identifica que la dirección de flujo tiene una componente vertical desde la zona más occidental en los Cerros Majuil, los cuales actúan como una divisoria hidrogeológica. Indicando además que desde dicha zona se produce la recarga de los sistemas acuíferos para el caso de las capas más arenosas identificadas en el modelo geológico- geofísico.
- ✓ Teniendo en cuenta que se evaluaron puntos hidrogeológicos regionales en inmediaciones a los cerros orientales se observa una dirección preferencial del flujo subterráneo desde esta zona hacia el noroccidente, en dirección del Río Bogotá.
- ✓ Es importante destacar que la zona de estudio se encuentra limitada por los Cerros de La Conejera, cuyas características litoestratigráficas corresponden a rocas de la Formación Guaduas, la cual está definida como acuitardo de bajo a nulo interés hidrogeológico, no obstante el gran sistema que deriva de la configuración geológica de los cerros facilita el paso del flujo de agua subterránea hasta el Río Bogotá.
- ✓ Mediante la isotopía se pudo determinar que los dos puntos de muestreo se encuentran sobre la línea meteórica, por lo que se infiere corresponden a aguas meteóricas locales, las cuales no presentan una evaporación diferencial.

- ✓ El contenido isotópico sobre la línea meteórica, indica aguas de poco tránsito, sobre todo el punto muestreado para el Río Bogotá, ya que la mayor parte del agua que se descarga allí se infiere de carácter juvenil, derivadas de aguas meteóricas.
- ✓ Los valores obtenidos mediante la isotopía con Deuterio ($2H$) y el oxígeno dieciocho ($O18$) permiten establecer, debido al efecto altitud que dada la precipitación en la zona, las concentraciones isotópicas muestreadas en el pozo profundo se van haciendo más negativos a medida que incrementa la altitud. Indicando que el agua de recarga para el pozo de extracción subterránea proviene de zonas de mayor altitud, como es el caso las áreas de alta montaña correspondientes al Cerro Majuil ubicadas al occidente del área de estudio. Estableciendo además que las concentraciones isotópicas para el Río Bogotá son menos negativas acercándose a la línea del efecto altitud en Colombia, lo que indicaría una diferencia marcada entre los dos tipos de agua, además de concluir una tendencia de recarga puntual para el sistema hídrico superficial.
- ✓ Finalmente la interacción entre los componentes geológico, geofísico, hidrológico, hidrodinámico e hidrogeoquímico determinan que no existe una interconexión entre los dos sistemas tanto acuífero (de baja pendiente de origen Fluvio – Lacustre), como superficial (dinámica fluvial de la cuenca media del Río Bogotá) al provenir de diferentes altitudes de recarga, y con concentraciones isotópicas diferentes de precipitación, lo que permite la toma de decisiones a nivel de demanda por parte de las comunidades y autoridades encargadas de su gestión, todo lo anterior obteniendo como resultado, los perfiles hidrogeológicos y el bloque diagrama del Modelo Hidrogeológico Conceptual 3D.

7. RECOMENDACIONES

- ✓ Se recomienda realizar una red isotópica que permita análisis más robustos a través de los cuales se puedan validar los aportes realizados por este estudio. Además se sugiere realizar una campaña de monitoreo de niveles estáticos y dinámicos en la zona, que permita actualizar los datos existentes.
- ✓ Se recomienda realizar una red de ensayos Slug, Lefranc y de infiltración en la Formación Chía y Formación Sabana que permitan robustecer la información actual.
- ✓ Se recomienda realizar un modelo numérico a partir del actual Modelo Hidrogeológico Conceptual, para evaluar las condiciones futuras dadas las intervenciones antrópicas que se prevén, esto en relación con la dinámica de la zona.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcaldía Mayor de Bogotá D.C, & SDP. (2018). *Estudios de soporte requeridos para la solicitud de sustracción para la reserva forestal productora regional thomas Van der Hammen en contexto con la UPR Norte y con la red de paisaje circundante.*
- Alejandro Perez. (2021). *Potencial Hidrogeológico del Sinclinal Suesca-Teusaca (Sector Central) como fuente de abastecimiento en el Municipio de Tocancipá Cundinamarca (Colombia).* Bogotá.
- Bermudes, Velandia, & INGEOMINAS. (2010). *HIDROGEOLOGIA REGIONAL DE LA SABANA DE BOGOTA.*
- CAR, & Consorcio Magneto. (2018). *Geofísica magnetotelurica, perforación de piezómetros e instrumentación de trasmisión satelital en la Cuenca del Río Bogotá.* Bogotá.
- CAR, & Ecoforest Ltda. (2006). *Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá, Subcuenca del río Chicú.* Bogotá.
- CAR, Ecoforest Ltda, & Planeación Ecológica Ltda. (2006). *Elaboración del Diagnostico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá, Subcuenca del Río Bogotá Sector Tibitoc Soacha.* Bogotá.
- Casagrande, & Fadum. (1940). *Valores típicos de permeabilidad para suelos.*
- Emilio Custodio, & Manuel Ramon Llamas. (1983). *Hidrogeología Subterránea - Tomo I.*
- Ernesto Orellana. (1982). *Prospección geoeléctrica en corriente continua. Paraninfo.*
- FDN, & METRO DE BOGOTÁ. (2022). *Realizar la estructuración integral del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá, incluyendo los componentes legal, de riesgos, técnico y financiero. Anexo A.* Bogotá.
- FDN, & MOVIUS. (2023). *Contrato interadministrativo 136 de 2021 Realizar la estructuración integral del proyecto Línea 2 del Metro de Bogotá, incluyendo los componentes legales, de riesgos, técnico y financiero.* Bogotá.
- FDN, & UT EGIS STEER. (2021). *Producto 4 Estudios y Diseños de Pre-factibilidad. Entregable 5.1 Revisión.* Bogotá.
- G, j. I. (2013). *Geotechnical Engineering Unsaturated and Saturated Soils.*
- IAEA, I. (2001). *Environmental Isotopes In the Hydrological Cycle- Vol_I.* Paris/Vienna.

- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua (Vol. Capítulo 2. Evaluación Regional del Agua Subterránea -ERA)*. Bogotá D.C.
- IDEAM, & Min_Ambiente. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA*. Bogotá.
- INGEOMINAS, & IAEA. (2000). *Mapa de parámetros hidráulicos de la Sabana de Bogotá*. Bogotá.
- Malo, J., Alfaro, C., & SGC. (2017). *Línea Meteorica Local, Boyacá Centro Norte*. Bogotá.
- Montoya & Reyes, & INGEOMINAS. (Marzo de 2005). *Geología de La Sabana de Bogotá*. Bogotá.
- Padilla & Calderon, & INGEOMINAS. (2004). *Cartografía Geológica aplicada a la zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá*. Bogotá.
- Padilla & Calderon, & INGEOMINAS. (2004). *Proyecto Compilación y Levantamiento de la Información Geomecánica. Cartografía geológica aplicada a la Zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá*. Bogotá.
- Pontificia Universidad Javeriana, & Alcaldía Mayor de Bogotá. (2017). *MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO SUBSUPERFICIAL O SOMERO EN EL PERÍMETRO URBANO DEL DISTRITO CAPITAL*. Bogotá.
- Robert L Folk;. (1980). *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin, Texas.
- Rodríguez, C. (2004). *Línea Meteorica Isotópica de Colombia*. Bogotá.
- Sánchez San Roman, J. (2017). *Prospección geofísica: Sondeos Eléctricos Verticales*. Salamanca, España.
- Sanders. (1998). *Valores típicos de conductividad hidráulica, diferentes autores*.
- SDA. (2021). *Informe de Brigada de Niveles Estáticos - Cuenca Salitre Torca*.
- SDA, & Veloza. (2012). *Ma Geológico - Sistema de modelamiento hidrogeológico del Distrito Capital*. Bogotá.
- Sebastian Alvarado. (2022). *Recarga de sistema lentos en zonas de paramo caso de estudio: Origen de la recarga del sistema Laguna Negra, localizada en el paramo de Oceta a partir de la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual*. Bogotá D.C.

SGC, & MINMINAS. (2017). *Guía Metodológica para la Zonificación de Amenaza por movimientos en Masa Escala 1: 25.000*. Bogotá: Imprenta Nacional de Colombia.

Soler Pedreros, & Universidad Libre. (2015). *Evaluación de vulnerabilidad del recurso hídrico subterráneo del Municipio de Cota Cundinamarca utilizando el modelo Drastic*. Bogotá.

Telford, W. (1990). *Applied Geophysics 2nd Edicion*.

Ulloa et al, & INGEOMINAS. (1999). *Geología de La Plancha 227 La Mesa*. Bogotá.

Veloza, J., & SDA. (2012). *Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital - Mapa Geológico*. Bogotá.

9. ANEXOS

Anexo A Modelo Geológico- Geofísico

Anexo B Modelo Hidrogeoquímico

Anexo C Modelo Hidrodinámico

Anexo D Modelo Hidrológico

Anexo E Modelo Hidrogeológico Conceptual