

**Estudio hidrogeológico conceptual como base para determinar la influencia de la actividad minera a cielo abierto, en la dinámica de los nacimientos de agua presentes en la cuenca de la Quebrada Aguas Calientes, en la Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciudad Bolívar
(Bogotá D.C. – Colombia)**

José Moisés Palacios Rodríguez

Ingeniero Forestal

Facultad de Ingeniería Ambiental, Maestría en Hidrogeología Ambiental, Universidad Antonio

Nariño

Bogotá D.C. Enero de 2021

**Estudio hidrogeológico conceptual como base para determinar la influencia de la actividad minera a cielo abierto, en la dinámica de los nacimientos de agua presentes en la cuenca de la Quebrada Aguas Calientes, en la Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciudad Bolívar
(Bogotá D.C. – Colombia)**

José Moisés Palacios Rodríguez

Ingeniero Forestal

Director de tesis: Diego Felipe Gómez Gutiérrez

Geólogo Ph. D. Recursos Minerales e Hidrogeología

Tesis para optar al título de Magíster en Hidrogeología Ambiental

Facultad de Ingeniería Ambiental, Maestría en Hidrogeología Ambiental, Universidad Antonio
Nariño

Bogotá D.C. Enero de 2021

Nota de aceptación:

El trabajo de maestría “Estudio hidrogeológico conceptual como base para determinar la influencia de la actividad minera a cielo abierto en la dinámica de los nacimientos de agua presentas en la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes, en la Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciudad Bolívar (Bogotá, Colombia)” presentado por el estudiante José Moisés Palacios Rodríguez, para optar por el título de Magíster en Hidrogeología Ambiental de la Universidad Antonio Nariño, cumple con todos los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Bogotá D.C., 02 de diciembre de 2020

Resumen

Algunas comunidades rurales quedan inmersas en conflictos por el uso de los recursos naturales especialmente los no renovables; actualmente en la Localidad de Ciudad Bolívar, Vereda Mochuelo Bajo, se localiza el Parque Minero Industrial El Mochuelo el cual explota arcillas, arenas y otros materiales de construcción. El avance de estas actividades mineras, podría afectar otros recursos que son vitales para las comunidades que habitan en esta zona, como lo es el agua; por lo anterior este estudio va encaminado a determinar, si las actuales y futuras actividades mineras pondrán en riesgo los nacimientos y cuerpos de agua superficial, que no solo surten el acueducto comunitario sino que mantienen un frágil equilibrio con los ecosistemas presentes en esta área.

El estudio de caracterización hidrogeológica de la Quebrada Aguas Calientes, se realizó con el objetivo de evaluar la dinámica de aguas subterráneas de la zona, basado en el análisis y caracterizaciones geológicas-geofísicas, hidráulica e hidrogeoquímicas realizadas en la zona de estudio.

La caracterización geológica-geofísica concluye que, el área de estudio está conformada litológicamente por una secuencia de rocas de edad Cretácica (Fm Arenisca Dura (Ksgd), Pleaneras (Ksgp) y Fm Labor y Tierna (Ksgt) pertenecientes al Grupo Guadalupe (Kgg)), las cuales se encuentran deformadas plásticamente formando una estructura anticlinal, esta estructura presenta un rumbo Nor-Oeste en el cual se observa, a partir de información colectada en campo que se encuentra actualmente erodado (no se encontró la Fm Labor y Tierna (Ksgt) en la zona de estudio) como consecuencia de procesos erosivos asociados a masas glaciales, por lo que hoy en día se observan discordantemente, depósitos definidos como de naturaleza coluvio glacial de manera dominante a lo largo del área de estudio.

La caracterización hidroquímica indicó que, las aguas de este sector son de tipo Bicarbonatados – Sódicas, en donde los iones en disolución más abundantes son los iones Bicarbonatados y le siguen los iones Sódico – Magnésicos, la dureza del agua indica que son aguas muy dulces, y basados en la cantidad de cloruros y sulfuros presentes en estas muestras se concluye que, estas aguas son de tránsito corto y una recarga directa de agua de precipitación.

La caracterización hidrogeológica identifica unidades acuíferas asociadas con unidades geológica de roca y depósitos, la primera se asocia a la zona moderadamente fracturada de las formaciones Arenisca Dura (Ksgd) y Plaeners (Ksgp), para las cuales el medio poroso se asocia al fracturamiento presentando una moderada importancia hidrogeológica. Los depósitos catalogados como acuíferos presentan porosidad primaria en medio granular, para los cuales se relacionan los depósitos Coluvio-glaciares (Qcog) y Depósitos Aluviales (Qal).

El ciclo del agua constituye el reflejo de la interacción entre las aguas superficiales y subterráneas así como su relación con las unidades hidrogeológicas definidas, configuran un frágil equilibrio, donde los depósitos presentes catalogados como unidades acuíferas superficiales representan medios porosos por los cuales flujos subsuperficiales y subterráneos alimentan nacimientos de agua, así como sirven de medio donde se transfiere recarga a unidades acuíferas en roca donde existen horizontes moderadamente fracturados, asociados a las Fm. Arenisca Dura (Ksgd) y Fm. Plaeners (Ksgp).

La disposición estructural asociada a un anticlinal erosionado con rumbo preferencial NW-SE, constituye el factor hidráulico dominante en relación a los flujos de aguas subterráneas, siendo el buzamiento de cada flanco quien determina la dirección de flujo de las aguas subterráneas. Actualmente la actividad minera se localiza en el flanco nor-este de la estructura anticlinal, lo que resulta en flujos preferenciales en dirección opuesta a la localización de los

nacimientos ubicados en el flanco Oeste, dando como resultado una desconexión hidráulica, entre los sistemas de agua subterránea presentes en los materiales rocosos y los nacimientos de agua reportados a lo largo de la quebrada Aguas Calientes. Un comportamiento distinto se observa a nivel de flujos de agua subsuperficial predominantemente relacionados a los depósitos coluvio – aluviales, dado que al no representar aguas subterráneas, no se rigen bajo el mismo comportamiento asociado a la estructura anticlinal, siendo dominante para su dirección de flujo el gradiente asociado a la topografía, lo que indica que estos sistemas de aguas subsuperficiales pueden verse afectados al eliminar la capa superficial presente en las áreas objeto de avance de la minería actual, lo que podría incidir en la recarga de los nacimientos presentes en el área de estudio.

Esto significa que, las aguas subsuperficiales que afloran, están directamente relacionadas a las zonas con poder de infiltración como bosques, zonas de matorrales, pastizales y cultivos; por lo anterior, a medida que la minería avance el área de infiltración que surten estos nacidos se reducirá, y por causa y efecto los caudales disponibles disminuirán y podrían llegar a perderse.

Considerando lo mencionado, los resultados de este estudio hidrogeológico se hacen valiosos, ya que forman la base para la recuperación de esta zona degradada y trazan una ruta clara para la rehabilitación ecológica, en donde se protejan las zonas de recarga, tránsito y descarga de los flujos superficiales y subterráneos, se recuperen los suelos y restablezcan los ciclos naturales, se conserve y se mejore la oferta hídrica, y se cree un gran sumidero de carbón que contribuya a mitigar los efectos del cambio climático y el calentamiento global.

Este estudio busca elaborar una caracterización hidrogeológica conceptual, que aporte como herramienta de planificación del territorio y como base para la toma de decisiones, que garanticen la permanencia y sostenibilidad del recurso hídrico en el tiempo.

Abstract

Some rural communities are immersed in conflicts due to the use of natural resources, especially non-renewable ones, currently in the town of Ciudad Bolívar, Vereda Mochuelo Bajo, there is the El Mochuelo Industrial Mining Park which exploits clays, sand and other construction materials, The progress of these mining activities could affect other resources that are vital for the communities that live in this area, such as water, therefore this study is aimed at determining whether current and future mining activities will put births and bodies of surface water that not only supply the community aqueduct but also maintain a fragile balance with the ecosystems present in this area.

The hydrogeological characterization study of the Quebrada Aguas Calientes was carried out with the objective of evaluating the dynamics of groundwater in the area, based on the analysis and geological-geophysical, hydraulic and hydrogeochemical characterizations carried out in the study area.

The geological-geophysical characterization concludes that the study area is lithologically conformed by a sequence of Cretaceous rocks (Arenisca Dura (Ksgd) Formation, Pleaneras (Ksgp) Formation and Labor y Tierna (Ksgt) Formation belonging to the Guadalupe Group (Kgg)), which are plastically deformed forming an anticline structure, this structure presents a North-West course in which it is observed, from information collected in the field that is currently eroded (the Labor and Tierna (Ksgt) Formation was not found in the study area) as a consequence of erosive processes associated with glacial masses, which is why nowadays deposits defined as glacial colluvium in nature are observed in a dominant way throughout the study area.

The hydrochemical characterization indicated that the waters in this sector are of the Bicarbonate - Sodium type, where the most abundant ions in solution are the Bicarbonate ions followed by the Sodium - Magnesium ions, the hardness of the water indicates that they are very sweet waters and based on the amount of chlorides and sulphides present in these samples, it is concluded that these waters are of short transit and a direct recharge of precipitation water.

The hydrogeological characterization identifies aquifer units associated with geological units of rock and deposits, the first is associated with the moderately fractured zone of the Arenisca Dura (Ksgd) and Plaeners (Ksgp) formations, for which the porous medium is associated with fracturing presenting a moderate hydrogeological importance. The deposits classified as aquifers present primary porosity in a granular medium for which the Coluvio-glacial (Qcog) Deposits and Alluvial (Qal) Deposits are related.

The water cycle is a reflection of the interaction between surface and groundwater as well as its relationship with the defined hydrogeological units, configuring a fragile equilibrium, where the present deposits classified as surface aquiferous units, represent porous media by which subsurface flows and Underground feeds water sources, as well as serving as a medium where recharge is transferred to aquifer units in rock where there are moderately fractured horizons, associated with Hard Sandstone (Ksgd) Formation and Plaeners (Ksgp) Formation.

The structural arrangement associated with an eroded anticline with a NW-SE preferential course, constitutes the dominant hydraulic factor in relation to groundwater flows, being the dip of each flank that determines the direction of groundwater flow. Currently mining activity It is located on the north-east flank of the anticline structure, which results in preferential flows in the opposite direction to the location of the springs located on the west flank, resulting

in a hydraulic disconnection between the groundwater systems present in the rocky materials and the water sources reported along the Aguas Calientes stream. A different behavior is observed at the level of subsurface water flows that are predominantly related to the colluvial-alluvial deposits, since they do not represent groundwater, they are not governed by the same behavior associated with the anticline structure, the gradient being dominant for their flow direction associated with the topography, which indicates that these subsurface water systems may be affected by eliminating the surface layer present in the areas subject to current mining progress, which could affect the recharge of the springs present in the study area.

This means that the subsurface waters that emerge are directly related to areas with infiltration power such as forests, scrub areas, grasslands and crops, therefore, as mining progresses, the infiltration area supplied by these sources will be reduced and therefore cause and effect available flows will decrease and could be lost.

Therefore, the results of this hydrogeological study become valuable since they form the basis for the recovery of this degraded area and draw a clear route for ecological rehabilitation where the recharge, transit and discharge areas of surface flows are protected and underground, soils are recovered and natural cycles reestablished, the water supply is conserved and improved and a large carbon sink is created that helps mitigate the effects of climate change and global warming.

This study seeks to develop a conceptual hydrogeological characterization that contributes as a territorial planning tool and as a basis for making decisions that guarantee the permanence and sustainability of the water resource over time.

Tabla de Contenido

GLOSARIO	19
INTRODUCCIÓN	22
1.PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA.....	26
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	29
2. OBJETIVOS	34
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	34
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	34
3.MARCO TEÓRICO	35
3.1 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	35
3.1.1. <i>Caracterización hidrogeológica de la Microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes</i>	36
3.2 MODELO GEOLÓGICO.....	37
3.3 MODELO HIDRÁULICO	37
3.4 MODELO HIDROGEOQUÍMICO.....	38
3.4.1 <i>Quebrada Aguas Calientes: Caracterización de condiciones hidrológicas</i>	38
3.4.2 <i>Precipitación</i>	40
3.5 ECOSISTEMAS	42
3.5.1 <i>Coberturas vegetales</i>	43
3.5.2 <i>Análisis general de riqueza</i>	44
3.5.3 <i>Análisis de clasificación</i>	46
3.5.4 <i>Descripción de las comunidades</i>	48
4. MARCO METODOLÓGICO	50
4.1 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO - GEOFÍSICO	52
4.1.1 <i>Materiales y Técnicas:</i>	54
4.1.2 <i>Secciones delgadas</i>	57
4.1.3 <i>Prospección Geoeléctrica</i>	58
4.2 CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICO	62
4.2.1 <i>Materiales y Técnicas</i>	64
4.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA.....	64
4.3.1 <i>Materiales y Técnicas</i>	66
4.3.2 <i>Diagrama de Piper</i>	67
4.3.3 <i>Diagrama de Stiff</i>	68
5. RESULTADOS.....	69
5.1. CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICO - GEOFÍSICO	69
5.1.1 <i>Grupo Guadalupe (Kgg)</i>	71
5.1.2 <i>Formación Arenisca Dura (Ksgd):</i>	73
5.1.3 <i>Formación Plaeners (Ksgp)</i>	74
5.1.4 <i>Formación Arenisca de Labor - Tierna (Ksgt):</i>	75

5.1.5 Formación Bogotá (Pgbo):	75
5.2 UNIDADES DE ACUÍFEROS	76
5.2.1 Acuífero Cuaternario (Aq).....	76
5.2.1.1 Depósitos Recientes: Depósitos Aluviales (Qal).....	77
5.2.1.2 Depósitos Coluvio-Glaciares (Qcog).....	77
5.2.2 Acuífero Labor Tierna (Alt).....	78
5.2.3 Acuífero porosidad secundaria Fm. Arenisca Dura (Ksgd) y Fm. Plaeners (Ksgp)	79
5.3 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	81
5.4. ESTUDIO AFLORAMIENTOS ROCOSOS	83
5.4.1. Afloramiento 1. Formación Arenisca Dura (Ksgd).....	85
5.4.2 Afloramiento 02 Formación Plaeners (Ksgp).....	87
5.4.3 Afloramiento 03 Formación Plaeners (Ksgp).....	89
5.4.4 Afloramiento 4. Formación Arenisca Dura (Ksgd).....	90
5.4.5 Afloramiento 05 Formación Plaeners (Ksgp):	92
5.4.6 Otros Aspectos Geológicos.....	94
5.5. HIDROGEOLOGÍA.....	97
5.5.1 Inventario de Puntos de Agua.....	97
5.5.2 Toma de muestras	102
5.6 GEOFÍSICA	104
7. ANALISIS DE RESULTADOS.....	112
7.1 SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL	112
7.1.1. Análisis Unidades Acuíferas SEV	118
7.2 HIDROGEOLOGÍA.....	118
7.2.1 Diagrama de Piper y Stiff.....	122
7.2.2. Silicio y cloruros	126
7.2.3. Análisis muestras de suelos asociados a los nacederos de agua.	127
7.3 CACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL	129
7.3.1 Mapa de Pendientes:	129
7.3.2 Mapa de Dirección de Flujos:	130
7.3.3 Unidades Hidrogeológicas	132
8. CONCLUSIONES.....	142
9. RECOMENDACIONES Y FUTURAS INVESTIGACIONES.....	147
REFERENCIAS	149
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS	154
ANEXOS	155

Lista de figuras

Figura 1. Localización del área de estudio

Figura 2. Localización: Fronteras del área de estudio

Figura 3. Características físicas del área de estudio

Figura 4. Polígonos asociados a los títulos mineros presentes en la vecindad de la zona de estudio de acuerdo al catastro minero

Figura 5. Flujograma Caracterización Hidrogeológica Conceptual

Figura 6. Mapa Microcuenca Yerbabuena y delimitación del área de estudio

Figura 7. Relación mensual de lluvia en mm/mes de los años 2017, 2018 y 2019. Estación Quiba

Figura 8. Dendrograma de la clasificación de la vegetación en la microcuenca Quebrada Yerbabuena (Ciudad Bolívar, Bogotá)

Figura 9. Diagrama de flujo de la Caracterización Hidrológica Conceptual

Figura 10. Diagrama de flujo del Caracterización Geológico

Figura 11. Determinación y toma de datos estructurales (rumbo y buzamiento de las unidades geológicas)

Figura 12. Calibración de equipo para determinación de coordenadas geográficas y toma de coordenadas geograficas

Figura 13. Medición de alturas de los afloramientos rocosos con hipsómetro

Figura 14. Análisis de muestras de roca en Estéreo Microscopio

Figura15. Muestras de roca para análisis de sección delgada correspondientes a los afloramientos 3 y 4

Figura16. Arreglo Schlumberger, los electrodos de corriente AB se alejan una distancia (L), mientras que los de potencial MN se quedan fijos

Figura 17. Arreglo Schlumberger en donde a =separación de electrodos, n =nivel de medición, $C1$ y $C2$ =electrodos de corriente, $P1$ y $P2$ =electrodos de potencial

Figura 18. Equipo para realizar Sondeo Eléctrico Vertical

Figura 19. Realización del Sondeo Eléctrico Vertical

Figura 20. Diagrama de flujo de la Caracterización Hidráulica

Figura 21. Diagrama de flujo de la Caracterización Hidrogeoquímica

Figura 22. Medidor multiparamétrico portátil Orion Star A329 y toma de datos conductividad, pH y temperatura de puntos de agua en campo

Figura 23. Muestras de agua y muestras de suelos para análisis en el Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC

Figura 24. Mapa Geológico de la zona de estudio, Escala 1:24.000

Figura 25. Columna estratigráfica generalizada de la provincia Cordillera Oriental

Figura 26. Afloramiento No 1. Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Figura 27. Afloramiento No 2, Formación Plaeners (Ksgp)

Figura 28. Depósitos aluviales, formación de causes hídricos y bocatoma del acueducto comunitario

Figura 29. Presencia de bloques litológicamente clasificados como areniscas feldespáticas (arcosas) producto de la terminación de la última glaciación, Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciudad Bolívar

Figura 30. Sección Esquemática de Campo

Figura 31. Sector de afloramientos rocosos en el área de estudio

Figura 32. Análisis en el laboratorio del Jardín Botánico de Bogotá, de las muestras recolectadas en la zona de estudio

Figura 33. Afloramiento 1. Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Figura 34. a) Afloramiento Formación Arenisca Dura (Ksgd) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Arenisca Dura (Ksgd) en estéreo microscopio

Figura 35. Afloramiento 02 Formación Plaeners (Ksgp)

Figura 36. a) Afloramiento Formación Formación Plaeners (Ksgp) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Formación Plaeners (Ksgp) en estéreo microscopio

Figura 37. Afloramiento 03 Formación Plaeners (Ksgp)

Figura 38. a) Afloramiento Formación Formación Plaeners (Ksgp) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Plaeners (Ksgp) en estéreo microscopio

Figura 39. Afloramiento 4. Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Figura 40. a) Afloramiento Formación Arenisca Dura (Ksgd) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurale, d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Arenisca Dura (Ksgd) en estéreo microscopio

Figura 41. Afloramiento 05 Formación Plaeners (Ksgp)

Figura 42. a) Afloramiento Formación Formación Plaeners (Ksgp) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Plaeners (Ksgp) en estéreo microscopio

Figura 43. a) Vista general de Depósitos no consolidados. b) Matriz limo-arenosa

Figura 44. Bloque perteneciente al depósito coluvio-glacial (Qcog) expuesto, el cual ha servido como punto de referencia y atractivo turístico, conocido como la Piedra del Mohán

Figura 45. Bloques expuestos compuestos por areniscas feldespáticas, se observa la porosidad secundaria

Figura 46. Zona de nacederos de agua en el área de estudio

Figura 47. a) Nacedero de agua No 1, características físicas b) Nacedero asociado a suelos

Figura 48. a) Nacedero de agua No 2, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos.

Figura 49. a) Nacedero de agua No 3, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos

Figura 50. a) Nacedero de agua No 4, características físicas. b) Nacedero asociado a bloques de roca expuestos

Figura 51. a) Nacedero de agua No 5, características físicas. b) Nacedero asociado a bloques de roca expuestos

Figura 52. a) Nacedero de agua características físicas. b) Nacedero asociado a suelos

Figura 53. a) Nacedero de agua No 7, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos este aflora en medio de una vía. c) Tomas de datos en campo

Figura 54. a) Nacedero de agua No 8, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos

Figura 55. a) Nacedero de agua No 9, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos

Figura 56. a) Nacedero de agua #1 asociado a suelos. b) Muestras de agua tomadas de los Nacederos de agua 1 a la izquierda y 4 a la derecha, en la fotografía central observamos la turbidez del agua de cada muestra. C) Nacedero de agua #1 asociado a bloques de rocas expuestos

Figura 57. Sitios en donde se realizaron los SEV

Figura 58. Sitios en donde se realizaron los SEV

Figura 59. Gráfica del SEV No 1 - Sistema IPI2WIN

Figura 60. Gráfica del SEV No 2 - Sistema IPI2WIN

Figura 61. Gráfica del SEV No 3 - Sistema IPI2WIN

Figura 62. Columna Estratigráfica SEV 1

Figura 63. Columna Estratigráfica SEV 2

Figura 64. Columna Estratigráfica SEV 3

Figura 65. Relación de pH tomado en campo de los nacederos de aguas inventariados

Figura 66. Relación de Conductividad tomada en campo de los nacederos de agua inventariados

Figura 67. Relación de temperatura tomada en campo de los nacimientos de agua inventariados

Figura 68. Diagrama de Piper nos muestra las familias de agua de las muestras de agua

Figura 69. Diagrama de Stiff nos muestra el anión y catión dominante en las muestras de agua

Figura 70. Mapa de pendientes de la zona de estudio

Figura 71. Mapa de Dirección de flujos de la zona de estudio

Figura 72. Geografía de la zona de estudio

Figura 73. Caracterización hidrogeológica de la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes

Figura 74. Mapa Unidades Hidrogeológicas

Figura 75. Mapa sentido de las secciones A-A` y B-B` sobre las unidades geológicas

Figura 76. Diagrama Sección A-A`

Figura 77. Unidades hidrogeológicas vistas en la sección A-A`

Figura 78. Diagrama Sección B-B` Unidades Geológicas

Figura 79. Unidades hidrogeológicas vistas en la sección B-B`

Lista de tablas

- Tabla 1.** Datos de precipitación estación Quiba, periodo 1990-2020
- Tabla 2.** Proporción de área de las coberturas vegetales naturales y seminaturales en la Microcuenca Quebrada Yerbabuena. Interpretación de ortofoto (Correa 2009)
- Tabla 3.** Riqueza taxonómica de plantas y líquenes en la Microcuenca Quebrada Yerbabuena (Ciudad Bolívar, Bogotá)
- Tabla 4.** Riqueza por cobertura en la microcuenca Quebrada Yerbabuena
- Tabla 5.** Características técnicas del equipo usado para SEV
- Tabla 6.** Clasificación de terrenos por su transmisividad ($m^2/día$)
- Tabla 7.** Relación e información de afloramientos estudiados en la zona de estudio
- Tabla 8.** Inventario de puntos de agua: Nacederos de agua, coordenadas geográficas y parámetros físico químicos tomas en campo
- Tabla 9.** Resultados de los análisis de aguas obtenidos en el Laboratorio Nacional de Suelos – IGAC
- Tabla 10.** Dos de los análisis de suelos obtenidos en el Laboratorio Nacional de Suelos –IGAC
- Tabla 11.** SEV No 1. Datos tomados en campo
- Tabla 12.** SEV No 1. Resultados de análisis de datos en Sistema IPI2WIN
- Tabla 13.** SEV No 2. Datos tomados en campo
- Tabla 14.** SEV No 2. Resultados de análisis de datos en Sistema IPI2WIN
- Tabla 15.** SEV No 3. Datos tomados en campo
- Tabla 16.** SEV No 3. Resultados de análisis de datos en Sistema IPI2WIN
- Tabla 17.** Rangos de Resistividad Eléctrica de Rocas y Sedimentos
- Tabla 18.** Análisis de datos del SEV 1

Tabla 19. Análisis de datos del SEV 2

Tabla 20. Análisis de datos del SEV 3

Tabla 21. Análisis Unidades Acuíferas basados en la información de los SEV

Tabla 22. Resultados de análisis de muestras de agua en unidades de mmol/l, mEq/l y %

Tabla 23. Dureza de las aguas según GHF

Tabla 24. Dureza de las muestras de agua tomadas de los nacederos de agua 1 y 4

Tabla 25. Sales totales de sólidos disueltos mg/l de las muestras de agua tomadas de los nacederos de agua 1 y 4

Tabla 26 Análisis de familias de agua y características de las muestras de agua de los nacederos de agua 1 y 4

Tabla 27. Parámetros hidráulicos generales del área de estudio

Glosario

- **Acuífero:** Material geológico capaz de almacenar y ceder el agua, se sitúa en la zona denominada “zona saturada”.
- **Arbustal abierto esclerófilo:** Campo caracterizado por una vegetación dominada por arbustos y plantas de porte herbáceo, en donde predominan especies que están adaptadas a largos periodos de sequía y calor, gracias a sus hojas duras y entrenudos cortos.
- **Arbustal abierto mesófilo:** Campo caracterizado por una vegetación dominada por arbustos y plantas de porte herbáceo, cuyos requerimientos no puede tener demasiada cantidad de agua, pero al mismo tiempo sobreviven en ambientes con poca cantidad de agua.
- **ARCGIS:** Sistema informático que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica. El software realiza cálculo de la pendiente mediante la interpolación de los valores z de una vecindad.
- **Acuitardo:** formación geológica capaz de almacenar agua, pero que la transmite dificultosamente. Son materiales porosos, pero poco permeables, como limos, arenas arcillosas o pizarras poco fisuradas. Son materiales semipermeables o semiconfinantes.
- **Acuífugo:** Formación geológica que no almacena ni transmite agua.
- **Bosque Alto Andino:** Ecosistemas localizados en la cordillera de los Andes sobre la franja ecuatorial, se encuentran entre 2600 a 3800 msnm, se caracterizan por predominio de especies de la Familia de Compuestas o Asteráceas, son representativos de esta categoría los robledales y los bosques de niebla.
- **Caudal ecológico:** Es el caudal mínimo que se debe conservar para proteger el buen estado y el potencial ecológico en los ríos o en las aguas de transición para mantener de

forma natural la vida piscícola, así como la vegetación de la rivera y en algunos casos los niveles freáticos del suelo.

- **Desertizar:** Transformar un terreno en un desierto.
- **Feldespatos:** corresponden a un grupo de minerales que forman unas series de soluciones sólidas como son los feldespatos de plagioclasa y los feldespatos alcalinos, cuya fórmula generalizada es $X (Al, Si)_4 O_8$. Estos minerales son formadores de rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas y más del 50% de feldespatos están presente en la corteza terrestre.
- **Flujo base:** Aporte en el caudal transportado por un cauce por parte de un acuífero sobre el cual el drenaje tiene una relación hidráulica.
- **Flujo subsuperficial:** Es la parte de la precipitación que penetra en el suelo o sedimentos superficiales pero que no alcanza a llegar hasta el nivel freático, porque toma una dirección paralela a la de la superficie, este flujo puede salir a superficie como consecuencia de cambios en la pendiente o en el grado de saturación del suelo o sedimento e integrarse a la escorrentía superficial.
- **Lidita o chert:** Roca sedimentaria estratificada de origen químico o biogénico de alto contenido en sílice.
- **Lodolitas:** Son rocas sedimentarias detríticas compuestas por 50% de partículas tamaño arcilla y 50% tamaño limo.
- **Lluvia horizontal:** Es el agua que se condensa producto del choque de la bruma o niebla con la vegetación existente, en este fenómeno el agua se condensa en gotas de agua que se precipitan formando caudales o infiltrándose en el suelo.

- **Manantial:** Punto de agua subterránea asociado a un material geológico con características acuíferas, correspondiente a la representación del nivel freático en superficie.
- **Napa:** Capas de agua subterránea ubicadas a diferentes alturas en el perfil del subsuelo.
- **Nacimiento de agua:** Término que agrupa la aparición en superficie de aguas presentes en el sustrato, ya sea a manera de flujos superficiales o de manantiales (aguas subterráneas).
- **Nivel freático:** Es el límite superior de la zona de saturación o zona saturada, se define como la superficie que toma los puntos donde la presión del agua y la presión atmosférica son iguales, tiene un relieve similar al de la superficie, aunque más suavizado y puede llegar a aflorar al exterior formando depósitos de agua libre.
- **Zona vadosa o zona no saturada:** Corresponde a la parte de la Tierra entre la superficie terrestre y la parte superior de la zona freática, la posición en la que el agua subterránea está a presión atmosférica.

Introducción

El desarrollo de los centros urbanos genera diversos impactos ambientales al medio, la responsabilidad de los habitantes de estas urbes es mitigarlos e incluso evitarlos, uno de los impactos más importantes que se genera actualmente es la generación de residuos sólidos, si bien la ciudad de Bogotá D.C. cuenta con diversos programas de reciclaje, se hace necesario y obligatorio tener un sitio en donde se pueda acopiar y disponer adecuadamente todo tipo de residuos producidos por los habitantes.

Es este sentido que el Relleno Sanitario Doña Juana (RSDJ), recibe todos los días todo tipo de residuos, los cuales son dispuestos y enterrados en sitios seleccionados, estos residuos generan gran variedad de impactos ambientales en donde sobresalen los olores, contaminación de fuentes hídricas, proliferación de insectos, roedores y aves carroñeras, y afectación al paisaje entre otros, lo que al final influye negativamente en la calidad de vida de los habitantes cercanos a este relleno.

Como una medida de compensación que se le impuso a la Unidad Administrativa Especial de Servicios Públicos - UAESP, quien es la entidad responsable del manejo y la administración del Relleno Sanitario Doña Juana, se determinó por parte de la autoridad ambiental, que se debían adquirir predios debidamente seleccionados fuera del RSDJ para su restauración y rehabilitación ecológica, con el fin de proteger, mantener y mejorar una fuente hídrica, que en este caso es la Quebrada Aguas Calientes, en la Vereda Mochuelo Bajo, en la vía que comunica el casco urbano de esta vereda con el de la Vereda Quiba.

En el desarrollo del proyecto se realizan labores para la recuperación de los suelos, que favorezcan los árboles y arbustos de especies nativas seleccionadas para alcanzar los objetivos trazados, así como el diseño e implementación de estrategias de mantenimiento de los individuos

vegetales plantados, que garanticen la supervivencia del mayor número de plantas incorporadas a este proyecto, basados principalmente en las experiencias e investigaciones realizadas por el Jardín Botánico de Bogotá, a lo largo de más de dos décadas en diversos ambientes estratégicos de la ciudad y también en otras experiencias.

En el estudio y caracterización del entorno, se identificaron diversas amenazas entre las que sobresalen: el cambio de uso del suelo, el avance de la urbanización, invasión de predios, y sobresale la minería a gran escala, ya que en esta área se encuentra el Parque Minero Industrial El Mochuelo en donde se extraen arcillas para la elaboración de ladrillos, arena de peña y otros materiales para la construcción; estas explotaciones mineras están cada día más cerca de la zona de nacimientos de agua, y de manera preliminar se considera que podrían afectar las unidades geológicas acuíferas, y por ende la dinámica hidrogeológica que mantienen y surten los nacimientos de agua, presentes en la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes.

El estudio de caracterización hidrogeológica de la Quebrada Aguas Calientes, se realizó con el objetivo de evaluar la dinámica de aguas subterráneas de la zona, basados en el análisis y caracterizaciones geológicas-geofísicas, hidráulica e hidrogeoquímicas realizadas en la zona de estudio.

En el desarrollo de esta investigación se observó que las aguas subsuperficiales presentan alto grado de interacción con los suelos, estas interacciones se presentan como un sistema abierto suelo – planta, en el cual existe transferencia de materia y energía al interior o al exterior de este sistema, en donde las plantas transportan agua desde el suelo hasta el aire a través de sus tejidos y especialmente sus hojas, gracias a los gradientes de potencial hídrico que se presentan al interior y que se denomina transpiración, que es la fuerza motriz más importante para el

movimiento del agua por toda la planta, parte de este vapor de agua liberado al aire se condensa y regresa al suelo en forma líquida para reincorporarse al ciclo hídrico.

En un suelo saturado el agua gravitacional rellena transitoriamente los espacios de aire y se profundiza por infiltración, por acción de la gravedad, en estos procesos los sistemas radiculares cobran importancia ya que al ir profundizando y desplazándose horizontalmente abre caminos de menor resistencia para el agua subterránea, ya que fractura la matriz de los horizontes más profundos facilitando su infiltración; además en la parte superior del suelo, el bosque acumula materia orgánica en forma de hojarasca, la cual regula la escorrentía, forma suelos fértiles y consolida los Depósitos Aluviales

Conservar y aumentar estas zonas boscosas y restaurar nuevas áreas que permitan recuperar los suelos, no solo como sustento de la vegetación sino como instrumentos de infiltración y almacenamiento de agua en la napas freáticas, permitirá que la vegetación tenga mayor cantidad de agua disponible en el suelo, la cual podrá tomar y evapotranspirar propiciando nuevas lluvias que surtirán más eficientemente el agua almacenada y disponible en el suelo, y que a través de los sistemas radiculares de la vegetación presente, podrá infiltrarse fácilmente para surtir los niveles freáticos, subsuperficiales y subterráneos, y a la vez retenerse en los suelos ricos en materia orgánica, que una vez saturados la liberaran lentamente, para que los nacimientos de agua dispongan de una mejor oferta de agua dulce superficial. Además, estos bosques forman una barrera que frena y retiene la niebla y las nubes bajas atrapando la lluvia horizontal, lo que ocasiona que el agua se condense en la vegetación existente, aumentando la cantidad de agua disponible para este ecosistema

De otra parte, estas investigaciones y los futuros proyectos ecosistémicos que allí se desarrollen, mejorarán no solo la calidad de vida de los habitantes del sector y de la localidad,

sino que también se verá favorecido todo el entorno, ya que se recuperará la conectividad ecológica y se mejoran los bienes y servicios ofrecidos por este tipo de ecosistemas.

1.Propósito del trabajo de maestría

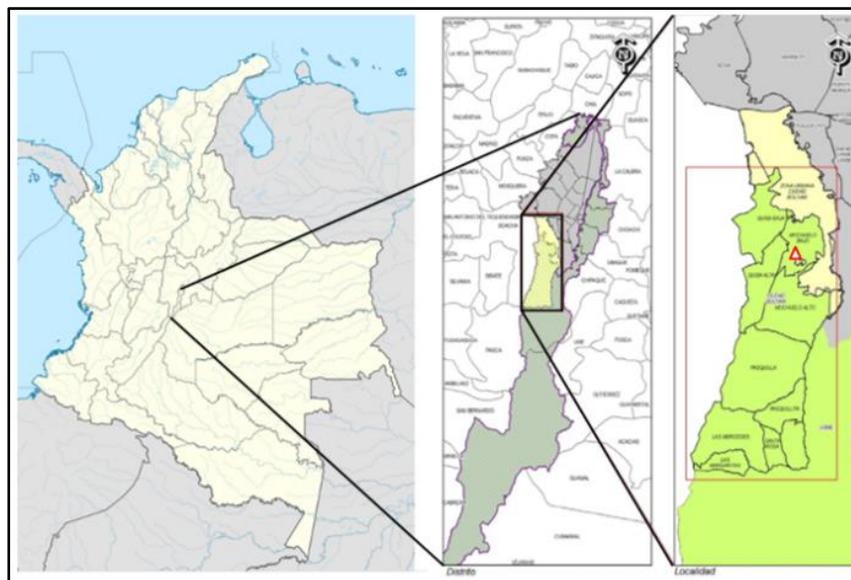
El propósito de este estudio, es la elaboración de un modelo de aguas subterráneas que represente la dinámica hidrogeológica de la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes, con el fin de determinar si existen factores de riesgo como consecuencia de la actividad minería actual, afectando la calidad y cantidad de agua que presenta esta quebrada, ya que podría afectar el suministro de agua al acueducto veredal, a la población que usa esta agua para labores agropecuarias y las dinámicas de los bosques presentes.

1.1.Localización del Proyecto

El área de estudio pertenece a la ciudad de Bogotá D.C., se ubica en la Localidad de Ciudad Bolívar, la cual tiene un área de 12.998,46 hectáreas, de las cuales el 73,52% (9.555,94 ha) son rurales y la parte urbana de la localidad tiene 3.237,87 ha (24.91 %).

Figura1

Localización del área de estudio.



Nota: Imágenes de internet Fuente:

<http://www.ambientebogota.gov.co/documents/10157/2883179/PAL+CBol%C3%ADvar+2013-2016.pdf>

La microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes, está localizada en las coordenadas geográficas N 4°30.619'N, 74°9.465'WO, este polígono se ubica en la Vereda Mochuelo Bajo, que limita al norte y al oriente con el área urbana de la Localidad, al sur con la Vereda de Mochuelo Alto y al occidente con las Veredas de Quiba Alta y Quiba Baja; tiene una altitud que varía entre los 2850 msnm y los 3300 msnm.

Figura 2

Localización: Fronteras del área de estudio



Nota: El área de estudio la cual colinda con el casco urbano de la Vereda Mochuelo Bajo, el Relleno Sanitario Doña Juna y la Vereda Quiba, en la Localidad de Ciudad Bolívar. Fuente: Google earth y el autor, (2020).

La zona de estudio tiene un área de 158 hectáreas y un perímetro de 5.208 metros aproximadamente.

Figura 3

Características físicas del área de estudio



Nota: a) Imagen superior tomada con dron, b) En la figura inferior izquierda se observa el avance actual de la actividad minera, c) En la figura inferior derecha se observa el área de estudio desde la vía que comunica el barrio San Joaquín con la Vereda Mochuelo. Fuente: El autor, (2020).

1.2 Descripción del proyecto

La economía de muchos países está soportada en la construcción como uno de sus principales ejes dinamizadores, lo cual exige un suministro permanente no solo de tierras sino de materiales de construcción, que por lo general son recursos naturales no renovables.

El desarrollo de las ciudades exige contar con recursos naturales que sustentan el avance de obras de ingeniería civil, principalmente la construcción de vivienda y de infraestructura como vías.

En la ciudad de Bogotá D.C. las autoridades ambientales tomaron la decisión de centrar la actividad minera a cielo abierto para la extracción de arcillas, arenas de peña y otros materiales de construcción en Parques Minero Industriales, que son áreas en donde se permite desarrollar de manera transitoria la actividad minera, aprovechando al máximo sus reservas bajo

parámetros de sostenibilidad ambiental; constituyen zonas estratégicas para el desarrollo del Distrito, por ser las áreas que concentran los puntos de extracción de materiales necesarios para la construcción de la ciudad, de su manejo, control y seguimiento depende en gran medida el comportamiento económico del sector de la construcción (Alcalde Mayor de Bogotá D.C., 2003).

Según el art. 217 del Decreto 463 de 2003¹:

“Los Parques Minero Industriales posibilitarán la integración de licencias mineras para lograr una mayor racionalidad y coherencia en el desarrollo de los frentes de explotación, rehabilitación y construcción urbana, y permitirán crear espacios físicos adecuados para las industrias derivadas de tal actividad, las cuales requieren estar cerca de las fuentes de materiales". (Alcalde Mayor de Bogotá D.C., 2003)

La Asociación Nacional de Fabricantes de Ladrillo y Productos de Arcilla ANAFALCO, cuenta a la fecha con 32 proyectos mineros en curso ubicados en el Parque Minero Industrial El Mochuelo, los proyectos que se encuentran en este sector se relacionan con la extracción de minerales no metálicos.

Basados en el estudio realizado por la Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, en desarrollo del contrato No. 19547- 004-2013 celebrado con el Consorcio Proyección², que tuvo como objetivo “Evaluar la situación actual y los escenarios futuros del mercado de los materiales de construcción y arcillas teniendo en cuenta las restricciones técnicas, sociales, legales y ambientales que se puedan presentar en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta, Pereira, Manizales y Armenia y en sus áreas de influencia” (UPME y Consorcio Proyección, 2014, p, 1-1); se extraen los siguientes apartes:

“En total, la capital consume 12 millones 402 mil toneladas actualmente. Esta participación ha venido disminuyendo desde 2008 debido a la caída promedio de -1.3%

¹ Compilado por el Decreto Distrital 190 de 2004, Derogado por el art. 565, Decreto Distrital 364 de 2013.

² Integrado por las firmas B&C S.A. e INCOPLAN S.A,

que ha tenido el mercado en los últimos 5 años. El descenso obedece a la disminución recurrente que ha tenido la construcción de obras civiles en la ciudad, que ha caído por encima del 20% en los últimos 3 años.

Para el año 2023 se espera que la ciudad de Bogotá demande 19 millones 955 mil toneladas, lo cual representa un consumo de 2.3 toneladas por persona en ese año. La caída en el mercado se revertirá al totalizar un crecimiento de 4,9% por año en la siguiente década. La construcción del Metro de Bogotá, la complementación de la red de Transmilenio con las troncales de la Boyacá y la Av. Calle 68 y el desarrollo del metro ligero dinamizarán las obras civiles que registrarán una variación media anual de 11%.

Se estima que la demanda de materiales de construcción de los municipios de la Sabana de Bogotá es equivalente a 18 millones 239 mil toneladas en 2013. Para el año 2023 el consumo total de materiales de construcción se estima que será de 29 millones 346 mil toneladas anuales”. (p, 2-11)

“En Bogotá las zonas de producción se localizan en Usme y Mochuelo, equivalen al 41,8 % de la producción, de la que depende la ciudad. En el evento de cierre de estas minas, deberían desplazarse a la zona norte, donde se encuentran la mayoría de los títulos mineros como es Cogua y La Ruidosa”. (p, 3-22)

El avance de estas explotaciones mineras podría poner en riesgo el recurso hídrico tanto superficial como subterráneo, y podría afectar toda la parte biótica presente en la zona.

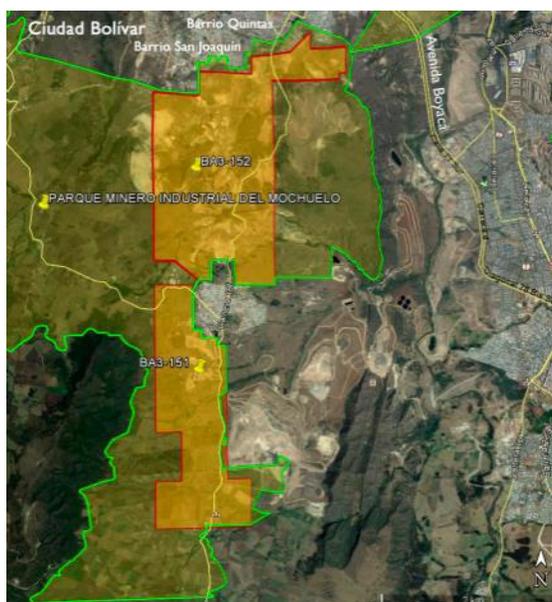
En la Figura 4 se observa el Parque Minero Industrial El Mochuelo, el cual posee dos certificaciones de registro minero otorgados por INGEOMINAS, las cuales se describen a continuación:

- Contrato de Concesión BA3- 152 para la extracción de minerales tipo arcilla cerámica. Área total: 303 hectáreas y 8736 m². Vigencia desde: julio 18 de 2007 hasta: julio 17 de 2037.

- Licencia de Explotación BA3-151 para la extracción de minerales tipo arcilla cerámica. Área total: 165 Hectáreas y 6324 m². Vigencia desde: Julio 18 de 2005 hasta: Julio 17 de 2015. (En proceso de adjudicación - contrato de concesión)

Figura 4

Polígonos asociados a los títulos mineros presentes en la vecindad de la zona de estudio de acuerdo al catastro minero.



Nota: Imagen tomada de: www.anafalco.com.co

Estas empresas mineras entran en conflicto con las pequeñas poblaciones de campesinos que en muchos casos no tienen voz, ya que estos emporios se van posicionando con la adquisición de predios y el poder económico desplazando a estas comunidades y cambiando o terminado con su cultura agraria.

Una de las consecuencias de las actividades mineras a cielo abierto es la alteración del ciclo hídrico, ya que al eliminar las coberturas vegetales y cambiar la topografía de la zona se ven afectados los equilibrios hídricos que estas zonas poseen, ya que el agua superficial y subterránea tiene menos área para su captación, los ecosistemas en donde se almacena y regula el

agua desaparecen o se ven severamente mermados y así la humedad relativa se ve también alterada afectando la cantidad y calidad de agua disponible en la zona.

Los sistemas hidrogeológicos son complejos y sumamente frágiles, y más en estas áreas que lindan con zonas xerofíticas que presentan déficit de agua disponible, los bosques y otras coberturas nativas típicas del bosque alto andino y de sub páramo han evolucionado y se han adaptado a las condiciones actuales en donde cuentan con una disponibilidad de agua suficiente pero limitada, que se ha visto afectada por fenómenos climáticos como el niño y la niña, pero que una vez pasan, recuperan su equilibrio, lo que no ocurriría si el territorio cambia su vocación rural - agraria por la minería.

Muchas poblaciones rurales dependen de pequeñas quebradas o microcuencas que ofrecen caudales bajos y sus unidades acuíferas son de poca importancia, pero para estas comunidades los cuerpos de agua son vitales ya que abastecen sus acueductos veredales; son puntos de hidratación para su ganado y son una alternativa de riego para sus cultivos, que en muchos casos son de pan coger ya que prevalecen los minifundios

Por lo anterior, esta investigación hace parte de una serie de estudios que busca entender las dinámicas bióticas y abióticas presentes en esta zona, para poder ofrecer a las entidades tomadoras de decisiones y a la comunidad, herramientas para hacer una planificación y uso del territorio de una manera sostenible y sustentable.

2. Objetivos

2.1 Objetivo General

Elaborar una caracterización hidrogeológica conceptual en la microcuenca de la quebrada Aguas Calientes, con la finalidad de poder determinar la influencia de la actividad minera a cielo abierto, en la dinámica de los nacimientos de agua presentes en la microcuenca de la quebrada Aguas Calientes, en la Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciudad Bolívar (Bogotá, Colombia).

2.2 Objetivos Específicos

- Realizar una caracterización geológica donde se identifica la geología de superficie y sub-superficie, en particular, busca definir el contacto roca – depósitos y delimitar las unidades geológicas y estructuras de deformación (pliegues – fallas).
- Elaborar una caracterización hidráulica donde se evalúen las propiedades hidráulicas de los materiales geológicos, orientada a determinar los rangos y distribución espacial de los parámetros hidráulicos, reflejo de las unidades hidrogeológicas.
- Hacer una caracterización hidrogeoquímica, en la que se comprenda con mayor certeza la dinámica de los fluidos y su interacción.
- Efectuar una caracterización hidrogeológica conceptual.
- Determinar el impacto hidrogeológico en los nacimientos presentes en la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes, como consecuencia de la actividad minera actual.

3.Marco Teórico

Los estudios hidrogeológicos son una herramienta para la planificación del territorio, que permiten calcular las reservas de agua subterránea que posee cierta región y determinar cómo es su gestión; estos estudios permiten conocer las diferentes unidades de acuíferos que se encuentran, así como sus características físicas y químicas, y los volúmenes que pueden contener.

“La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de almacenamiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y sus propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación”. (Mijailov, L., 1985, citado por Glok, M., 2015)

3.1 Modelo hidrogeológico conceptual

“Los recursos de aguas subterráneas no son yacimientos que se explotan hasta su agotamiento como p.ej. los yacimientos de petróleo. Más bien son sistemas hidrodinámicos recuperándose permanentemente como partes del ciclo hidrológico por ser recargados por agua de precipitación. Por eso el reconocimiento de la cantidad de *recarga* de sistemas hidrogeológicas es una de las tareas más importantes en la hidrogeología”. (Werner, J., 1996, p. 8)

Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de los ambientes internos, que presentan las unidades acuífero para determinar los equilibrios y movimientos que allí se presentan. Esta modelación incluye determinar la extensión y forma de los sistemas hidrogeológicos, basados en las unidades geológicas que los componen y sus propiedades hidráulicas, principalmente la capacidad que tiene de almacenar y transmitir agua

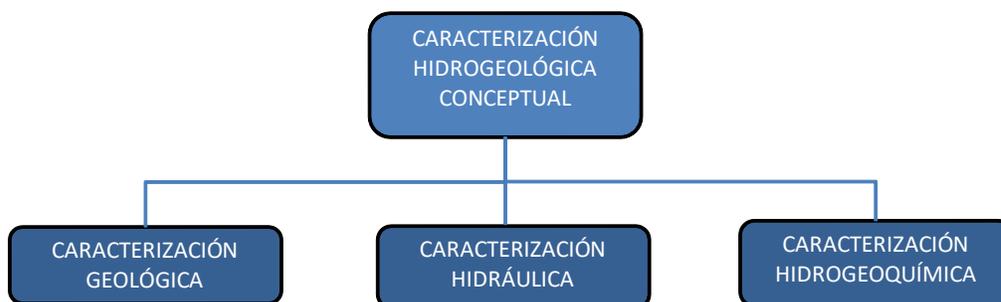
subterránea para determinar los tipos de acuíferos y la posición de los niveles piezométricos. Además, los estudios hidrogeoquímicos que pueden tener alcances isotópicos, indicarán los tipos y condiciones de flujos, los tiempos de tránsito; que combinado con factores ambientales como la precipitación, el uso del suelo y la topografía entre otros, determinarán las zonas de recarga, de tránsito y de descargas de los flujos subsuperficiales y subterráneos.

Desde un enfoque holístico, el Modelo Hidrogeológico Conceptual se realiza con base en el análisis e interpretación de información geológica, hidrológica, hidráulica, hidroquímica e isotópica, y permite tener una visión del comportamiento de los acuíferos o sistemas acuíferos de un área dada a la escala deseada.

El presente estudio tiene como objetivo la Caracterización Hidrogeológica Conceptual de la Quebrada Aguas Calientes; a continuación se presenta el flujograma planteado para el abordaje de la caracterización.

Figura 5

Flujograma Caracterización Hidrogeológica Conceptual



Fuente: El autor, (2020).

3.1.1. Caracterización hidrogeológica de la Microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes

La caracterización hidrogeológica conceptual consiste en el estudio descriptivo, basado en información primaria y secundaria, y datos cuantitativos y cualitativos de aspectos geológicos, hidráulicos e hidrogeoquímicos, con el objeto de aproximarse al conocimiento y comprensión de

las estructuras, características, dinámicas y movimientos de agua en el ciclo hidrogeológico presentes en el área de estudio.

Esta caracterización hidrogeológica conceptual está compuesta por tres modelos que son los siguientes: Modelo geológico, modelo hidráulico y el modelo hidrogeoquímico; los cuales se definen a continuación.

3.2 Modelo Geológico

El modelo geológico consiste en la representación bidimensional o tridimensional de las unidades geológicas o de un volumen de rocas en una determinada zona, describiendo las diferentes unidades de roca y depósitos sedimentarios que se identifican, representando la litología, mineralización, alteración u otro tipo de característica geológica del macizo rocoso (Naranjo, O., 2017).

3.3 Modelo Hidráulico

Se basa principalmente en dos factores propios de la roca que los conforman: Su capacidad de almacenamiento, de retener agua y después dejarla fluir (porosidad que está determinada por el volumen de agujeros o vacíos sobre el volumen total), y su capacidad de transmisión, o sea de permitir que el agua circule a través de la roca (permeabilidad o conductividad hidráulica K). (Mijailov, L., 1985). En este estudio nos centraremos en la hidráulica de las formaciones que hacen parte del Grupo Guadalupe y depósitos sedimentarios de origen coluvio-glaciar y aluvial, en donde se tendrá principalmente condiciones como la transmisividad y conductividad hidráulica.

3.4 Modelo Hidrogeoquímico

Estudia las propiedades físico-químicas del agua y su relación con el medio por el que transita, ya que durante el ciclo hidrológico el agua interactúa directamente con la biosfera; por lo anterior tiene correlación con la geología, la edafología y la biología principalmente.

Los estudios hidrogeoquímicos se basan principalmente en los aniones y cationes presentes en el agua subterránea y en los procesos de interacción agua-sólido-aire.

Con esta investigación se busca una aproximación al origen del agua presente en los nacimientos presentes en la cuenca de la quebrada Aguas Calientes, teniendo en cuenta la interacción de flujos subsuperficiales y subterráneos, aportando al conocimiento de ciclo hidrogeológico del sector, como ayuda base a la gestión integrada del agua, que conduzca a una buena planificación reflejada en la cantidad y calidad del agua disponible, así como la recuperación y mejoramiento de la conectividad ecológica, mediante bosques que permitan recuperar suelos degradados mejorando sus propiedades físicas y químicas, que se debe manifestar en un ciclo del agua más eficiente y con mejor disposición de agua no sólo para uso doméstico y agropecuario, sino para la fauna y flora asociada a este tipo de ecosistemas.

3.4.1 Quebrada Aguas Calientes: Caracterización de condiciones hidrológicas

“La acción de los glaciares en el Pleistoceno durante la última glaciación alcanzó la cota 3.000 m.s.n.m., experimentándose un clima frío y húmedo hacia el 40.000 AP. A partir de allí, se presenta un periodo de intenso frío (28.000-24.000 A.P). Un descenso continuo de las precipitaciones determina un clima frío pero muy seco donde los glaciares retroceden a los 3.500 m.s.n.m. A partir de entonces, un aumento en la temperatura hace desaparecer los glaciares por completo hacia el comienzo del Holoceno en el 10.000A.P.”. (IDEA, 2005, citado en Conservación Internacional Colombia y Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá, s.f., p. 2-18.).

“El clima frío y algo seco experimentado desde la Colonia, sumado a la pérdida de coberturas y la modificación de los patrones depositacionales así como los factores climáticos y antrópicos señalados, condicionaron un descenso acelerado del nivel freático durante la Colonia y la República; Van der Hammen agrega que a partir de los años 50 aumentó la explotación de aguas subterráneas que agravó la situación.”. (Ibíd., p. 2- 19)

La Quebrada Aguas Calientes pertenece a la microcuenca Yerbabuena, que es una cuenca endorreica que a su vez vierte sus aguas al Río Tunjuelo, el cual presenta un flujo subterráneo que se moviliza en dirección SO-NE, actuando el río Tunjuelito como colector principal, con un gradiente hidráulico aproximado de 0.001.

Figura 6

Mapa Microcuenca Yerbabuena y delimitación del área de estudio



Nota: Mapa Microcuenca Yerbabuena delimitado en color rojo; área de estudio delimitada en círculo color verde. Fuente: Sistema de Información Geográfica del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis y el autor, (2020).

En la figura 6 se observa cómo la Quebrada Aguas Calientes (o Mochuelo) nacía y tenía cauce desde la parte alta del polígono; actualmente esto no sucede y los nacedores de agua se encuentran exclusivamente en la zona de estudio.

Toda esta zona drena las aguas superficiales hacia el oriente de la ciudad, el cauce de la Quebrada Aguas Calientes se une al de la Quebrada Yerbabuena la cual atraviesa el Relleno Sanitario Doña Juana y finalmente vierte sus aguas al Río Tunjuelo. Actualmente esta quebrada surte el Acueducto veredal, el cual tiene más de 2.000 usuarios y provee agua a los habitantes del casco urbano de Mochuelo Bajo.

3.4.2 Precipitación

La zona de estudio posee un régimen de estaciones bimodal en la que se presentan dos estaciones de lluvia: el primero en los meses de marzo a mayo y el segundo de octubre a noviembre intercalados con dos períodos de pocas lluvias.

Al comportamiento de las lluvias a lo largo del año se le denomina régimen pluviométrico y se determina promediando la cantidad de precipitaciones medidas a lo largo del tiempo. (Datos de precipitación suministrados por Empresa de Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá – SIH Sistema de Información Hidrológica, estación Quiba 20205, Latitud $4^{\circ}32'$ - Longitud $74^{\circ}11'$, elevación 3.000 msnm.)

A continuación se presenta en la tabla 1, los datos de precipitación de la estación Quiba, para el periodo 1990-2020.

Tabla 1*Datos de precipitación estación Quiba, periodo 1990-2020*

Año	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre	Anual
1990	20,3	46,8	39,9	58,7	110,8	36,1	35,3	7,9	21,9	125,2	55,2	86,2	644,3
1991	7,5	21,7	150,8	65,2	110,5	35,7	35,3	56,3	62,4	23,5	85	74,9	728,8
1992	26,3	19,6	20	43,6	55,9	25,4	50,8	56	40,1	22,4	89,7	19,3	469,1
1993	46,6	22,4	23,7	80,1	98,8	37,1	28,6	18,8	51	70,2	119	9,9	606,2
1994	37,7	43,5	77	57,6	109,3	46,3	60,8	47,8	37,1	70,9	129,2	9,5	726,7
1995	1,8	8,3	59,1	91,5	87	49,6	41,6	64,6	25,4	67,5	70,6	94,7	661,7
1996	43,5	59,8	105,9	70	44,2	35,6	49,8	41,2	40,9	96,4	58,1	28	673,4
1997	33	39,9	29,3	60	41,4	67,1	55	24,6	39,1	59,7	30,8	0,9	480,8
1998	0,1	17,6	50,1	31,1	193,2	48,6	83,2	42,7	44,3	77	40	82,6	710,5
1999	26,7	64,2	56,8	72,4	78,3	45,9	21,7	48,3	99,5	59,1	71,6	33,3	677,8
2000	21,8	87,4	96	44,2	80,1	55,3	46,4	62,4	59,5	77,3	62,8	32,6	725,8
2001	5,3	40,4	64,6	17,2	82,6	57,3	44,6	25,9	82,4	29,6	50,3	53,6	553,8
2002	18	13,1	48,6	121,9	110,2	120,9	32,7	47,9	41,3	85,5	58,6	39,8	738,5
2003	3,9	17,7	75,5	92,9	32,1	44,7	56,9	25,3	44,1	103,6	151,9	35	683,6
2004	5,4	54,6	35,9	99,1	100	90,2	52,3	68,3	78,6	165,1	93,3	20,3	863,1
2005	18,7	43,1	39,2	84,7	226,7	64,1	38,5	35,2	82,4	122,2	31,7	53,8	840,3
2006	65,5	3,1	102,6	134,6	90	99	47,1	30,9	19,8	97,7	67	23,5	780,8
2007	5,2	4,4	40	123,2	55,1	76	51,2	74,1	12,2	149,4	38,5	96,5	725,8
2008	9,8	89,7	84,7	109,7	146,4	108,3	95,9	98,3	62,3	148,7	100,7	19,6	1074,1
2009	38,3	40,2	44,8	70	27,4	52,1	39,6	38,4	31,1	113,8	58,7	16,5	570,9
2010	10,3	42,7	29,2	182	137,7	81	142,7	31,6	67,1	122,2	189,5	11	1047
2011	18,6	56,2	64,3	150,2	142,4	54,2	66	36,7	28,4	74,1	104,1	73,9	869,1
2012	35,7	27,9	127	146,2	23,8	37,5	48	52,6	18,3	116,2	49,6	34,2	717
2013	1,5	69,5	68,9	76,3	90,6	41,6	59,8	51,6	39	54,4	95	61,2	709,4
2014	33,5	50	51,7	62,4	37,4	81,2	83,8	47,4	32,8	56,4	93,9	63,2	693,7
2015	30,4	24,2	75	36,5	35,7	115,6	98,7	33	38,2	101,7	35,9	1,4	626,3
2016	11,6	14,7	109,2	125,1	298,6	34,8	49,4	42,9	78,1	68,2	114,2	72,7	1019,5
2017	51,3	52,5	158,6	43,9	120,4	100	36,7	102	19,4	75,5	91,1	55,2	906,6
2018	31,1	28,1	86,4	142	114,2	48,6	75,2	58,9	23,8	51	39	1,5	699,8
2019	13,9	28,4	44,6	152,1	78,5	61,8	58,4	54,6	50,2	30,2	107,7	23,1	703,5
2020	45,9	42,1	57,8	48,2									194
MED	23,2	37,9	68,3	86,9	98,6	61,7	56,2	47,5	45,7	83,8	79,4	44,2	733,4
MAX	65,5	89,7	158,6	182	298,6	120,9	142,7	102	99,5	165,1	189,5	110	298,6
MIN	0,10	3,10	20,00	17,20	23,80	25,40	21,70	7,90	12,20	22,40	30,80	0,90	0,10

Fuente: Datos de precipitación suministrados por Empresa de Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá – SIH Sistema de Información Hidrológica, estación Quiba 20205, Latitud 4°32' - Longitud 74°11', elevación 3.000 msnm. (Información suministrada mediante oficio en el año 2020).

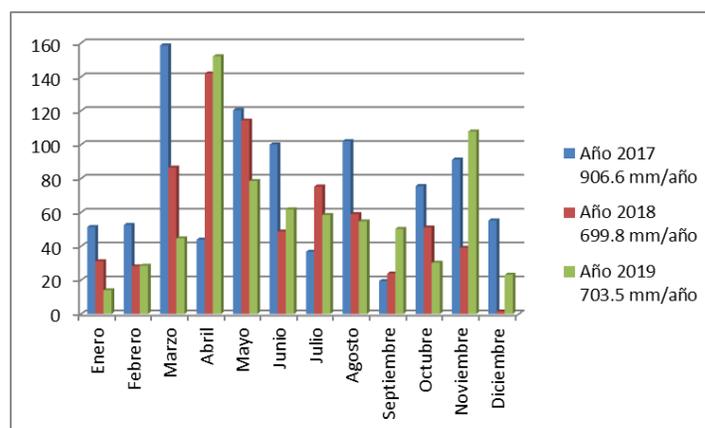
Basados en los datos para el periodo 1990-2020, esta zona tiene una precipitación promedio anual de 733.4 mm/anales, con dos periodos en donde se incrementan las lluvias entre abril – mayo y octubre- noviembre, y en los meses de diciembre y enero se presenta el fenómeno de heladas. En lo corrido del año 2020 se han presentado heladas en los meses de enero, febrero y marzo; el periodo septiembre - octubre se caracteriza por presentar fuertes vientos.

En la tabla de precipitación se observa la variación en la cantidad de precipitación en Bogotá – Estación Quiba, en esta zona las variaciones de precipitación promedio, han cambiado bastante; la precipitación más baja fue en enero de 1998 de 0.1 mm/mes, mientras que la mayor fue de 295.6 mm/mes en mayo de 2016.

La siguiente gráfica presenta la relación mensual de en mm/mes de los años 2017, 2018 y 2019, estación Quiba.

Figura 7

Relación mensual de lluvia en mm/mes de los años 2017, 2018 y 2019. Estación Quiba



Fuente: El autor, (2020).

Haciendo un comparativo de la cantidad de lluvia registrada en mm/mes de los años 2017, 2018 y 2019, podemos observar cómo la cantidad de lluvia varía moviendo la temporada de lluvias y su cantidad.

3.5 Ecosistemas

El Jardín Botánico de Bogotá suscribió el contrato JBB 576-2015 cuyo objeto era “Caracterización florística y estructural, y la identificación de comunidades vegetales en las áreas priorizadas para la conservación de la flora en Bogotá D.C. y la región” (Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, 2016, b), realizado por el biólogo Diego Mauricio Cabrera Amaya; en esta investigación se incluyó la zona de estudio y por ende se tomó la información correspondiente a la Microcuenca Quebrada Yerbabuena.

Para la Microcuenca Quebrada Yerbabuena se delimitaron las diferentes unidades de paisaje como son: Arbustal abierto esclerófilo, Arbustal abierto mesófilo, Arbustal denso,

Arbustal denso ripario, Bosque denso, Herbazal denso subxerofítico, Mosaico de pastos y cultivos, Pajonal frailejona, Plantación forestal de coníferas, Plantación forestal de latifoliadas, Rellenos sanitarios, Reservorios de agua, Tejido urbano continuo y Tierras desnudas y degradadas. De esta microcuenca no se dispone información de cobertura de la tierra para la totalidad del área. En este sector se encuentra ubicado parte del Relleno Sanitario Doña Juana, y también funcionan varias minas, canteras y fábricas de ladrillo agremiadas bajo la asociación ANAFALCO.

3.5.1 Coberturas vegetales

Se estableció que las coberturas de vegetación abarcan 460 ha en el área de estudio, de las cuales el 43,7% corresponden a Mosaicos de Pastos y Cultivos, 26,6% a Rellenos sanitarios, 18,9% a Arbustal denso, 3% a Arbustal abierto mesófilo y 2% a Plantación forestal de latifoliadas. La cobertura de Bosque denso cubre tan solo el 1,8%.

En la siguiente tabla se observa la proporción de área de las coberturas vegetales naturales y seminaturales en la Microcuenca Quebrada Yerbabuena. Interpretación de ortofoto (Correa 2009).

Tabla 2

Proporción de área de las coberturas vegetales naturales y seminaturales en la Microcuenca Quebrada Yerbabuena. Interpretación de ortofoto (Correa 2009)

Proporción de área de las coberturas vegetales naturales y seminaturales en la Microcuenca Quebrada Yerbabuena		
Cobertura	Área (há)	% Área
Arbustal abierto esclerófilo	2,2	0,48%
Arbustal abierto mesófilo	14,09	3,06%
Arbustal denso	87,03	18,91%
Arbustal denso ripario	3,09	0,67%
Bosque denso	8,07	1,75%
Herbazal denso subxerofítico	0,56	0,12%
Mosaico de pastos y cultivos	201,15	43,71%
Pajonal frailejonal	0,33	0,07%
Plantación forestal de coníferas	2,53	0,55%
Plantación forestal de latifoliadas	9,65	2,10%
Rellenos sanitarios	122,21	26,56%
Reservorios de agua	0,06	0,01%
Tejido urbano continuo	8,04	1,75%
Tierras desnudas y degradadas	1,14	0,25%
Total	460,16	100,00%

Fuente: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, (2016, a), p.43.

3.5.2 Análisis general de riqueza

3.5.2.1 Riqueza taxonómica.

En la microcuenca Quebrada Yerbabuena se han registrado 88 especies, repartidas en 71 géneros y 39 familias; 78 morfoespecies corresponden a angiospermas y 6 a monilófitos (pteridófitos sensu stricto). Las familias de plantas más ricas fueron: *Asteraceae* (15), *Orchidaceae* (11), *Poaceae* (10), *Rosaceae* (5), *Bromeliaceae* (3), *Ericaceae* (3), *Piperaceae* (3), *Aspleniaceae* (2), *Melastomataceae* (2), *Polypodiaceae* (2), *Solanaceae* (2). Los géneros con

mayor riqueza de especies fueron: *Ageratina* (3), *Epidendrum* (3), *Peperomia* (3), *Tillandsia* (3), *Asplenium* (2), *Gomphichis* (2), *Hesperomeles* (2), *Hypochaeris* (2).

La única familia de líquenes registrada hasta el momento ha sido *Parmeliaceae* con dos especies de los géneros *Hypotrachyna* y *Usnea*.

3.5.2.2 Riqueza por cobertura.

La cobertura con el mayor número de especies de plantas hasta el momento en la microcuenca Quebrada Yerbabuena es Arbustal abierto mesófilo.

Tabla 3

Riqueza taxonómica de plantas y líquenes en la Microcuenca Quebrada Yerbabuena (Ciudad Bolívar, Bogotá)

Reino	División	Clase	Familia	Género	Especie	
Plantae	Bryophyta	Bryopsida	2	2	2	
	Monilophyta	Polypodiopsida	4	5	6	
	Magnoliophyta		Magnoliidae	1	1	3
			Eudicotyledoneae	26	42	49
			Monocotyledoneae	5	19	26
		Total Magnoliophyta		32	62	78
	Total Plantae		38	69	86	
Fungi	Ascomycota	Lecanoromycetes	1	2	2	
	Total Fungi		1	2	2	
	Total general		39	71	88	

Fuente: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, (2016, a), p.44.

Tabla 4*Riqueza por cobertura en la microcuenca Quebrada Yerbabuena*

Riqueza por cobertura en la Microcuenca Quebrada Yerbabuena			
Cobertura	Familia	Género	Especie
Arbustal abierto esclerófilo	12	17	22
Arbustal abierto mesófilo	32	49	55
Arbustal denso	7	8	9
Bosque denso	1	3	3
Total general	39	71	88

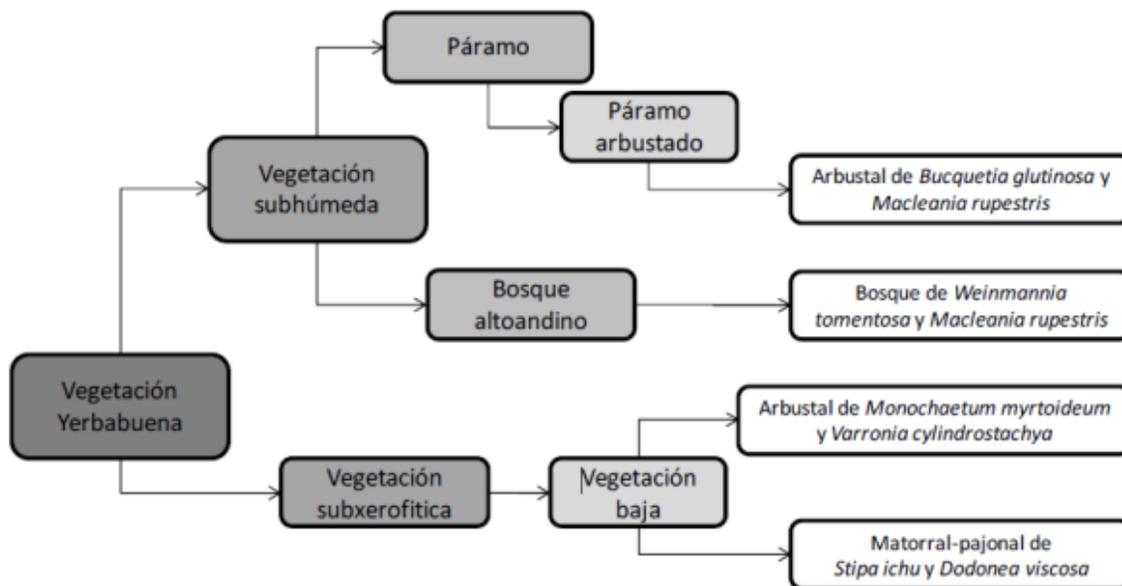
Fuente: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, (2016, a), p.45.

3.5.3 Análisis de clasificación

El análisis de especies indicadoras (IndVal) llevado a cabo para cada uno de los niveles de división del análisis de clasificación, muestra que el nivel de división con el menor promedio de valor de significancia (p-valor) es el nivel 5. De esta forma se obtienen 7 comunidades vegetales la microcuenca río Tunjuelito, quebrada la Orqueta, quebrada Mochuelo y quebrada Yerbabuena. Las comunidades vegetales. Para la vegetación de la microcuenca quebrada Yerbabuena, la vegetación se encuentra agrupada en tres bloques: vegetación subxerofítica, bosque altoandino y páramo, dentro de los cuales aparecen 4 comunidades como se observa en la figura 8.

Figura 8

Dendrograma de la clasificación de la vegetación en la microcuenca Quebrada Yerbabuena (Ciudad Bolívar, Bogotá).



Fuente: Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, (2016, a), p.45.

La vegetación subxerofítica presenta especies como *Dodonaea viscosa* y *Morella parvifolia* en el estrato arbustivo, y *Varronia cylindrostachya* y *Miconia squamulosa* en el estrato arbóreo. Está representada por arbustales de 3 m y matorrales de 1,5 m.

Dentro de la vegetación subhúmeda se puede encontrar la vegetación de bosque altoandino y el páramo. El bosque altoandino presenta una mayor proporción de árboles, los cuales forman una cobertura continua o dosel a nivel del estrato arbóreo. Presenta elementos arbustivos dispersos en el sotobosque en donde *Weinmannia tomentosa* es la especie dominante.

El páramo hace referencia aquella vegetación de porte bajo en donde hay una cobertura continua a nivel de los estratos rasante y herbáceo, y donde los estratos arbustivo y arbóreo presentan una muy baja cobertura o no existen. Presenta una combinación de elementos herbáceos (hierbas, rosetas y caulirrósulas) y leñosos (subarbustos y arbustos) en diferentes

proporciones según las condiciones del terreno. En esta microcuenca sólo está representado por el páramo arbustivo, el cual presenta una mayor proporción de subarbustos y arbustos bajos de las familias Ericaceae (*Macleania rupestris*) y Melastomataceae (*Bucquetia glutinosa*), en donde la densidad de macollas y caulirrósulas es baja.

3.5.4 Descripción de las comunidades

Matorral-pajonal de *Stipa ichu* y *Dodonaea viscosa*. Especies más abundantes: *Stipa ichu*, *Dodonaea viscosa*, *Tillandsia* sp.03, *Lantana boyacana*, *Duranta mutisii*. Especies indicadoras: *Lepidium bipinnatifidum*, *Stipa ichu*, *Piptochaetium panicoides*, *Aegopogon cenchroides*, *Chromolaena leivensis*. Formas de crecimiento dominantes: hierbas (macoyas), subarbustos y arbustos. Estratos con mayor cobertura: herbáceo y rasante. Distribución: sector bajo de la vereda Mochuelo Bajo, en la zona de las ladrilleras.

Arbustal de *Monochaetum myrtoideum* y *Varronia cylindrostachya*. Especies más abundantes: *Muehlenbeckia tamnifolia*, *Monochaetum myrtoideum*, *Varronia cylindrostachya*, *Dodonaea viscosa*, *Cavendishia bracteata*, *Morella parvifolia*. Especies indicadoras: *Muehlenbeckia tamnifolia*, *Gamochaeta* sp.01, *Poaceae* sp.02, *Cynanchum tenellum*, *Berberis rigidifolia*, *Rhynchospora nervosa*, *Masdevallia* sp.01, *Cyclopogon* sp.01, *Cestrum buxifolium*, *Chromolaena bullata*, *Cuphea ciliata*. Formas de crecimiento dominantes: subarbustos y arbustos. Estratos con mayor cobertura: arbustivo y herbáceo. Distribución: en inmediaciones de la Piedra del Mohán, límites entre las veredas Quiba Alta y Mochuelo Bajo, alrededor de 3000 msnm.

Bosque de *Weinmannia tomentosa* y *Macleania rupestris*. Especies más abundantes: Especies indicadoras: *Weinmannia tomentosa*, *Macleania rupestris*, *Viburnum tinoides*. Formas de crecimiento dominantes: Arbustos y árboles. Estratos con mayor cobertura: Arbóreo y

arbustivo. Distribución: en la vereda Quiba Alta sobre márgenes de la quebrada Yerbabuena y en la falda del Cerro del Gavilán por debajo de 3300 msnm.

Arbustal de *Bucquetia glutinosa* y *Macleania rupestris*. Especies más abundantes:

Calamagrostis effusa, *Diplostephium rosmarinifolium*, *Clethra fimbriata*, *Gaultheria*

anastomosans, *Gaiadendron punctatum*, *Macleania rupestris*. Especies indicadoras:

Gaiadendron punctatum, *Gaultheria anastomosans*. Formas de crecimiento dominantes:

Arbustos y árboles. Estratos con mayor cobertura: arbustivo y herbáceo. Distribución: sobre las cumbres del Cerro del Gavilán en las veredas Mochuelo Bajo y Quiba Alta, por encima de 3300 msnm (Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, 2016, b).

4. Marco Metodológico

Esta investigación se desarrolla bajo el método científico, basado en revisión, análisis y generación de información geológica, hidráulica e hidroquímica base para el desarrollo de la caracterización hidrogeológica conceptual.

La metodología para el desarrollo de este estudio se dividió en 4 fases sistemáticas, que se presentan a continuación:

1. Fase preliminar de colecta y procesamiento de la información:

Etapa heurística: Muestra el estado del arte, proporcionando una visión general sobre las investigaciones y líneas que han sido abordadas por varios autores en el tema. Esta etapa se realizó a partir de la recopilación e investigación de fuentes primarias (artículos, disertaciones, tesis, trabajos presentados en eventos, libros, informes científicos), y fuentes secundarias de información (bases de datos, diccionarios, artículos indexados, resúmenes y catálogos).

Etapa hermenéutica: consistió en clasificar, analizar e interpretar las diferentes fuentes bibliográficas consultadas, permitiendo sistematizar la información disponible basado en el desarrollo de conocimientos teóricos sobre interpretación de modelos geológicos, hidráulicos e hidroquímicos base para la caracterización hidrogeológica conceptual.

2. Fase de campo:

Previamente definida la metodología a emplear, en esta etapa se desarrolló el trabajo de campo, asociado a la elaboración del modelo geológico e hidroquímico, donde se desarrolló la cartografía geológica, levantamiento de columnas estratigráficas, toma de muestras de roca y agua para análisis de laboratorio.

3. Fase de Análisis de laboratorio:

Se realizaron análisis petrográficos para muestras de roca de la Formación Pleaners (Ksgp), así como análisis hidroquímicos para muestras de agua representativas de nacimientos de agua, presentes en la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes.

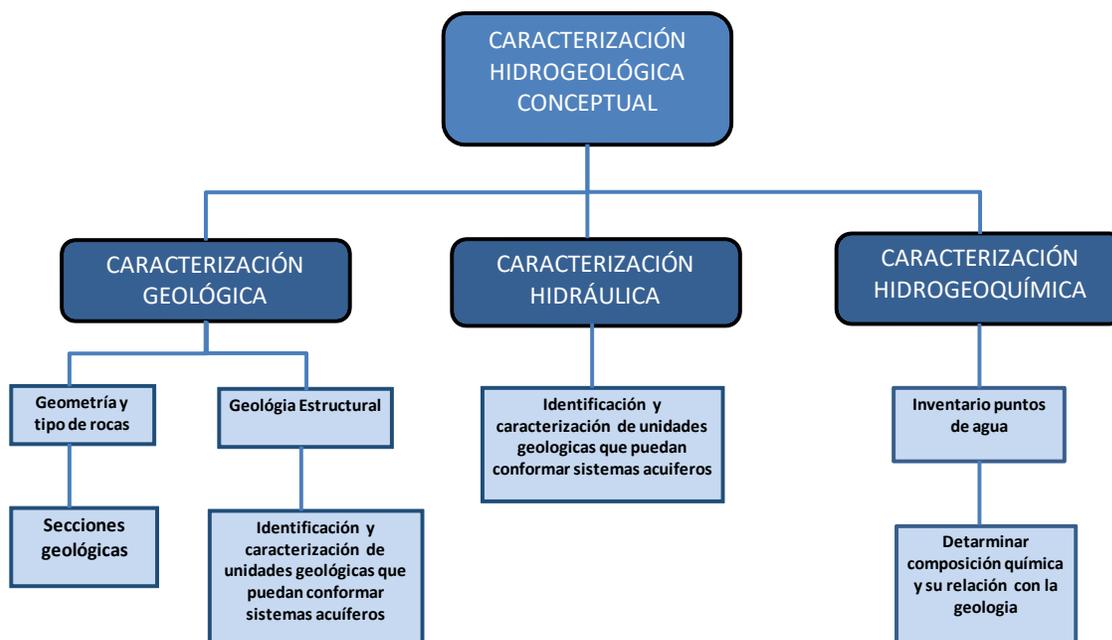
4. Fase de Análisis de resultados y caracterización hidrogeológica conceptual:

Se elaboraron modelos de insumo relacionados con caracterización geológica, hidráulica e hidroquímica, como base e insumo para la caracterización hidrogeológica conceptual que represente la dinámica de aguas subterráneas en el área de estudio.

En la Figura 9 se presenta la síntesis metodológica utilizada en la elaboración de la caracterización hidrogeológica conceptual a partir del desarrollo de los modelos de insumo.

Figura 9

Diagrama de flujo de la Caracterización Hidrológica Conceptual



Fuente: El autor, (2020).

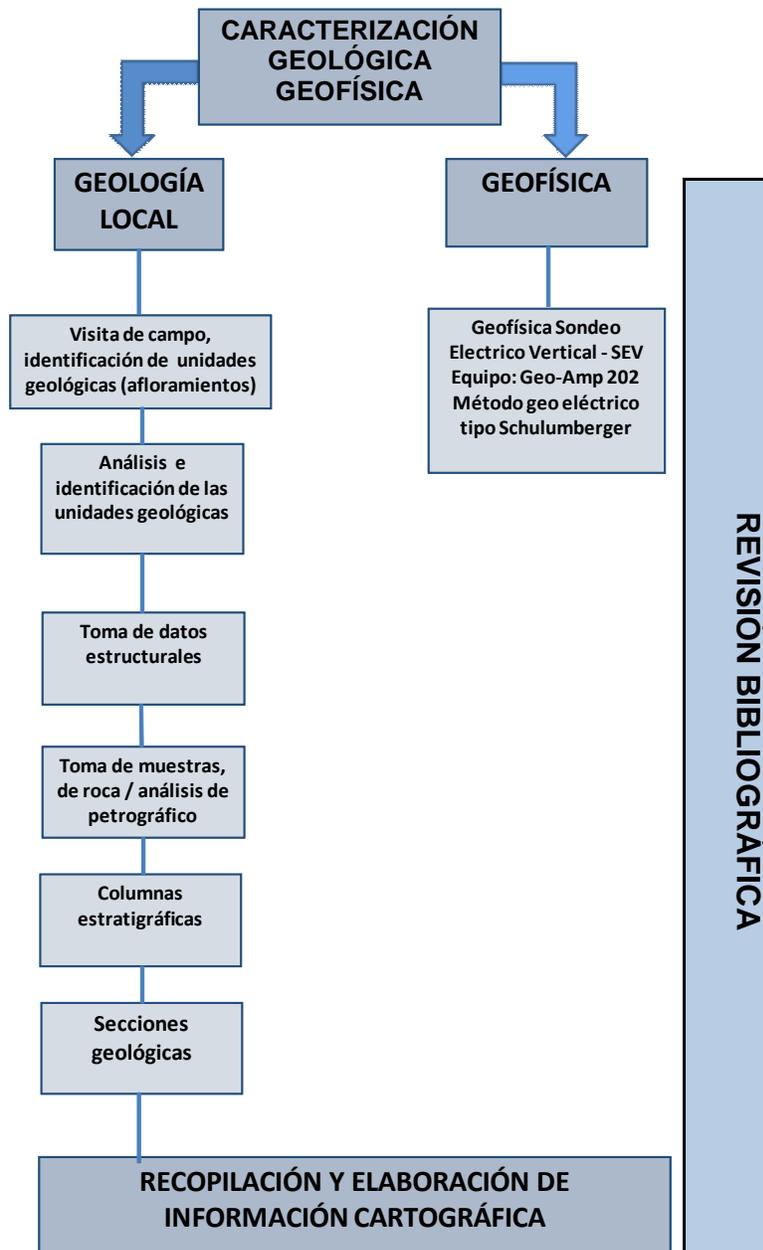
4.1 Caracterización Geológico - Geofísico

La caracterización geológica que se observa en la Figura 10 es una representación bidimensional de la geología de la zona de estudio, en donde cada unidad geológica que contiene la caracterización, incluye las características litológicas y físicas.

Esta caracterización se basa en información cartográfica y estratigráfica, levantada por el Servicio Geológico Colombiano, e información primaria obtenida en campo y en laboratorios. Las diferentes etapas, procesos y metodologías se describen en los flujogramas respectivos.

Figura 10

Diagrama de flujo de la Caracterización Geológica



Fuente: El autor, (2020).

Basados en el flujograma de la caracterización geológica geofísica observamos que, la información primaria de este estudio se realizó en visitas de campo, en donde se actualizó la

cartografía geológica basados en caracterización de afloramientos rocosos y reconocimiento geomorfológico, donde se realizó la descripción litológica y toma de datos estructurales basados en la información del Servicio Geológico de Colombia, además de recolectar muestras para su análisis en laboratorio de secciones delgadas y finalmente localizar los mejores sitios para el desarrollo de Sondeos Eléctricos Verticales en la parte baja de la zona de estudio.

4.1.1 Materiales y Técnicas:

En este estudio se emplearon diversas técnicas y equipos básicos y necesarios para el trabajo geológico en las fases de trabajo en campo, laboratorios y análisis de información.

Rumbo y buzamiento: En la fase de campo y una vez identificados los afloramientos rocosos a investigar, se tomaron datos estructurales (rumbo y buzamiento) de cada una de las unidades geológicas estudiadas; para esta labor se utilizó una brújula geológica.

En la Figura 11 se observa la toma de datos estructurales de los afloramientos investigados, para lo cual se usó una brújula geológica.

Figura 11

Determinación y toma de datos estructurales (rumbo y buzamiento de las unidades geológicas)



Fuente: El autor, (2020).

Determinación de coordenadas geográficas: Para la toma de estos datos se usará un GPS Garmin GPSMAP 64S, en el trabajo de campo se usó para determinar las coordenadas geográficas y altitud msnm de los afloramientos y nacimientos de agua estudiados.

En la Figura 12 se observa la calibración satelital y uso del GPS utilizado.

Figura 12

Calibración de equipo para determinación de coordenadas geográficas y toma de coordenadas geográficas.



Nota: La imagen izquierda corresponde a la calibración de equipo para la determinación de coordenadas geográficas; la imagen derecha corresponde a la toma de coordenadas geográficas.
Fuente: El autor, (2020).

Para determinar las dimensiones de altura de los afloramientos rocosos y como se observa en la Figura 13, se usó un Hipsómetro electrónico laser, "Trupulse 200 bluetooth", el cual sirve para medición de distancias, pendientes y alturas, rango distancia horizontal 1000m (2000m a objetivos reflectantes), precisión 0,30 m, medición de pendientes $\pm 90^\circ$, precisión $0,25^\circ$, conexión bluetooth.

Figura 13

Medición de alturas de los afloramientos rocosos con hipsómetro



Fuente: El autor, (2020).

Se realizaron análisis granulométricos y de composición litológica de las muestras de roca recolectadas, como se observa en la Figura 14, las muestras fueron llevadas al laboratorio de la Subdirección Científica del Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis para ser observadas en Estéreo Microscopio - Referencia: SMZ-171 Bled. Marca: Moticbled (Pole Type) El estéreo microscopio SMZ-171 imágenes estereoscópicas de 7.5X a 50X con una distancia de trabajo estándar de 110mm.

Figura 14

Análisis de muestras de roca en Estéreo Microscopio



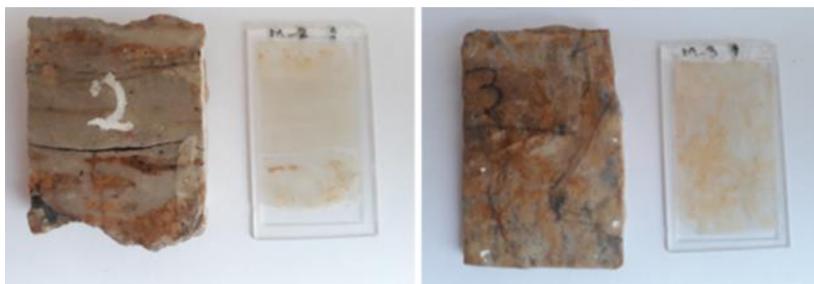
Fuente: El autor, (2020).

4.1.2 Secciones delgadas

De los afloramientos rocosos número 3 y 4 se realizó el análisis petrográfico de secciones delgadas como se observa en la Figura 15, estas secciones fueron enviadas a los laboratorios de Geología de la Universidad Nacional de Colombia para determinar la composición mineral de las rocas presentes en estos puntos.

Figura 15

Muestras de roca para análisis de sección delgada correspondientes a los afloramientos 3 y 4.



Fuente: El autor, (2020).

4.1.3 Prospección Geoeléctrica

La aplicación de un método geofísico dentro de un estudio hidrogeológico se hace imprescindible, ya que mediante técnicas eléctricas enfocadas hacia las geociencias permite determinar a profundidad la existencia de acuíferos y las características litológicas de este, aplicando una correlación de resistividades eléctricas que permite determinar la configuración espacial de las capas en el subsuelo, y poder establecer así el sitio con condiciones geológicas e hidrogeológicas óptimas, para realizar una perforación de tipo exploratoria.

Con el desarrollo de este capítulo se presentará la interpretación técnica de dichos sondeos, obteniendo así el juego de curvas de resistividad para cada sondeo eléctrico y generar la respectiva caracterización geológica geofísica, en donde se aprecie el comportamiento geofísico de cada litología a profundidad y poder asociarlo dependiendo el valor de resistividad obtenido a una unidad hidrogeológica determinada.

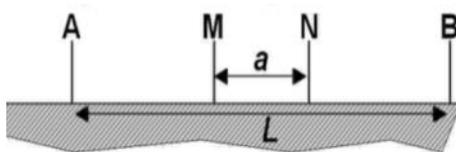
Por último, una correlación lito-geofísica de los tres sondeos eléctricos, identificando estratificación a profundidad de los estratos anteriormente definidos, para determinar así continuidad horizontal de los estratos, o si se presentan pinchamientos (pinch out) y si se presentan estructuras hidrogeológicas de interés a nivel regional.

4.1.3.1 Método Geoeléctrico Tipo Schlumberger.

El sondeo eléctrico vertical genera información necesaria para la determinación de los cambios verticales de las propiedades geoeléctricas del subsuelo, como se observa en las Figuras 16 y 17 este método consiste en que, a través de un par de electrodos de cobre o impolarizables AB, hacer fluir corriente eléctrica continua al subsuelo desde una fuente artificial o batería, este fluido eléctrico es recibido por otro par de electrodos de cobre o impolarizables MN colineales con AB, mide la diferencia de potencial eléctrico entre ambos (Orellana, E., 1982).

Figura 16

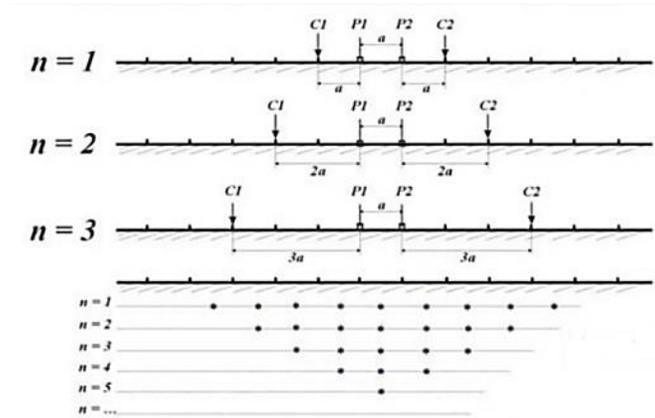
Arreglo Schlumberger, los electrodos de corriente AB se alejan una distancia (L), mientras que los de potencial MN se quedan fijos



Nota: Tomado de Orellana, E., (1982).

Figura 17

Arreglo Schlumberger en donde a =separación de electrodos, n =nivel de medición, $C1$ y $C2$ =electrodos de corriente, $P1$ y $P2$ =electrodos de potencial



Nota: Tomado de Orellana, E., (1982).

Este sistema tiene la ventaja de que la señal y la profundidad de investigación es buena, en los extremos su cobertura es pobre, debido a la menor cantidad de mediciones en la construcción de una rejilla (Figura 17), no se recomienda para estudios tridimensionales (Urbieta, J., 2009).

Figura 18

Equipo para realizar Sondeo Eléctrico Vertical



Fuente: El autor, (2020).

Dado el dispositivo Schlumberger AM-NB con $AB \gg MN$, el sondeo consiste en separar progresivamente los electrodos inyectoros A y B dejando los electrodos detectores M y N fijos

en torno a un punto central fijo P (Figura 19). La representación de este sondeo muestra en ordenadas Ra (Wm) y en abscisas la distancia AB/2 (m). Los electrodos A y B se abren progresivamente mientras M y N están fijos. Cuando la distancia AB se hace tan grande que la diferencia de potencial MN es muy chica, entonces se mueven M y N, de modo que el intervalo b se hace suficientemente mayor -y por lo tanto también mayor la diferencia de potencial- y se recomienza a abrir A y B progresivamente, pero siempre repitiendo un par de puntos comunes a dichos empalmes. El método de cálculo es tal que da siempre resultados de ρ consistentes. (Sánchez, F, 2016).

Características técnicas del equipo:

Tabla 5

Características técnicas del equipo usado para SEV

Nombre del equipo	Geo-Amp 202
Longitud de AB	600 metros
Longitud de MN	200 metros
Fuente de alimentación	12 voltios DC
Voltaje de salida	200 voltios
Corriente de salida Max	2.5 Amperios

Fuente: Sebastián Alvarado. Geólogo, (2020).

Figura 19

Realización del Sondeo Eléctrico Vertical



Fuente: El autor, (2020).

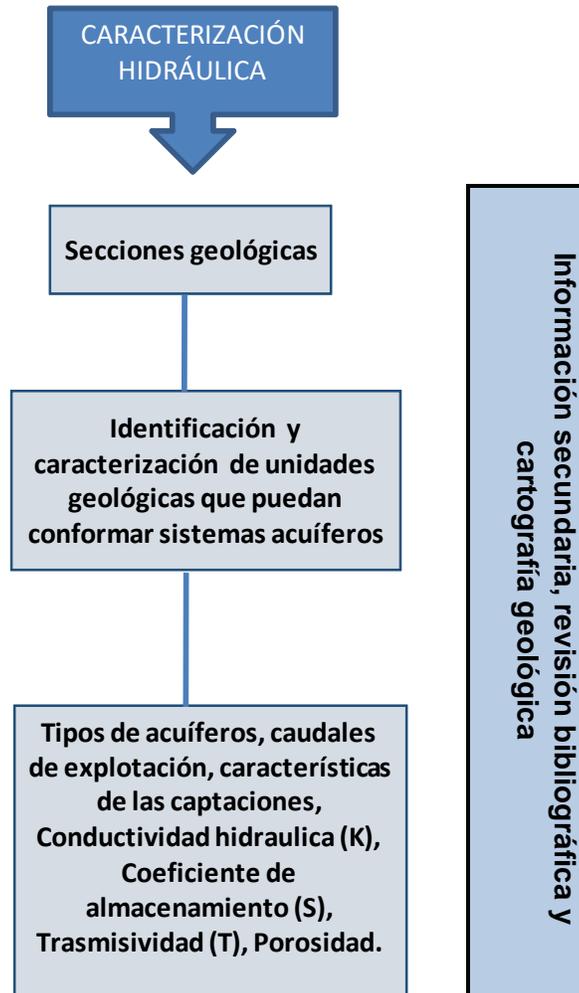
Una vez se obtengan los resultados, estos se procesarán con el programa IPI2WIN, que es un programa de distribución libre que sirve para obtener la caracterización de cualquier suelo multiestratificado a partir de varios métodos de medición, entre ellos los clásicos métodos de Wenner o Schlumberger, y tiene la ventaja de poder hacer ajustes manuales, después del proceso de ajuste de curvas automático.

4.2 Caracterización Hidráulico

La caracterización hidráulica tiene como fin conocer las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas presentes en el área de estudio, para determinar si estas unidades almacenan agua o si se comportan como confinantes frente a la transmisión del agua subterránea. La mayoría de estos parámetros se obtienen a partir de tablas, en donde basados en las propiedades físicas y químicas de las rocas se relacionan los valores aproximados de las propiedades hidráulicas como conductividad hidráulica (K), coeficiente de almacenamiento (S) y la transmisividad (T) entre otros.

Figura 20

Diagrama de flujo de la Caracterización Hidráulica



Fuente: El autor, (2020).

Como se observa en el flujograma, la información primaria de este estudio en la que se basa la caracterización hidráulica, se realizó en visitas de campo en donde se identificaron los tipos de roca presentes en el área de estudio, inventarios de puntos de agua y la identificación de tipos de acuíferos que emanan en la zona.

4.2.1 Materiales y Técnicas

Para esta caracterización se hizo consulta bibliográfica, para determinar los valores hidráulicos de las unidades geológicas representativas del área de estudio.

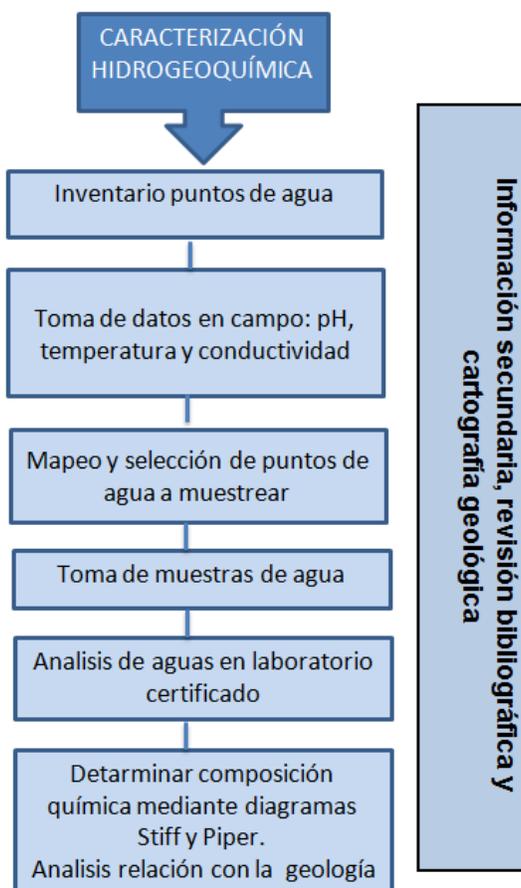
4.3 Caracterización Hidrogeoquímica

La caracterización hidroquímica, nos brinda información de gran importancia para analizar y estudiar las aguas existentes en la zona de estudio, ya que nos puede decir cómo fue su origen, como es su tránsito y el tiempo de las aguas subterráneas (Figura 21).

Basados en los análisis fisicoquímicos y estudios de la hidrogeoquímica de la zona de estudio podemos, determinar el origen, los procesos y evolución del agua almacenada en las unidades hidrogeológicas, además de la composición y la calidad del agua, las zonas de recarga y descarga, así como los flujos subterráneos.

Figura 21

Diagrama de flujo de la Caracterización Hidrogeoquímica



Fuente: El autor, (2020).

La información primaria de este estudio en la que se basa la caracterización hidroquímica, se realizó en visitas de campo en donde se determinó el inventario de puntos de agua, identificando los nacimientos de agua en el área de estudio; con ayuda de una sonda multiparámetros se tomaron algunas medidas y se tomaron muestras de dos nacimientos de agua para ser analizadas en laboratorios certificados.

4.3.1 Materiales y Técnicas

Para la realización del inventario de puntos de agua, se contó con una Sonda Multipropósito Thermo Scientific Medidor multiparamétrico portátil Orion Star A329 para medir Conductividad, pH y temperatura de puntos de agua en campo (Figura 22).

Figura 22

Medidor multiparamétrico portátil Orion Star A329 y toma de datos conductividad, pH y temperatura de puntos de agua en campo



Nota: Fotografía de la izquierda: Medidor multiparamétrico portátil Orion Star A329; fotografías del centro y derecha: Toma de datos Conductividad, pH y temperatura de puntos de agua en campo. Fuente: El autor, (2020).

Se tomaron muestras de agua y suelo de nacaderos de agua seleccionados, para ser analizadas en el laboratorio del Instituto Geográfico Agustín Codazzi IGAC (Figura 23).

Figura 23

Muestras de agua y muestras de suelos para análisis en el Laboratorio Nacional de Suelos del IGAC



Nota: Fotografía de la izquierda: Muestras de agua; Fotografía de la derecha: Muestras de suelos para análisis en el laboratorio de suelos del IGAC. Fuente: El autor, (2020).

Para el análisis de los datos de las muestras de agua de los nacederos 1 y 4 se usará el diagrama de Piper y el Diagrama de Stiff.

4.3.2 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper está formado por dos triángulos con un rombo que recoge la información de ambos triángulos, en uno de los triángulos se representan los cationes y en el otro los aniones principales. El paso desde ambos triángulos hasta el rombo es inmediato, por tanto, cada análisis queda representado por tres puntos (los dos triángulos y el rombo). (Sánchez, J., s.f.)

Los datos de partida deben ser meq/L de cada ion, y es preciso calcular los porcentajes separadamente: Σ cationes = 100 (para el triángulo izquierdo) Σ aniones = 100 (para el triángulo derecho).

Este método posee diversas ventajas entre las que se destacan:

- “Visualizar la evolución geoquímica de las aguas subterráneas.
- Detectar procesos como intercambio catiónico.

- Detectar mezclas entre dos tipos de agua.
- Detectar procesos de dilución o precipitación de especies iónicas.
- Junto con la cartografía y localización de los puntos de muestreo permite validar o lanzar hipótesis de la localización de la zona de recarga de los acuíferos”. (Agua y SIG, 2011)

4.3.3 Diagrama de Stiff

Son polígonos (uno para cada análisis) que normalmente se situarán sobre un mapa para mostrar la distribución geográfica de la composición de las aguas. En su forma más sencilla (y mejor) se forman con 3 ejes paralelos hacia la izquierda (cationes) y otros tres hacia la derecha (aniones). La distancia entre los ejes horizontales es arbitraria, simplemente estética, y la escala elegida en horizontal y dependerá de la salinidad de las aguas de la región estudiada. La longitud y escala se establecerán a partir del análisis de concentraciones más elevadas. Se sitúan las concentraciones en cada uno de los seis ejes (en mEq/L) y después se unen formando un polígono, la manera de construir este diagrama es la siguiente:

En cada eje, representamos los valores, en meq/L de los aniones $\text{SO}_4^{=}$, Cl, Cl^- y CHO_3^- y los cationes Ca^{++} , Mg^{++} y la sumatoria de K^+ y Na^+ , luego unimos los puntos formando un polígono, a ambos lados del eje vertical central y finalmente no se representan los ejes, solamente el polígono y el eje central. (Agua y SIG, 2011)

5. Resultados

5.1. Caracterización Geológico - Geofísico

La zona de estudio se encuentra en la parte sur de la ciudad de Bogotá, en la parte central de la Cordillera Oriental, en esta área afloran rocas desde el Cretácico Superior al Paleógeno Paleoceno, estas unidades se caracterizan por presentar sedimentación de ambientes marinos presentes en las formaciones más antiguas como la Formación Conejo.

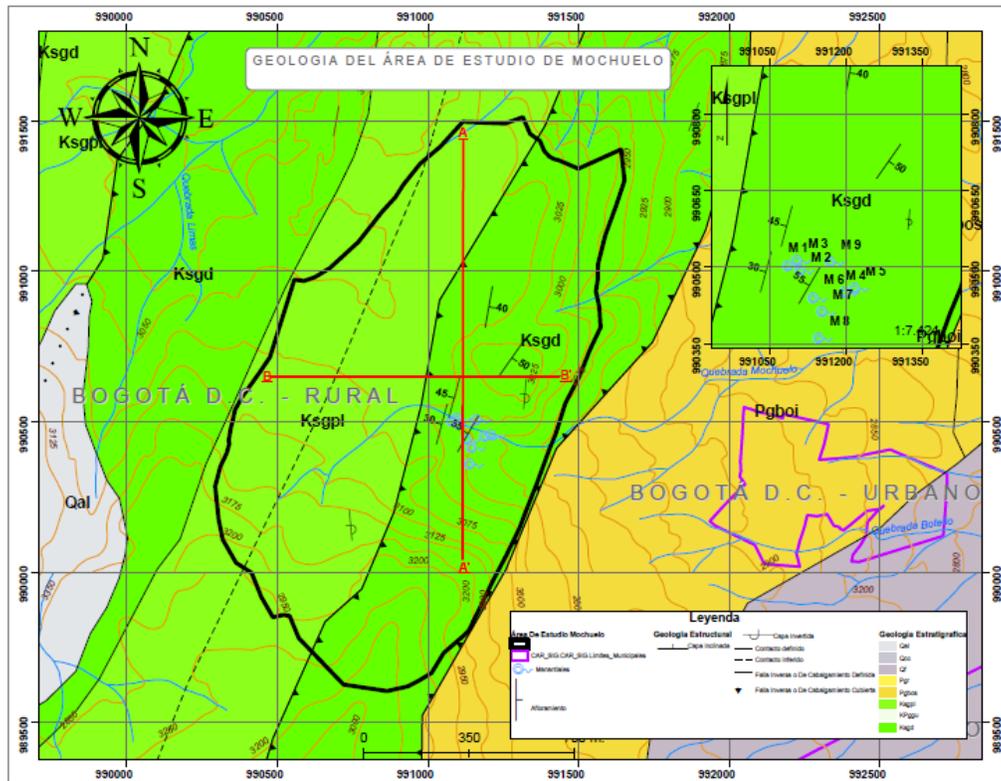
“A partir del Campaniano las condiciones de sedimentación varían y se deposita en zonas distales la Formación Lidita Superior y la Formación Arenisca Dura en zonas proximales y continúa la sedimentación en el Campaniano Superior con la Formación Plaeners; la regresión se completa y deja como último registro marino la Formación Labor-Tierna y la parte inferior de la Formación Guaduas y empieza una sedimentación continental de tipo fluvial”. (INGEOMINAS, 2005, a, p.9)

En el Paleógeno y Neógeno la sedimentación de origen fluvial da origen a las formaciones Bogotá (Pgbo). “El Mioceno es una época de tectónica activa, plegamientos, fallamiento y levantamiento de la Cordillera Oriental y afecta las formaciones antes depositadas y posiblemente se forme la cuenca de la actual Sabana de Bogotá” (Ibíd.); acompañados de eventos de glaciación que generaron otros depósitos.

La zona de estudio comprende el Grupo Guadalupe; más exactamente la Formación Arenisca Dura y Formación Plaeners como se observa en la Figura 24.

Figura 24

Mapa Geológico de la zona de estudio, Escala 1:24.000



GRUPO GUADALUPE

Ksg	Ksglt
	Ksgpl
	Ksgd

FORMACIÓN BOGOTÁ

Pgbos	Pgbo
Pgboi	

Ksglt: Formación Labor y Tierra: Arenita de grano fino a medio en capas gruesas

Ksgpl: Formación Plaeners: Limolita silicea y chert, capas delgadas a medias, con intercalaciones de lodolita y arenita fina de cuarzo.

Ksgd: Formación Arenisca Dura: Arenita de cuarzo de grano fino, en capas delgadas a muy gruesas, con intercalaciones de limolitas silíceas gruesas.

Pgbos: Parte Superior: Arcillolita abigarrada con esporádicas intercalaciones de arenita feldespática de grano medio a grueso.

Pgboi: Parte Inferior: Alternancia de lodolitas rojizas y arenitas feldespáticas y líticas de grano medio a fino en capas muy gruesas.

Eón	Era	Periodo	Epoca	Edad	Millones de años	Grupo	Unidad Litoestratigráfica	Litología Predominante	Unidad Hidrogeológica
FANEROZOICO PH	CENOZOICO	TERCIARIO	PALEOGENO	Paleoceno	56-66	F. Bogotá	F. Bogotá Inferior (Pgboi)	Lutitas, areniscas y arcillas	Acuífero de porosidad secundaria
				Acuitardo					
	MESOZOICO MZ	CRETÁCICO K	SUPERIOR / TARDÍO K2	Maastrichtiano k6	66-72	Guadalupe	F. Labor - Tierra F. Plaeners F. Arenisca Dura	Areniscas con intercalaciones de lutitas	Acuífero de porosidad primaria
				Campaniano k5	72-83				Acuífero de porosidad secundaria

Fuente: Geología de la Plancha 246 Fusagasugá, INGEOMINAS 1998

Nota: Tomado de INGEOMINAS, (1998).

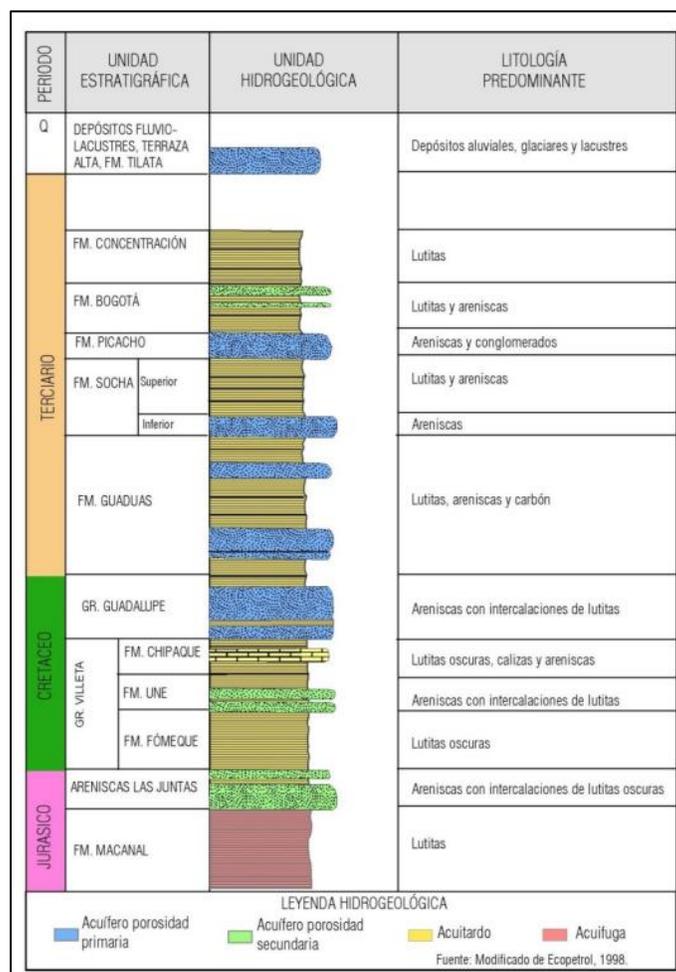
5.1.1 Grupo Guadalupe (Kgg)

Fue definido por Hettner (1892), redefinido por Hubach (1957), y la caracterización más actual corresponde a Pérez y Salazar (1971) (INGEOMINAS, 1988). Aflora principalmente hacia los flancos del Anticlinal de Bogotá y en el núcleo de los cerros sur orientales. El Grupo Guadalupe consta principalmente de intercalaciones de arenisca con limolitas silíceas y arcillolitas, depositadas en un ambiente litoral a sublitoral en una llanura de marea.

En la Figura 24 se observa como afloran estas formaciones en la zona de estudio, en la Figura 25 se observa la Columna estratigráfica generalizada de la provincia Cordillera Oriental.

Figura 25

Columna estratigráfica generalizada de la provincia Cordillera Oriental



Fuente: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5c59f8cfe9580.pdf>

Este grupo se encuentra dividido en cuatro formaciones: Formación Arenisca Dura, Formación Planers, Formación Arenisca de Labor y Formación Arenisca Tierna (INGEOMINAS, 1988), aunque para fines prácticos, estas últimas dos formaciones se agrupan en una sola. Para este estudio se usó la plancha geológica 246 Fusagasugá, escala 1:100.000 (INGEOMINAS, 2005, a).

5.1.2 Formación Arenisca Dura (Ksgd):

Edad: Campaniano Inferior.

También conocida como la “Formación Raizal”, constituye la base del Grupo Guadalupe. Está compuesta por una serie de cuarzo arenitas, con cemento silíceo e intercalaciones de lodolitas y lodolitas arenosas (Figura 26). Las areniscas presentan un color amarillento y se caracterizan por conformar gruesos paquetes, de hasta 3 m de espesor (INGEOMINAS, 2005, a).

Figura 26

Afloramiento No 1. Formación Arenisca Dura (Ksgd)



Nota: Presenta una altura de 6.4 metros, se observa el afloramiento sobre la vía Vereda Mochuelo Bajo – Quiba, en la Localidad de Ciudad Bolívar. Fuente: El autor, (2020).

De acuerdo a sus características litológicas, indican que estas areniscas se depositaron en un ambiente de plataforma interna durante una fase regresiva del mar. Dentro de esta plataforma la variación de facies arenosas, de totalmente bioturbadas a laminadas, sugieren una fluctuación de depósito desde el “upper offshore”, a la zona de transición y el “lower shoreface”. Son comunes los foraminíferos bentónicos y planctónicos, estos últimos referenciados a la base de la formación. (Salazar, A., 1999, citado por INGEOMINAS, 2005, b)

Esta unidad se encuentra haciendo parte del Anticlinal de Bogotá, el cual está en posición invertida.

5.1.3 Formación Plaeners (Ksgp)

Edad: Campaniano Superior – Maastrichtiano Temprano.

De acuerdo a sus características paleoambientales, esta unidad geológica se depositó en un ambiente marino de plataforma externa a media por debajo del nivel de acción de las olas, con aportes significativos de sílice que indican corrientes de surgencia favoreciendo el desarrollo de abundante fauna. (INGEOMINAS, 2005, a). En su parte inferior hay abundancia de Foraminíferos Bentónicos. El tipo de fracturamiento que presentan las liditas hace que esta formación no sea estable, por lo que al no poseer cobertura vegetal es fácilmente erosionable (Figura 27) (INGEOMINAS, 2005, a).

Figura 27

Afloramiento No 2, Formación Plaeners (Ksgp)



Nota: Se observa sobre la vía terciaria en la Vereda Mochuelo Bajo, en la Localidad de Ciudad Bolívar. Fuente: El autor, (2020).

El límite inferior (Formación Arenisca Dura) transicional lento y su límite superior (Formación Labor y Tierna) corresponde a un contacto neto (Servicio Geológico Colombiano, 2015), presenta espesores de 90 y 180 m de espesor respectivamente.

5.1.4 Formación Arenisca de Labor - Tierna (Ksgt):

En el área de estudio esta unidad geológica se encuentra erosionada, sus remanentes se encuentran conformando los bloques de roca presentes en la unidad cuaternaria denominada depósito coluvio – glacial.

Edad: Maastrichtiano.

Está compuesta por limolitas de cuarzo, suprayacidas por secuencias de areniscas cuarzosas, de textura fina o muy fina, con estratificación gruesa a muy gruesa en capas cuneiformes, con bioperturbación alta, micáceas, generalmente friables y muy meteorizadas. Seguido se ha determinado un intervalo de arcillolitas envueltas con niveles de arenitas, como separador entre la Arenisca de Labor y la Arenisca Tierna, donde esta última se caracteriza por estar compuesta de cuarzoarenitas de color gris claro o amarillento, con estratificación delgada ondulosa paralela, discontinua, y de carácter friable.

Su límite inferior con la Formación Plaeners (Ksgp) corresponde a un contacto neto y el límite superior con la formación Guaduas se considera concordante y neto (Servicio Geológico Colombiano, 2015). El espesor de los estratos oscila entre 0,2 y 0,3 m y excepcionalmente forman bancos de 1,5 m de espesor. Su grueso se ha calculado en unos 120 m.) (INGEOMINAS, 2005, a)

5.1.5 Formación Bogotá (Pgbo):

Hubach (1931), denominó piso de Bogotá a la secuencia del terciario medio que está constituido por tres conjuntos, el inferior, es arenoso y arcilloso e incluía el Horizonte de Cacho en la parte basal; el conjunto medio conformado por arcillolitas abigarradas entre las cuales se intercalan algunos bancos gruesos de areniscas y areniscas arcillosas y el conjunto superior, formado por bancos de areniscas de grano grueso, blandas que alternan con arcillolitas

abigarradas. Julivert (1963), determina como localidad tipo de la Formación Bogotá (Pgbo) la sección ubicada en la quebrada Mochuelo (Zo Grande) (flanco occidental del Sinclinal de Usme), la cual suprayace a la Formación Cacho e infrayace la Formación Regadera (Servicio Geológico Colombiano, 2015).

La litología de esta formación genera una morfología suave de valles, constituida por intercalaciones de bancos de arcillolitas de variados colores con esporádicas crestas formadas por areniscas (INGEOMINAS, 2005, a).

5.2 Unidades de Acuíferos

5.2.1 Acuífero Cuaternario (Aq)

Este acuífero está asociado a la sedimentación proveniente de los cerros aledaños, ocurrida entre el pleistoceno y el holoceno y que conformó lo que se conoce hoy como la Sabana de Bogotá. Litológicamente presenta una alta variación de facies dependiendo principalmente de la zona fuente de aporte, y la paleotopografía de la cuenca.

Debido a la génesis de su formación, el complejo Acuífero cuaternario presenta un carácter libre, semiconfinado y confinado, dependiendo del contenido de arcilla de las capas superiores, las cuales pueden actuar como capas sello o confinantes.

“Dentro de este sistema acuífero se han agrupado acuíferos locales definidos con anterioridad por INGEOMINAS (1993) y que son: Acuífero de Terraza alta (Qta), Depósitos Aluviales (Qal) y Depósitos Coluviales (Qc)” (CAR y SIAM S.A., 2010, p. 129).

“El agua de este complejo generalmente no es apta para el consumo humano por los altos valores de hierro, turbidez y color (Decreto 476 de 1998), el agua se puede clasificar como de moderada a relativa importancia hidrogeológica”. (INGEOMINAS, 1996, citado por CAR y SIAM S.A., 2010, p. 130).

5.2.1.1 Depósitos Recientes: Depósitos Aluviales (Qal).

Figura 28

Depósitos aluviales, formación de causes hídricos y bocatoma del acueducto comunitario



Nota: Imagen izquierda: Depósitos Aluviales (Qal) característicos de las márgenes hídricas, imagen del centro: Formación de causes hídricos en la parte alta de la microcuenca, imagen derecha: Bocatoma del acueducto comunitario. Fuente: El autor, (2020).

Son depósitos de material heterogéneo que se han formado en los bordes de los actuales ríos y quebradas. Dependiendo de la energía de la corriente, se acumulan desde arenas y limos hasta bloques gigantes que pueden alcanzar diámetros mayores a los 3m. El río Tunjuelito muestra estas características en su parte alta. En general el espesor de estos depósitos se considera mayor a los 10 metros, aunque ocasionalmente pueden ser mayores (INGEOMINAS, 1996).

5.2.1.2 Depósitos Coluvio-Glaciares (Qcog).

Figura 29

Presencia de bloques litológicamente clasificados como areniscas feldespáticas (arcosas) producto de la terminación de la última glaciación, Vereda Mochuelo Bajo, Localidad de Ciudad Bolívar.



Fuente: El autor, (2020).

Son generalmente antiguos depósitos glaciares, coluviales, flujos estabilizados y flujos activos, que están constituidos, ya sea por material arcilloso casi exclusivamente o por bloques de areniscas en una matriz areno arcillosa; se encuentran principalmente hacia la parte occidental de la Sabana de Bogotá (Acosta, J. y Ulloa, C. 1998).

5.2.2 Acuífero Labor Tierna (Alt)

Rocas con flujo combinado intergranular y por fisuras Complejo de acuíferos de extensión regional a local, continuos a discontinuos, de carácter confinado a libre, de baja hasta alta importancia hidrogeológica dependiendo de la litología asociada, con un grado de tectonismo variable que contribuyen a mayores producciones de agua subterránea. Dentro de este complejo acuífero, el Labor Tierna es el más importante, ya que produce los mayores caudales

de agua subterránea y en las partes altas donde aflora se convierte en la principal fuente de recarga para la cuenca.

Este acuífero "...se caracteriza por ser un acuífero continuo de extensión regional de alta importancia hidrogeológica, de tipo confinado (zona plana) a libre (piedemonte), el cual está asociado a sedimentitas granulares tipo areniscas de grano medio a fino, que pueden tener un fracturamiento secundario adicional que contribuyen a la generación de mayores caudales de explotación, su espesor es variable y según INGEOMINAS (1993) se encuentra entre 150 m y 260 m. Los valores que se reportan para los parámetros geohidráulicos de este acuífero son los siguientes: Según INGEOMINAS la conductividad hidráulica varía entre 0.9 m/día – 5.1m/día, según JICA varía entre 0.7 m/día – 7.8 m/día y según DAMA 1.086 m/día y 2.56 m/día. El coeficiente de almacenamiento según JICA es del orden de $3 \cdot 10^{-4}$ y según INGEOMINAS está en promedio entre $2 \cdot 10^{-2}$ y $4 \cdot 10^{-4}$. Por último, la capacidad específica en l/s/m reportada en JICA varía entre 0.64 y 4.53 mientras que la CAR reporta valores entre 0.18-0.33. Este acuífero se encuentra en ciertos sectores a más de 1000 m de profundidad (especialmente en la zona plana de la ciudad), razón por la cual su captación es limitada, pero en contraprestación puede aportar caudales de agua subterránea entre 10 l/s - 60 l/s. El agua generalmente es apta para el consumo humano con tratamiento previo para disminuir las concentraciones de hierro que puede presentar. (CAR y SIAM S.A., 2010, p. 135 -136)

5.2.3 Acuífero porosidad secundaria Fm. Arenisca Dura (Ksgd) y Fm. Plaeners (Ksgp)

Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas Complejo de acuíferos de extensión regional, continuos a discontinuos, de carácter confinado a semiconfinado, de baja hasta moderada importancia hidrogeológica donde la producción de caudales está directamente

relacionada con el grado de fracturamiento. Esta unidad hidrogeológica se correlaciona con las sedimentitas de las Formaciones Plaeners (Ksgp) y Arenisca Dura (Ksgd), pertenecientes al Grupo Guadalupe de edad Cretáceo Superior (INGEOMINAS, 1996).

Este acuífero de extensión regional continuo de muy baja a moderada importancia hidrogeológica de tipo confinado a semiconfinado, asociado a litofacies de granulometría fina, cementadas, donde su producción depende directamente del grado de fracturamiento, el espesor es muy variable siendo mayor el de la arenisca dura, pero en conjunto para las dos unidades es en promedio del orden de los 490 m. Sirve como área de recarga sólo en aquellas zonas donde el grado de tectonismo es alto. Las sedimentitas asociadas a la Fm Arenisca Dura (Ksgd) son las que presentan un mejor potencial acuífero a nivel local dentro de este Acuífero. Según INGEOMINAS presenta una conductividad hidráulica entre 0.5 m/día y 1.0 m/día y un coeficiente de almacenamiento entre $4.5 \cdot 10^{-4}$ y $6.5 \cdot 10^{-5}$. Los caudales de producción de esta unidad varían dependiendo del grado de fracturamiento de las mismas; alcanzando localmente valores hasta de 14 l/s en promedio. “La calidad del agua es buena, apta para el riego y para consumo humano a excepción del hierro que tiene concentraciones hasta de 3 mg/L”⁶.

Las características más evaluadas a la hora de estudiar hidráulicamente una unidad acuífero son la permeabilidad y la porosidad, que se denomina transmisividad, que viene siendo la multiplicación del espesor saturado por la permeabilidad del acuífero estudiado, esto quiere decir que la transmisividad es el caudal de agua que proporciona una sección de ancho unidad de frente acuífero sometido a un gradiente de saturación del 100%.

Tabla 6

Clasificación de terrenos por su transmisividad (m²/día)

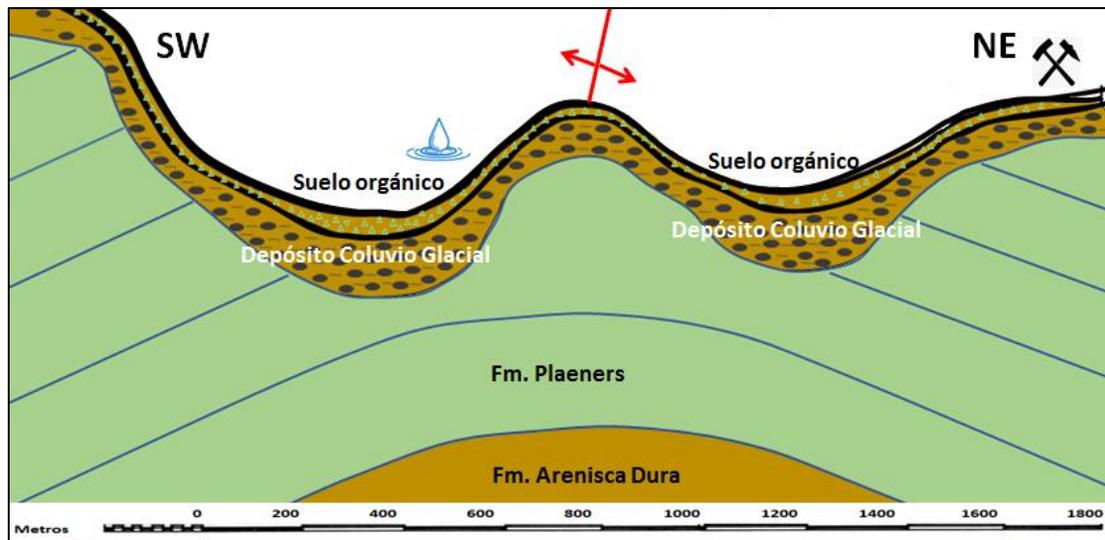
CLASIFICACIÓN DE TERRENOS POR SU TRANSMISIVIDAD (m²/día)					
T	1	10	10²	10³	
Calificación	Impermeables	Poco permeable	Algo permeable	Permeable	Muy permeable
Calificación del acuífero	Sin Acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Tipo de materiales	Arcilla compacta, Pizarra, Granito	Limo arenoso, Limo, Arcilla limosa	Arena fina, Arena limosa, Caliza poco fracturada, Basaltos	Arena limpia, Grava y arena, Arena fina, Caliza fracturada	Grava limpia, Dolomías, Calizas muy fracturadas

Fuente: Adaptado de Custodio y Llamas, 1983

Fuente: Tabla tomada de https://aguas.igme.es/igme/publica/libro20/pdf/lib20/los_s_a_1.pdf

5.3 Geología Estructural

En el área de estudio, basados en la información primaria colectada en trabajo de campo (cartografía geológica, toma de datos estructurales, análisis de imágenes de sensores remotos) se evidenció la presencia de una estructura anticlinal con rumbo nor-oeste la cual compromete a las unidades geológicas Formación Arenisca Dura (Ksgd) , Formación Pleaners (Ksgp) y Formación Arenisca Labor y Tierna (Ksgt), siendo la última erosionada como consecuencia de eventos glaciares que ocurrieron en la zona de estudio dejando como remanentes depósitos coluvio – glaciares los cuales se encuentran discordantes sobre las rocas deformadas.

Figura 30*Sección Esquemática de Campo*

Nota: Grafica demostrativa, no está a escala. Fuente: El autor, (2020).

A nivel regional esta área está afectada por la Falla Mochuelo, que es una falla vertical de tipo inverso con una longitud de más de 30 kilómetros, en su extremo sur presenta un rumbo noroeste mientras que a la altura de la autopista a Villavicencio, su orientación es nor-noroeste (INGEOMINAS, 1996).

5.4. Estudio Afloramientos Rocosos

En la zona de estudio se identificaron y estudiaron cinco afloramientos (Figura 31), de estos cuatro son aborde de vía y uno en la parte alta del Cerro de la Antena; en la siguiente tabla se relacionan las coordenadas geográficas, la altitud y el rumbo y buzamiento de cada uno de estos afloramientos.

Tabla 7

Relación e información de afloramientos estudiados en la zona de estudio

Nombre	Coordenadas Geográficas				Altitud msnm	Rumbo y buzamiento
Afloramiento 1	N	4°30.599´	WO	74°9.450´	3050	N30°E / 55NW
Afloramiento 2	N	4°30.662´	WO	74°9.475´	3068	N15°E / 45NW
Afloramiento 3	N	4°30.728´	WO	74°9.361´	3100	N35°E / 50SE
Afloramiento 4	N	4°30.823´	WO	74°9.402´	3040	N10°E / 40SE
Afloramiento 5	N	4°30.613´	WO	74°9.497´	3065	N15°E / 30NW

Fuente: El autor, (2020).

Figura 31

Sector de afloramientos rocosos en el área de estudio



Fuente: El autor, (2020).

De estos afloramientos se recolectaron muestras, las cuales se llevaron a laboratorio para hacer análisis granulométricos y de composición litológica bajo estéreo microscopio, haciendo previamente un trabajo de separación basados en el tamaño de partículas (Figura 32).

Figura 32

Análisis en el laboratorio del Jardín Botánico de Bogotá, de las muestras recolectadas en la zona de estudio



Nota: En la imagen se observan las muestras recolectadas en la zona de estudio, las cuales pertenecen al Grupo Guadalupe (Kgg), Formación Arenisca Dura (Ksgd) y Plaeners (Ksgp), se observan sus colores característicos. Fuente: El autor, (2020).

A continuación, se describe cada uno de los afloramientos encontrados y estudiados:

5.4.1. Afloramiento 1. Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Este afloramiento se localiza sobre la vía Mochuelo Bajo – Quiba (Figura 33), tiene una altura de 6.4 metros, en su parte superior se observa un depósito de suelo debido a la acumulación de materia orgánica.

Figura 33

Afloramiento 1. Formación Arenisca Dura (Ksgd)



Fuente: El autor, (2020).

En la Figura 34 se observa el Afloramiento de la Formación Arenisca Dura (Ksgd), la toma de muestras de roca y datos estructurales, trabajo en laboratorio en donde se hizo separación, por tamaño de partículas de muestras, para ser analizadas en estéreo microscopio.

Figura 34

a) Afloramiento Formación Arenisca Dura (Ksgd) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Arenisca Dura (Ksgd) en estéreo microscopio.



Fuente: El autor, (2020).

Esta unidad se halla constituida por cuarzoarenitas grises claras a blanco amarillentas (Figura 34), de grano fino, estratificación laminar a gruesa, con intercalaciones de lutitas y limolitas silíceas en bancos de 5 a 50 cm de grosor. El espesor de esta unidad varía entre 55 a 171m aproximadamente.

5.4.2 Afloramiento 02 Formación Plaeners (Ksgp)

Este afloramiento se localiza sobre una vía terciaria cercana a la vía Mochuelo Bajo – Quiba, tiene una altura de 16.9 metros, este afloramiento se erosiona rápidamente (Figura 35).

En la Figura 36 se observa el Afloramiento de la Formación Plaeners (Ksgp), la toma de muestras de roca y datos estructurales, trabajo en laboratorio en donde se hizo separación por tamaño de partículas de muestras para ser analizadas en estéreo microscopio.

Figura 35

Afloramiento 02 Formación Plaeners (Ksgp)



Fuente: El autor, (2020).

Figura 36

a) Afloramiento Formación Formación Plaeners (Ksgp) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Formación Plaeners (Ksgp) en estéreo microscopio



Fuente: El autor 2020

Está constituido principalmente por una alternancia de limolitas silíceas, lutitas y areniscas de grano fino, estratificadas en bancos de pocos centímetros a 5 m de espesor.

5.4.3 Afloramiento 03 Formación Plaeners (Ksgp)

Este afloramiento se localiza en la parte alta del Cerro de la Antena (Figura 37), tiene una altura de 1.5 metros, este afloramiento se erosiona rápidamente.

Figura 37

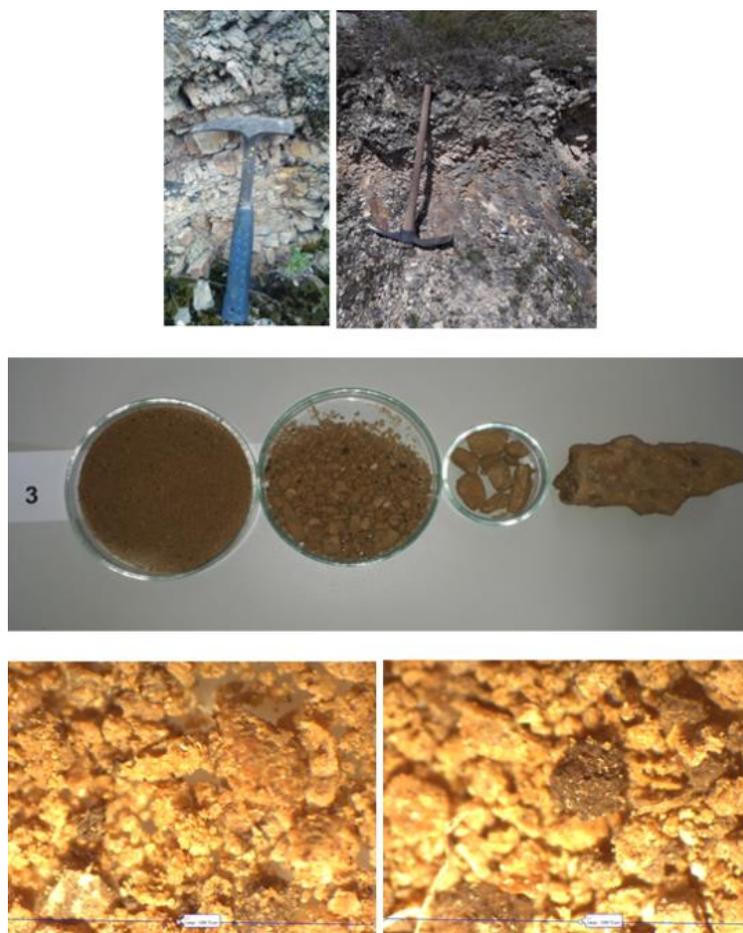
Afloramiento 03 Formación Plaeners (Ksgp)



Fuente: El autor, (2020).

Figura 38

a) Afloramiento Formación Formación Plaeners (Ksgp) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Plaeners (Ksgp) en estéreo microscopio



Fuente: El autor, (2020).

5.4.4 Afloramiento 4. Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Este afloramiento se localiza sobre una vía terciaria cercana a la vía Mochuelo Bajo – Quiba, tiene una altura de 1.2 metros (Figura 39).

Figura 39

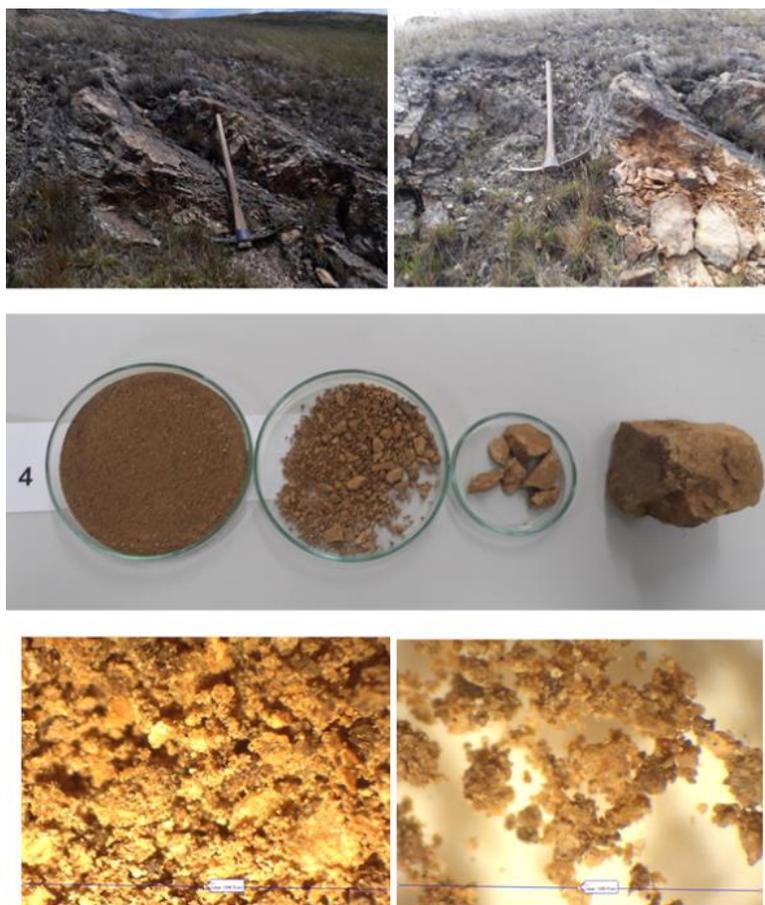
Afloramiento 4. Formación Arenisca Dura (Ksgd)



Fuente: El autor, (2020).

Figura 40

a) Afloramiento Formación Arenisca Dura (Ksgd) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales, d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Arenisca Dura (Ksgd) en estéreo microscopio



Fuente: El autor 2020

5.4.5 Afloramiento 05 Formación Plaeners (Ksgp):

Este afloramiento se localiza sobre la vía Mochuelo Bajo – Quiba, (Figura 41) tiene una altura de 3.4 metros, en su parte superior se observa el desarrollo de una densa vegetación debido a la acumulación de materia orgánica.

Figura 41

Afloramiento 05 Formación Plaeners (Ksgp)



Fuente. El autor, (2020)

Figura 42

a) Afloramiento Formación Formación Plaeners (Ksgp) b) y c) Toma de muestras de roca y datos estructurales. d) Separación por tamaño de partículas de muestras. e) Vista de muestras Formación Plaeners (Ksgp) en estéreo microscopio



Fuente: El autor, (2020)

5.4.6 Otros Aspectos Geológicos

En la zona de estudio se encontraron Depósitos no consolidados, los cuales poseen una matriz limo-arenosa, en su parte superior se desarrollaron suelos producto de largos periodos de descomposición de rocas, actividad biológica y de estar expuestos al viento, el aire y la temperatura principalmente (Figura 43).

Figura 43

a) Vista general de Depósitos no consolidados. b) Matriz limo-arenosa

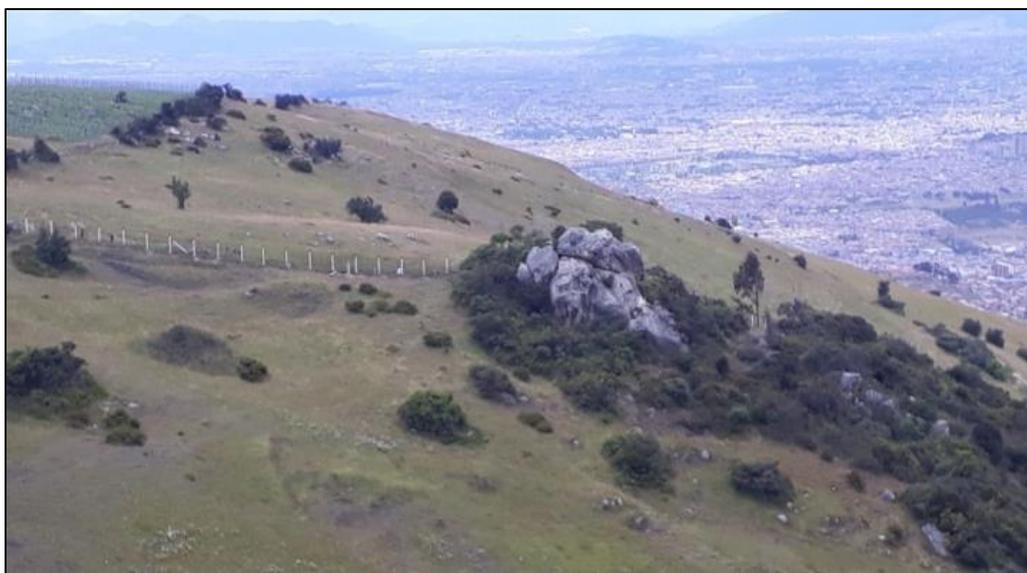


Fuente: El autor, (2020).

Esta zona evidencia que existe gran actividad geológica, en toda el área se observan grandes bloques de roca de la Fm Labor y Tierna (Ksgt), la cual fue erosionada producto de la glaciación (Figuras 44 y 45).

Figura 44

Bloque perteneciente al depósito coluvio-glacial (Qcog) expuesto, el cual ha servido como punto de referencia y atractivo turístico, conocido como la Piedra del Mohán

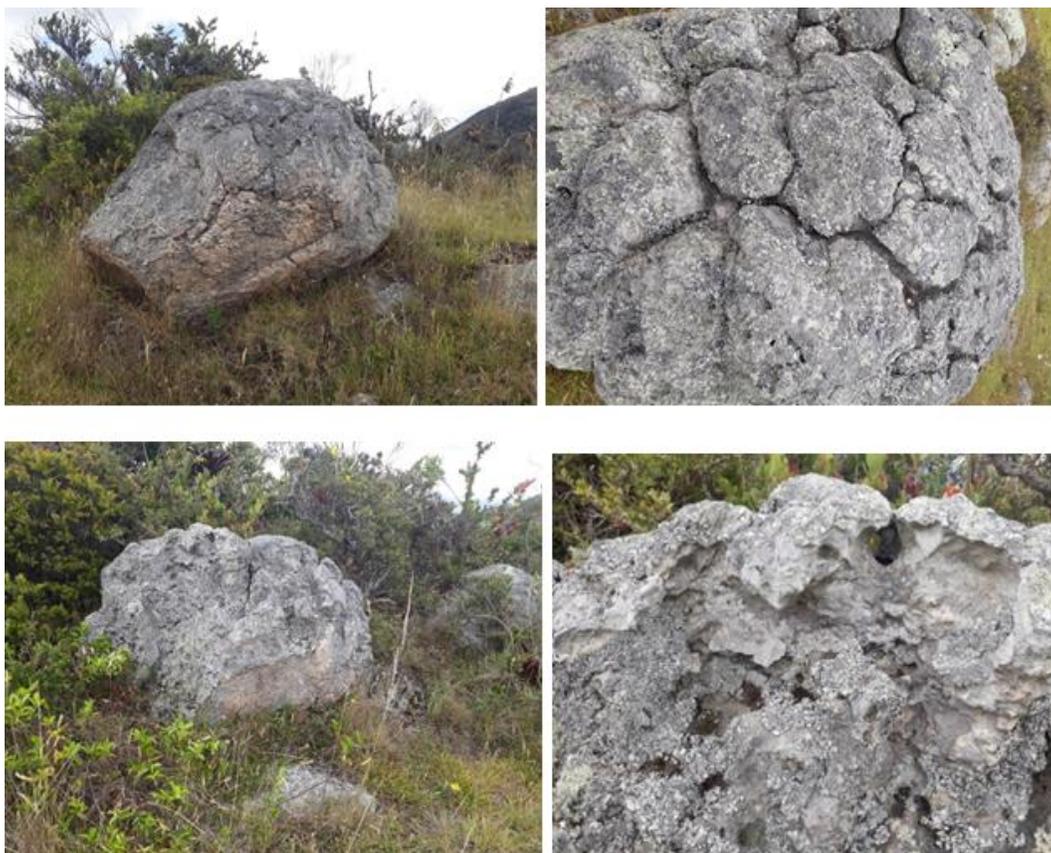


Fuente: El autor, (2020).

Estos bloques expuestos (Figura 45) están compuestos por areniscas feldespáticas (no cuarzo) los cuales se caracterizan por presentar porosidad secundaria como consecuencia del fracturamiento, descomposición o meteorización de los feldespatos a minerales de arcilla que son transportados por el agua principalmenmte.

Figura 45

Bloques expuestos compuestos por areniscas feldespaticas, se observa la porosidad secundaria



Fuente: El autor, (2020).

5.5. Hidrogeología

5.5.1 Inventario de Puntos de Agua

En la zona solo se identificaron nueve nacederos de agua, los cuales se encuentran relativamente cerca los unos de los otros, estos nacederos se localizan en la parte baja entre los Cerros El Gavilán y de la Antena (Figura 46).

Debido a la génesis de su formación, el complejo Acuífero cuaternario presenta un carácter libre (acuífero libre) y sus nacederos de agua son permanentes; es decir que presentan flujo base y son perennes.

Figura 46

Zona de nacederos de agua en el área de estudio



Fuente: El autor, (2020).

A continuación, se relacionan las coordenadas geográficas y parámetros físicoquímicos tomados en campo:

Tabla 8

Inventario de puntos de agua: Nacederos de agua, coordenadas geográficas y parámetros físico químicos tomas en campo

Nombre	Coordenadas Geográficas				Altitud msnm	Conductivida d μ S/cm	pH	Temp °C	
Nacimiento 1	N	4°30.619`	WO	74°9.465`	3040	57.33	5.06	12.3	Deposito Suelo
Nacimiento 2	N	4°30.614`	WO	74°9.452`	3037	38.36	4.97	14.3	Deposito Suelo
Nacimiento 3	N	4°30.624`	WO	74°9.455`	3036	52.18	5.01	16.4	Deposito Suelo
Nacimiento 4	N	4°30.590`	WO	74°9.405`	3015	15.27	4.5	14.2	Rocas -Bloques
Nacimiento 5	N	4°30.594`	WO	74°9.394`	3010	22.63	4.69	14.2	Rocas -Bloques
Nacimiento 6	N	4°30.585`	WO	74°9.438`	3032	18.79	5.25	14.2	Deposito Suelo
Nacimiento 7	N	4°30.570`	WO	74°9.429`	3026	14.81	4.48	13.9	Deposito Suelo
Nacimiento 8	N	4°30.542`	WO	74°9.432`	3018	11.71	4.63	13.3	Deposito Suelo
Nacimiento 9	N	4°30.622`	WO	74°9.420`	3031	61.19	5.21	15.9	Deposito Suelo

Fuente: El autor, (2020).

A continuación se presenta el registro fotográfico (Figuras 47 a 55) de los nacederos de agua inventariados:

Figura 47

a) Nacedero de agua No 1, características físicas b) Nacedero asociado a suelos



Fuente: El autor, (2020).

Figura 48

a) Nacedero de agua No 2, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos.



Fuente: El autor, (2020).

Figura 49

a) Nacedero de agua No 3, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos



Fuente: El autor, (2020).

Figura 50

a) Nacedero de agua No 4, características físicas. b) Nacedero asociado a bloques de roca expuestos



Fuente: El autor, (2020).

Figura 51

a) Nacedero de agua No 5, características físicas. b) Nacedero asociado a bloques de roca expuestos



Fuente: El autor, (2020).

Figura 52

a) Nacedero de agua características físicas. b) Nacedero asociado a suelos



Fuente: El autor, (2020).

Figura 53

a) Nacedero de agua No 7, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos este aflora en medio de una vía. c) Tomas de datos en campo



Fuente: El autor, (2020).

Figura 54

a) Nacedero de agua No 8, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos



Fuente: El autor, (2020).

Figura 55

a) Nacedero de agua No 9, características físicas. b) Nacedero asociado a suelos



Fuente: El autor, (2020).

5.5.2 Toma de muestras

Para el análisis de agua y suelo se seleccionaron los nacaderos de agua número 1 y 4, el manantial número uno se caracteriza por que sus aguas salen directamente del suelo y el número cuatro está relacionado con grandes bloques de roca.

En la Figura 56 observamos las muestras de agua tomadas de los Nacederos de agua 1 a la izquierda y 4 a la derecha, en la fotografía central observamos la turbidez del agua de cada muestra además se tomaron muestras de suelo cercano a cada una de estos nacederos de agua, los cuales fueron enviadas al Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Laboratorio Nacional De Suelos-LNS.

Figura 56

a) *Nacedero de agua #1 asociado a suelos.* b) *Muestras de agua tomadas de los Nacederos de agua 1 a la izquierda y 4 a la derecha, en la fotografía central observamos la turbidez del agua de cada muestra.* C) *Nacedero de agua #1 asociado a bloques de rocas expuestos*



Fuente: El autor, (2020).

En la tabla 9 podemos observar los resultados de las dos muestras de agua tomadas a los nacederos de agua 1 y 4.

Tabla 9

Resultados de los análisis de aguas obtenidos en el Laboratorio Nacional de Suelos -IGAC

IGAC		RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – ANÁLISIS DE AGUA W-01 LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C.										FECHA DE EMISIÓN AAAA-MM-DD 2020-11-12					
INFORMACIÓN DEL CLIENTE																	
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO		JARDIN BOTANICO JOSE CELESTINO MUTIS								TIPO DE MUESTRA		AGUA		No. SOLICITUD		4472_1	
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO		Bogota D.C. - Bogotá, D.C.															
MODIFICACIÓN		<input type="checkbox"/> SUPLEMENTO DE RESULTADOS		<input type="checkbox"/> DE FECHA		DIRECCIÓN DEL CLIENTE AVENIDA CALLE 63 No. 68-95											
No. DE LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	pH	CE (µS/cm)	RAS	CLASE	CATIONES mmol(-)/L					ANIONES mmol(-)/L						
						CALCIO	MAGNESIO	POTASIO	SODIO	SUMA CATIONES	SULFATOS	CLORUROS	CARBONATOS	BICARBONATOS	SUMA ANIONES		
MQ1-44038	MUESTRA 1	6.540	59.50	0.66	C1-S1	0.052	0.085	0.063	0.172	0.372	0.05	0.18	N.D	0.44	0.67		
MQ1-44039	MUESTRA 2	6.060	14.13	0.45	C1-S1	0.012	0.011	0.023	0.048	0.094	0.01	0.03	N.D	0.12	0.16		

No. DE LABORATORIO	DUREZA TOTAL (d.H.F)	SALES TOTALES DE SÓLIDOS DISUELTOS (mg/L)
MQ1-44038	3.014	38.080
MQ1-44039	0.658	9.043

C1-S1 : Agua de baja salinidad y bajo contenido de sodio; puede usarse para riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de que se generen problemas de salinidad, siempre y cuando exista una buena permeabilidad y no se presenten problemas de sodio en el suelo.

NOTA: Consultar con el técnico de la zona

Fuente: IGAC, (2020).

En la tabla 10 podemos observar los resultados de las dos muestras de suelos asociadas a los nacederos de agua 1 y 4.

Tabla 10

Dos de los análisis de suelos obtenidos en el Laboratorio Nacional de Suelos -IGAC

No. DE LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	PROFUNDIDAD (cm)	GRANULOMETRÍA			CLASE TEXTURAL	% DE GRAVAS (FRACCIÓN > 2 mm)	RELACIÓN DE pH	pH	ACIDEZ INTERCAMBIABLE (meq(-)/kg)	S.A.I. %	SALINIDAD CE (µS/cm)	CARBONATO DE CALCIO Contributivo %	CARBONO ORGÁNICO %	CARBONO TOTAL %	NITRÓGENO TOTAL %
			ARENA %	LILO %	ARCILLA %											
MQ1-44033	MUESTRA 1	-	52.8	30.8	16.4	F A*	N.A.	1:1	5.510	0.95	9.02	0.13	N.A.	5.9022	6.80	0.59
MQ1-44034	MUESTRA 2	-	68.2	25.6	6.2	F A*	22.90	1:1	5.400	0.32	1.16	0.57	N.A.	10.9945	14.95	1.29

No. DE LABORATORIO	FÓSFORO DISPONIBLE (mg/kg)	COMPLEJO DE CAMBIO (meq(-)/kg)								S.B. %	ELEMENTOS MENORES DISPONIBLES (mg/kg)					
		CIC	CICE	Ca	Mg	K	Na	S.T.	Mn (mg/kg)		Fe (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	B (mg/kg)	NaNH	NiCO
MQ1-44033	33.71	30.070	10.552	8.040	1.080	0.320	0.160	9.600	31.93	0.91	195.06	0.22	0.17	0.18	N.A.	N.A.
MQ1-44034	220.22	48.883	27.742	24.630	1.810	0.900	0.080	27.420	56.09	1.84	165.53	15.24	0.13	0.39	N.A.	N.A.

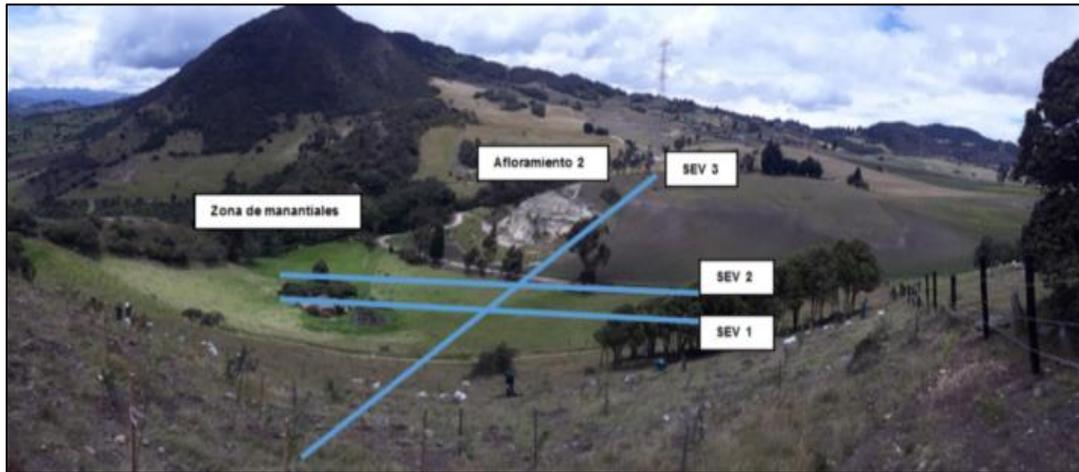
Fuente: IGAC, (2020).

5.6 Geofísica

Se realizaron tres Sondeos Eléctricos Verticales SEV, dos paralelos y uno perpendicular a los anteriores (Figura 56 y 57), estos SEV tuvieron una longitud de 150 metros aproximadamente, lo que teóricamente nos brindará información de una profundidad de 50 a 60 metros.

Figura 57

Sitios en donde se realizaron los SEV



Fuente: El autor, (2020).

Figura 58

Sitios en donde se realizaron los SEV



Fuente: Imagen Google earth y el autor, (2020).

Como se observa en la Figura 58 los SEV 1 y 2 se realizaron paralelamente en la parte baja, esta es un área cercana a los nacederos de agua y al afloramiento 2.

A continuación, en la tabla 11 se relacionan los datos tomados en campo del SEV 1:

Tabla 11

SEV No 1. Datos tomados en campo

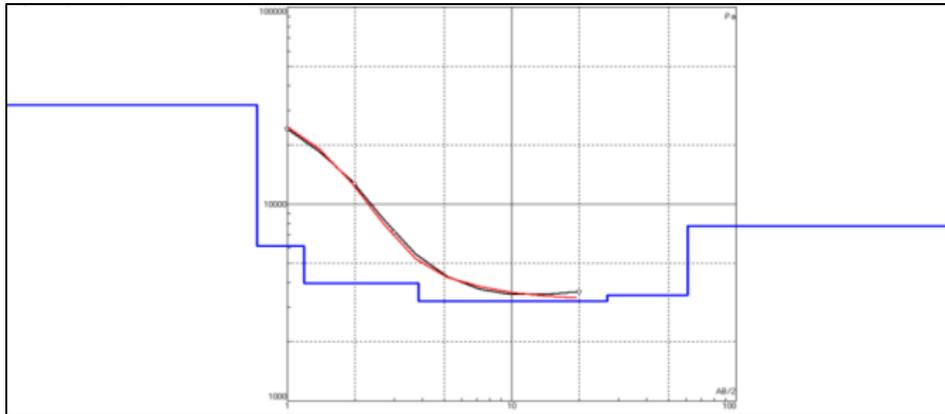
SEV 1 N: 04.51129 W: 074.15722 ALT: 3050 MTS					
1 LECTURA					
PUNTO	AB/2	MN	SP	DC	I
1	1	1	-083,3 MV	07,29 V	0.079 A
2	1	1	-083,5 MV	3,753 V	0.095 A
3	1	1	-083,3 MV	1,599 V	0,080 A
4	1	1	-082,7 MV	0,957 V	0,083 A
5	1	1	-082,9 MV	568,6 V	0,088 A
6	2	1	-082,0 MV	207,7 V	00,47 A
7	2	1	-081,5 MV	094,0 MV	0,086 A
8	2	1	-081,3 MV	058,0 MV	0,114 A
9	3	1	-081,1 MV	-002,9 MV	0,112 A
10	3	10	-129,9 MV	597,1 MV	-00,69 A
11	3	10	-135,7 MV	285,8 MV	0,097 A
12	3	10	-135,4 MV	0,997 MV	0,080 A
13	5	10	-134,2 MV	-016,5 MV	0,075 A
14	5	10	-133,1 MV	-002,4 MV	0,101 A
15	5	10	-132,1 MV	-007,2 MV	0,119 A
16	5	20	-069,7 MV	322,3 MV	0,118 A
17	10	20	-071,4 MV	199,9 MV	0,111 A
18	10	20	-070,6 MV	074,0 MV	0,112 A
19	10	20	-069,9 MV	115,4 MV	0,163 A
20	10	30	-095,5 MV	148,7 MV	0,095 A
21	20	30	-072,9 MV	-073,1 MV	0,184 A
22	20	30	-070,2 MV	101,6 MV	0,208 A
23	20	30	-069,7 MV	086,2 MV	0,260 A

Fuente: El autor, (2020).

Una vez los datos fueron analizados por el Sistema IPI2WIN, se obtuvo la respectiva grafica (Figura 59) y en la tabla 12 se relacionan los datos de número de capas, resistividad, ancho de cada una de las capas y profundidad total del SEV 1.

Figura 59

Gráfica del SEV No 1 - Sistema IPI2WIN



Fuente: El autor, (2020).

Tabla 12

SEV No 1. Resultados de análisis de datos en Sistema IPI2WIN

Error = 3.78%				
N	p	h	d	Alt
1	31847	0.735	0.735	-0.7352
2	6124	0.455	1.19	-1.191
3	3974	2.65	3.84	-3.845
4	3202	22.8	26.6	-26.6
5	3436	34.1	60.7	-60.73
6	7728			

Fuente: El autor, (2020).

En la tabla 13 se relacionan los datos tomados en campo del SEV 2:

Tabla 13*SEV No 2. Datos tomados en campo*

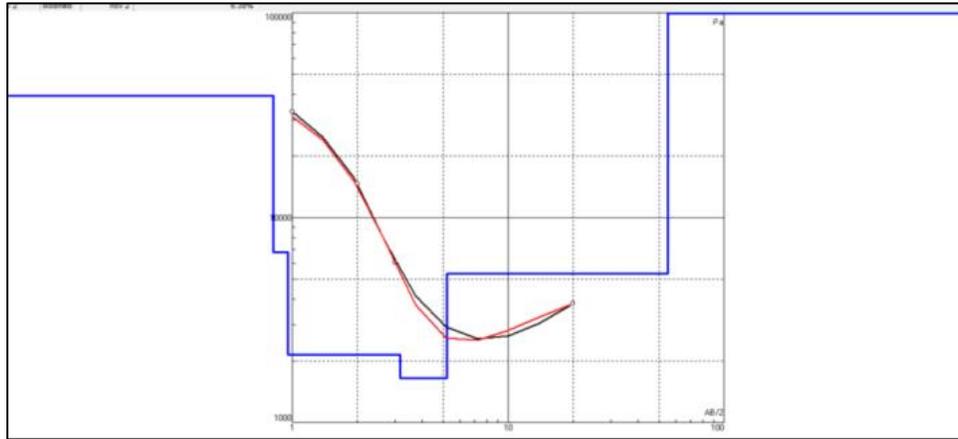
SEV 2 N:04.51143 W:074.15730 ALT: 3050 MTS					
1 LECTURA					
PUNTO	AB/2	MN	SP	DC	I
1	1	1	-026,1 MV	-0,26,0 MV	0,082 A
2	1	1	-024,9 MV	2,516 V	0,073 A
3	1	1	-024,6 MV	1,261 V	0,071 A
4	1	1	-024,4 MV	245,5 MV	0,024 A
5	1	1	-024,0 MV	387,0 MV	0,058 A
6	2	1	-023,7 MV	255,8 MV	0,074 A
7	2	1	-023,5 MV	111,4 MV	0,065 A
8	2	1	-023,2 MV	046,5 MV	0,053 A
9	3	1	-023,0 MV	-019,8 MV	0,004 A
10	3	10	-009,7 MV	365,5 MV	0,045 A
11	3	10	-011,0 MV	274,5 MV	0,057 A
12	3	10	-012,3 MV	284,2 MV	0,080 A
13	5	10	-013,6 MV	119,0 MV	0,053 A
14	5	10	-019,7 MV	134,8 MV	0,085 A
15	5	10	-015,1 MV	088,3 MV	0,072 A
16	5	20	156,1 MV	250,9 MV	0,010 A
17	10	20	168,4 MV	371,7 MV	0,063 A
18	10	20	176,4 MV	240,4 MV	0,030 A
19	10	20	181,9 MV	246,2 MV	0,041 A
20	10	30	056,8 MV	264,3 MV	0,041 A
21	20	30	040,0 MV	138,4 MV	0,033 A
22	20	30	036,5 MV	092,9 MV	0,029 A
23	20	30	033,7 MV	060,5 MV	0,019 A

Fuente: El autor, (2020).

Una vez los datos fueron analizados por el Sistema IPI2WIN se obtuvo la respectiva grafica (Figura 60), y en la tabla 14 se relacionan los datos de número de capas, resistividad, ancho de cada una de las capas y profundidad total del SEV 2.

Figura 60

Gráfica del SEV No 2 - Sistema IPI2WIN



Fuente: El autor, (2020).

Tabla 14

SEV No 2. Resultados de análisis de datos en Sistema IPI2WIN

Error = 6.39%				
N	p	h	d	Alt
1	39417	0.819	0.819	-0.8191
2	6766	0.137	0.956	-0.9561
3	2148	2.2	3.15	-3.152
4	1647	2.05	5.2	-5.198
5	5317	49.8	55	-54.96
6	1.0E+5			

Fuente: El autor, (2020).

En la tabla 15 se relacionan los datos tomados en campo del SEV 3:

Tabla 15*SEV No 3. Datos tomados en campo*

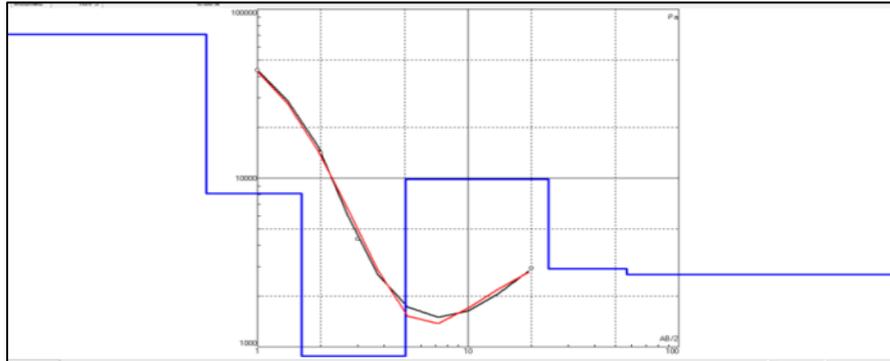
SEV 3 N:04.51116 W:074.5739 ALT: 3044 MTS					
1 LECTURA					
PUNTO	AB/2	MN	SP	DC	I
1	1	1	021,4 MV	11,08 V	0,063 A
2	1	1	021,2 MV	3,221 V	0,070 A
3	1	1	020,6 MV	1,823 V	0,079 A
4	1	1	020,1 MV	1,196 V	0,092 A
5	1	1	019,9 MV	0,838 V	0,103 A
6	2	1	019,8 MV	204,1 MV	0,053 A
7	2	1	019,9 MV	138,7 MV	0,062 A
8	2	1	020,1 MV	113,9 MV	0,086 A
9	3	1	020,6 MV	059,8 MV	0,056 A
10	3	10	161,4 MV	445,5 MV	0,055 A
11	3	10	048,7 MV	447,6 MV	0,091 A
12	3	10	050,8 MV	258,3 MV	0,071 A
13	5	10	052,2 MV	195,5 MV	0,080 A
14	5	10	053,0 MV	200,0 MV	0,117 A
15	5	10	053,6 MV	150,4 MV	0,105 A
16	5	20	004,5 MV	297,4 MV	0,105 A
17	10	20	002,8 MV	208,2 MV	0,123 A
18	10	20	001,6 MV	107,2 MV	0,092 A
19	10	20	000,5 MV	194,4 MV	0,249 A
20	10	30	-090,1 MV	420,9 MV	0,252 A
21	20	30	-114,6 MV	045,3 MV	0,139 A
22	20	30	-124,9 MV	-064,5 MV	0,077 A
23	20	30	-135,4 MV	-130,8 MV	0,009 A

Fuente: El autor, (2020).

Una vez los datos fueron analizados por el Sistema IPI2WIN se obtuvo la respectiva grafica (Figura 61) y en la tabla 16 se relacionan los datos de número de capas, resistividad, ancho de cada una de las capas y profundidad total del SEV 2.

Figura 61

Gráfica del SEV No 3 - Sistema IPI2WIN



Fuente: El autor, (2020).

Tabla 16

SEV No 3. Resultados de análisis de datos en Sistema IPI2WIN

Error = 6.88%				
N	ρ	h	d	Alt
1	70990	0.573	0.573	-0.573
2	8124	1.05	1.62	-1.62
3	699	3.44	5.06	-5.058
4	9835	19.1	24.1	-24.14
5	2898	32.7	56.8	-56.82
6	2689			

Fuente: El autor, (2020).

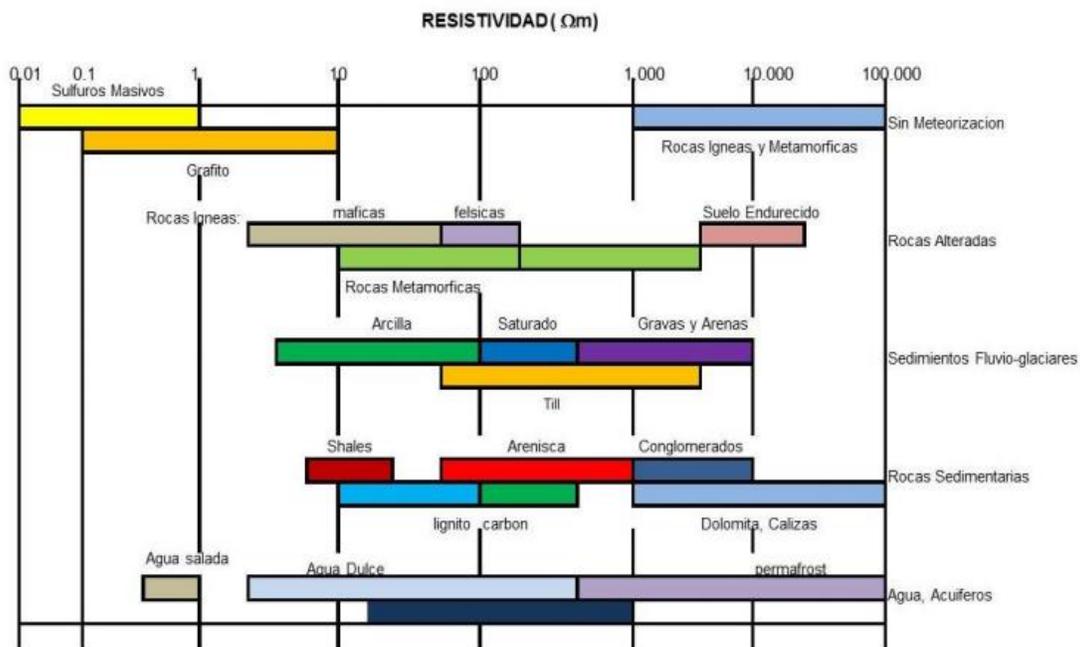
7. Análisis de Resultados

7.1 Sondeo Eléctrico Vertical

A partir de la columna estratigráfica y con la caracterización geofísica se trabaja en las unidades hidrogeológicas, para esto nos basamos en la tabla de Rangos de Resistividad Eléctrica de Rocas y Sedimentos, Palacky, 1987 (Tabla 17), en donde tomamos los datos de resistividad que nos dio el Sistema IPI2WIN de cada uno de los SEV; y con la información levantada en campo, localizamos en dicha tabla la correlación con la litología respectiva.

Tabla 17

Rangos de Resistividad Eléctrica de Rocas y Sedimentos



Fuente: Palacky, 1987

Fuente: imagen tomada de SYSCOL Consultores S.A.S. (s.f), p. 23

Análisis de datos del SEV 1:

Tabla 18

Análisis de datos del SEV 1

SONDEO	PROFUNDIDAD (metros)	ESPESOR (metros)	RESISTIVIDAD	CORRELACIÓN
SEV 01	0 – 0,735	0,735	31847	Suelo endurecido
	0,736 – 1,19	0,455	6124	Depósito Coluvio-glacial no saturado
	1,19– 3,84	2,65	3974	Depósito Coluvio-glacial medianamente saturado
	3,84-26,6	22,8	3202	Depósito Coluvio-glacial saturado
	26,6-60,74	34,1	3436	Formación Plaeners
SEV 1 N: 04.51129 W: 074.15722 ALT: 3050 MTS				

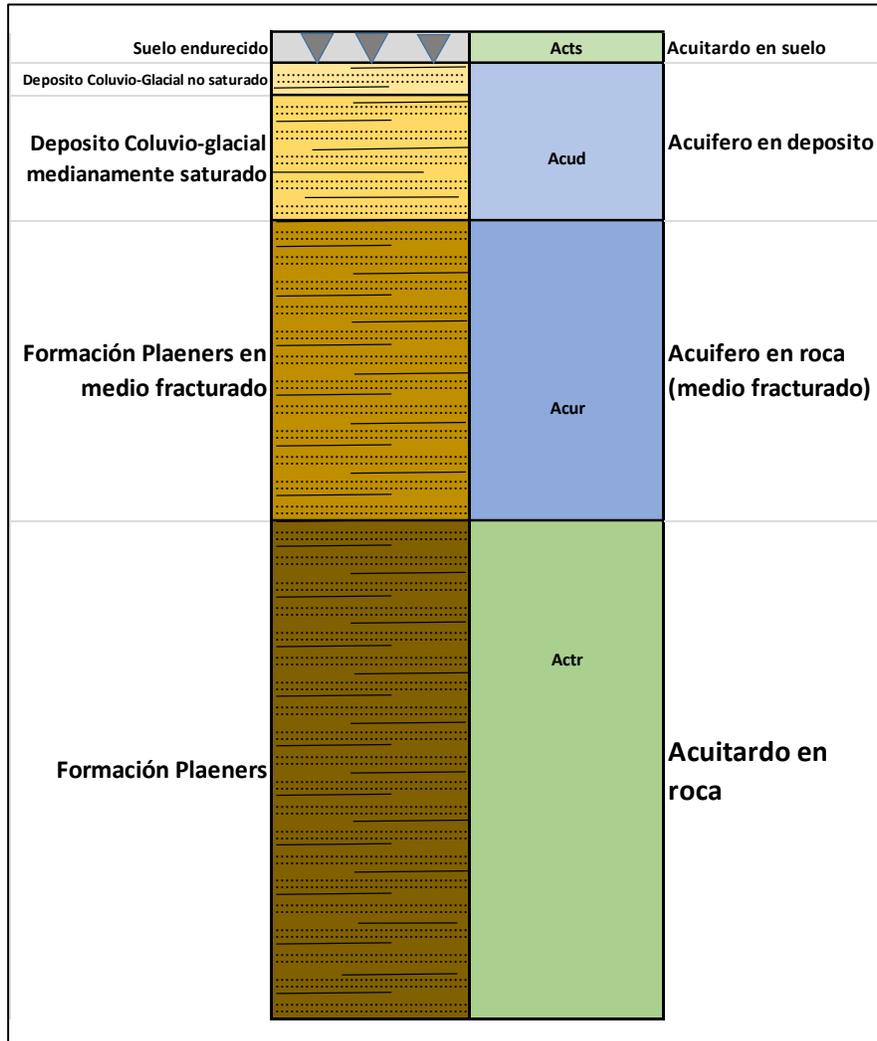
Fuente: El autor, (2020).

Columna SEV 1

Una vez se obtuvieron los datos de espesor y correlación litológica de cada una de las capas trabajadas en el sistema IPI2WIN, se procedió a dibujar la respectiva columna litológica y basados en las características hidráulicas también se obtuvieron las unidades acuíferas respectivas, en la Figura 62 se observa la columna del SEV 1 con sus unidades acuíferas correspondientes:

Figura 62

Columna Estratigráfica SEV 1



Fuente: El autor, (2020).

Análisis de datos del SEV 2:

Tabla 19

Análisis de datos del SEV 2

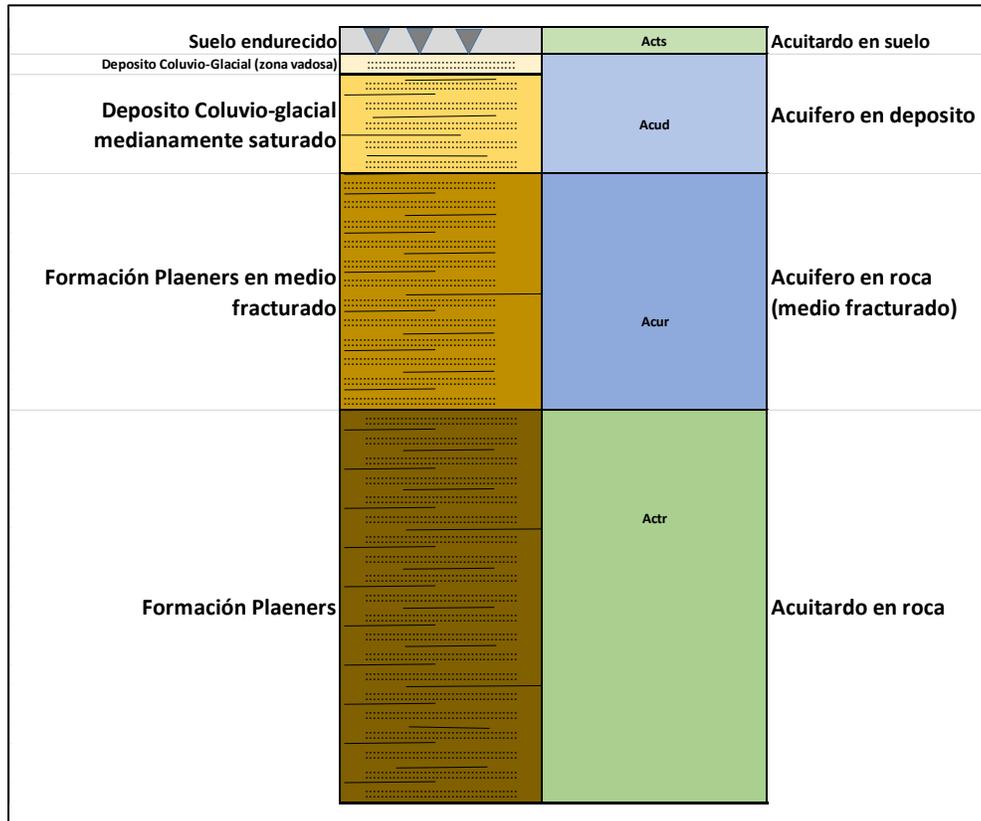
SONDEO	PROFUNDIDAD (metros)	ESPESOR (metros)	RESISTIVIDAD	CORRELACIÓN
SEV 02	0 – 0.819	0.82	39417	Suelo endurecido
	0.819-0.956	0.14	6766	Depósito Coluvio-glacial (zona vadosa)
	0.956– 3.15	2.20	2148	Depósito Coluvio-glacial moderadamente saturado
	3.15-5.2	2.05	1647	Depósito Coluvio-glacial saturado
	5.2-55	49.80	5317	Fm Planners
SEV 2 N:04.51143 W:074.15730 ALT: 3050 MTS				

Fuente: El autor, (2020).

En la Figura 63 se observa la columna del SEV 2 con sus unidades acuíferas correspondientes:

Figura 63

Columna Estratigráfica SEV 2



Fuente: El autor, (2020).

Análisis de datos del SEV 3:

Tabla 20

Análisis de datos del SEV 3

SONDEO	PROFUNDIDAD (metros)	ESPESOR (metros)	RESISTIVIDAD	CORRELACIÓN
SEV 03	0 – 0.573	0.573	70990	Suelo endurecido
	0.573 – 1.62	1.05	8124	Depósito Coluvio-glacial (zona vadosa)
	1.62– 5.06	3.44	699	Depósito Coluvio-glacial saturado

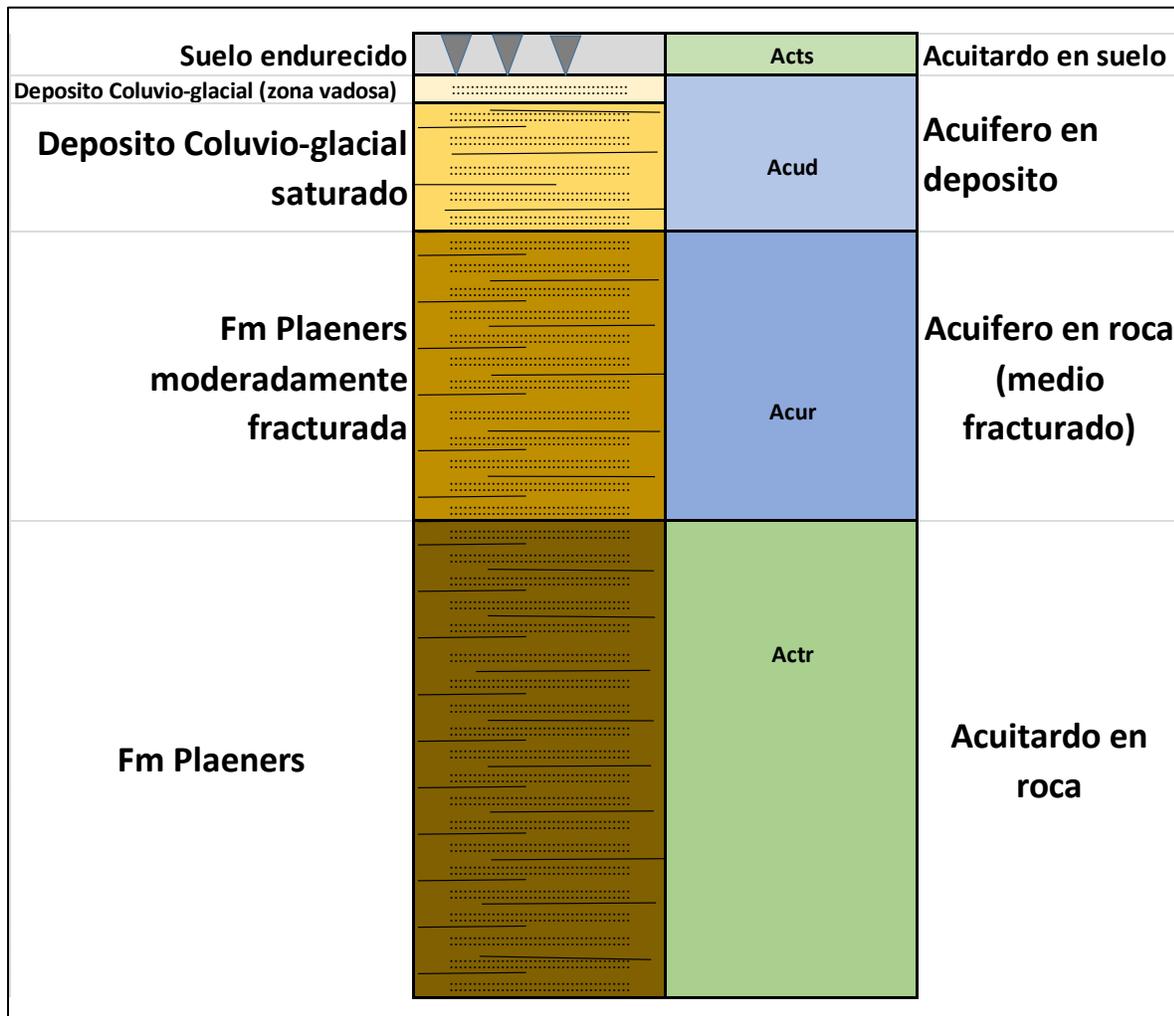
5.06-24.1	19.1	9835	Depósito Coluvio-glacial (zona vadosa)
24.1-56.8	32.7	2898	Fm Planners
SEV 3 N:04.51116 W:074.5739 ALT: 3044 MT			

Fuente: El autor, (2020).

En la Figura 64 se observa la columna del SEV 3 con sus unidades acuíferas correspondientes:

Figura 64

Columna Estratigráfica SEV 3



Fuente: El autor, (2020).

7.1.1. Análisis Unidades Acuíferas SEV

El análisis de la información obtenida en campo de los tres SEV y procesada mediante el programa IPI2WIN arrojó cinco capas, las cuales basados en sus características se consolidaron para describir litológicamente e hidráulicamente cómo se comporta esta área de estudio la cual se describe en la tabla 21:

Tabla 21

Análisis Unidades Acuíferas basados en la información de los SEV

CORRELACIÓN			UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS	
Capa 1	Suelo endurecido	Suelo residuales	Acuitardo en suelo	Acts
Capa 2	Bloques de arenisca en matriz limosa (Zona Vadosa)	Deposito coluvio glacial	Acuífero en deposito	Acud
Capa 3	Bloques de arenisca en matriz limosa (Zona saturada)			
Capa 4	Secuencia de liditas o chert (Zona saturada)	Fm Plaeners, moderadamente fracturada	Acuífero en roca (medio fracturado)	Acur
Capa 5	Secuencia de liditas o chert (No saturada)	Fm Plaeners, poco fracturada	Acuitardo en roca	Actr

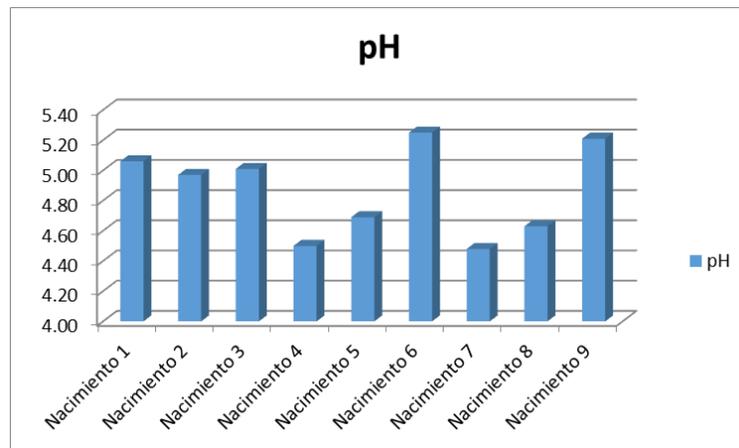
Fuente: El autor, (2020).

7.2 Hidrogeología

Basados en los parámetros físico-químicos medidos en las aguas de los nacimientos de la Quebrada Aguas Calientes se tienen las siguientes conclusiones:

Figura 65

Relación de pH tomado en campo de los nacederos de aguas inventariados

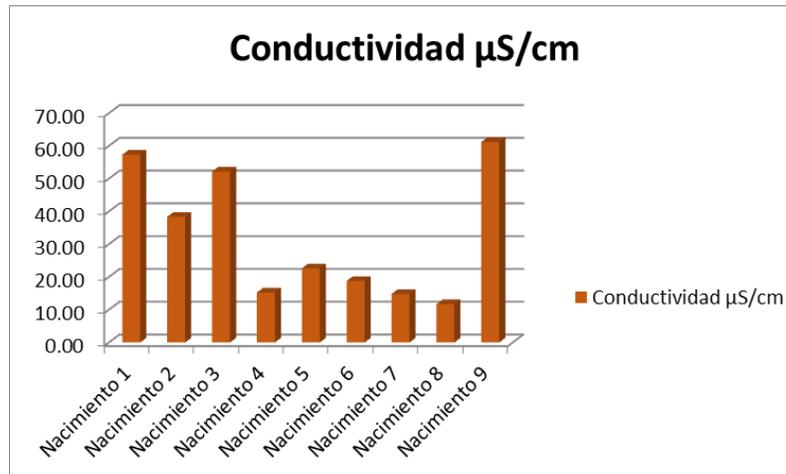


Fuente: El autor, (2020).

Las muestras de agua de la Quebrada Aguas Calientes asociadas a los nacimientos de agua, presentan valores de pH en el rango de 4.48 a 5.25, lo que las clasifica como aguas acidas, esto como consecuencia de suelos organismos y a la oxidación y descomposición de esta materia orgánica, que genera residuos orgánicos y óxidos de hierro produciendo aumento de contenido de cationes hidroxilo.

Figura 66

Relación de Conductividad tomada en campo de los nacederos de agua inventariados



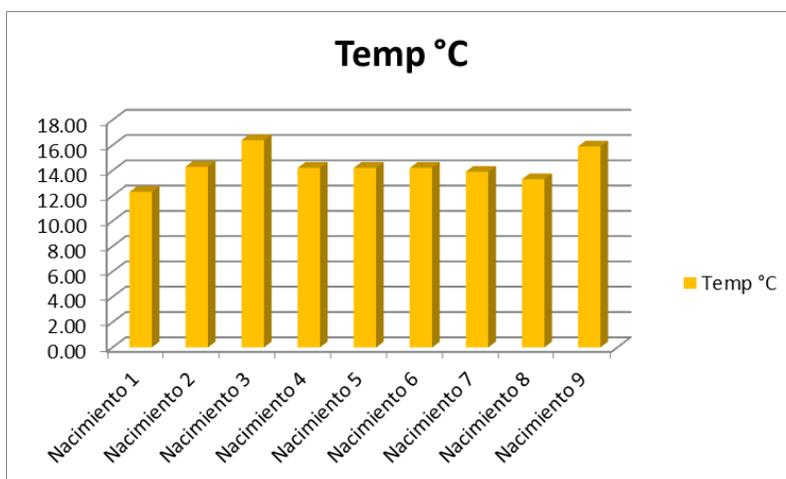
Fuente: El autor, (2020).

A partir de la información obtenida en campo relacionada con la conductividad de los nacederos de agua, se puede hacer dos grupos de conductividad, uno asociado a los nacederos 1,2,3 y 9 con conductividades entre los 40 y los 60 $\mu\text{S/cm}$, y otro grupo asociado a los nacederos 4,5,6,7 y 8 con valores menores a 20 $\mu\text{S/cm}$; lo cual demuestra que a pesar de ser catalogadas como aguas ácidas, la cantidad de iones en solución es baja siendo los mayores valores en donde tenemos mayores contenidos de materia orgánica.

Los nacederos con menor conductividad son los que están relacionados con bloques de roca y los de mayor están relacionados al suelo.

Figura 67

Relación de temperatura tomada en campo de los nacimientos de agua inventariados



Fuente: El autor, (2020).

La temperatura varía de 12.3°C a 16.4°C, lo que cataloga estas aguas como no termales; se resalta que entre mayor temperatura mayor solubilidad.

Estos rangos de temperatura presentes en el área de estudio nos indican que son flujos locales, es decir que no tiene más de un kilómetro de profundidad, son muy cercanos a la superficie con poca o nula influencia del gradiente térmico.

Para las representaciones gráficas de los diagramas de Piper y el diagrama de Stiff es necesario hacer la conversión de las unidades, ya que los resultados de laboratorio están en la unidad de milimol por litro (mmol/L) y el diagrama de Stiff se deben convertir a miliequivalentes por litro (mEq/L), mientras que para el Diagrama de Piper de deben tener los datos en porcentaje (%). En la tabla 22 se observan estas conversiones:

Tabla 22

Resultados de análisis de muestras de agua en unidades de mmol/l, mEq/l y %

	Unidades	Ca ++	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Total	SO ₄ ⁼	Cl, Cl ⁻	CHO ₃ ⁻	Total	Si
		Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Cationes	Sulfuros	Cloruros	Bicarbonatos	Aniones	Silicio mg/l
Muestra 1	mmol/l	0.052	0.085	0.063	0.172	0.372	0.05	0.18	0.44	0.67	6.61
	mEq/l	0.104	0.17	0.063	0.172	0.509	0.1	0.18	0.44	0.72	0
	%	20.432	33.399	46.169			13.889	25	61.111		
Muestra 2	Unidades	Ca ++	Mg ⁺⁺	K ⁺	Na ⁺	Total	SO ₄ ⁼	Cl, Cl ⁻	CHO ₃ ⁻	Total	
		Calcio	Magnesio	Potasio	Sodio	Cationes	Sulfuros	Cloruros	Bicarbonatos	Aniones	Silicio mg/l
	mmol/l	0.012	0.011	0.023	0.048	0.094	0.01	0.03	0.12	0.16	4.04
	mEq/l	0.024	0.022	0.023	0.048	0.117	0.02	0.03	0.12	0.17	
%	20.513	18.803	60.684			11.765	17.647	70.588			

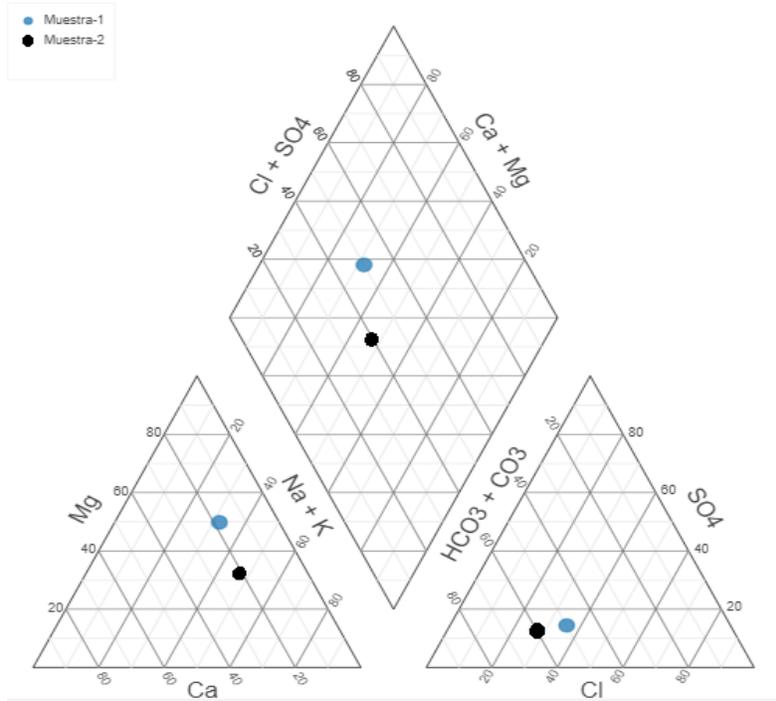
Fuente: IGAC, (2020).

Los valores que arrojaron estos análisis fueron muy bajos, lo anterior se refleja que para el Diagrama de Stiff se manejó una escala más grande y los resultados en el Diagrama de Schoeller no fueron significativos.

7.2.1 Diagrama de Piper y Stiff

Figura 68

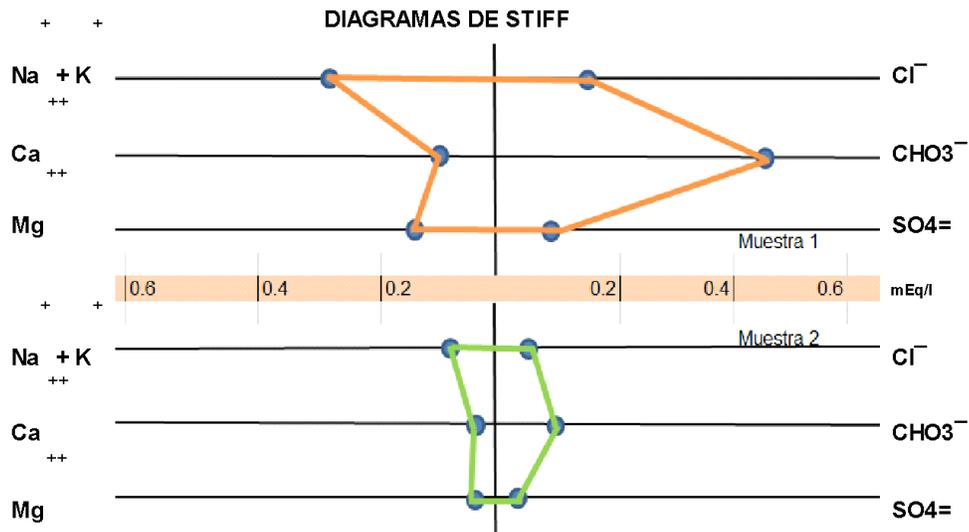
Diagrama de Piper nos muestra las familias de agua de las muestras de agua



Fuente: El autor, (2020).

Figura 69

Diagrama de Stiff nos muestra el anión y catión dominante en las muestras de agua



Fuente: El autor, (2020).

Aguas subterráneas naturales: Mayor mineralización de Sodio y Potasio hacia los aniones y hacia los bicarbonatos en los aniones, como estas aguas subterráneas son bicarbonatadas significan que tiene poco tiempo de tránsito en el subsuelo.

Los datos obtenidos a partir de los Diagramas de Piper y de Stiff indican que la composición de las aguas de este sector son de tipo Bicarbonatados – Sódicas, en donde los iones en disolución más abundantes son los iones Bicarbonatados y le siguen los iones Sódico – Magnésicos.

La dureza está determinada como masa de carbonato cálcico en miligramos por cada litro de disolución, es decir, mg CaCO₃/L, se considera como si todo el calcio estuviese en forma de carbonato cálcico y el magnesio también fuese carbonato cálcico.

Los coeficientes indicados se deben a la relación existente entre la masa del calcio y del magnesio con la masa del carbonato cálcico (100/40 para el calcio, 100/24 para el magnesio), dividiendo por 10 esta misma relación, tenemos la unidad llamada GHF o °fH (Grados Hidrotimétricos Franceses); estos dan lugar a la escala de clasificación de un agua muy dulce a un agua muy dura:

Tabla 23

Dureza de las aguas según GHF

Denominación	G.H.F.
	Muy blanda
Blanda	7 a 14
Semiblanda	14 a 22
Semidura	22 a 32
Dura	32 a 54
Muy dura	> 54

Fuente: IGAC, (2020).

Como observamos en la tabla 23, un agua muy blanda (o muy dulce) es aquella que presenta una dureza inferior a 7°GHF (o a 70 mg de CaCO₃/L), mientras que un agua muy dura es aquella que presenta más de 54°fH (más de 540 mg CaCO₃/L).

Tabla 24

Dureza de las muestras de agua tomadas de los nacederos de agua 1 y 4

Dureza Total (GHF)	
Muestra 1	3.014
Muestra 2	0.658

Fuente: IGAC, (2020).

Basado en es la clasificación GHF y como se observa en la tabla 24, las aguas estudiadas son muy dulces, es decir que tienen una dureza inferior a 7°fH (o a 70 mg de CaCO₃/L).

En las muestras de agua se denomina *Sólidos Disueltos* a las partículas presentes de materia orgánica e inorgánica, dichas partículas no son visibles por separado y no se sedimentan naturalmente, para ser removidas se deben usar métodos fisicoquímicos, estas partículas son indicadores de mala calidad del agua y se identifican organolépticamente por su olor, color y sabor.

Tabla 25

Sales totales de sólidos disueltos mg/l de las muestras de agua tomadas de los nacederos de agua 1 y 4

Sales totales de sólidos disueltos mg/l	
Muestra 1	38.08
Muestra 2	9.043

Fuente: IGAC, (2020).

El agua mineral natural y el agua de potable tienen un valor promedio de TDS de entre 100 y 200 mg/l, por lo anterior las aguas que emergen en los nacederos de agua de la zona de estudio, está en los rangos de agua potable (Tabla 25).

7.2.2. Silicio y cloruros

El silicio (Si) es un semimetal que constituye el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre. La degradación de las rocas da lugar al dióxido de silicio, que se encuentra en el agua natural. El dióxido de silicio, también denominado «sílice» es un compuesto químico formado por un óxido de silicio con la fórmula química SiO_2 .

Es el constituyente común de las rocas ígneas, el cuarzo y la arena. La sílice existe normalmente como óxido (como SiO_2 en la arena y como silicato $\text{SiO}_3 =$). Puede estar en forma insoluble, soluble y coloidal. Muchas aguas naturales contienen menos de 10 mg/l de sílice, algunas pueden llegar a contener hasta 80 mg/l.

El cloro es el halógeno más abundante en la corteza continental y se acumula en reservas de agua terminales (océanos, lagos continentales de cuenca cerrada) debido a que su migración no es afectada por ambientes ácido-alcalinos ni de oxidación reducción, no forma prácticamente ninguna sal insoluble y existe en la naturaleza solo como Cl^- .

Las muestras de aguas arrojaron valores de Silicio de 6.61 mg/L para el nacedero 1 y de 4.04 mg/L para el nacedero 2, para los Cloruros la muestra del nacedero 1 dio 0.18 mEq/L y la muestra 2 dio 0.03 mEq/L; lo que nos indican que son aguas que se pueden usar para riego y en algunos casos pueden llegar a ser potables.

Como se observa en la tabla 26, podemos clasificar estas muestras como Aguas Bicarbonatadas – Cállica ($\text{HCO}_3\text{-Ca}$), estas aguas son geoquímicamente similares, esto está relacionado con rocas carbonatadas y oxidación de sulfatos.

Tabla 26

Análisis de familias de agua y características de las muestras de agua de los nacederos de agua 1 y 4

Punto de Muestreo	Facie	Anión	Catión	Dureza
Muestra 1	Na-K-HCO ₃	Bicarbonatada	Sódico-potásica	Muy blanda o muy agua dulce
Muestra 2	Na-K-HCO ₃	Bicarbonatada	Sódico-potásica	Muy blanda o muy agua dulce

Fuente: El autor, (2020)

7.2.3. Análisis muestras de suelos asociados a los nacederos de agua.

Con base a resultados obtenidos a través de análisis de suelo realizado, se plantea que son suelos de textura franco Arenosa, presenta niveles de acidez pH 5,5 y 4,6 que lo posesiona en fuertemente ácido y muy fuertemente ácido, presenta baja capacidad de

Tabla 27

Parámetros hidráulicos generales del área de estudio

PARÁMETROS GEOHIDRÁULICOS GENERALIZADOS													
Unidad Acuífero	Espesores	Litología	Características Hidrogeológicas	K Conductividad Hidráulica m/día CAR	K Conductividad Hidráulica m/día Custodio y Llamas	S Coeficiente de almacenamiento	CE Capacidad Específica l/m/s	T m ² /día	Cuadral Q l/p/s	Resistividad (Ohm.m)	Descripción	Porosidad Total % (me)	Porosidad Efectiva % (m)
Drepósitos Fluvioglaciars (Qflg) Depósitos Aluviales (Qal)	0-20	Bloques y fragmentos de arenisca incluidos dentro de una matriz limo-arenosa. Sedimentos arenosos, limosos y gravas.	De alta a moderada importancia hidrogeológica.	0.13	1-500			2.7 - 228	0.03 - 22.62	< 20-50	Gravas	25-40	13-26
					10 - 10 ³							Álviones	20-40
FM LA BORTI ERNA	220	Areniscas de grano fino a medio en la base y gruesa a conglomerática en el tope estratificada con arcillolitas y limolitas silíceas.	De moderada a gran importancia hidrogeológica.	0.92-4.4	(10-4) - (-10)	1.5*10-4 1.4*10-11	0.64 y 4.53	66-81	1.3-14.5	100-300	Arenas finas	20-50	10. - 28
FM PLAENERS	60	Arcillolitas, limolitas, silíceas, lilitas y areniscas	Poca importancia hidrogeológica	0.3	(10-5) - (-10)		0.005-0.07	9.6	0.06-4	50-100		0.1 -30	
FM RENISCA	450	Sucesión de areniscas interestratificadas con limolitas silíceas y arcillolitas.	De moderada importancia hidrogeológica	0.8	(10-4) - (-10)	4.5*10-4	0.2-0.3	22-356	0.2-0.3	500	Arenas finas	20-50	10. - 28

Fuente: CAR y SIAM S.A., (2010). Porosidad tomada de Sanders (1998) y Custodio, E. y Llamas, M. (1983).

7.3 Cacterización Hidrogeológico Conceptual

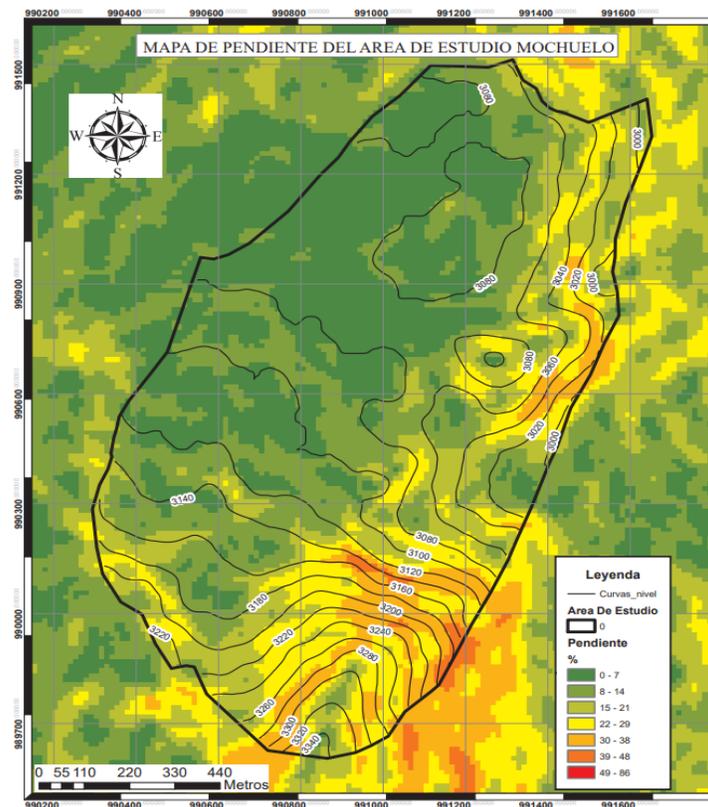
7.3.1 Mapa de Pendientes:

El valor de pendiente de este plano se calcula mediante la técnica de promedio máximo. La dirección a la que apunta el plano es la orientación para la celda de procesamiento, mientras menor sea el valor de la pendiente, más plano será el terreno; mientras más alto sea el valor de la pendiente, más empinado será el terreno.

En este mapa (Figura 70) podemos observar cómo está conformada la topografía y las partes más elevadas de la zona de estudio.

Figura 70

Mapa de pendientes de la zona de estudio



Fuente: El autor, (2020).

La zona de estudio está principalmente en los rangos de 0 a 21%, las partes altas se localizan en el Cerro del Gavilán y el Cerro de la antena en donde está la parte más alta del proyecto con 3400 msnm.

7.3.2 Mapa de Dirección de Flujos:

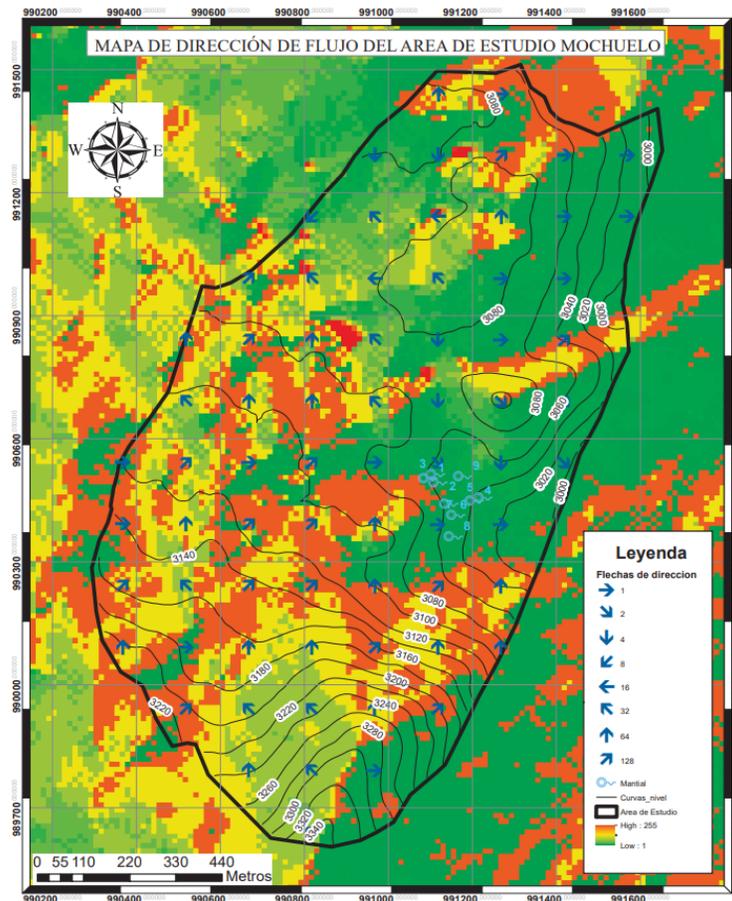
La herramienta de dirección de flujo crea un ráster de dirección de flujo desde cada celda hasta su vecina con la pendiente descendente más empinada, existen ocho direcciones de salida válidas que se relacionan con las ocho celdas adyacentes hacia dónde puede ir el flujo. Este enfoque comúnmente se denomina caracterización de flujo de ocho direcciones (D8).

El mapa de flujos permite determinar la interacción entre dos o más puntos, representando la dirección del movimiento del agua superficial por medio de flechas, que nos indican el camino que recorre el agua en ese sector.

En colores amarillos y rojos (Figura 71) se observan las zonas de recarga que son las partes más altas de la zona de estudio, en donde sobresalen el Cerro El Gavilán y el Cerro de la Antena.

Figura 71

Mapa de Dirección de flujos de la zona de estudio



Fuente: El autor, (2020).

En la sección sur oriental se observa la zona de Nacederos de agua, en esta área se identificaron nueve, por lo anterior esta es la zona de descarga, también podemos ver los flujos de agua superficial siguen la trayectoria de la Quebrada Aguas Calientes para descargar sus aguas ya sea en su parte alta o media.

La dirección de flujo de las aguas subterráneas son consecuentes con el gradiente hidráulico observado y estudiado en la zona, es decir que no se encontraron flujos locales consecuentes con la gravedad.

Figura 72

Geografía de la zona de estudio



Nota: A la derecha encontramos el Cerro El Gavilan, en la parte central dirección de flujos por las pendientes, bajan hacia el oriente. Fuente Jardín Botánico de Bogotá, (2020).

7.3.3 Unidades Hidrogeológicas

La zona de estudio en donde se desarrolló la caracterización hidrogeológica de la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes, posee un ciclo hidrogeológico que se caracteriza principalmente por las siguientes características (Figura 73):

No existe presencia de flujos de aguas termales, lo que evidencia que la recarga se produce por la infiltración de las precipitaciones y del agua condensada por la vegetación existente.

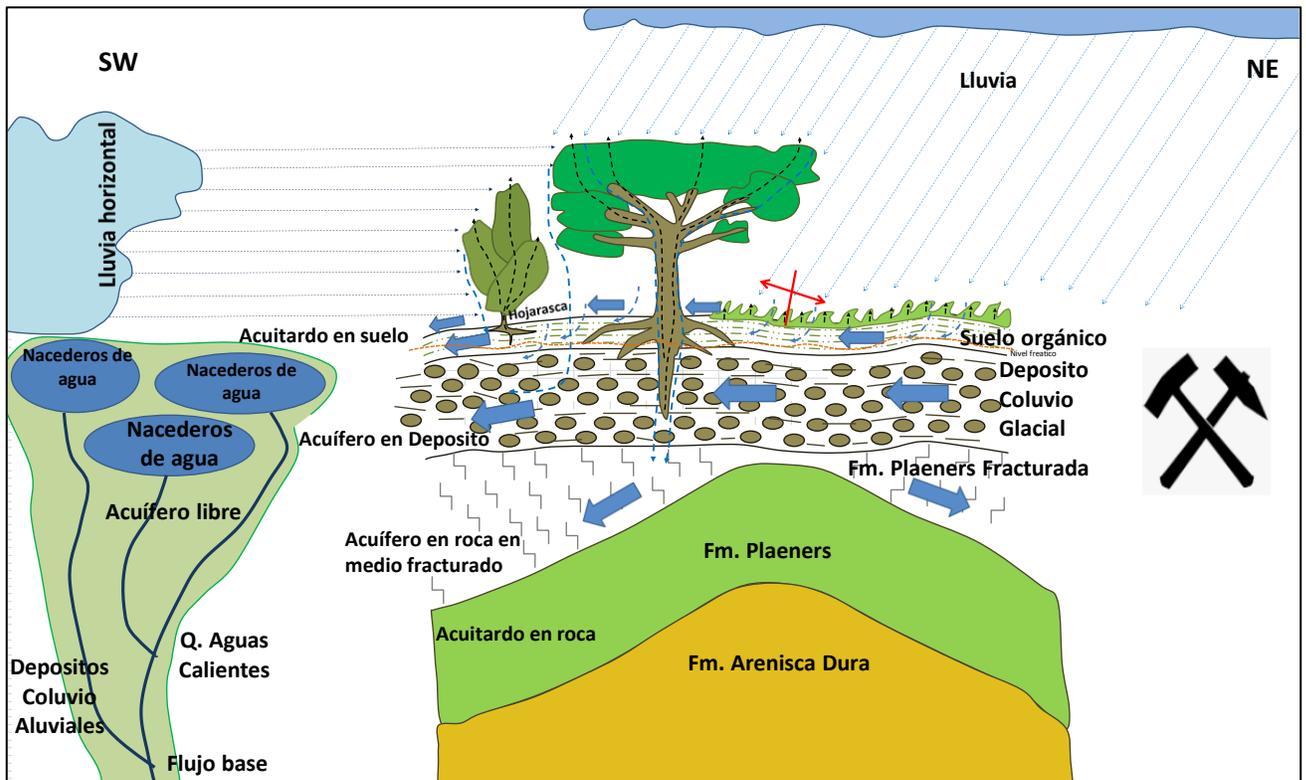
Esta área posee un régimen de estaciones bimodal, se presentan dos estaciones de lluvia, el primero en los meses de marzo a mayo, y el segundo de octubre a noviembre intercalados con dos períodos de pocas lluvias, con un promedio anual de 733.4 mm/año; el agua que llega a la superficie tiene dos caminos de flujo, un flujo superficial asociado a la escorrentía de aguas superficiales a manera de pequeños canales que fluyen hacia la quebrada y siguen su flujo respecto al cause asociado al drenaje principal, luego tenemos una fracción del agua precipitación que se infiltra y recorre paralelo a la superficie,

siguiendo el gradiente hidrómico de la partes altas hacia las partes bajas denominado flujo subsuperficial, el cual transita por debajo del nivel del suelo y en la parte superior de los depósitos coluvio glaciales en la zona vadosa sin integrarse al nivel freático local, luego esto flujos subsuperficiales descargan en los cauces principales asociados a los drenajes superficiales, siendo importante aclarar que en algunos sectores estos flujos salen a superficie por donde están la mayoría de los nacedores de agua que fueron encontrados.

Luego, la parte restante de la fracción de agua infiltrada se integra al nivel freático, asociados a las aguas subterráneas locales en donde está presente en los Depósitos Fluvio Glaciales y la parte superior de la Formación Plaeners (Ksgp) moderadamente fracturada, estas dos unidades corresponden a las unidades acuíferas más importantes de la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes.

Figura 73

Caracterización hidrogeológica de la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes



Fuente: El autor, (2020)

Un comportamiento distinto se observa a nivel de flujos de agua subsuperficial predominantemente relacionados a los depósitos coluvio – aluviales, dado que al no representar aguas subterráneas no se rigen bajo el mismo comportamiento asociado a la estructura anticlinal, siendo dominante para su dirección de flujo el gradiente asociado a la topografía, lo que indica que estos sistemas de aguas subsuperficiales pueden verse afectados al eliminar la capa superficial presente en las áreas objeto de avance de la minería actual, lo que podría incidir en la recarga de los nacimientos presentes en el área de estudio.

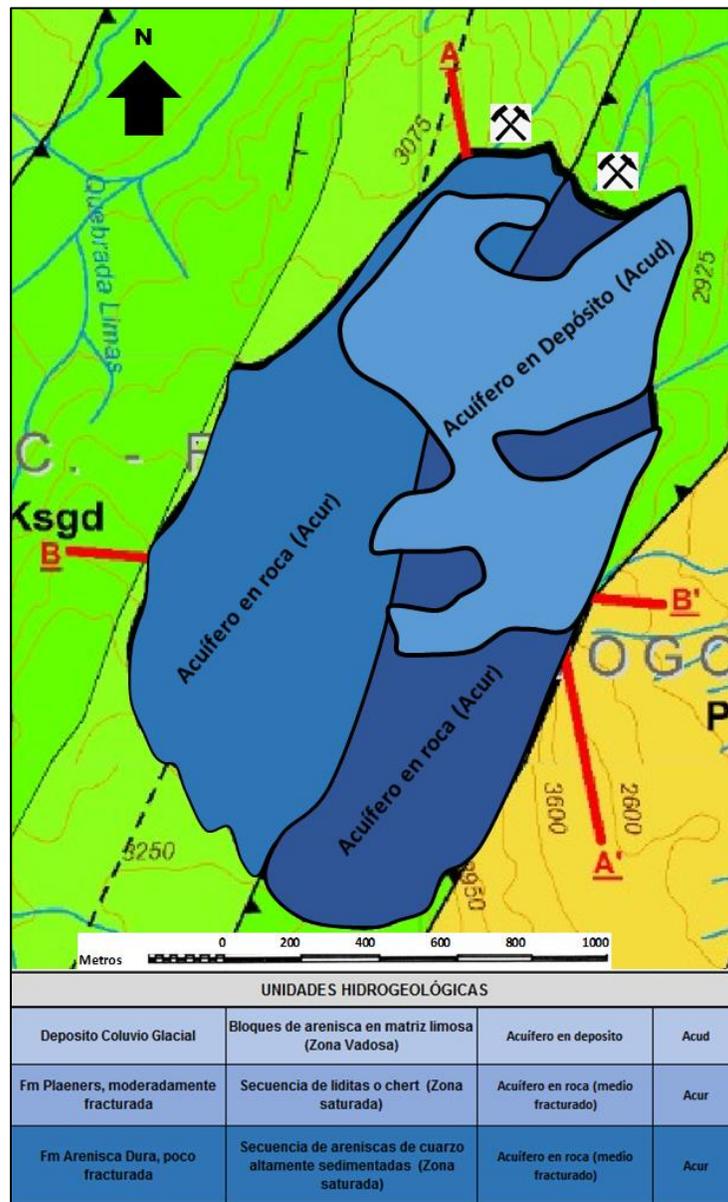
En el área de estudio se identifican dos unidades hidrogeológicas las cuales se describen a continuación:

7.3.3.1. Acuífero de Deposito (Acud).

Correlación depósito coluvio glacial (bloques de arenisca en una matriz limosa), Capas gruesas de areniscas compactas, con intercalaciones de lodolitas, se localiza en zonas con pendientes suaves (Figura 74).

Figura 74

Mapa Unidades Hidrogeológicas



Fuente: El autor, (2020).

7.3.3.2. Acuífero en Roca (Acur). Secuencia de liditas Fm Plaeners (Ksgp), moderadamente fracturada, capas de areniscas y liditas compactas, con intercalaciones delgadas de lodolitas.

7.3.3.3. Acuífero en Roca (Acur). (se repite con el anterior) Secuencia de cuarzo areniscas Fm Arenisca Dura (Ksgd), moderadamente fracturada, capas de areniscas con cemento silíceo e intercalaciones de lodolitas.

7.3.3.4. Secciones Geológicas. A partir de los datos obtenidos en campo con el fin de actualizar la cartografía del Servicio Geológico Colombiano disponible a una escala 1:100.000, se observa que existe una estructura de deformación plástica denominada anticlinal sentido SW – NE y que no había sido reportada. Estas secciones esquemáticas nos permiten ver la disposición de la roca, los materiales geológicos, la estructura anticlinal y la localización de los frentes mineros en relación a la zona de nacimientos de agua.

Podemos ver en la sección geológica en donde tenemos la estructura anticlinal básicamente formada por la Fm Plaeners (Ksgp), en donde se evidencia que por procesos glaciales recientes esta erosionada en su parte superior, no se observa la Fm Labor y Tierna (Ksgt) pero los relictos o materiales geológicos que conformaban la Fm Labor y Tierna (Ksgt) los encontramos a manera de bloques en una matriz limosa relacionada a Depósitos Coluvio Glaciales actual a manera de discordante.

Como consecuencia de esta estructura anticlinal (el eje del anticlinal está sirviendo como divisoria de aguas subterráneas), observamos como los frentes mineros se encuentran hacia el flanco Nor-Este del anticlinal y la zona de nacederos de agua se encuentra en el flanco Sur-Oeste, lo que nos muestra que a nivel de aguas subterráneas locales no existe una conexión hidráulica entre las aguas subterráneas presentes en la porosidad secundaria

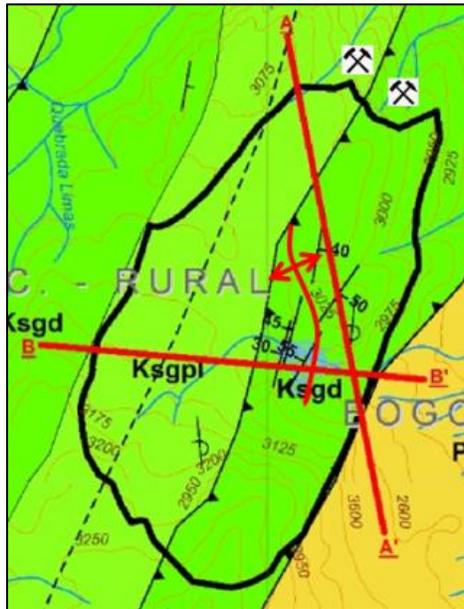
de la Fm Plaeners (Ksgp) con relación al Flanco SW del sistema anticlinal, ya que la dirección de flujo del agua subterránea va a ser consecuente con la dirección de buzamiento lo que nos permite ver una desconexión a nivel de aguas subterráneas, es decir que con el avance de la actividad minera, los flujos que se originan en el flanco NE no tiene incidencia en la dinámica hidráulica del flanco SW.

Sin embargo y como se observa en el perfil esquemático de la Figura 73, existe una cobertura suprayacente a la Fm Plaeners (Ksgp) tipo Deposito Coluvio Glacial, que se encuentra cubriendo la secuencia rocosa a través del área de estudio, este Deposito presenta una porosidad primaria importante y no responde a esta disposición estructural que genera el anticlinal, dejando abierta la posibilidad de que exista una conexión de aguas subsuperficiales desde los extremos de los dos flancos del sistema anticlinal y que estas aguas afloren en la zona de nacederos de agua.

A continuación en la Figura 75 se muestran las secciones geológicas. Se realizaron dos secciones la primera A-A` que tiene sentido norte sur y la segunda sección B-B` tiene sentido Oriente – Occidente; estos cortes verticales se realizan con la finalidad de conocer la disposición de las rocas a profundidad.

Figura 75

Mapa sentido de las secciones A-A' y B-B' sobre las unidades geológicas

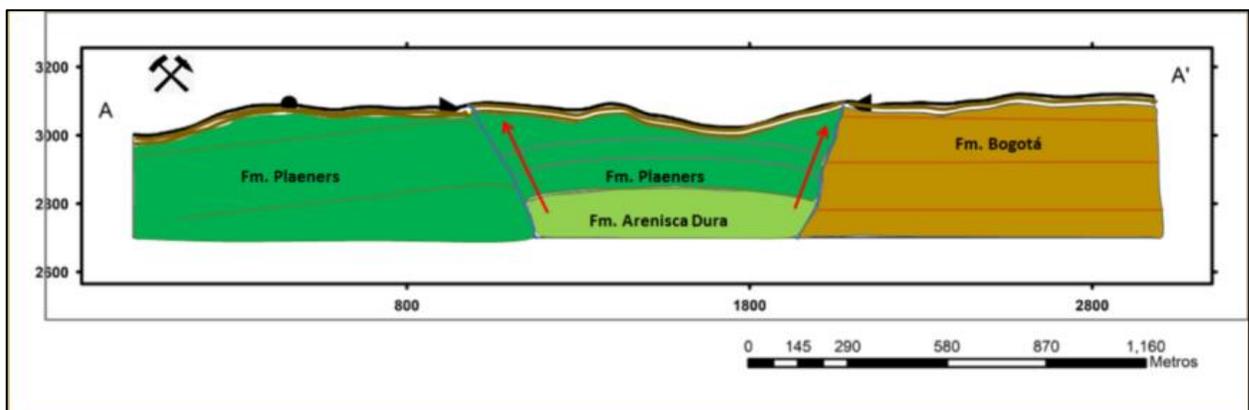


Nota: Anticlinal erosionado esta representado por la linea curva color rojo. Fuente: Servicio Geológico Colombino y el autor, (2020).

En estos cortes observamos como las fallas inversas dividen las unidades geológicas formando un gran bloque que va ascendiendo.

Figura 76

Diagrama Sección A-A'



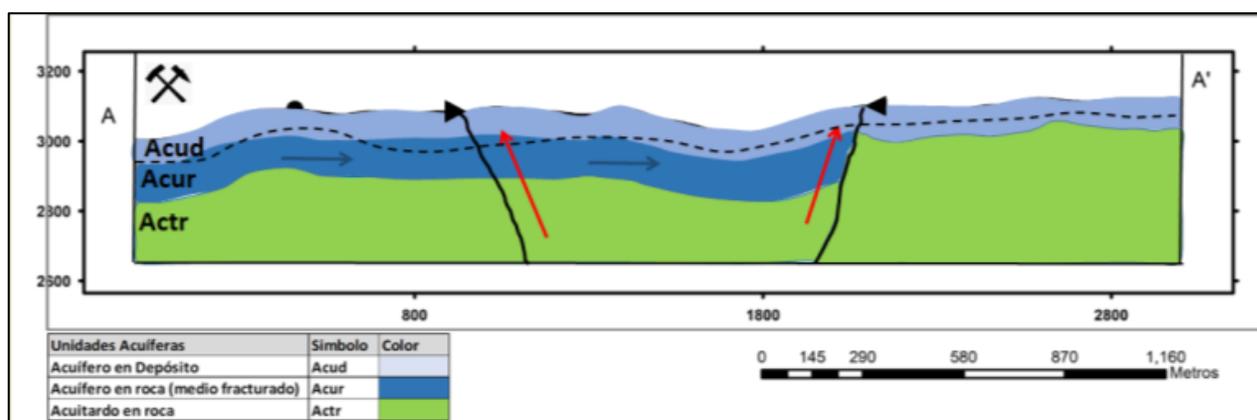
Fuente: El autor, (2020)

En la sección A-A' Unidades geológicas presentes en el área de estudio el anticlinal se observa desde un flanco y las capas de las unidades geológicas se ven relativamente horizontales.

El punto es el contacto inferido, las flechas son fallas invertidas y el sentido de la fecha es la dirección de la falla.

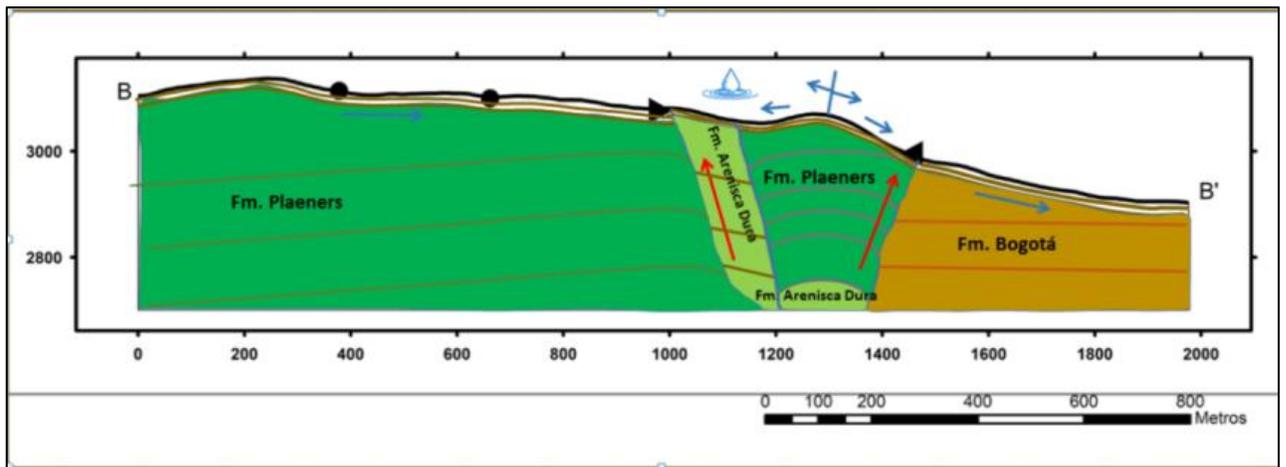
Figura 77

Unidades hidrogeológicas vistas en la sección A-A'



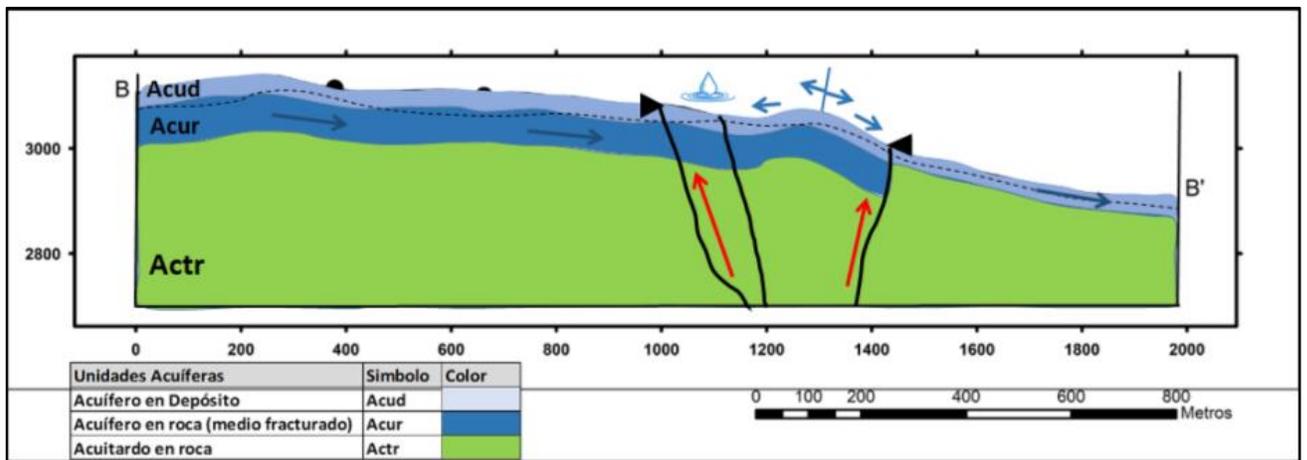
Fuente: El autor, (2020).

Las unidades hidrogeológicas vistas en la sección A-A', en la parte superior se encuentra la Unidad Hidrogeológica Acuífero de Depósito Flujo Glacial, luego está la Unidad Acuífero en roca que se caracteriza por presentar porosidad secundaria y en la parte inferior se encuentra el Acuitardo en roca.

Figura 78*Diagrama Sección B-B' Unidades Geológicas*

Fuente: El autor, (2020).

En la sección B-B' se observan las unidades geológicas presentes en la zona de estudios, se observa como las fallas inversas forman un bloque que va ascendiendo, además sirven como fronteras entre estas unidades.

Figura 79*Unidades hidrogeológicas vistas en la sección B-B'*

Fuente: El autor, (2020)

Las unidades hidrogeológicas vistas en la sección B-B', en la parte superior se encuentra la Unidad Hidrogeológica Acuífero de Depósito Flujo Glacial, luego está la Unidad Acuífero en roca que se caracteriza por presentar porosidad secundaria y en la parte inferior se encuentra el Acuitardo en roca se observa el anticlinal de frente, las aguas de precipitación que caen en este sitio puede tomar cualquiera de las dos direcciones de flujo, además las fallas inversas en este sector podrían estar facilitando la recarga de los acuíferos.

8. Conclusiones

Con la caracterización Hidrogeológica Conceptual elaborada a partir de la caracterización de insumos (geológico, hidráulico e hidrogeoquímico), se obtienen las siguientes conclusiones:

La actividad minera presente en el área de estudio asociada a la explotación de arcillas, gravas y arenas en el sector de Mochuelo Bajo no genera ni generará impactos directos en la dinámica de aguas subterráneas de los nacimientos de agua en la cuenca de la Quebrada Aguas Calientes; sin embargo se generan modificaciones directas en la recarga de agua asociada a flujos subsuperficiales en las unidades hidrogeológicas superficiales asociadas a los depósitos coluvio – aluviales, los cuales soportan los nacederos de agua, lo anterior basados en los siguientes resultados:

La caracterización geológica concluye que, el área de estudio está conformada litológicamente por una secuencia de rocas de edad Cretácica (Fm Arenisca Dura (Ksgd), Pleaneras (Ksgp) y Fm Labor y Tierna (Ksgt) pertenecientes al Grupo Guadalupe (Kgg)), las cuales se encuentran deformadas plásticamente formando una estructura anticlinal, esta estructura presenta un rumbo Nor-Oeste, en el cual se observa a partir de información colectada en campo que se encuentra actualmente erodado (no se encontró la Fm Labor y Tierna (Ksgt) en la zona de estudio), como consecuencia de procesos erosivos asociados a masas glaciales, por lo que hoy en día se observan discordantemente depósitos definidos como de naturaleza coluvio glacial de manera dominante a lo largo del área de estudio.

Basados en esta información geológica se concluye que, las labores mineras actuales y futuras se desarrollan en el flanco NE de la estructura anticlinal por lo que estratigráficamente los flujos de agua subterránea presentan una dirección preferencial NE,

dirección opuesta en donde se localizan los nacederos de agua asociados a la Quebrada Aguas Calientes, esto sumado a que litológicamente la Fm Pleaners (Ksgp) y Arenisca Dura (Ksgd) presenta muy baja porosidad primaria, siendo importante en relación al comportamiento como acuífero la parte superior moderadamente fracturada en esta zona.

Se identifica como las unidades acuíferas más importantes en la microcuenca Quebrada Aguas Calientes los depósitos coluvio glaciales presentes de manera discordantes sobre las rocas cretácicas, dado que presentan una granulometría predominantemente de bloques de arenisca embebidas en una matriz limosa, lo que permite obtener una porosidad primaria con la capacidad de almacenar y transmitir agua de manera efectiva; cabe destacar que la mayor parte de los nacederos de agua encontrados, están asociados a suelos residuales generados a partir de este depósito cuaternario.

La microcuenca Aguas Calientes presenta asociado a la corriente activa actual, un depósito sectorizado de origen aluvial de granulometría predominantemente compuesta de gravas y arena, sobre la cual existe actualmente el drenaje principal y se convierte en la segunda unidad de importancia hidrogeológica.

De acuerdo a la revisión y compilación de información secundaria, asociadas a los materiales geológicos presentes en la zona de estudio, podemos resumir que las unidades geológicas con mayor potencial acuífero se relacionan a los depósitos coluvio glaciales, los cuales presentan Porosidad Total % (me) entre 20 - 40, K Conductividad Hidráulica de 1 a 500 m/día (Tabla 1 Valores de porosidad según Custodio y Llamas, 1983) (Villarroya, F., 2009), y transmisividad entre 10 y 10³ (m²/día), lo que soporta a nivel hidráulico el comportamiento que presentaran estas unidades geológicas en relación con las aguas subterráneas, se clasifican las Formaciones Arenisca Dura (Ksgd) y Pleaners (Ksgp), como

rocas de comportamiento tipo acuitardo si son analizadas desde su porosidad primaria, pero pueden ser clasificadas como acuífero de porosidad secundaria en medio fracturado en las zonas cerca de la superficie en donde estos materiales se encuentran fracturados y presentan valores hidráulicos de Porosidad Total % (me) 0.1 y 30, K Conductividad Hidráulica de 10^{-4} a 10 m/día (Tabla 1 Valores de porosidad según Custodio y Llamas, 1983) (Villarroya, F., 2009), y transmisividad entre 1 y 10 (m²/día), por lo que se clasifican como acuitardos tanto las rocas de la Fm Pleaners (Ksgp) poco fracturada como los suelos residuales presentes a niveles de superficie.

A partir de las unidades geológicas obtenidas de la caracterización geológica, se clasifican de acuerdo a su comportamiento hidráulico en las siguientes unidades hidrogeológicas:

- Suelos endurecidos: compuestos por arcillas limos compactados. (Acuitardo en suelo).
- Depósitos: Bloques de arenisca en una matriz limosa (Acuífero en depósito)
- Fm Pleaners (Ksgp)- moderadamente fracturada: Secuencia de liditas o chert. (Acuífero en roca (medio fracturado)).
- Fm Pleaners (Ksgp) - poco fracturada: Secuencia de liditas o chert no saturada. (Acuitardo en roca).

Según los resultados de los análisis químicos, con datos tomados en campo y datos obtenidos a partir de los Diagramas de Piper y de Stiff, se halla que la composición de las aguas de este sector son de tipo Bicarbonatados – Sódicas, en donde los iones en disolución más abundantes son los iones Bicarbonatados y le siguen los iones Sódico – Magnésicos; la dureza del agua indica que son aguas muy dulces, y basados en la cantidad de cloruros y

sulfuros presentes en estas muestras se concluye que, estas aguas son de tránsito corto y una recarga directa de agua de precipitación.

La caracterización hidrogeológica de la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes, presenta los siguientes aspectos:

No existe presencia de flujos de aguas termales, lo que evidencia que la recarga se produce por la infiltración de las precipitaciones y del agua condensada por la vegetación existente, esta área posee un régimen de estaciones bimodal, el agua que llega a la superficie tiene dos caminos de flujo, un flujo superficial asociado a la escorrentía de aguas superficiales a manera de pequeños canales que fluyen hacia la quebrada y siguen su flujo respecto al cauce asociado al drenaje principal; luego tenemos una fracción del agua de precipitación que se infiltra y recorre paralelo a la superficie siguiendo el gradiente hidráulico desde las partes altas hacia las partes bajas denominado flujo subsuperficial; el cual transita por debajo del nivel del suelo y en la parte superior de los Depósitos Coluvio Glaciales (Qcog) en la zona vadosa sin integrarse al nivel freático local, luego estos flujos subsuperficiales descargan en los cauces principales asociados a los drenajes superficiales, siendo importante aclarar que en algunos sectores estos flujos salen a superficie por donde los nacederos de agua fueron encontrados.

En seguida, la parte restante de la fracción de agua infiltrada se integra al nivel freático asociados a las aguas subterráneas locales en donde está presente en los Depósitos Fluvio Glaciales (Qcog) y la parte superior de la Formación Plaeners (Ksgp) moderadamente fracturada, estas dos unidades corresponden a las unidades acuíferas más importantes de la microcuenca de la Quebrada Aguas Calientes. Un comportamiento distinto se observa a nivel de flujos de agua subsuperficial predominantemente relacionados a

los Depósitos Coluvio Aluviales (Qal), dado que al no representar aguas subterráneas no se rigen bajo el mismo comportamiento asociado a la estructura anticlinal, siendo dominante para su dirección de flujo el gradiente asociado a la topografía, lo que indica que estos sistemas de aguas subsuperficiales pueden verse afectados al eliminar la capa superficial presente en las áreas objeto de avance de la minería actual, lo que podría incidir en la recarga de los nacimientos presentes en el área de estudio.

Se considera a la Formación Plaeners (Ksgp) poco fracturada; como el basamento acuitado de la caracterización hidrogeológica local, estas aguas subterráneas está dominada por la presencia de una estructura anticlinal, hoy en día erosionada como consecuencia de la presencia de masas glaciales en los últimos 10.000 años en el sector, lo que da como resultado que las líneas de flujo dominantes tengan una dirección asociada a los flancos a esta estructura anticlinal, siendo el eje de esta estructura la divisoria de aguas asociadas a estas líneas de flujo.

9. Recomendaciones y futuras investigaciones

Se debe hacer control y en lo posible frenar la actividad de extracción minera que se desarrolla, no solo en el sector de Mochuelo Bajo sino en toda la Localidad de Ciudad Bolívar, ya que se están maximizando los daños que estas actividades tienen en los sistemas naturales existentes, debido a la afectación que la minería causa a las unidades acuíferas que genera un gran impacto en los ecosistemas aledaños, cambiando la disponibilidad de agua en el ambiente y desertizando nuevas áreas.

Además, se debe continuar con los estudios hidrogeológicos, de suelos, de flora y fauna y de rehabilitación ecológica necesarios para consolidar las áreas adquiridas por la UAESP, tanto en Mochuelo Bajo como Mochuelo Alto como nuevas áreas boscosas para la ciudad y la región, que ofrezcan bienes y servicios ambientales y contribuyan a la educación ambiental y el conocimiento de nuestra región.

Realizar la evaluación hidráulica de las unidades hidrogeológicas definidas in situ con toma de datos en campo con el fin de corroborar, refinar y estudiar a fondo los parámetros hidráulicos de las formaciones estudiadas.

Se recomienda complementar la caracterización hidrogeológica desarrollada a nivel de caracterización hidrogeológico conceptual y numérico, con el fin de cuantificar los aportes relacionados a flujos de aguas subterráneas y flujos de aguas subsuperficiales en los sistemas de aguas naturales (nacederos de aguas y drenajes de la Quebrada Aguas Calientes).

Elaborar un modelo hidrogeológico numérico con el fin de evaluar un escenario futuro de explotación minera, en donde se pueda observar los impactos generados en el tiempo en los sistemas de aguas subterráneas y superficiales.

Se recomienda realizar como complemento a la caracterización hidroquímica, una caracterización isotópica (estables Oxígeno 18, Deuterio y Tritio) con el fin de validar la caracterización hidrogeológica desarrollada y determinar posibles orígenes, conexiones y tiempos de tránsitos de las aguas subterráneas.

Referencias

- Acosta, J. y Ulloa, C. (1998). Memoria explicativa de la geología de la plancha 246 Fusagasugá. INGEOMINAS. Informe interno 2374b. 93 p. Bogotá. D.C.
- Agua y SIG. (2011). Los diagramas más usados para la interpretación de análisis hidroquímicos. <https://aguaysig.com/los-diagramas-mas-usados-para-la-interpretacion-de-analisis-hidroquimicos/>
- Alcalde Mayor de Bogotá D.C. (2003). Decreto 463 de 2003 «Por el cual se reglamentan la administración, el mantenimiento y el aprovechamiento económico del espacio público construido y sus usos temporales en Bogotá, Distrito Capital». <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=10966>
- CAR Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, y SIAM S.A. (2010). Inclusión del balance hídrico, implementación del caracterización hidrogeológico y capacitación en Modflow. Bogotá D.C. <https://www.car.gov.co/uploads/files/5b45215511c8f.pdf>
- Conservación Internacional Colombia y Acueducto, agua y alcantarillado de Bogotá. (s.f.). Plan de Manejo Ambiental Humedal Capellanía. <http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/1bf02b8f-aae3-48d2-861b-ce7c99d93b01>

Custodio, E. y Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Segunda Edición.

Ediciones Omega S.A. Barcelona.

Glok, M.. (2015). *El agua subterránea como agente geológico en el sector*

meridional de la cuenca de la laguna Mar Chiquita, provincia de Buenos

Aires: Su estudio con herramientas hidrogeoquímicas e isotópicas. [Tesis

doctoral Universidad Nacional de la Plata]. Naturalis repositorio institucional

Universidad Nacional de la Plata, Facultad de Ciencias Naturales y Museo.

[http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/repositorio/_documentos/tesis/tesis_1374.p](http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/repositorio/_documentos/tesis/tesis_1374.pdf)

[df](http://naturalis.fcnym.unlp.edu.ar/repositorio/_documentos/tesis/tesis_1374.pdf)

IDEA. (2005). Plan de Manejo Ambiental del Parque Ecológico Distrital Humedal de

Tibanica. DAMA. Bogotá D.C.

IGAC Instituto Geográfico Agustín Codazzi. (2020). Resultados de Análisis. Laboratorio

Nacional de Suelos.

INGEOMINAS Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1996). Estudio

Hidrogeológico en la periferia de Santa Fe de Bogotá y en algunas poblaciones

cercanas para el abastecimiento de agua. Informe final. Bogotá.

INGEOMINAS Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1988). Mapa Geológico de

Colombia Memoria Explicativa. Bogotá.D.C.

INGEOMINAS Instituto Colombiano de Geología y Minería. (1998). Geología de la plancha 246 de Fusagasugá.

INGEOMINAS Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2005, a). Geología de la sabana de Bogotá.

INGEOMINAS Instituto Colombiano de Geología y Minería. (2005, b). Geología regional de la plancha 190, Chiquinquirá. Informe No. 1 – 1794.

<http://recordcenter.sgc.gov.co/B4/13010010024376/documento/pdf/0101243761103000.pdf>

Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis, (2016, a). Caracterización florística y estructural, y la identificación de comunidades vegetales en las áreas priorizadas para la conservación de la flora en Bogotá D.C. y la región. Contrato 576 -2015. Informe final de investigación.

Jardín Botánico de Bogotá José Celestino Mutis. (2016, b). Caracterización florística y estructural, y la identificación de comunidades vegetales en las áreas priorizadas para la conservación de la flora en Bogotá D.C. y la región.

Mijailov, L. (1985). *Hidrogeología*. Editorial Mir Moscú, Rusia.

- Naranjo, O. (2017). Modelamiento geológico y estimación de recursos, yacimiento La Niña, Tongoy, Cementos Melón SA. [Memoria para optar al título de geólogo]. Universidad de Chile. Santiago de Chile.
<http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/148670/Modelamiento-geologico-y-estimacion-de-recursos-yacimiento-La-Ni%C3%B1a-Tongoy-%20Cementos%20Mel%C3%B3n.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua, Parte 1*. Ed. Paraninfo.
- Sánchez, F. (2016). *Prospección Geofísica*. Universidad de Salamanca, España.
- Sánchez, J., (s.f.). Piper y Stiff. Dpto. Geología Univ. Salamanca (España).
https://hidrologia.usal.es/Complementos/Representar_Piper_y_Stiff.pdf
- Servicio Geológico Colombiano. (2015). *Geología de la plancha 228 Bogotá Noreste*.
- SYSCOL Consultores S.A.S. (s.f). Sub capítulo 1.2. Evaluación geofísica.
https://repositorio.gestiondelriesgo.gov.co/bitstream/handle/20.500.11762/27703/Evaluacion_Geofisica.pdf?sequence=6&isAllowed=y
- UPME Unidad de Planeación Minero Energética y Consorcio Proyección. (2014).

Evaluación de la situación actual y futura del mercado de los materiales de construcción y arcillas en las ciudades de Bogotá, Medellín, Bucaramanga, Barranquilla, Santa Marta y Eje Cafetero. Resumen ejecutivo. Informe final mayo de 2014. Bogotá D.C.

Urbieto, J. (2009). Evaluación de las técnicas de adquisición de datos 2D y 3D con tomografía de resistividad eléctrica en pozo. [Tesis de maestría Universidad Nacional Autónoma de México].
https://repositorio.unam.mx/contenidos/evaluacion-de-las-tecnicas-de-adquisicion-de-datos-2d-y-3d-con-tomografia-de-resistividad-electrica-en-pozo-134162?c=EYxPma&d=false&q=*&i=1&v=1&t=search_0&as=0

Villarroya, F. (2009). Jornadas técnicas sobre aprovechamiento de aguas subterráneas para riego. Tema: Tipos de acuíferos y parámetros hidrogeológicos. *CENTER Centro Nacional de Tecnología de Regadíos*. Madrid. 1-13 <http://chilorg.chil.me/download-doc/86199>

Werner, J. (1996). *Introducción a la hidrogeología*. Primera edición. Ed Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Referencias Electrónicas

https://aguas.igme.es/igme/publica/libro20/pdf/lib20/los_s_a_1.pdf

<https://www.car.gov.co/uploads/files/5c59f8cfe9580.pdf>

www.anafalco.com.co

Anexos

Anexo A

Resultados de análisis físico químicos Laboratorio de Suelos IGAC de muestras de agua y suelo

No. DE LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	pH	CE (µS/cm)	RAS	CLASE	CATIONES (mmol/L)					ANIONES (mmol/L)				
						CALCIO	MAGNESIO	POTASIO	SODIO	SUMA CATIONES	SULFATOS	CLORUROS	CARBONATOS	BICARBONATOS	SUMA ANIONES
MQ1-44038	MUESTRA 1	6.540	59.50	0.66	C1-S1	0.052	0.085	0.063	0.172	0.372	0.05	0.18	N.D	0.44	0.67
MQ1-44039	MUESTRA 2	6.060	14.13	0.45	C1-S1	0.012	0.011	0.023	0.048	0.094	0.01	0.03	N.D	0.12	0.16
No. DE LABORATORIO	DUREZA TOTAL (D.H.F)	SALES TOTALES DE SÓLIDOS DISUELTOS (mg/L)													
MQ1-44038	3.014	38.080													
MQ1-44039	0.658	9.043													

C1-S1 : Agua de baja salinidad y bajo contenido de sodio; puede usarse para riego en la mayoría de los suelos con poca probabilidad de que se generen problemas de salinidad, siempre y cuando exista una buena permeabilidad y no se presenten problemas de sodio en el suelo.

NOTA: Consultar con el técnico de la zona

No. DE LABORATORIO	TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	ALUMINIO (mg/L)	SILICIO (mg/L)	RESULTADOS ANALISIS AGUA W10						FECHA DE EMISIÓN			
						LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS						AAAA-MM-DD			
						CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C.						2020-11-12			
						INFORMACIÓN DEL CLIENTE									
						NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO JARDIN BOTANICO JOSE CELESTINO MUTIS						TIPO DE MUESTRA AGUA		No. SOLICITUD 4472_1	
						DEPARTAMENTO / MUNICIPIO Bogota D.C. - Bogotá, D.C.									
						MODIFICACIÓN <input type="checkbox"/> SUPLEMENTO DE RESULTADOS <input type="checkbox"/> DE FECHA _____						DIRECCIÓN DEL CLIENTE AVENIDA CALLE 63 No. 68-95			
No. DE LABORATORIO	TIPO DE MUESTRA	PROFUNDIDAD (cm)	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	ALUMINIO (mg/L)	SILICIO (mg/L)										
MQ1-44038	AGUA	-	MUESTRA 1	N.A.	6.61										
MQ1-44039	AGUA	-	MUESTRA 2	N.A.	4.04										

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – CARACTERIZACIÓN Q-02															FECHA DE EMISIÓN					
LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS-CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C.															AAAA-MM-DD					
CARACTERIZACIÓN BÁSICA + ELEMENTOS MENORES + NITRATOS Y AMONIO + C.E.															2020-11-12					
INFORMACIÓN DEL CLIENTE																				
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO										JARDIN BOTANICO JOSE CELESTINO MUTIS			TIPO DE MUESTRA		SUELO		No. SOLICITUD		4472_1	
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO										Bogota D.C. - Bogotá, D.C.										
MODIFICACIÓN										<input type="checkbox"/> SUPLEMENTO DE RESULTADOS		<input type="checkbox"/> DE FECHA		DIRECCIÓN DEL CLIENTE AVENIDA CALLE 63 No. 68-95						
No. DE LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	PROFUNDIDAD (cm)	GRANULOMETRÍA			CLASE TEXTURAL	% DE GRAVAS (FRACCIÓN + 2 mm)	RELACIÓN DE pH	pH	ACIDEZ INTERCAMBIABLE (mmol+/kg)	S.A.I. %	SALINIDAD CE (µS/cm)	CARBONATO DE CALCIO Cuantitativo %	CARBONO ORGÁNICO %	CARBONO TOTAL %	NITRÓGENO TOTAL %				
			ARENA %	LIJO %	ARCILLA %															
MQ1-44033	MUESTRA 1	-	52.8	30.8	16.4	F A*	N.A.	1:1	5.510	0.95	9.02	0.13	N.A.	5.0022	6.80	0.59				
MQ1-44034	MUESTRA 2	-	68.2	25.6	6.2	F A*	22.90	1:1	5.400	0.32	1.16	0.57	N.A.	10.9945	14.95	1.29				
MQ1-44035	MUESTRA 3	-	59.0	28.3	12.7	F A	25.20	1:1	4.820	2.29	19.07	0.16	N.A.	3.1469	4.28	0.37				
MQ1-44036	MUESTRA 4	-	56.5	28.6	14.9	F A	11.60	1:1	5.350	<0.15	N.A.	0.45	N.A.	4.1221	5.61	0.48				
MQ1-44037	MUESTRA 5	-	60.8	30.5	8.7	F A	21.00	1:1	4.610	3.09	25.68	0.22	N.A.	4.9476	6.73	0.58				
No. DE LABORATORIO	FÓSFORO DISPONIBLE (mg/kg)	COMPLEJO DE CAMBIO (mmol+/kg)							S.B. %	ELEMENTOS MENORES DISPONIBLES (mg/kg)					mg/kg					
		Ca	Mg	K	Na	B.T.	Mn (mg/kg)	Fe (mg/kg)		Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	B (mg/kg)	N-AM	N-N03						
MQ1-44033	33.71	30.070	10.552	8.040	1.080	0.320	0.160	9.600	31.93	0.91	195.06	0.22	0.17	0.18	N.A.	N.A.				
MQ1-44034	220.22	48.883	27.742	24.630	1.810	0.900	0.080	27.420	56.09	1.84	165.53	15.24	0.13	0.39	N.A.	N.A.				
MQ1-44035	10.07	17.938	12.011	8.870	0.530	0.160	0.060	9.720	54.19	0.63	127.38	0.41	0.20	0.14	N.A.	N.A.				
MQ1-44036	98.94	25.930	17.800	16.000	1.590	0.140	0.070	17.800	68.65	2.40	97.55	1.66	0.93	0.67	N.A.	N.A.				
MQ1-44037	12.92	18.396	12.016	8.430	0.300	0.150	0.050	8.930	48.54	0.67	76.30	0.81	0.15	0.32	N.A.	N.A.				
No. DE LABORATORIO	Relaciones Catiónicas e Interpretación																			
	Ca/Mg	Interpretación	Mg/K	Interpretación	Ca/K	Interpretación	(Ca+Mg)/K	Interpretación (Ca+Mg)/K												
MQ1-44033	7.444	Amplia	3.375	Amplia	25.125	Amplia	28.500	Amplia												
MQ1-44034	13.608	Amplia con deficiencia de Mg	2.011	Estrecha	27.367	Amplia	29.378	Amplia												
MQ1-44035	16.925	Amplia con deficiencia de Mg	3.313	Amplia	56.063	Amplia con deficiencia de K	59.375	Amplia con deficiencia de K												
MQ1-44036	10.063	Amplia con deficiencia de Mg	11.357	Amplia	114.286	Amplia con deficiencia de K	125.643	Amplia con deficiencia de K												

RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – SALINIDAD DEL SUELO Q-19															FECHA DE EMISIÓN					
LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS															AAAA-MM-DD					
CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C.															2020-11-12					
INFORMACIÓN DEL CLIENTE																				
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO										JARDIN BOTANICO JOSE CELESTINO MUTIS			TIPO DE MUESTRA		SUELO		No. SOLICITUD		4472_1	
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO										Bogota D.C. - Bogotá, D.C.										
MODIFICACIÓN										<input type="checkbox"/> SUPLEMENTO DE RESULTADOS		<input type="checkbox"/> DE FECHA		DIRECCIÓN DEL CLIENTE AVENIDA CALLE 63 No. 68-95						
No. DE LABORATORIO	IDENTIFICACIÓN DE CAMPO	PROFUNDIDAD (cm)	pH	RAS	PSI	CLASE	CATIONES mmol+/L													
							CALCIO	MAGNESIO	POTASIO	SODIO	HEBRO	AMONIO								
MQ1-44033	MUESTRA 1	-	5.510	0.80	0.47	N	0.091	0.150	0.161	0.276	N.A.	N.A.								
MQ1-44034	MUESTRA 2	-	5.400	0.15	0.14	N	2.295	0.676	0.910	0.177	N.A.	N.A.								
SUMA CATIONES	Pw(%)	CE (µS/cm)	CARBONATO DE CALCIO			ANIONES mmol-/L					mmol+/kg									
			Cuantitativo*	Cuantitativo %	SULFATOS	CLORUROS	CARBONATOS	BICARBONATOS	NITRATOS	SUMA ANIONES	CIC	Na Intercambiable Real								
0.678	72.45	0.11	N.A.	N.A.	0.01	0.35	N.D	0.91	N.A.	1.26	30.070	0.1399								
4.058	90.59	0.53	N.A.	N.A.	2.84	0.96	N.D	1.26	N.A.	5.06	48.883	0.0702								

OBSERVACIONES: "Las muestras no dispersaron adecuadamente, por lo que el % de Arcilla puede ser más alto, estas son las muestras que tienen asterisco en la clase textural"								
CONVENCIONES GENERALES								
(-)=No presente, (+)=Presente, N.D.=No Detectado; N.A.=No aplic., N.I.C.=No informado por el Cliente, SAT=Saturado, B.T.=Bases Totales, S.A.I.%=Porcentaje Saturación Acidez Intercambiable, S.B.%=Porcentaje Saturación de Bases								
CONVENCIONES GRANULOMETRIA								
F.A: Franco-arenoso								
ACLARACIONES								
* Prohibida la reproducción parcial o total de este documento sin la aprobación del Laboratorio Nacional de Suelos-LNS. * Los resultados emitidos corresponden a los parámetros analizados para la muestra. * El Laboratorio Nacional de Suelos-LNS solo realiza las actividades de análisis de la(s) muestra(s), no es responsable del muestreo								
EQUIVALENCIAS: cmol(+) /kgx200=mg/kg Ca.cmol(+) /kgx200=mg/kg Mg.cmol(+) /kgx120=mg/kg Na.cmol(+) /kgx230=mg/kg K.cmol(+) /kgx391=mg/kg								
APROBADO POR:								
 Nancy Lina Gulemez COORDINADOR DEL LABORATORIO								
 Martha Lucia Carrascal RESPONSABLE DEL TEMA								
Página 1 de 4								
RESULTADOS DE ANÁLISIS QUÍMICO – CARACTERIZACIÓN Q-02								
LABORATORIO NACIONAL DE SUELOS-LNS-CRA 30 N° 48-51 Bogotá D.C.								
CARACTERIZACIÓN BÁSICA + ELEMENTOS MENORES + NITRATOS Y AMONIO + C.E.								
FECHA DE EMISIÓN								
AAAA-MM-DD								
2020-11-12								
INFORMACIÓN DEL CLIENTE								
NOMBRE Y APELLIDO / EMPRESA / PROYECTO	JARDIN BOTANICO JOSE CELESTINO MUTIS	TIPO DE MUESTRA	SUELO	No. SOLICITUD	4472_1			
DEPARTAMENTO / MUNICIPIO	Bogotá D.C. - Bogotá, D.C.							
MODIFICACIÓN	<input type="checkbox"/> SUPLEMENTO DE RESULTADOS	<input type="checkbox"/> DE FECHA	DIRECCIÓN DEL CLIENTE AVENIDA CALLE 63 No. 68-95					
No. DE LABORATORIO	Relaciones Cationicas e Interpretación							
	Ca/Kg	Interpretación	Mg/K	Interpretación	Ca/K	Interpretación	Ca+Mg/K	Interpretación Ca+Mg/K
MD-44027	28.100	Amplia con deficiencia de Mg	2.000	Estrecha	56.200	Amplia con deficiencia de K	58.200	Amplia con deficiencia de K