

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE  
NEMOCÓN, CONTRATO DE CONCESIÓN HIQO - 01

MAYURY YULEIMI MÉNDEZ BERNAL



UNIVERSIDAD PEDÁGOGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO  
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA  
2016

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DE LA MINA DE SAL DE  
NEMOCÓN, CONTRATO DE CONCESIÓN HIQO - 01

MAYURY YULEIMI MÉNDEZ BERNAL

Proyecto de grado presentado como requisito para optar al título de  
INGENIERO GEÓLOGO

Modalidad:  
MONOGRAFÍA

PhD. JORGE ELIECER MARIÑO MARTINEZ  
Director

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA Y TECNOLÓGICA DE COLOMBIA  
FACULTAD SEDE SECCIONAL SOGAMOSO  
ESCUELA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA  
2016

Nota de Aceptación

---

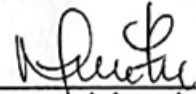
---

---

---



Firma del Jurado



Firma del Jurado



Firma del Director

Sogamoso, 07 de Julio de 2016.

*A mi amado hijo Jael Santiago por llenar mis días de  
alegría y regalarme un motivo para seguir adelante.  
A mis padres y hermanos por su apoyo y comprensión.  
A Antony, mi novio, amigo y confidente por apoyarme y  
enseñarme a batallar. Este logro también es tuyo.*



## **AGRADECIMIENTOS**

A Dios primeramente por permitirme culminar esta etapa tan importante en mi vida.

A mis padres y hermanos por su esfuerzo, por acompañarme a lo largo de este proceso, por brindarme su apoyo incondicional y darme las herramientas suficientes para afrontar la vida.

A mi nueva familia Antony y Jael por su paciencia, entrega, comprensión y apoyo incondicional; por darme una nueva razón para seguir adelante y las fuerzas necesarias para alcanzar esta meta.

A mis compañeros Ricardo y Damián por acompañarme a lo largo de la carrera y brindarme su amistad, también por brindarme su conocimiento y apoyo en los trabajos de campo y la elaboración del proyecto.

A la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y a la escuela de Ingeniería Geológica por la formación personal y profesional brindada.

Al director del proyecto de grado, PhD. Jorge Eliecer Mariño Martínez quien con paciencia me orientó en el desarrollo del tema.

A la Ing. Eveling Dayana Cuchigay Pelayo y a la empresa Colsalminas Limitada por brindarme el apoyo logístico y económico para la ejecución del proyecto.

A cada uno de mis amigos y compañeros con quien compartí momentos difíciles y también gratos y aunque algunos ya no están presentes, siempre los llevare en el corazón.



## CONTENIDO

	Pág.
<b>RESUMEN</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1. OBJETIVOS</b> .....	20
1.1. OBJETIVO GENERAL.....	20
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	20
<b>2. GENERALIDADES</b> .....	21
2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA .....	21
2.2. VIAS DE ACCESO .....	22
2.3. FISIOGRAFÍA.....	22
2.4. CLIMA .....	23
2.5. HIDROGRAFÍA .....	24
2.6. VEGETACIÓN.....	25
2.7. SUELOS.....	25
2.7.1. Consociación Pachic Melanudands.....	25
2.7.2. Consociación Typic Haplustalfs .....	26
2.7.3. Consociación Typic Haplustepts .....	27
<b>3. METODOLOGÍA</b> .....	28
<b>4. FUNDAMENTO TEÓRICO</b> .....	31
4.1. GEOFÍSICA.....	31
4.1.1. Geoeléctrica .....	31
4.1.1.1. Sondeo eléctrico vertical .....	32
4.1.1.2. Registro eléctrico de pozo.....	33
4.2. HIDROLOGÍA.....	36
4.2.1. Parámetros Hidrometeorológicos que dependen de otras variables .....	36
4.2.1.1. Evapotranspiración .....	36
4.2.1.2. Escorrentía.....	40
4.2.2. Balance Hídrico .....	40
4.3. HIDROGEOQUÍMICA.....	41
4.3.1. Composición del agua subterránea.....	41
4.3.1.1. Características fisicoquímicas.....	42
4.3.1.2. Constituyentes químicos .....	44
4.3.2. Clasificación del agua subterránea por iones dominantes .....	48



4.3.2.1.	Diagrama de Stiff .....	49
4.3.2.2.	Diagrama de Piper .....	49
4.3.2.3.	Diagrama de Schöeller- Berkaloff .....	49
4.4.	HIDROGEOLOGÍA.....	50
4.4.1.	El agua subterránea.....	50
4.4.2.	Clasificación de formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico.....	50
4.4.2.1.	Tipos de Acuíferos .....	51
4.4.3.	Propiedades hidráulicas de acuíferos .....	52
4.4.3.1.	Porosidad.....	52
4.4.3.2.	Permeabilidad .....	52
4.4.3.3.	Conductividad Hidráulica .....	53
4.4.3.4.	Transmisividad.....	54
4.4.3.5.	Coeficiente de almacenamiento.....	55
4.4.4.	Pruebas de bombeo.....	55
4.4.4.1.	Método de Theis .....	56
<b>5.</b>	<b>GEOLOGÍA .....</b>	<b>59</b>
5.1.	GEOLOGÍA REGIONAL E HISTÓRICA.....	59
5.1.1.	Geología regional.....	59
5.1.2.	Geología Histórica.....	60
5.2.	GEOLOGÍA LOCAL.....	61
5.2.1.	Estratigrafía.....	61
5.2.1.1.	Formación Chipaque (K <sub>2</sub> cp).....	61
5.2.1.2.	Grupo Guadalupe.....	64
5.2.1.3.	Formación Guaduas (K <sub>2</sub> E <sub>1</sub> g).....	71
5.2.1.4.	Cuaternarios no consolidados.....	72
5.2.2.	Geología estructural.....	72
5.2.2.1.	Fallas .....	73
5.2.2.2.	Pliegues .....	74
5.3.	GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO.....	75
5.3.1.	Edad y ubicación estratigráfica del depósito .....	77
<b>6.</b>	<b>GEOMORFOLOGÍA.....</b>	<b>78</b>
6.1.	CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA.....	78
6.1.1.	Subunidades geomorfológicas de origen Antropogénico .....	79
6.1.1.1.	Cantera Ac.....	79
6.1.2.	Subunidades geomorfológicas de origen Denudacional .....	79
6.1.2.1.	Conos y lóbulos coluviales y de solifluxión Dco .....	80
6.1.2.2.	Colina residual Dcr.....	80

6.1.2.3.	Glacis de acumulación Dga .....	80
6.1.3.	Subunidades geomorfológicas de origen fluvial y lagunar .....	81
6.1.3.1.	Cono de deyección Fcdy.....	82
6.1.3.2.	Planicie y delta lacustrino Fpla.....	82
6.1.4.	Subunidades geomorfológicas de origen glacial y periglacial .....	83
6.1.4.1.	Sierra anticlinal glaciada Gsag.....	83
6.1.4.2.	Sierra homoclinal glaciada Gshg .....	83
6.1.4.3.	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal glaciada Gshcp.....	83
6.1.4.4.	Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada Gshle.....	83
6.1.5.	Subunidades geomorfológicas de origen morfoestructural .....	84
6.1.5.1.	Cerro estructural Sce .....	84
6.1.5.2.	Domo diapírico Sdd.....	85
6.1.5.3.	Escarpe de línea de falla Slfp .....	85
6.1.5.4.	Laderas de contrapendiente de sierra homoclinal Sshle.....	85
6.1.5.5.	Ladera estructural de sierra homoclinal Sshcp .....	86
<b>7.</b>	<b>GEOFÍSICA.....</b>	<b>87</b>
7.1.	SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL .....	87
7.1.1.	Interpretación .....	89
7.1.1.1.	Sección geológica - geofísica 1. ....	90
7.1.1.2.	Sección geológica - geofísica 2. ....	91
7.1.1.3.	Sección geológica - geofísica 3. ....	91
7.2.	REGISTRO ELÉCTRICO DE POZO.....	93
7.2.1.	Interpretación .....	93
7.2.1.1.	Sección 1 .....	93
7.2.1.2.	Sección 2. ....	94
7.2.1.3.	Sección 3. ....	94
7.2.1.4.	Sección 4. ....	94
7.2.1.5.	Sección 5. ....	94
7.2.1.6.	Sección 6. ....	94
7.2.1.7.	Sección 7. ....	95
<b>8.</b>	<b>HIDROLOGÍA.....</b>	<b>96</b>
8.1.	CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA .....	96
8.1.1.	Delimitación de cuencas .....	96
8.1.1.1.	Análisis morfométrico.....	97
8.1.2.	Parámetros hidrometeorológicos .....	99
8.1.2.1.	Precipitación .....	101
8.1.2.2.	Temperatura .....	102
8.1.2.3.	Humedad Relativa.....	104



8.1.2.4.	Brillo solar .....	104
8.1.2.5.	Velocidad del viento .....	105
8.1.2.6.	Evaporación .....	106
8.1.2.7.	Evapotranspiración .....	107
8.1.2.8.	Escorrentía.....	109
8.2.	BALANCE HÍDRICO.....	110
<b>9.</b>	<b>HIDROGEOQUÍMICA .....</b>	<b>113</b>
9.1.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA ZONA .....	113
9.1.1.	Evaluación de los resultados químicos .....	116
9.1.2.	Características impartidas por litología .....	117
9.1.3.	Concentración de metales en el agua subterránea .....	117
9.2.	CLASIFICACIÓN DEL AGUA SUBTERRANEA.....	119
9.2.1.	Clasificación por pH .....	119
9.2.2.	Clasificación por Dureza .....	120
9.2.3.	Clasificación por contenido de Sólidos totales disueltos .....	122
9.2.4.	Clasificación por iones dominantes .....	123
9.2.4.1.	Diagrama de Piper .....	124
9.2.4.2.	Diagrama de Stiff .....	125
9.2.4.3.	Diagrama de Schöeller- Berkaloff. ....	127
<b>10.</b>	<b>HIDROGEOLOGÍA.....</b>	<b>130</b>
10.1.	INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA .....	130
10.2.	CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE ACUÍFEROS .....	132
10.2.1.	Datos piezométricos.....	133
10.2.2.	Pruebas de bombeo .....	133
10.2.2.1.	Pozo 0.....	134
10.2.2.2.	Labores Subterráneas.....	135
10.3.	CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGICA DE LA ZONA.....	137
10.3.1.	Unidades Hidrogeológicas .....	137
10.3.1.1.	Formación Chipaque (K2cp) .....	137
10.3.1.2.	Formación Arenisca Dura (K2d).....	137
10.3.1.3.	Formación Plaeners (K2p) .....	138
10.3.1.4.	Formación Labor y Tierna (K2t) .....	138
10.3.1.5.	Formación Guaduas (Ktg).....	139
10.3.1.6.	Depósitos Cuaternarios no consolidados (Terrazas Altas y Cuaternario Coluvial) .....	139
10.3.2.	Clasificación general de unidades hidrogeológicas.....	140
10.3.2.1.	Acuitardo Chipaque (K2cp) .....	140
10.3.2.2.	Acuífero Arenisca Dura (K2d) .....	140



10.3.2.3. Acuífero Plaeners (K2p).....	140
10.3.2.4. Acuífero Arenisca Labor - Tierna (K2t).....	141
10.3.2.5. Acuitardo Guaduas (K2E1g) .....	141
10.3.2.6. Acuífero Cuaternario Coluvial (Qc) .....	141
10.3.2.7. Acuífero Terrazas Altas (Qt) .....	141
10.3.3. Dirección del Flujo subterráneo.....	141
10.3.4. Zonas de recarga y descarga.....	142
10.3.4.1. Zonas de recarga .....	142
10.3.4.2. Zonas de descarga .....	143
<b>11. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL .....</b>	<b>144</b>
<b>CONCLUSIONES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	
<b>ANEXOS</b>	

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.....	21
Figura 2. Clasificación de pendientes del área de estudio.....	23
Figura 3. Hidrografía del área de estudio.....	24
Figura 4. Mapa de cobertura vegetal Microcuenca Quebrada El Sotá.....	26
Figura 5. Diagrama de flujo metodológico de exploración y evaluación de aguas subterráneas. ....	28
Figura 6. Metodología del proyecto.....	29
Figura 7. Disposición de electrodos para ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales. ....	32
Figura 8. Registro de rayos gamma esperado para algunos tipos de roca.....	34
Figura 9. Registro de Potencial espontáneo SP. ....	36
Figura 10. Sustancias disueltas constituyentes del agua subterránea.....	44
Figura 11. Panorámica del segmento D de la Formación Chipaque.....	63
Figura 12. Presencia de Fósiles en lutitas del segmento D de la Formación Chipaque. a. Amonita y restos de plantas. b. Equinodermos. ....	64
Figura 13. Estructuras sedimentarias en la parte basal de la Formación Arenisca Dura, sector La Cucariana. a. Skolithos b. Bioturbación.....	65
Figura 14. Estratificación plano paralela continua a ondulada en areniscas. a. Acumulación de láminas de hierro. b. Presencia de lentes de arena con inclusiones de hierro. ....	66
Figura 15. Formación Arenisca Dura, Vereda Camacho. a. Intercalación de areniscas y limolitas silíceas. b. Cantos armados de arcilla y arena.....	66
Figura 16. Capas de liditas, areniscas arcillosas y arcillas caoliníticas de la Formación Plaeners, Finca Chimisía. ....	67
Figura 17. Fósiles de la Formación Plaeners. a. Amonita reemplazada por óxido de hierro en arcillas caoliníticas. b. Bivalvo en arcillas caoliníticas. ....	68



Figura 18. Afloramiento parte inferior y media Formación Arenisca Labor – Tierna, sector Agua Caliente.....	70
Figura 19. Formación Arenisca Labor – Tierna, sector Salinas. a. Bioturbación intensa en capa de arcilla. b. Impresión de bivalvos en lentes de arena gruesa.....	70
Figura 20. Afloramiento parte superior Formación Arenisca Labor – Tierna, Vereda la Puerta. a. Cantera Arenas de Nemocón. b. Bioturbación en muestra de arena.....	71
Figura 21. Geología estructural de la zona. ....	75
Figura 22. Sección transversal diagramática del depósito de sal de Nemocón. ...	76
Figura 23. Cantera de explotación de arcillas caoliníticas, Vereda Camacho. ....	80
Figura 24. Subunidades de origen denudacional, morfoestructural, glacial y periglacial, Finca Chimisía. ....	81
Figura 25. Subunidades de origen denudacional, fluvial y lagunar. ....	82
Figura 26. Subunidades de origen denudacional, fluvial y lagunar, glacial y periglacial, Vereda Astorga.....	84
Figura 27. Domo diapírico y glacis de acumulación, Finca Chimisía. ....	85
Figura 28. Subunidades de origen morfoestructural, glacial y periglacial. ....	86
Figura 29. Localización SEV's y Perforaciones.....	88
Figura 30. Sección geológica - geofísica No. 1.....	91
Figura 31. Sección geológica - geofísica No. 2.....	92
Figura 32. Sección geológica - geofísica No. 3.....	92
Figura 33. Delimitación de la Microcuenca Quebrada el Sotá. ....	97
Figura 34. Curva hipsométrica y Frecuencia de altitudes Microcuenca Quebrada El Sotá. ....	98
Figura 35. Estaciones hidrometereológicas del municipio de Nemocón y áreas cercanas. ....	100
Figura 36. Precipitación total multianual Microcuenca Quebrada El Sotá.....	101





Figura 37. Distribución temporal precipitación Microcuenca Quebrada El Sotá.	102
Figura 38. Gradiente de Temperatura.....	103
Figura 39. Temperatura media Microcuenca Quebrada El Sotá.....	103
Figura 40. Humedad Relativa Microcuenca Quebrada El Sotá.....	104
Figura 41. Brillo Solar Total Multianual Microcuenca Quebrada El Sotá.....	105
Figura 42. Velocidad del Viento Microcuenca Quebrada El Sotá. ....	106
Figura 43. Evaporación media mensual Microcuenca Quebrada El Sotá. ....	107
Figura 44. Evapotranspiración Real Microcuenca Quebrada El Sotá. ....	108
Figura 45. Distribución temporal de la Evapotranspiración Real. ....	109
Figura 46. Distribución temporal de la esorrentía en la zona de estudio.....	110
Figura 47. Balance Hídrico. ....	111
Figura 48. Localización puntos de muestreo de agua subterránea para análisis fisicoquímico. ....	114
Figura 49. Recolección de muestras de agua en superficie y zonas de infiltración en labores mineras. ....	115
Figura 50. Desarrollo de análisis fisicoquímico en el laboratorio de aguas UPTC.....	115
Figura 51. Variación en la concentración de hierro para la zona de estudio.....	119
Figura 52. Variación de la dureza en la zona de estudio. ....	121
Figura 53. Variación de la concentración de Solidos Totales Disueltos en la zona.....	123
Figura 54. Diagrama de Piper.....	124
Figura 55. Diagramas de Stiff. ....	126
Figura 56. Distribución de Diagramas de Stiff en la zona de estudio.....	127
Figura 57. Diagrama de Schöeller- Berkaloff.....	128
Figura 58. Localización de puntos de agua en la zona.....	131



Figura 59. Distribución de puntos de agua en las diferentes Formaciones Geológicas de la zona. ....	132
Figura 60. Hidrogeología de la zona de estudio.....	143
Figura 61. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la zona.....	144
Figura 62. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la mina sal, dirección N - S...	145



## LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Coordenadas del polígono de concesión.....	22
Tabla 2. Clasificación de pendientes. ....	23
Tabla 3. Variables utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración potencial según diferentes métodos.....	37
Tabla 4. Valores de coeficiente C1. ....	38
Tabla 5. Porcentaje de horas diurnas P.....	38
Tabla 6. Número de horas de brillo solar N. ....	39
Tabla 7. Características de las unidades hidrogeológicas según la permeabilidad. ....	53
Tabla 8. Valores de Conductividad Hidráulica (K) para diferentes materiales. ....	53
Tabla 9. Clasificación de terrenos por su transmisividad. ....	54
Tabla 10. Valores típicos de coeficiente de almacenamiento en acuíferos.....	55
Tabla 11. Subunidades geomorfológicas presentes en el área de estudio.....	79
Tabla 12. Coordenadas SEV´s. ....	88
Tabla 13. Rangos de resistividades.....	90
Tabla 14. Parámetros Morfométricos Microcuenca Quebrada el Sotá.....	98
Tabla 15. Estaciones Hidrometeorológicas cercanas al área de estudio.....	99
Tabla 16. Cálculo del Balance Hídrico para la Microcuenca.....	111
Tabla 17. Coordenadas puntos de muestreo de agua subterránea para análisis Físicoquímico. ....	114
Tabla 18. Error de Balance Iónico.....	116
Tabla 19. Concentración de metales en el agua subterránea.....	118
Tabla 20. Clasificación por pH de las muestras de agua. ....	120



Tabla 21. Clasificación del agua por dureza. ....	120
Tabla 22. Clasificación por dureza de las muestras de agua según Romero, Jairo. 2002. ....	121
Tabla 23. Clasificación del Agua subterránea basada en los Solidos Totales Disueltos. ....	122
Tabla 24. Clasificación por TDS de las muestras de agua según Freeze & Cherry, 1979. ....	122
Tabla 25. Clasificación de aguas subterráneas por iones dominantes. ....	128
Tabla 26. Tabla resumen de inventario de puntos de agua. ....	130
Tabla 27. Datos piezométricos.....	133
Tabla 28. Localización pruebas de bombeo. ....	134
Tabla 29. Resultados prueba de bombeo Pozo 0. ....	135
Tabla 30. Resumen Prueba de Bombeo en Labores Subterráneas.....	136



## **LISTA DE ANEXOS**

Anexo A. Mapa Geológico.

Anexo B. Columna Estratigráfica de la Formación Chipaque vía Nemocón - Suesca, Sector La Cucariana.

Anexo C. Interpretación de las Curvas de Resistividad y Correlación Litológica con las Perforaciones Existentes.

Anexo D. Interpretación Registro Eléctrico del Pozo de Producción de Salmuera No. 7, Finca Chimisía.

Anexo E. Cálculo de la Evapotranspiración Potencial y Real Microcuenca Quebrada El Sotá.

Anexo F. Cálculo de la Escorrentía Microcuenca Quebrada El Sotá por el Método de Número De Curva CN.

Anexo G. Resultado de Análisis Físicoquímicos de las Muestras de Agua Recolectadas.

Anexo H. Inventario de Puntos De Agua.

Anexo I. Prueba de Bombeo Pozo 0 Finca Chimisía.

Anexo J. Mapa Hidrogeológico.

Anexo K. Estructura del Domo Salino y Ubicación de Labores Subterráneas en 3 Dimensiones.



## RESUMEN

La zona de estudio comprende un área de 159.5 Ha y se encuentra ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental, en la sabana de Bogotá, donde afloran rocas sedimentarias de edad Cretácica y Cuaternaria afectadas por plegamiento y fallamiento producto de la orogenia andina y halotectonismo. El domo salino se encuentra ubicado estratigráficamente en el segmento C de la Formación Chipaque.

Hidrológicamente, el área se encuentra en inmediaciones de la Microcuenca Quebrada el Sotá donde su cauce principal pasa por encima de las labores mineras; su balance hídrico es positivo y la recarga se presenta en los meses de Marzo a Noviembre con un total de volumen de recarga de 218.402 m<sup>3</sup> /año, que se traduce en un caudal de recarga de 0.0069 m<sup>3</sup>/seg.

La ocurrencia del agua subterránea en la zona se encuentra asociada principalmente a las Formaciones acuíferas Arenisca Labor – Tierna, Plaeners y Arenisca Dura que presentan un potencial hidrogeológico moderado a alto. Se observa también, presencia de agua en los acuitardos Chipaque y Guaduas con potencial hidrogeológico bajo y depósitos no consolidados de porosidad primaria y potencial hidrogeológico moderado a alto.

A partir del modelo hidrogeológico elaborado, donde se aprecian los diferentes componentes del ciclo hidrológico, las zonas de recarga y descarga y la dirección principal del flujo subterráneo; se determina que la principal fuente de infiltración de agua hacia las labores mineras se da a través de la Falla El Sotá, la cual pasa directamente sobre los Niveles dos y tres de la mina y además, se encuentra alineada con la Quebrada el Sotá. También se establece que la Formación acuífera Arenisca Dura incide en los problemas de infiltración puesto que se encuentra ubicada sobre las labores inundadas y presenta una moderada porosidad y permeabilidad que permite el flujo del agua a través de sus intersticios.

Adicional a esto, se deduce que el depósito salino presenta alto fracturamiento y diaclasamiento al encontrarse limitado por un sistema de fallas, lo que confiere características hidrogeológicas de porosidad y permeabilidad de tipo secundario al domo y las Formaciones adyacentes, generando problemas de infiltración en diferentes lugares dentro de la mina.

Palabras clave: Acuífero, acuitardo, ciclo hidrológico, halotectonismo, infiltración, modelo hidrogeológico conceptual.



## INTRODUCCIÓN

La mina de sal de Nemocón es un componente tradicional de gran interés nacional cuyo desarrollo se remonta a una época precolombina. Esta mina está compuesta por tres niveles: Un nivel superior denominado Santa Bárbara, un segundo nivel denominado Santa Isabel y un nivel inferior denominado Santa Ursula.

Aunque esta mina actualmente no se encuentra en explotación, se ha convertido en un atractivo turístico del municipio generando grandes ingresos, pero debido a que la sal es un mineral que se disuelve con facilidad en contacto con agua dulce, las labores subterráneas de la mina han venido presentando problemas de estabilidad e infiltración, principalmente en los niveles dos y tres, que pueden ocasionar complicaciones futuras en las labores y representar riesgo inminente para los turistas.

Por tal motivo, la empresa Colsalminas Limitada, quien está a cargo de la mina, en cuanto a la parte minera y estructural se refiere, ha decidido elaborar un modelo hidrogeológico conceptual de la mina y el polígono de concesión que la contiene, que permita comprender la dinámica del flujo de agua tanto subterránea como superficial y su interacción con el yacimiento salino para establecer las condiciones actuales del mismo y las posibles fuentes de agua que están generando problemas de infiltración y estabilidad en la mina.

El presente proyecto, desarrollado a partir de la metodología propuesta por el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS en el año 2004, actualmente llamado Servicio Geológico Colombiano SGC, consignada en el *Programa de Exploración de Aguas Subterráneas*, se constituye entonces, en la presentación del Modelo Hidrogeológico conceptual de la zona, donde se presentan todos los componentes que intervienen en el ciclo del agua y su incidencia en el domo salino y las labores subterráneas.

El documento se divide en 11 títulos numerados, de los cuales, los cuatro primeros corresponden a generalidades del proyecto, los siguientes seis títulos explican cada una de las disciplinas y herramientas que se utilizaron para la adquisición de información que apoyara la construcción del modelo y el último título numerado corresponde a la compilación de todos los resultados obtenidos, plasmados en un modelo hidrogeológico conceptual de tres dimensiones que brinda una clara idea de las condiciones geológicas, hidrológicas e hidrogeológicas en las que se encuentra la zona. También se presentan las conclusiones y recomendaciones respectivas.



## 1. OBJETIVOS

### 1.1. OBJETIVO GENERAL

Realizar el modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Nemocón, definida por el contrato de concesión HIQO - 01.

### 1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- ✓ Recopilar y analizar la información bibliográfica existente relacionada con el proyecto a ejecutar.
- ✓ Elaborar la cartografía geológica del área de estudio a una escala 1:5000.
- ✓ Realizar la caracterización geomorfológica del área.
- ✓ Evaluar la información geofísica existente, y de ser preciso, desarrollar estudios complementarios para generar el modelo geológico – geofísico de la zona.
- ✓ Realizar la evaluación hidrológica de la zona y alrededores.
- ✓ Establecer las características hidrogeoquímicas del área de estudio.
- ✓ Definir las condiciones hidrogeológicas del área de estudio y zonas aledañas.
- ✓ Realizar el modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Nemocón.

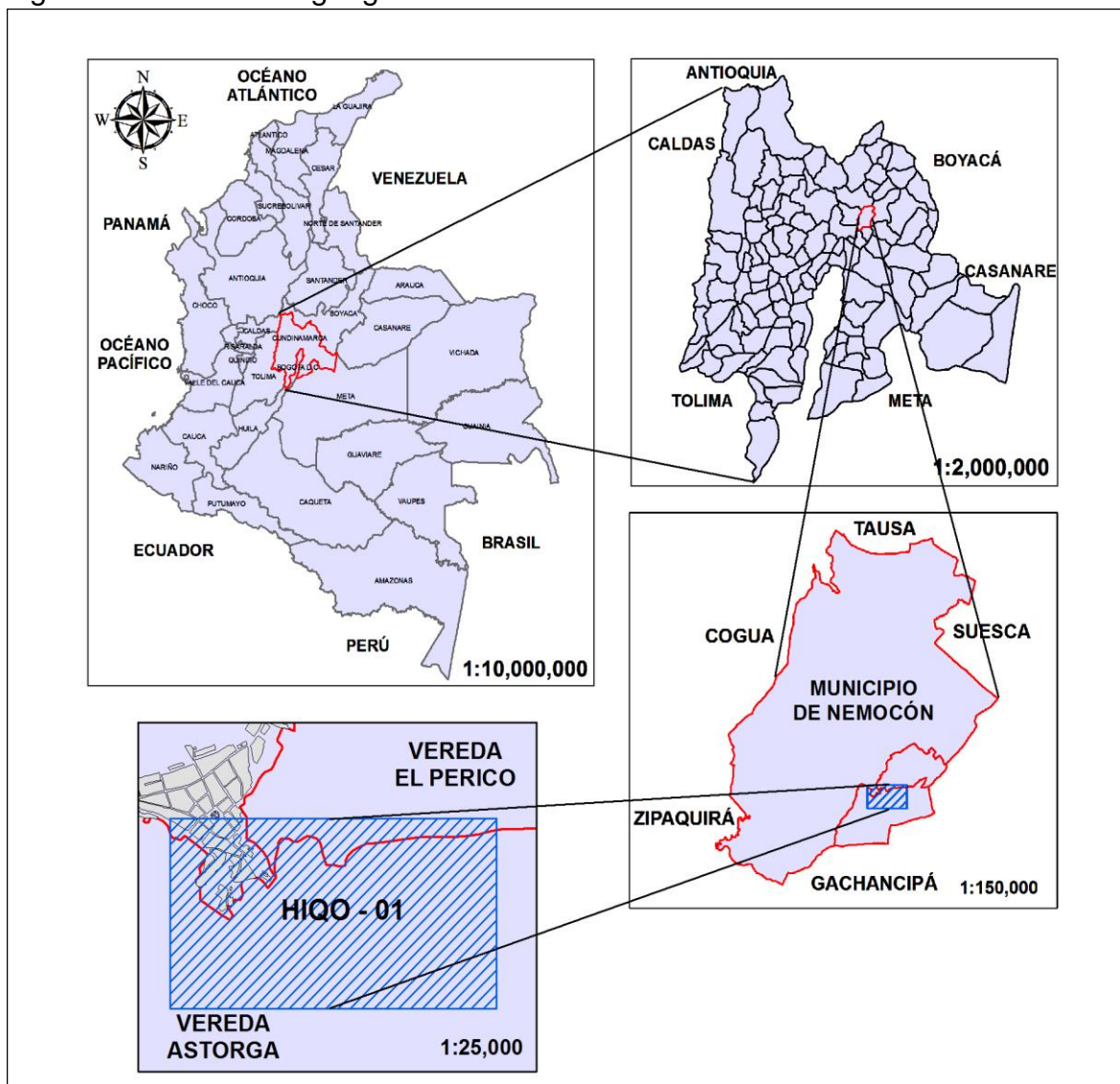


## 2. GENERALIDADES

### 2.1. LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA

El área de estudio se encuentra localizada sobre la cordillera oriental, al noreste del departamento de Cundinamarca a unos 65 Km de Bogotá D.C., cubriendo parte de las veredas Perico, Astorga y casco urbano del municipio de Nemocón, con una extensión de 159.5 Ha.

Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.



Fuente: Autor.



Las coordenadas planas (Proyección Transversa de Mercator Colombia Zona Bogotá) del polígono de concesión HIQO – 01 son:

Tabla 1. Coordenadas del polígono de concesión.

PUNTO	ESTE	NORTE
PA	1'022.000	1'052.000
1	1'022.000	1'051.050
2	1'023.679	1'051.050
3	1'023.679	1'052.000

Fuente: Expediente HIQO - 01.

## 2.2. VIAS DE ACCESO

Para llegar a la zona de estudio, la principal vía de acceso es la que conduce de Bogotá a Nemocón con un recorrido aproximado de 68 Km. También existen vías secundarias que comunican la mina de sal con los municipios de Tocancipá, Suesca y Ubaté como las vías Nemocón -Tocancipá, Nemocón - Suesca por la vereda de Astorga y Nemocón – Ubaté por la vereda Susatá. La mayoría de vías existentes son carretables o vías sin pavimentar y las vías principales del casco urbano, así como la vía Bogotá – Nemocón, se encuentran pavimentadas en su totalidad.

## 2.3. FISIOGRAFÍA

La zona de estudio se encuentra en un rango de alturas de 2.570 a 3.000 m.s.n.m., con una altura promedio de 2.785 m.s.n.m. La zona de estudio, según el método de clasificación de pendientes de la FAO (Tabla 2), se caracteriza por presentar topográficamente predominio de pendientes ligeramente planas a fuertemente onduladas (Figura 2).

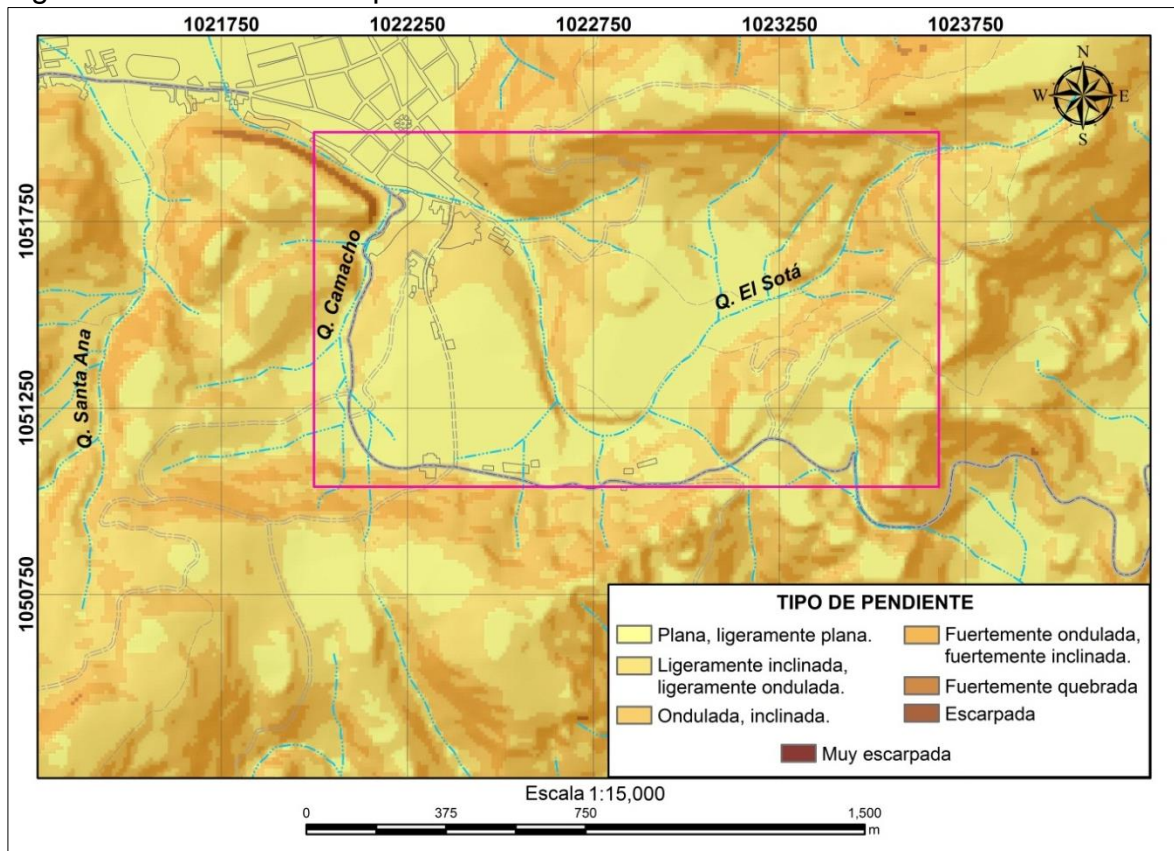
Las zonas planas a ligeramente onduladas se encuentran ubicadas en la parte central, noroeste y sureste de la zona de estudio, conformada por glaciares coluviales, zonas distales de los conos de deyección y el domo diapírico, estas zonas tienen un gran potencial para actividades agrícolas y ganaderas, además de ser zonas de asentamiento humano. Las zonas de relieve ondulado a fuertemente quebrado y en menor medida, escarpado y muy escarpado, se localizan sobre las laderas, pendientes y contrapendientes que bordean las zonas planas a ligeramente onduladas.

Tabla 2. Clasificación de pendientes.

GRADO	RELIEVE
0-3 %	Plana, ligeramente plana.
3-7 %	Ligeramente inclinada, ligeramente ondulada
7-12 %	Ondulada, inclinada
12-25 %	Fuertemente ondulada, fuertemente inclinada
25-50 %	Fuertemente quebrada
50-75 %	Escarpada
> 75 %	Muy escarpada

Fuente: FAO.

Figura 2. Clasificación de pendientes del área de estudio.



Fuente: Autor.

## 2.4. CLIMA

Según la clasificación de Caldas – Lang (Schaufelberguer, 1962) que tiene en cuenta los parámetros de temperatura, altura y precipitación, se establece que la zona de estudio posee un clima frío semi--húmedo.

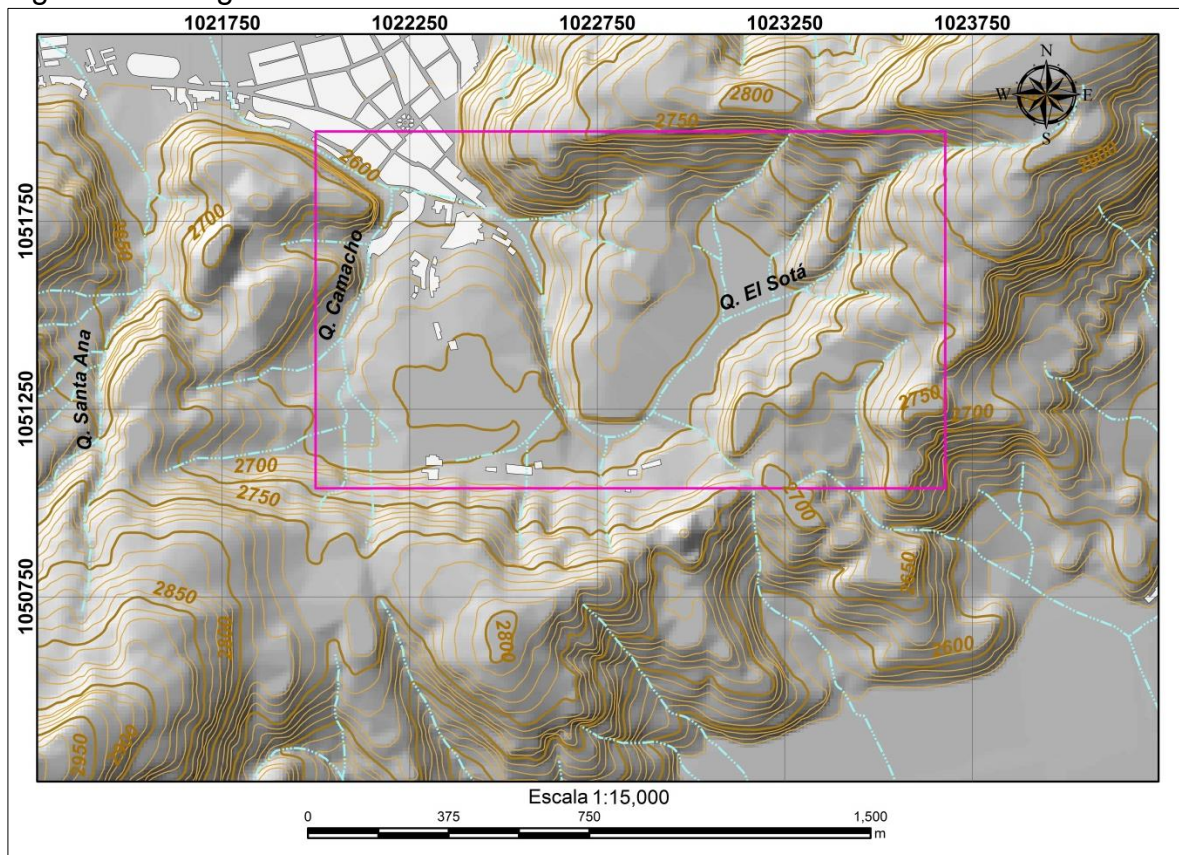


La temperatura media de la zona es de 12.5°C y la precipitación media anual es de 780mm con un promedio de 153 días con lluvia. El periodo más lluvioso va de Septiembre a Noviembre y el más seco de Diciembre a Marzo.

## 2.5. HIDROGRAFÍA

El área de estudio pertenece a la cuenca hidrográfica alta del río Bogotá, subcuenca del río Checua y está en inmediaciones de la microcuenca Quebrada El Sotá. Otras quebradas presentes en la zona son Camacho, El Socaire, Jochonta y Santa Ana. La Quebrada El Sotá y otros drenajes menores, son de tipo intermitente.

Figura 3. Hidrografía del área de estudio.



Fuente: Autor.

## 2.6. VEGETACIÓN

Según la metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia por el IDEAM y el IGAC que permite describir, clasificar y comparar las características de la cobertura de la tierra, interpretadas a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas; se establecieron cuatro tipos de cobertura principales para la microcuenca Quebrada El Sotá (que ocupa un 75% del polígono de concesión) como son territorios artificializados, territorios agrícolas, bosques y áreas seminaturales y superficies de aguas, estos a su vez subdivididos en 18 clases como muestra en la Figura 4.

La cobertura predominante en la cuenca corresponde a pastos limpios utilizados en ganadería ubicados en la parte central, seguido por mosaico de pastos y cultivos en la parte sur de la microcuenca. También se presenta gran cantidad de bosques y arbustales con especies nativas que son reguladoras del recurso del agua y existen zonas de bosques de tipo plantado cuyas especies son el pino, el eucalipto y las acacias, utilizados para las cercas vivas, comercialización y procesos de reforestación, ubicados en la parte central del área sobre el domo.

## 2.7. SUELOS

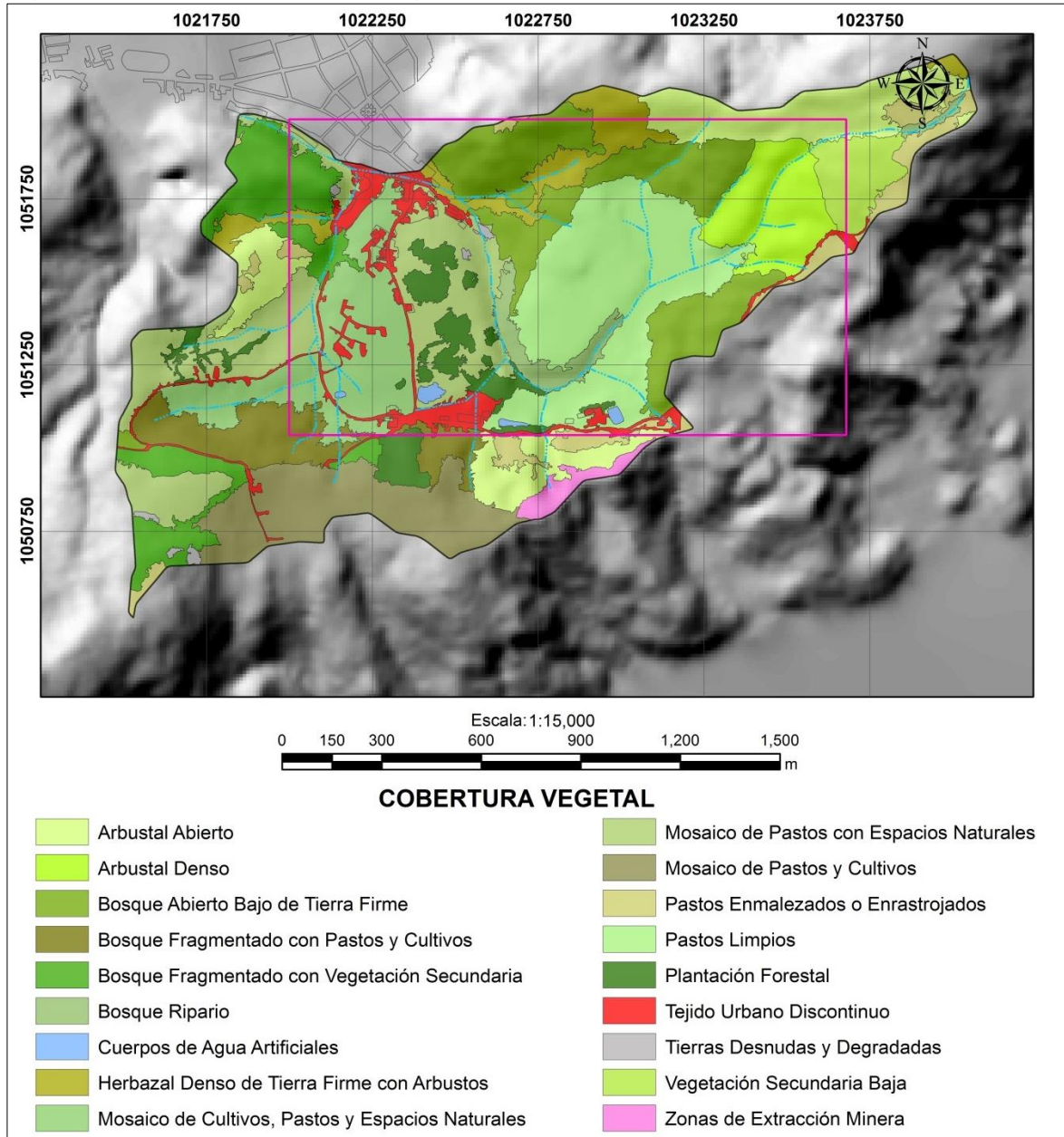
La zona de estudio se caracteriza por presentar tres unidades de suelo cuyo origen se relaciona a geformas que conservan parcialmente la estructura original de la roca, pero que gradualmente han sido modeladas por procesos erosionales y acumulación de materiales de origen aluvial y coluvial.

### 2.7.1. Consociación Pachic Melanudands

Esta unidad de suelo se encuentra ubicada en la parte norte y sur del área de estudio, con un relieve ligeramente plano a ligeramente inclinado y pendientes que varían entre 1 y 7 %, donde se realizan las actividades agropecuarias más sobresalientes. Los suelos se caracterizan por ser de colores oscuros, profundos a moderadamente profundos (150cm), tener una baja a moderada evolución a partir de depósitos de ceniza volcánica y texturas finas (textura arcillo limosa y franco arcillo limosa). Estos suelos se pueden ver afectados ocasionalmente por fluctuaciones del nivel freático y pueden presentar un drenaje que va desde bueno a imperfecto.

Los suelos de esta unidad están constituidos en un 90% de suelos Pachic Melanudands y un 10% de suelos Andic Dystrudepts y Aeric Endoaquepts.

Figura 4. Mapa de cobertura vegetal Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.

### 2.7.2. Consociación Typic Haplustalfs

Los suelos de esta unidad se distribuyen en glaciais con pendientes entre 7 y 25% y relieve ligera a moderadamente quebrado; frecuentemente se observan al pie de las laderas, especialmente en la parte central del área de estudio, en el sector de Chimisía y Camacho. Se caracterizan por ser de colores amarillo oscuro, pardo y





negro, ser moderadamente profundos a superficiales limitados por horizontes de arcilla endurecida y presentar texturas finas a medias (texturas franco arcillosa y arcillosa). Estos suelos han evolucionado a partir de depósitos clásticos hidrogravigénicos y suelen ser moderadamente a bien drenados.

La consociación está integrada en un 90% por los suelos Typic Haplustalfs y 10% de suelos Typic Haplustepts.

### **2.7.3. Consociación Typic Haplustepts**

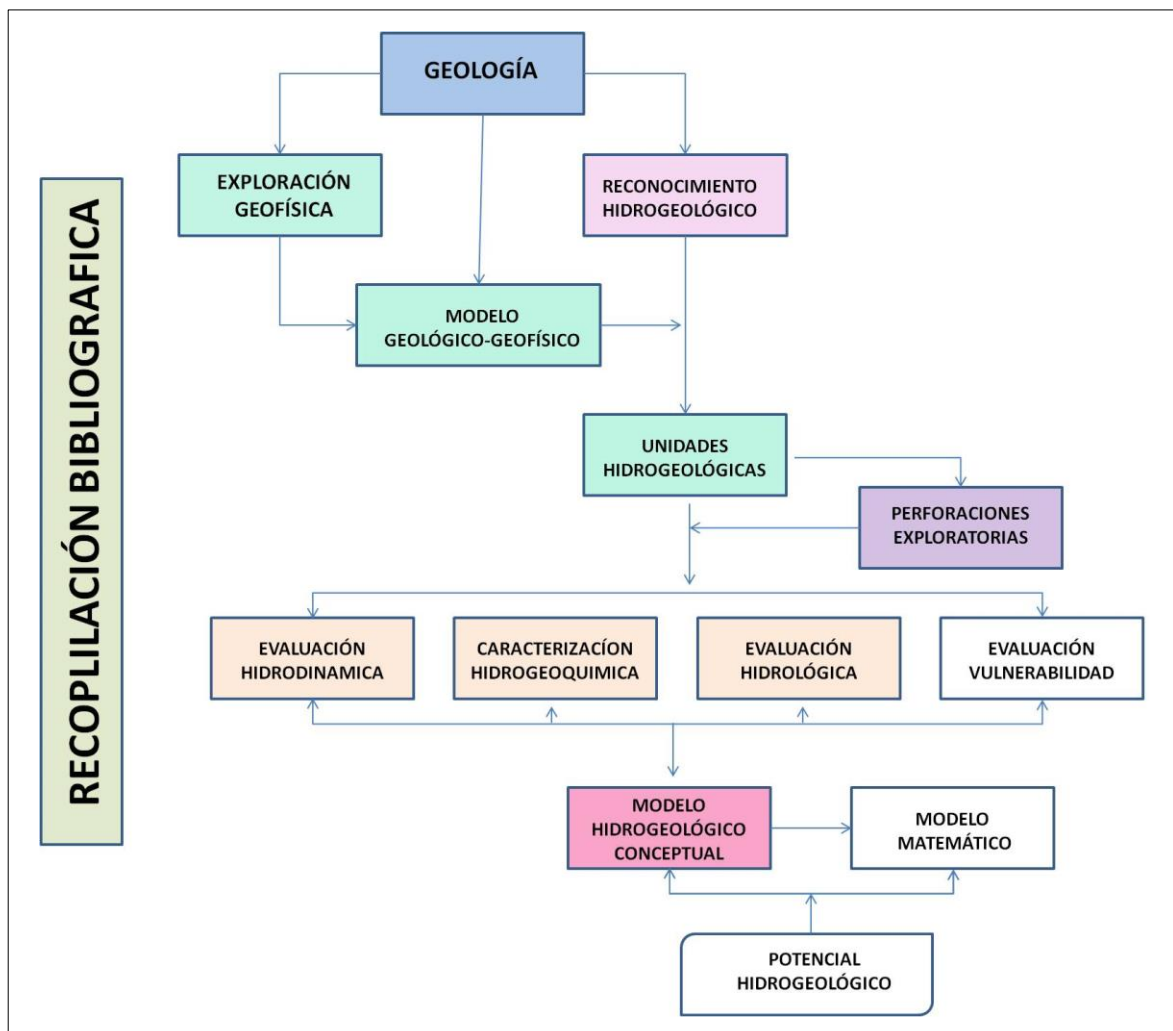
Estos suelos se encuentran en laderas estructurales y crestones, bordeando las zonas planas a ligeramente onduladas. El relieve es fuertemente quebrado a moderadamente escarpado con pendientes entre 25 y 75%. Se caracterizan por ser de color gris a pardo oscuro, ser bien a excesivamente drenados, tener texturas finas a moderadamente gruesas (textura franco arcillo limosa y arcillo limosa con 5% de gravilla) y ser moderadamente profundos a superficiales (45cm), limitados en su mayoría por contacto con el lecho rocoso. Son suelos poco evolucionados cuyo material parental está constituido por rocas clásticas limoarcillosas.

Constituyen esta unidad los suelos Typic Haplustepts en una proporción del 80% y Lithic Ustorthents en el 20% restante.

### 3. METODOLOGÍA

Para elaborar el modelo hidrogeológico conceptual del polígono de concesión, se partió de la metodología general para la exploración y evaluación de aguas subterráneas definida por el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEOMINAS en el 2004, actual Servicio Geológico Colombiano SGS, exceptuando la evaluación de vulnerabilidad y modelo matemático, esto debido al enfoque del proyecto (Figura 5).

Figura 5. Diagrama de flujo metodológico de exploración y evaluación de aguas subterráneas.

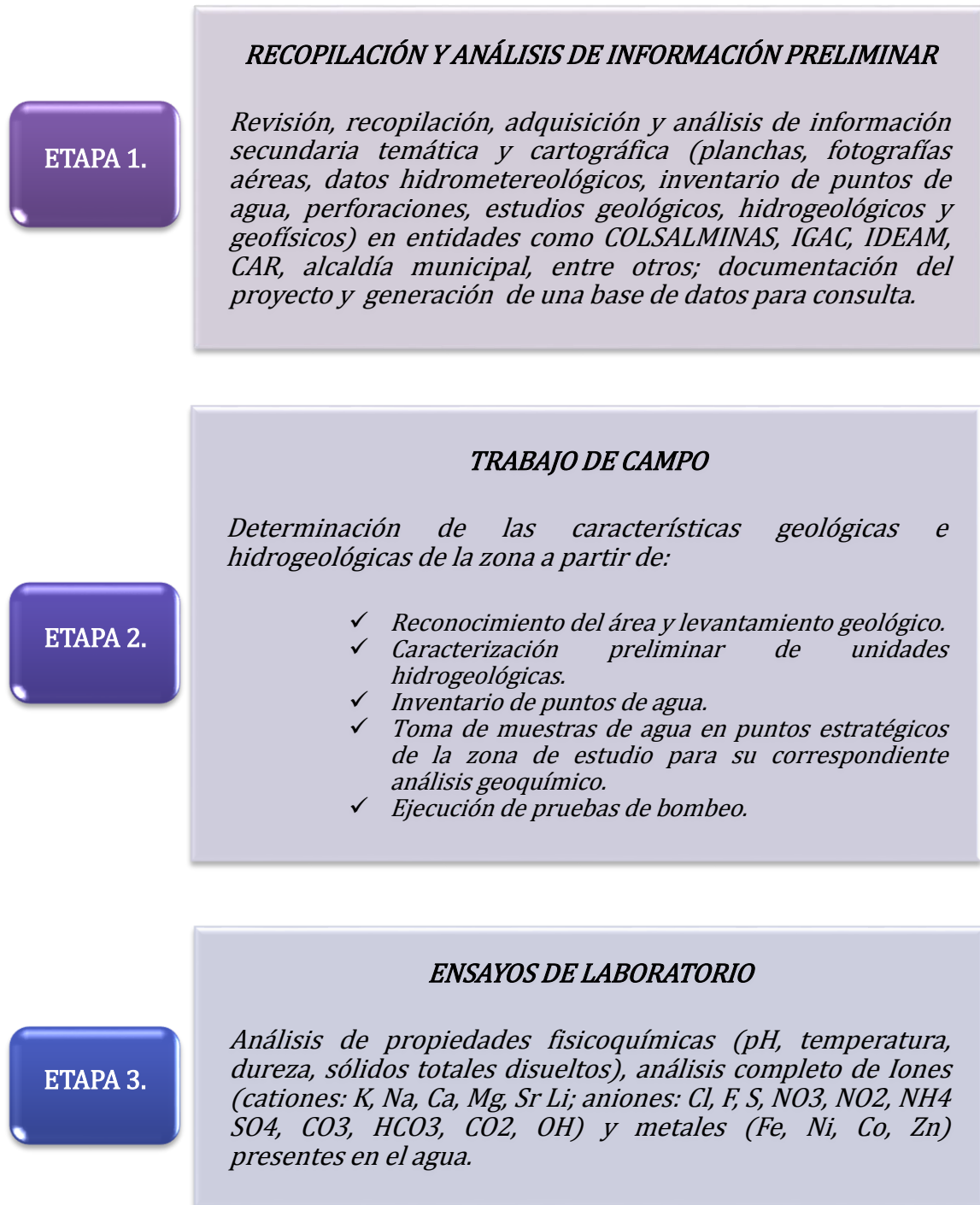


Fuente: Tomado y modificado de INGEOMINAS, 2004.

Las etapas y metodología adaptadas a la ejecución del proyecto, se describen a continuación:



Figura 6. Metodología del proyecto.



ETAPA 4.

### PROCESAMIENTO Y ANÁLISIS DE INFORMACIÓN

**Geología:** Caracterización geológica de la zona a escala 1:5000, haciendo énfasis en litología, textura, tipo de porosidad, ambientes de deposición, estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como composición mineralógica de los sedimentos y rocas. Levantamiento de columnas estratigráficas.

**Geofísica:** Interpretación de SEV's y Registro eléctrico de pozo, desarrollo de secciones geológicas- geofísicas con ayuda de perforaciones exploratorias y determinación de presencia y geometría de zonas acuíferas.

**Hidrología:** Evaluación de las condiciones meteorológicas e hidrológicas, elaboración del balance hídrico para determinar la disponibilidad del agua de recarga.

**Hidrogeoquímica:** Clasificación de aguas, evolución de la composición del agua almacenada en las unidades hidrogeológicas, identificación de zonas de recarga y descarga, dirección del flujo subterráneo, identificación de ocurrencias de aguas termales y minerales.

**Hidrogeología:** Caracterización de unidades hidrogeológicas apoyada en el inventario de puntos de agua divididos en manantiales, aljibes, pozos y humedales, corrientes y cuerpos de agua. Determinación de parámetros hidráulicos del acuífero (conductividad hidráulica, transmisividad y coeficiente de almacenamiento) y dirección del flujo subterráneo a partir de pruebas de bombeo.

ETAPA 5

### ELABORACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Modelo hidrogeológico conceptual del área mediante un esquema lógico que muestra la interacción de sus diferentes componentes (dirección de flujo de agua superficial y subterránea, correlaciones hidrogeoquímicas y la identificación de zonas de recarga y descarga).

Fuente: Autor.

## 4. FUNDAMENTO TEÓRICO

Dado que la elaboración del modelo hidrogeológico conceptual de la zona de estudio se sustenta en diferentes disciplinas, se hace necesario definir los conceptos más relevantes de las ciencias y métodos empleados en el desarrollo del proyecto.

### 4.1. GEOFÍSICA

La Geofísica utiliza los fundamentos teóricos de la Física para investigar el comportamiento de algunos componentes de la Tierra como el campo magnético, la densidad de las rocas, su capacidad para conducir corriente eléctrica, ondas sísmicas y energía radioactiva, además brinda información sobre su evolución y composición. También puede ser utilizada como una herramienta de resolución de tareas geológicas y prospección de recursos.

Para la investigación del comportamiento de la tierra se utilizan diferentes ramas o técnicas que miden un parámetro físico específico, los más conocidos son la gravimetría, magnetometría, geoelectrica y sísmica. Estas técnicas pueden utilizar el campo natural o el campo artificial para su investigación.

En el plano de la hidrogeología, la técnica geofísica más aplicada a la solución de problemas es la geoelectrica, ya que su campo físico de estudio está estrechamente ligado a la presencia de fluidos en las rocas, como es el caso del agua.

#### 4.1.1. Geoelectrica

Trata sobre el comportamiento de rocas y sedimentos en relación a la corriente eléctrica. Los métodos geoelectricos estudian, por medio de mediciones efectuadas en la superficie o pozos, la distribución de alguna magnitud electromagnética. Existen tres magnitudes electromagnéticas principales que son la permeabilidad magnética, la constante dieléctrica y la resistividad eléctrica, esta ultima la de mayor importancia y la más estudiada.

Los métodos geoelectricos son muchos y variados y pueden clasificarse de acuerdo a si la corriente utilizada es natural o artificial, y a su vez si es continua o alterna. En general los métodos más utilizados son el método de resistividad (SEV, Calicatas o Perfilaje, Tomografías eléctricas 2D y 3D) y el método de potencial espontáneo y en conjunto el registro eléctrico de pozos.

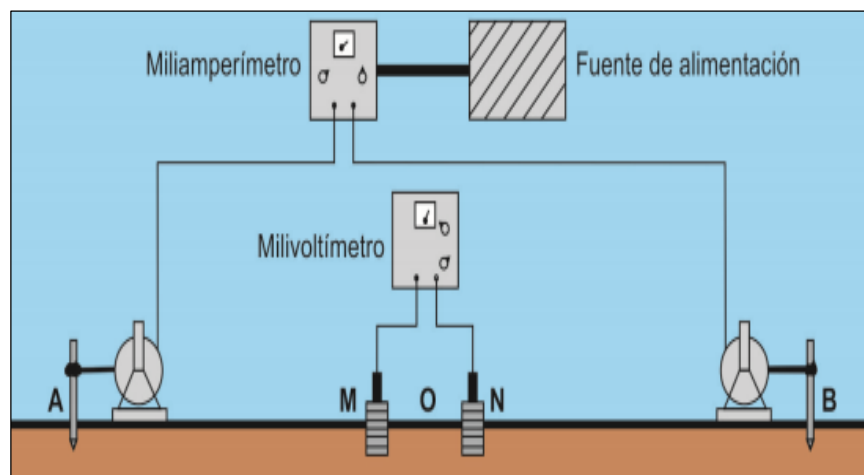
#### 4.1.1.1. Sondeo eléctrico vertical

Se realiza de manera sencilla y tiene un costo de ejecución relativamente bajo. Este método permite obtener una curva de variación de resistividad aparente en función de la profundidad, en el punto sondeado. Su objetivo es determinar cambios litológicos y presencia de estructuras geológicas basándose en los contrastes de resistividad en profundidad, haciendo medidas sucesivas incrementando la separación entre electrodos. Los datos obtenidos son medidas de resistividad aparente dadas en ohm/m.

El método consiste en colocar cuatro electrodos alineados y dispuestos simétricamente con respecto a un centro. Se mide la intensidad  $I$  que circula entre los electrodos A y B, así como el voltaje entre los electrodos M y N. La resistividad viene definida por el cociente entre el voltaje y la intensidad de la corriente medidos, multiplicado por  $K$  (constante dieléctrica característica según el tipo de arreglo).

$$\rho = k \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Ec. (1)}$$

Figura 7. Disposición de electrodos para ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales.



Fuente: Estrada, Luis. UNIVERSIDAD NACIONAL DE TUCUNAM. Apuntes de Prospección Geoeléctrica para Ingenieros, 2012.

En la implementación del Sondeo Eléctrico Vertical se deben tener en cuenta los siguientes aspectos:

- ✓ Las rocas que componen el corte geoeléctrico deben tener diferentes resistividades.

- ✓ La inclinación de los contactos de las rocas de diferentes resistividades no debe ser mayor de 15 a 20 grados, ya que si los ángulos de buzamiento son mayores, la interpretación no es exacta.
- ✓ El relieve del terreno debe ser llano, ya que las curvas teóricas han sido calculadas para superficies terrestres planas.
- ✓ El número de horizontes geoelectricos no debe ser superior a 6 o 7 ya que de lo contrario la interpretación se complica y no es segura.

#### 4.1.1.2. Registro eléctrico de pozo

Los registros eléctricos de pozo son un conjunto de métodos utilizados para evaluar los yacimientos a partir de la medición de parámetros físicos de las rocas en función de la profundidad. Con base en los registros de pozo se determina la litología, resistividad real, porosidad, permeabilidad y espesor de las capas o estratos.

La medición de las propiedades petrofísicas de la roca se realiza introduciendo en el pozo diferentes sondas de registro conectadas mediante un cable a un equipo en superficie para obtener de forma indirecta y en tiempo casi real información precisa de las unidades perforadas.

El registro eléctrico de pozo esta conformado por el registro de potencial espontáneo, resistencia de punto sencillo, resistencia lateral, resistividad normal corta y normal larga. El registro electrico de pozo generalmente se encuentra acompañado del registro de rayos gamma, que se basa en las propiedades radiactivas de las rocas pero para efectos prácticos se incluirea en este contexto.

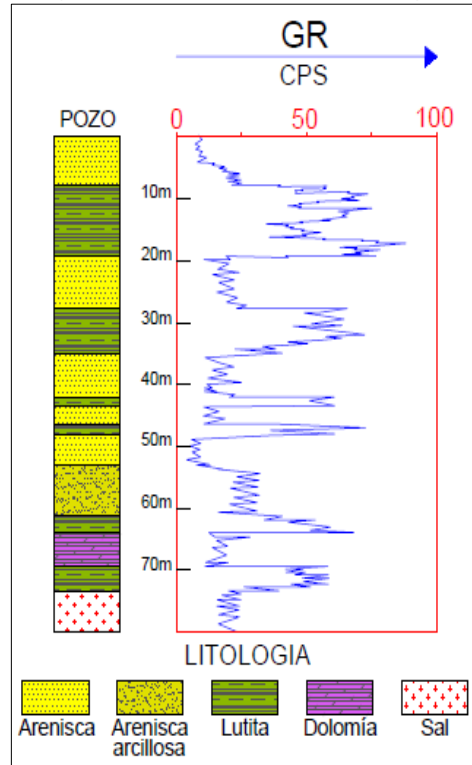
#### ➤ Registro de rayos gamma (RG)

El registro de GR mide la radioactividad natural de las rocas o sedimentos de una formación y hace posible la distinción de unidades arcillosas de las no arcillosas.

Este registro se basa en la medida de tres isótopos radioactivos: el Potasio 40, el Uranio 238 y el Torio 232, cada uno con un nivel de energía de desintegración constante y diferente entre sí. Los isotopos radiactivos K y Th se encuentran mayoritariamente en arcillas y lutitas, mientras que generalmente en las fracturas hay presencia de sales de Uranio.

Cuando el registro de rayos gamma es alto indica presencia de rocas arcillosas y cuando es bajo indica presencia de rocas arenosas o compactas, a menos que tengan contaminantes radiactivos. Se lee de izquierda a derecha y se mide en unidades API o en counts per second CPS.

Figura 8. Registro de rayos gamma esperado para algunos tipos de roca.



Fuente: Autor.

### ➤ Registro normal de resistividad

Para el desarrollo del registro normal de resistividad se utilizan cuatro electrodos, la corriente se hace pasar entre los electrodos A y B, y la diferencia de potencial se mide entre los electrodos M y N. La profundidad de penetración del registro está relacionada con la distancia entre los electrodos A y M sobre la sonda de resistividad. Los nombres de las curvas derivan de la separación AM. En general, cuanto mayor sea el espaciamiento entre los electrodos, mayor es la investigación dentro de la formación.

Las separaciones AM más empleadas son de 8" también llamada resistividad normal corta (SNR), de 16", de 32" y de 64" también llamada normal larga (LNR). Este registro se ve afectado por el espesor de las capas, diámetro de la perforación, y el lodo presente en el pozo, sólo se puede realizar en pozos abiertos y utilizando lodos conductivos.

La curva de resistividad normal corta (16") mide la resistividad de la zona lavada y la curva de resistividad normal larga (64") muestra la resistividad de la roca en la zona no invadida. Las curvas se leen de izquierda a derecha, en escala logarítmica. La unidad de medida es el ohm-m, con un rango de valores que va desde 0.1 hasta 2000 ohm/m.



➤ **Registro de resistencia de punto aislado (SPR: Single-Point Resistance)**

Es una medida lineal de la resistencia de la formación en la pared del pozo, tomada con respecto a un punto en superficie y solo utiliza un electrodo de medición. En general, la resistencia aumenta con el aumento de tamaño de grano y disminuye con el aumento del diámetro de la perforación, la presencia de fracturas y la concentración de sólidos disueltos del agua. Este método se utiliza para mostrar capas delgadas que los registros normales de resistividad tienen dificultades para resolver debido a su respectiva distancia entre electrodos, también sirve para determinar la calidad del agua y la ubicación de las zonas de fractura. Se lee de izquierda a derecha y la unidad de medida es el ohm/m.

➤ **Registro de resistividad lateral**

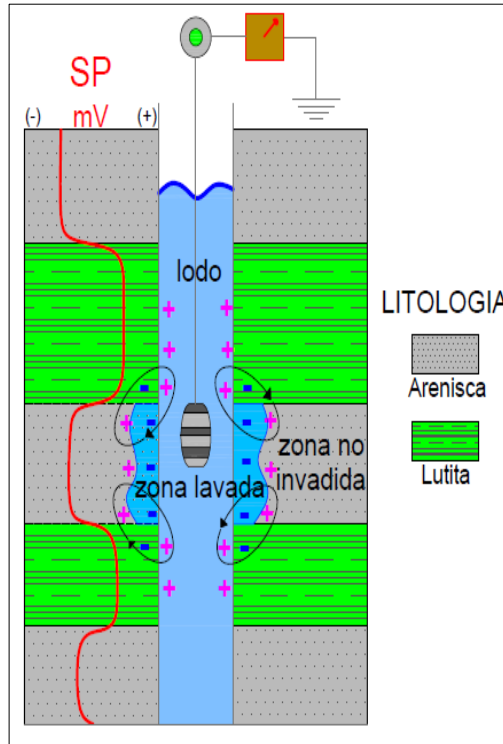
Emplea el mismo principio del método de resistividad normal. Este registro es utilizado para medir la resistividad verdadera de la formación cuando no es posible obtener un valor preciso de la curva normal larga. Se lee de izquierda a derecha, en escala logarítmica y la unidad de medida es el ohm/m.

➤ **Registro de potencial espontáneo (SP)**

El registro de potencial espontáneo mide las corrientes eléctricas (potenciales espontáneos naturales) que se producen dentro del pozo por el contacto entre fluidos de diferente concentración salina. Se utiliza para identificar capas porosas, calcular la salinidad y resistividad del agua ( $R_w$ ) de la formación. Este registro no es inducido y solo se desarrolla en pozos libres, utilizando lodos conductivos. Se representa como una gráfica de pequeñas variaciones de voltaje medidas en milivoltios (mV).

En las capas impermeables el SP es neutro, y marca una línea recta llamada comúnmente línea base de las arcillas. En las capas permeables la curva del SP muestra deflexiones desde la línea base de arcillas hasta alcanzar la línea base de las arenas cuando las capas son de gran espesor. Dependiendo de la salinidad del lodo de perforación y la salinidad del agua de formación, la curva SP puede presentar diferentes resultados. Si la salinidad del agua de formación es mayor a la del lodo, la deflexión será hacia la izquierda y se considerara negativa. Si sucede lo opuesto, la deflexión será hacia la derecha y se considerara positiva. Por otro lado, si la resistividad del lodo y la del agua de formación son más o menos iguales, las deflexiones de la curva de SP serán pequeñas y su información no sea significativa.

Figura 9. Registro de Potencial espontáneo SP.



Fuente: Autor.

## 4.2. HIDROLOGÍA

La hidrología es el estudio del agua en todas las zonas de la tierra, incluyendo su existencia, movimiento, distribución e interacción con el medio ambiente y los organismos vivos. Su tema central de estudio es el ciclo hidrológico así como sus diferentes componentes (precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración) y la variación espacio temporal de los mismos a diferentes escalas.

La hidrología abarca las ramas de la hidrometeorología, la hidrología superficial y subterránea, la calidad del agua, entre otras, y se apoya en ciencias como la Climatología, Geología, Geomorfología e Hidrografía.

### 4.2.1. Parámetros Hidrometeorológicos que dependen de otras variables

#### 4.2.1.1. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un componente muy importante en el ciclo hidrológico pues mide las pérdidas de agua generadas desde una superficie de suelo por



evaporación y transpiración, esta se da en forma de vapor de agua. Depende de factores de orden hidrometeorológico como radiación solar, humedad relativa, temperatura, velocidad del viento; factores referentes a las plantas como cobertura vegetal, y factores de tipo edáfico como tipo y estado de humedad de suelo.

Existen dos tipos de evapotranspiración: evapotranspiración real y evapotranspiración potencial.

- ✓ **Evapotranspiración potencial o de Referencia (ETP):** Es la cantidad máxima teórica de evapotranspiración posible que ocurre cuando el suelo está dotado con abundante agua y con una cobertura vegetal completa. Este parámetro se calcula por diferentes fórmulas que estiman la pérdida de agua directamente de los datos hidrometeorológicos.
- ✓ **Evapotranspiración real (ETR):** Es la evapotranspiración que ocurre en condiciones reales, teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa ni el suelo se encuentra en estado de saturación. Este valor se mide directamente en campo, aunque también existen fórmulas que permiten evaluarlo. La evapotranspiración real generalmente es inferior a la evapotranspiración potencial.

La determinación de la evapotranspiración se puede realizar de manera práctica mediante el uso de lisímetros o a través de métodos semiempíricos como los mostrados en la Tabla 3, donde el número de variables juega un papel importante en el cálculo, ya que entre mayor sea el número de variables utilizadas, el valor obtenido se aproximara más a la realidad.

El método de cálculo se escoge de acuerdo a la información disponible de las variables relacionadas.

Tabla 3. Variables utilizadas para el cálculo de la evapotranspiración potencial según diferentes métodos.

MÉTODO	VARIABLE					
	Temp.	Brillo Solar	Velocidad del Viento	Humedad Relativa	Precipitación	Altitud
Thornthwaite (1944)	x					
L. Turc (1961)	x	x			x	
García y López (1970)	x			x		
Hargreaves (1956)	x	x	x	x		x
Christiansen (1966)	x	x	x	x		x

Fuente: Autor.

➤ **Método de Hargreaves para el cálculo de la evapotranspiración**

El método de Hargreaves (1956) es una fórmula empírica que halla la evapotranspiración de referencia a partir de la estimación de la evaporación del tanque clase A. Este método utiliza las variables de temperatura, humedad relativa y coeficiente mensual de luz solar.

A partir de esta fórmula se puede hallar la evapotranspiración real mensual:

$$ETR = K * ETP \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde el coeficiente K o coeficiente de cultivo es una variable y oscila entre 0,10 y 0,90, aproximándose a 1 cuando la planta está en su máximo desarrollo (foliación y fruto) y ETP es la Evapotranspiración Potencial que viene dada por la siguiente fórmula:

$$ETP = C_1 D T F_H C_W C_I C_A \quad \text{Ec. (3)}$$

$C_1$  Es un coeficiente que depende del brillo solar y se obtiene de la Tabla 4.

Tabla 4. Valores de coeficiente  $C_1$ .

<b>BS (%)</b>	40	50	60	70	80	90
<b><math>C_1</math></b>	12.5	13.3	14.0	15.0	16.1	17.4

El coeficiente de luz solar  $D$  se define como  $D=0.12P$ , donde  $P$  es el porcentaje teórico de horas de brillo solar respecto al año, teniendo en cuenta el número de días del mes y la duración del brillo solar diario. Su valor depende de la latitud y se obtiene de la Tabla 5.

Tabla 5. Porcentaje de horas diurnas  $P$ .

LATITUD NORTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.26	7.75	7.88
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.42
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.76	9.77	9.93	9.37	8.36	7.87	6.97	6.86
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.20	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.52
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.99	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.57	6.98	5.04	4.22

La temperatura media mensual del aire  $T$  se expresa en  $^{\circ}\text{C}$  y  $F_H$  es el coeficiente de humedad relativa, el cual se calcula con la siguiente expresión:

$$F_H = 1.0 - 0.001H_n \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde  $H_n$  es la humedad relativa media mensual al medio día en porcentaje y se expresa así:

$$H_n = [0.004(H_{RM})^2 + 0.4(H_{RM}) + 1.0] \quad \text{Ec. (5)}$$

$H_{RM}$  es la humedad relativa media mensual expresada en porcentaje.

El coeficiente de viento  $C_W$  se mediante la siguiente ecuación:

$$C_W = 0.75 + 0.0255\sqrt{W_z}$$

$W_z$  es la velocidad media mensual del viento a una altura de 2.0 m, expresada en km/día.

El coeficiente de brillo solar depende de la Insolación y se define con la siguiente expresión:

$$C_I = 0.478 + 0.58 * S \quad \text{Ec. (6)}$$

$$S = \frac{n}{N} \quad \text{Ec. (7)}$$

Dónde: n es el brillo solar (hr/día)

N es la duración del día (hr/día) según la Tabla 6.

Tabla 6. Número de horas de brillo solar N.

LATITUD NORTE	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
0	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1	12.1
5	11.8	11.9	12	12.2	12.3	12.4	12.3	12.3	12.1	12.2	11.9	11.8
10	11.6	11.8	12	12.3	12.6	12.7	12.6	12.4	12.1	11.8	11.6	11.5
15	11.3	11.6	12	12.5	12.8	13	12.9	12.6	12.2	11.8	11.4	11.2
20	11	11.5	12	12.6	13.1	13.3	13.2	12.8	12.3	11.7	11.2	10.9
25	10.7	11.3	12	12.7	13.3	13.7	13.5	12	12.3	11.6	10.9	10.6
30	10.4	11.1	12	12.9	13.6	14	13.9	13.2	12.4	11.5	10.6	10.2
35	10.1	11	11.9	13.1	14	14.5	14.3	13.5	12.4	11.3	10.3	9.8

El coeficiente de elevación  $C_A$  depende de la elevación promedio de la zona  $E$  en msnm y se calcula con la siguiente fórmula:

$$C_A = 0.95 + 1 * 10^{-4} * E \quad \text{Ec. (8)}$$

Cuando no se cuenta con mediciones de brillo solar o velocidad del viento, se recomienda tomar la unidad como valor de los respectivos factores de corrección (Chiappe, 1998).

#### 4.2.1.2. Escorrentía

La escorrentía se presenta cuando el suelo se encuentra cercano a la saturación y su contenido de humedad es mayor o igual a su capacidad de campo; y por tanto no permite que haya infiltración, o cuando la intensidad de la precipitación es muy alta y la tasa de infiltración del suelo es muy lenta. La escorrentía se puede dar de manera superficial y subsuperficial, donde el flujo subsuperficial domina en todos casos excepto en aguaceros de fuerte intensidad.

Cuando no se cuenta con información de caudales que permitan hallar la escorrentía directamente, esta se puede calcular mediante el método de Número de curva desarrollado por el Soil Conservation Service SGS de los Estados Unidos, hoy llamado Natural Resources Conservation Service NRCS. Este método además de ayudar a estimar la escorrentía, permite calcular la infiltración.

El método de número de curva toma en cuenta las condiciones de humedad del suelo, así como el tipo de práctica con la que se cultiva, la pendiente del terreno, tipo y la condición hidrológica del mismo, donde se evalúa su capacidad de infiltración. Se representa mediante un número de curvas que varía entre 0 y 100; donde 0 significa que la zona no permite la generación de escorrentía y 100 que la zona es impermeable y toda la precipitación genera escorrentía.

A partir del número de curva se calcula la escorrentía mediante la fórmula de Hawkins y Ponce:

$$Q = \frac{(P-0.2S)^2}{(P+0.8S)} \quad \text{Ec. (9)}$$

Dónde:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad \text{Ec. (10)}$$

S= Infiltración potencial del suelo.

P= Precipitación media mensual.

CN= Número de curva (Tablas características)

Q= Escorrentía

#### 4.2.2. Balance Hídrico

Es la principal herramienta de desarrollo de la hidrología. Mediante el balance hídrico se cuantifican las componentes que conforman el ciclo hidrológico y se



hace una relación de los recursos hídricos que entran y salen del sistema en un tiempo y lugar determinado.

La ecuación general del balance hídrico es:

$$\frac{dS(t)}{dt} = P(t) - E(t) - Q(t) \quad \text{Ec. (11)}$$

Dónde:

S (t): Representa el almacenamiento o recarga de agua en el suelo como una función del tiempo.

P (t): Precipitación en mm por unidad de tiempo.

E (t): Evapotranspiración real o efectiva en mm por unidad de tiempo.

R (t): Escorrentía incluyendo el flujo base en mm por unidad de tiempo.

### **4.3. HIDROGEOQUÍMICA**

La hidrogeoquímica es la combinación de la química, geología y biología, aplicada al estudio del origen, evolución y los procesos de cambio de composición del agua subterránea y superficial relacionados con el ciclo hidrológico y la hidrogeología.

Esta herramienta permite determinar la calidad del agua para diferentes usos mediante análisis de iones disueltos y propiedades fisicoquímicas, además de indagar sobre los procesos químicos que tienen lugar en la interacción del agua con el suelo y las rocas. También ayuda a identificar zonas de recarga y descarga, dirección de flujo subterráneo, ocurrencias de aguas termales y minerales, tiempo de residencia de las aguas subterráneas, mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes como aguas superficiales y subterráneas y mezclas de agua entre acuíferos.

#### **4.3.1. Composición del agua subterránea**

La composición y características fisicoquímicas del agua se dan lo largo del ciclo hidrológico y dependen de factores como duración, naturaleza y disposición espacial de los materiales con los que el agua está en contacto, así como la temperatura, presión, existencia de gases y grado de saturación del agua en relación con las distintas sustancias incorporables, entre otras.



Los procesos químicos más importantes que tienen lugar a lo largo del ciclo hidrológico y que le imprimen las características químicas particulares al agua subterránea son: hidratación o incorporación del agua a la red cristalina de los minerales para formar hidratos; hidrólisis o descomposición de minerales bajo la acción de H y OH procedentes de la descomposición del agua; procesos de oxidación - reducción y variación del pH.

#### **4.3.1.1. Características fisicoquímicas**

El agua subterránea natural como consecuencia de su composición química y de acciones naturales externas, presenta una serie de propiedades físicas y químicas características y variables en tiempo y espacio como temperatura, pH, Sólidos Totales Disueltos, conductividad eléctrica, dureza, entre otros.

##### **➤ Temperatura**

Esta medida es de gran importancia para la calidad del agua ya influye en la capacidad de solubilización de sales y gases y en los procesos de depuración natural (degradación de materia orgánica). La mineralización del agua subterránea generalmente aumenta con la temperatura. A temperaturas mayores de 25 °C el agua es considerada como termal.

La temperatura del agua subterránea está influida por factores climáticos cerca a la superficie o por el gradiente geotérmico en profundidad. Las aguas subterráneas mantienen una escasa oscilación térmica anual, en comparación a las aguas superficiales.

##### **➤ pH**

El pH es un indicador de acidez y está determinado por el número de iones libres de hidrógeno presentes en una sustancia. Este valor es medido en una escala de cero a catorce, en la cual siete indica que la sustancia es neutra. Los valores de pH para aguas subterráneas suelen estar entre 6,5 y 8 (salvo aguas subterráneas muy ácidas o muy alcalinas).

Debido a que el agua disuelve casi todos los iones, el pH sirve como indicador de los procesos químicos que tendrán lugar en las rocas y el suelo que estarán en contacto con el agua, ya que valores de pH inferiores a 7,0 le darán al agua un carácter oxidante, mientras que valores de pH superiores a 8,0 le imprimirán al agua un carácter reductor. Este parámetro también sirve para identificar si el agua procede de material calizo (pH básico) o silíceo (pH ácido), si contiene residuos industriales (generalmente pH ácidos) y la posible disociación de compuestos con metales pesados.



### ➤ Conductividad eléctrica

Como consecuencia de su contenido iónico el agua se hace conductora de la electricidad. La conductividad eléctrica aumenta (hasta cierto límite) a medida que aumenta la concentración iónica, el contenido de TDS y la temperatura ambiental (2% a 3% por 1°C). Este parámetro se mide en  $\mu\text{S/cm}$  (microsiemens/cm) o  $\mu\text{mhos/cm}$  (micromhos/cm), ambas medidas equivalentes.

### ➤ Sólidos totales disueltos

Los sólidos totales disueltos o TDS (Total dissolved solids) son la suma de los minerales, metales, cationes y aniones disueltos en el agua, expresados en partes por millón ppm o mg/L, esto incluye cualquier elemento presente en el agua que no sea moléculas de agua pura y sólidos en suspensión.

La cantidad de TDS recomendada para consumo humano es de 500 mg/L, aunque hay aguas dulces que pueden alcanzar valores de 1000 mg/L, después de este rango el agua tomara un sabor desagradable y provocara algunos problemas de salud.

El agua se puede clasificar en primera medida a partir de los sólidos totales disueltos que permitirán determinar el grado de salinidad.

### ➤ Dureza

Se define como la concentración de sales de calcio y magnesio en forma de carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, cloruros y nitratos presentes en el agua y se expresa en mg/L  $\text{CaCO}_3$  total.

En términos de dureza, las aguas pueden clasificarse en blandas, moderadamente duras, duras y muy duras, donde el límite máximo permisible de dureza para consumo humano es de 300 mg/L (resolución 2115 de 2007).

El agua denominada dura tiene una elevada concentración de sales de calcio y magnesio que tiende a producir incrustaciones y consumir mayores cantidades de detergentes; por otro lado, el agua blanda contiene sales en muy poca cantidad y puede ser agresiva.

La presencia de sales de calcio y magnesio en el agua, depende fundamentalmente de las formaciones geológicas atravesadas por está antes de su captación, por ejemplo, las aguas subterráneas que atraviesan rocas carbonatadas (carbonatos de calcio y magnesio) presentan mayor dureza que las aguas provenientes de rocas silicatadas.

#### 4.3.1.2. Constituyentes químicos

Los constituyentes químicos del agua subterránea en su mayoría son sustancias de tipo inorgánico, puesto que las sustancias de origen orgánico por lo general, aparecen en concentraciones muy pequeñas. Estos constituyentes le confieren una serie de propiedades particulares que califican y caracterizan el agua.

El agua subterránea natural presenta una gran variedad de sustancias constituyentes, que en su mayoría se encuentran disueltas en estado iónico.

Estas sustancias se clasifican según la frecuencia y concentración en que aparecen como iones o elementos mayoritarios, minoritarios y elementos traza, donde los constituyentes mayoritarios se encuentran en concentraciones superiores a 5mg/L, los minoritarios en concentraciones de 0.1 – 5 mg/L y los elementos traza en concentraciones menores a 0.1mg/L. Sin embargo, se debe tener presente que en algunos casos particulares, un constituyente minoritario puede alcanzar un rango de concentración que puede incluirlo dentro de los constituyentes mayoritarios.

Figura 10. Sustancias disueltas constituyentes del agua subterránea.

<b>Constituyentes mayoritarios (&gt; 5mg/L)</b>		
Sodio (Na <sup>+</sup> )	Bicarbonato (HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	Acido carbónico (CO <sub>2</sub> )
Calcio (Ca <sup>2+</sup> )	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Sílice (SiO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )
Magnesio (Mg <sup>2+</sup> )	Cloruro (Cl <sup>-</sup> )	Nitratos (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )
<b>Constituyentes minoritarios (0.1 – 5 mg/L)</b>		
Boro (B <sup>+</sup> )	Potasio (K <sup>+</sup> )	Carbonato (CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> )
Estroncio (Sr <sup>2+</sup> )	Hierro (Fe <sup>2+</sup> )	Fluoruro (F <sup>-</sup> )
<b>Elementos traza (&lt; 0.1 mg/L)</b>		
Aluminio (Al <sup>3+</sup> )	Arsénico (As)	Bromo (Br <sup>-</sup> )
Cromo (Cr)	Cobre (Cu <sup>+</sup> )	Plomo (Pb <sup>2+</sup> )
Manganeso (Mn <sup>2+</sup> )	Fosfato (PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> )	Zinc (Zn <sup>2+</sup> )
Sulfuro (S <sup>2-</sup> )	Yodo (I <sup>-</sup> )	Borato (BO <sub>3</sub> H <sub>2</sub> <sup>-</sup> )
Nitrito (NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> )	Hidróxido (OH <sup>-</sup> )	Níquel (Ni <sup>2+</sup> )
Amonio (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	Hidrogeno (H <sup>+</sup> )	Antimonio (Sb <sup>3+</sup> )
Bario (Ba)	Vanadio (V)	Mercurio (Hg)
Litio (Li <sup>+</sup> )	Uranio (U)	Cobalto (Co)

Fuente: Adaptado de Freeze & Cherry, 1979.

A continuación se describen algunos iones constituyentes del agua subterránea definidos en IGME-EPTISA, 1985.



### ➤ **Sodio (Na<sup>+</sup>)**

Es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos, en donde se presenta fundamentalmente como cloruro de sodio.

Las sales de sodio son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas reacciones de precipitación, sin embargo, el sodio puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de cambio catiónico y puede ser intercambiado por calcio, provocando una disminución de la dureza de las aguas.

La presencia de sodio en cantidades elevadas es muy perjudicial para la agricultura, ya que tiende a impermeabilizar los suelos, especialmente en zonas de drenaje deficiente (la presencia de calcio y magnesio atenúa este efecto). La concentración de sodio en aguas naturales es muy variable, pudiendo alcanzar hasta 120.000 mg/L en zonas evaporíticas, aunque raramente sobrepasa 100 o 150 mg/L en aguas dulces normales.

### ➤ **Potasio (K<sup>+</sup>)**

Procede de la meteorización de feldespatos y silicatos como micas y arcillas, ocasionalmente procede de la solubilización de depósitos de evaporitas; en pequeña cantidad del aporte del agua lluvia y en ocasiones, de la contaminación industrial, minera y agrícola. Es muy soluble y difícil de precipitar. El potasio tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico, por ello su concentración y contenidos en las rocas y en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del sodio.

En aguas subterráneas el contenido de potasio no suele sobrepasar 10 mg/L, aunque en casos excepcionales se pueden alcanzar concentraciones de 100.000 mg/L como es el caso de las salmueras. No presenta problemas en las concentraciones habituales y es un elemento vital para las plantas.

### ➤ **Calcio (Ca<sup>+2</sup>)**

El calcio suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. Aparece como constituyente esencial de los silicatos, especialmente en el grupo de las plagioclasas, también aparece en forma de carbonatos como calcita, aragonito, y dolomita o en forma de sulfatos como yeso y anhidrita. Puede provenir de la disolución de cemento calcáreo y de la concentración del agua lluvia. La presencia de calcio se potencia notablemente en terrenos arcillosos de baja permeabilidad.



La concentración de calcio varía ampliamente en las aguas subterráneas. Concentraciones entre 10 y 250 mg/L son frecuentes en aguas dulces, mientras que en aguas de terrenos con yeso pueden llegar a 600 mg/L y en salmueras de cloruro de calcio hasta 50.000 mg/L. El mayor inconveniente va asociado al aporte de dureza y formación de incrustaciones.

➤ **Magnesio ( $Mg^{+2}$ )**

Este ion es menos abundante pero más soluble y difícil de precipitar que el calcio. En las aguas naturales procede de la disolución de rocas carbonatadas como dolomías y calizas magnesianas, de la disolución de evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como de la intrusión de agua marina y de la contaminación industrial y minera.

Los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de magnesio en aguas subterráneas, donde es retenido con preferencia al calcio en suelos y rocas. En aguas dulces naturales el contenido de magnesio no suele sobrepasar los 40 mg/L. En terrenos calcáreos puede sobrepasar los 100 mg/L y en terrenos evaporíticos puede alcanzar valores de 1000 mg/L. Este ión da propiedades laxantes al agua, contribuye a su dureza, y a pH elevados puede generar problemas de incrustación.

➤ **Cloruro ( $Cl^-$ )**

Procede de aguas congénitas, fósiles, por lavado de terrenos marinos o por meteorización de rocas. El agua lluvia también puede ser una fuente importante de cloruro en zonas próximas a la costa, aunque su concentración disminuye rápidamente tierra adentro. Un aporte importante del ion cloruro procede de rocas evaporíticas. Los vertimientos urbanos e industriales pueden aportar cantidades importantes.

Este ion no forma sales de baja solubilidad, no se oxida ni se reduce en aguas naturales, no es adsorbido significativamente, ni entra a formar parte de procesos bioquímicos, lo que le da un carácter de trazador casi ideal. La concentración de cloruro en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de 10 mg/L a más de 2.000 ó 3.000 mg/L. En salmueras naturales, próximas a la saturación de Cloruro de Sodio puede llegar a casi 200.000 mg/L. Concentraciones de cloruro de más de 300 mg/L dan sabor salado al agua, pero no es perjudicial hasta algunos miles de mg/L. Contenidos muy elevados en concentración son perjudiciales para muchas plantas y da un carácter corrosivo al agua.

### ➤ **Bicarbonato y Carbonato ( $\text{HCO}_3^-$ y $\text{CO}_3^{2-}$ )**

Proceden de la disolución de ácido carbónico ( $\text{CO}_2$ ) atmosférico o del suelo en la zona edáfica, por la respiración, descomposición de la materia orgánica y por disolución de calizas y dolomías.

El ion bicarbonato es la especie carbonatada dominante en aguas subterráneas con pH inferior a 8.3, donde suele adquirir valores entre 50 y 400 mg/L, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/L. Concentraciones de hasta 100 mg/L pueden encontrarse en aguas pobres en calcio y magnesio o en las que se produce fenómenos de liberación de  $\text{CO}_2$  en el acuífero, como reducción de sulfatos.

El ion carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) está en concentraciones mucho menores que el bicarbonato, y si el pH es menor que 8.3 se le considera cero. En aguas alcalinas con pH mayor que 8.3, puede haber cantidades apreciables de hasta 50 mg/l. No presenta problemas de toxicidad. El equilibrio entre carbonato, bicarbonato, ácido carbónico y pH es determinante de la corrosividad e incrustabilidad.

### ➤ **Sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ )**

Procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias, y de la descomposición de sustancias orgánicas. Sin embargo, la disolución de yeso, anhidrita y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno, representan el aporte más significativo de este ion a las aguas subterráneas.

El comportamiento del ion sulfato puede desviarse significativamente del teórico predecible debido a que está sujeto a procesos de reducción, especialmente en presencia de bacterias y materia orgánica, procesos de disolución y tendencia a formar iones complejos con sodio y calcio. En aguas dulces la concentración normal de sulfato puede variar entre 2 y 150 mg/L, en aguas salinas puede llegar a 5.000 mg/L asociado al calcio; en salmueras, asociado con sodio y calcio puede alcanzar hasta 200.000 mg/L. En aguas sulfurosas da un típico olor a huevos podridos. El ion sulfato en altas concentraciones puede producir un efecto laxante.

### ➤ **Nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) Nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) y Amonio ( $\text{NH}_4^+$ )**

Los compuestos nitrogenados presentes en las aguas naturales están íntimamente relacionados con el ciclo del nitrógeno. La mayor parte del nitrógeno aparece en forma gaseosa en la atmósfera (78% en volumen). En forma oxidada constituye una importante fracción en los suelos y sustancias orgánicas (tejidos de animales o vegetales que lo extraen de la atmósfera para su metabolismo). En las rocas, sin embargo, sólo se presenta como elemento minoritario.



Los procesos de oxidación-reducción de las especies nitrogenadas en el agua están influenciados por fenómenos biológicos y, en consecuencia, los productos finales dependerán del número y tipo de organismos que intervengan en ellos.

El amonio aparece sólo como trazas en aguas subterráneas naturales, aumentando su concentración cuando el medio es fuertemente reductor, concentraciones significativas de amonio pueden indicar contaminación reciente probable. La presencia del ion nitrito se considera como indicio de contaminación reciente dada su inestabilidad, sin embargo primero se debe determinar si el acuífero presenta un ambiente oxidante. Los nitratos pueden estar presentes en las aguas subterráneas ya sea como resultado de la disolución de rocas que los contengan (lo que ocurre raramente) o por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas raramente excede de 10 mg/L.

Concentraciones altas de los compuestos nitrogenados en el agua puede producir cianosis en los niños, comunicar corrosividad al agua y producir interferencias en fermentaciones.

#### ➤ Iones asociados al hierro (Fe)

El hierro es un elemento esencial para el metabolismo de animales y plantas. En aguas subterráneas suele encontrarse en forma de  $Fe^{+2}$ , aunque puede presentarse como  $Fe^{+3}$ ,  $FeOH^{+2}$ ,  $FeOH^{+}$  en función del pH, contenido de oxígeno y dependiendo a menudo del contenido del agua en otros elementos (carbonatos, bicarbonatos, sulfatos, etc).

La concentración de este elemento en el agua, está controlada por procesos de equilibrio químico como oxidación-reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros, formación de complejos con materia orgánica y también por la actividad metabólica de animales y plantas.

En general, la concentración de hierro se da en valores inferiores a 0.1 mg/L, aunque en algunas aguas subterráneas se dan concentraciones de 1 y 10 mg/L y en presencia de pH de 6 a 8 puede presentar concentraciones de hasta 50 mg/L. Produce manchas, es poco deseable en aguas industriales y puede producir incrustaciones duras.

#### 4.3.2. Clasificación del agua subterránea por iones dominantes

La clasificación por iones dominantes utiliza herramientas gráficas para su representación. El agua se nombra por el anión o catión que sobrepasa el 50% de concentración y si ninguno sobrepasa el 50%, se nombran los dos más



abundantes. También se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta, de ser necesario.

El manejo y estudio de análisis químicos puede simplificarse con el empleo de gráficos y diagramas. Entre los más utilizados se encuentran los diagramas de Stiff, Piper y Schöeller- Berkaloff.

#### 4.3.2.1. Diagrama de Stiff

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama y los aniones al derecho. Todos los ejes horizontales están a la misma escala y dependen de la concentración de iones en la muestra; las concentraciones están dadas en meq/l.

Este diagrama permite visualizar claramente diferentes tipos de agua y da una idea del grado de mineralización de la muestra. También puede representarse en un mapa, con lo que se visualiza rápidamente la variación espacial de la mineralización del agua en el acuífero.

#### 4.3.2.2. Diagrama de Piper

Este diagrama permite representar en una sola grafica el análisis de varias muestras de agua sin dar origen a confusiones. Está formado por dos triángulos equiláteros, donde se representan los cationes y aniones mayoritarios. Los vértices del triángulo de cationes son  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$  y los vértices del triángulo de aniones son  $\text{SO}_4^{-2}$ ,  $\text{Cl}^{-}$  y  $\text{HCO}_3^{-}$ . Las concentraciones de los iones dadas en meq/l se expresan como porcentaje con respecto a la suma de aniones y cationes totales de la muestra respectivamente. Los datos de los diagramas triangulares se proyectan en un rombo central en el que se representa la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes.

Este diagrama sirve para 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 y 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.

#### 4.3.2.3. Diagrama de Schöeller- Berkaloff

Este diagrama se dispone en varias semirrectas o columnas verticales paralelas, igualmente espaciadas y divididas en escala logarítmica. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión y el orden de las columnas es Ca, Mg, Na, Cl,  $\text{SO}_4$ ,  $\text{HCO}_3$  y  $\text{NO}_3$ , este último cuando sea necesario. Su unidad de medida es en meq/L.



El diagrama de Schöeller- Berkaloff es útil cuando se necesita representar tanto aguas diluidas como concentradas en un mismo diagrama. También permite establecer, en una misma línea de flujo, la evolución del agua en el acuífero, así como determinar los procesos modificatorios, como intercambio iónico, procesos de óxido reducción y mezcla de diferentes tipos de agua.

#### 4.4. HIDROGEOLOGÍA

La hidrogeología es la ciencia que estudia el origen y la formación de las aguas subterráneas, las formas de yacimiento, su difusión, movimiento, régimen y reservas, su interacción con los suelos y rocas, su estado (líquido, sólido y gaseoso) y propiedades (físicas, químicas, bacteriológicas y radiactivas); así como las condiciones que determinan las medidas de su aprovechamiento, regulación y evacuación<sup>1</sup>.

##### 4.4.1. El agua subterránea

Se considera agua subterránea al agua que se encuentra por debajo de la superficie, confinada a una presión igual o mayor que la atmosférica y que satura el medio rocoso a través del cual se mueve y se almacena. El agua subterránea puede presentarse en fallas, diaclasas, espacios vacíos entre cristales o granos, contactos litológicos o discontinuidades y en cavidades originadas por meteorización o disolución de las rocas.

El movimiento y almacenamiento del agua subterránea, dependen del espesor, textura y estructura de las rocas presentes en determinado lugar, así como de la capacidad física del agua para moverse a través de un medio permeable. Así mismo, el desequilibrio originado por la interacción de las diferentes fuerzas, como las presiones diferenciales y la gravedad, hacen que el agua se mantenga en movimiento constante, creando depósitos que abastezcan a pozos y manantiales, conservando el flujo de algunos arroyos durante los periodos de sequía (SERVICIO GEOLÓGICO MEXICANO).

##### 4.4.2. Clasificación de formaciones geológicas según su comportamiento hidrogeológico

Una unidad hidrogeológica, dependiendo de la escala de trabajo, es una formación o un conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico se basa en la capacidad de almacenar y proporcionar agua en

<sup>1</sup> Mijailov, L. 1985. *Hidrogeología*. Edit. MIR, Moscú.



cantidades importantes. De acuerdo a este comportamiento las formaciones se pueden clasificar en acuíferos, acuitardos, acuicludos y acuífugos.

- **Acuífero:** Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable y que permite que circule a través de ella con facilidad. Un ejemplo son los sedimentos no consolidados o rocas constituidas por arenas o gravas. También se pueden presentar acuíferos en rocas compactas con un grado de fracturamiento importante.
- **Acuitardo:** Formación Geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que el agua circula a través de ella con dificultad. Este comportamiento es característico de arenas arcillosas, areniscas consolidadas y rocas compactas con moderada alteración o fracturación.
- **Acuicludo:** Formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable pero que no permite que el agua circule a través de ella. Por ejemplo, las arcillas plásticas contienen agua en gran cantidad pero el agua está atrapada y no puede circular a través del subsuelo.
- **Acuífugo:** Formación geológica que no contiene agua porque no permite que circule a través de ella.

#### 4.4.2.1. Tipos de Acuíferos

De acuerdo a la posición de las capas acuíferas con respecto a la superficie de la tierra y la presión hidrostática ejercida en ellas, estas se pueden clasificar como acuíferos libres, confinados y semiconfinados.

- **Acuíferos libres:** Son aquellos acuíferos donde el límite superior (la superficie freática) está a presión atmosférica, y a medida que se extraiga agua de él, descenderá la superficie freática, la cual no es fija sino que varía en función de las épocas secas o lluviosas. Entre la superficie del terreno y el nivel freático del acuífero se encuentra la zona no saturada.
- **Acuíferos confinados:** Son acuíferos donde el agua contenida está sometida a una presión superior a la atmosférica y ocupa totalmente los poros o huecos de la formación geológica, saturándola totalmente. Generalmente, si se perforan pozos en un acuífero confinado donde la presión del agua es alta, se pueden obtener pozos surgentes.
- **Acuíferos semiconfinados:** Son acuíferos a presión en el que alguna de las capas confinantes son semipermeables (acuitardos) de modo que se producirá un flujo de agua ascendente o descendente a través del acuitardo hacia el acuífero semiconfinado, recargándolo por filtración.



#### **4.4.3. Propiedades hidráulicas de acuíferos**

Las propiedades hidráulicas de las formaciones y los depósitos no consolidados determinan de manera importante la cantidad de agua que pueden proporcionar y almacenar. Estas propiedades dependen de diversos factores geológicos, como la granulometría, composición mineralógica, compactación, cementación, fracturamiento, erosión, disolución, entre otros.

Las definiciones de las principales características hidráulicas de acuíferos fueron tomadas del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, escrito por la Comisión Nacional del Agua de México (Edición 2007. ISBN: 978-968-817-880-5).

##### **4.4.3.1. Porosidad**

La porosidad se define como el volumen de vacíos o poros que existen en un material por unidad de volumen. Específicamente se establece como la relación que existe entre el volumen que ocupan dichos espacios vacíos y el volumen total que ocupa el material expresada en porcentaje.

En rocas y materiales consolidados se distinguen dos tipos de porosidad, una primaria, generada cuando la roca se formó y una secundaria, desarrollada después de su formación, como resultado de eventos tectónicos. Las fracturas en las rocas que se orientan en diferentes direcciones, seccionan al macizo rocoso en bloques.

En los materiales clásticos, entre los factores que controlan la porosidad se destacan la distribución granulométrica, el grado de compactación, la redondez de los granos y el empaquetamiento. En términos generales se establece que, entre menor es el tamaño del grano, mayor es la porosidad. Así mismo, se establece que los materiales mal clasificados son menos porosos que los bien clasificados. Por otra parte, la porosidad de los materiales clásticos decrece al aumentar la profundidad a que se encuentran, debido, principalmente, a la compactación provocada por el peso del material suprayacente.

Las rocas y materiales no consolidados, tienen porosidad primaria, generada al momento de su formación, y secundaria, producida como resultado de procesos geológicos y tectónicos que afectan a dichos materiales después de su formación.

##### **4.4.3.2. Permeabilidad**

La permeabilidad mide la capacidad de la roca para permitir el paso de un fluido. La permeabilidad depende principalmente de factores como tamaño, forma y orientación de los granos, distribución granulométrica, tamaño y forma de los poros, grado de compactación y cementación, densidad y abertura del fracturamiento y el grado de meteorización química de la roca.

En general se establece que cuanto menor es el tamaño de las partículas, menor es su permeabilidad, debido a que su área de contacto con el agua es elevada y su resistencia al flujo es alta; por ello es que materiales de grano fino como arcillas, son poco permeables. Generalmente, una permeabilidad elevada indica la existencia de una porosidad alta, excepto en las arcillas.

Tabla 7. Características de las unidades hidrogeológicas según la permeabilidad.

Permeabilidad (m/día)	$10^4$	$10^3$	$10^2$	$10^1$	$10^0$	$10^{-1}$	$10^{-2}$	$10^{-3}$	$10^{-4}$	$10^{-5}$	$10^{-6}$
Tipo de terreno	Grava Limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena					Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas.		Arcillas no meteorizadas	
Calificación			Buenos Acuíferos					Acuíferos Pobres		Impermeables	
Capacidad de drenaje			Drenan bien					Drenan mal		No drenan	

Fuente: Custodio y Llamas, 1996. Hidrología Subterránea. Tomo I.

#### 4.4.3.3. Conductividad Hidráulica

Se conoce como conductividad hidráulica (K) a la cantidad de agua, que bajo condiciones físicas específicas, circula a través de una sección de área unitaria normal al sentido de flujo, bajo un gradiente hidráulico unitario. Esta propiedad depende de las características del fluido, la permeabilidad del medio poroso a través del cual circula y de la fuerza de gravedad (g).

En la tabla 8 se muestran valores aproximados del orden de magnitud de la conductividad hidráulica para algunos materiales y rocas.

Tabla 8. Valores de Conductividad Hidráulica (K) para diferentes materiales.

Material	K (m/día)
Arcilla	$10^{-3} - 10^{-8}$
Arcilla débilmente arenosa	$10^{-1} - 10^{-2}$
Arcilla arenosa	$10^{-1} - 1$
Arena arcillosa	0.5 – 1.0
Arena de grano fino	1 – 5
Arena de grano medio	5 – 15
Arena de grano grueso	15 – 50
Arena con grava	5 – 100
Grava	100 – 200
Arcilla, arena y grava mezcladas	$10^{-3} - 10^{-4}$

...Continuación Tabla 8.

Rocas	K (m/día)
Arenisca	$10^{-3} - 1$
Roca carbonatada con porosidad secundaria	$10^{-2} - 1$
Lutita	$10^{-7}$
Rocas sólidas	$<10^{-5}$
Rocas fracturadas	$3 \times 10^2$
Rocas volcánicas	$10^3$

Fuente: Comisión Nacional del Agua de México. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento, 2007.

#### 4.4.3.4. Transmisividad

La transmisividad se define como la cantidad de agua que circula a través de una sección vertical de un metro de anchura y de altura igual al espesor saturado del acuífero, afectado por un gradiente hidráulico cuyo valor es igual a uno. Tiene dimensiones de longitud al cuadrado sobre tiempo y se expresa en  $m^2/día$  o  $m^2/s$ .

La transmisividad viene dada por la siguiente expresión:

$$T = Kb \quad \text{Ec. (12)}$$

Dónde:

T = Transmisividad del acuífero ( $m^2/día$ )

K = Conductividad hidráulica promedio el acuífero (permeabilidad  $m/día$ )

b = Espesor saturado del acuífero (m)

Tabla 9. Clasificación de terrenos por su transmisividad.

T $m^2/día$	1	10	$10^2$	$10^3$	
Clasificación	Impermeable	Poco Permeable	Algo Permeable	Permeable	Muy Permeable
Calificación de 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, dolomitas, calizas muy fracturadas.

Fuente: Adaptado de Custodio y Llamas, 1983.

El valor de la transmisividad es uno de los resultados de las pruebas de bombeo, del cual puede estimarse una conductividad hidráulica media del acuífero. Sin



embargo, el concepto de transmisividad aporta información limitada sobre valores "promedio" de conductividad hidráulica y porosidad (en el caso de acuíferos confinados) y no describe satisfactoriamente la velocidad real de movimiento del agua subterránea.

#### 4.4.3.5. Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento determina la capacidad que tiene un acuífero, para almacenar o ceder agua. Este coeficiente (S) se define como la cantidad de agua que libera (o toma) una columna del acuífero, de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende (o asciende) una unidad. Este factor depende de las características físicas del agua, condiciones petrofísicas e hidráulicas del acuífero y las presiones a las que se encuentra sometida el agua (presión intersticial o de poro) y las partículas granulares (presión intergranular o efectiva), que en general se consideran constantes, por tanto depende principalmente de la porosidad efectiva. El coeficiente de almacenamiento (S) es adimensional.

Tabla 10. Valores típicos de coeficiente de almacenamiento en acuíferos.

Tipo de Acuífero	Coeficiente de Almacenamiento (S)	Característica
Acuífero Libre	$3 \times 10^{-1}$ a $10^{-2}$	El agua proviene del vaciado de los poros
Acuífero semiconfinado	$10^{-3}$ a $10^{-4}$	El agua proviene de descompresión y de los rezumes desde las capas confinantes
Acuífero confinado	$10^{-4}$ a $10^{-5}$	El agua proviene de descompresión

Fuente: Adaptado de Sánchez San Román, Javier. 2014.<sup>2</sup>

#### 4.4.4. Pruebas de bombeo

La prueba de bombeo tiene como objetivo determinar las principales características hidráulicas del acuífero. Debido a que esta prueba estudia al acuífero y al pozo en sí, más no a la bomba, también es llamada prueba de acuífero.

Cuando se planifican y llevan a cabo correctamente, estas pruebas pueden proporcionar información básica sobre el flujo del agua subterránea en un lugar determinado.

Como paso previo a la realización de una prueba de bombeo, se debe contar con información sobre la geología e hidrología superficial del área, con el fin de

<sup>2</sup> Sánchez San Román, Javier. Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España, Septiembre de 2014. Consultado en línea en: [http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos\\_Hidrogeol.Pdf](http://hidrologia.usal.es/temas/Conceptos_Hidrogeol.Pdf).



conocer las características del acuífero como su litología, espesor y límites horizontales, así como las características geológicas y comportamiento de las rocas que lo limitan.

Al planear la organización general de las pruebas de bombeo, el primer punto a definir es el sitio donde se hará ésta. En la mayoría de los casos el sitio ya está predeterminado y no hay posibilidades de cambiar a otro más adecuado, ya que casi siempre se tiene que utilizar pozos ya existentes. La prueba comenzará hasta que el nivel del agua en el mismo pozo se encuentre en reposo total. Es fundamental conocer el diseño constructivo y corte litológico de los pozos.

La prueba consiste en bombear un pozo que esté perforado en el acuífero que se desea estudiar, durante un cierto tiempo, a un determinado caudal y medir la evolución del nivel piezométrico debido al bombeo, en el pozo de bombeo y en piezómetros o pozos de observación, de ser posible.

Como el abatimiento y la recuperación de los niveles son mayores durante las primeras dos horas, las lecturas se deben realizar a intervalos cortos, estas se van aumentando conforme se prolonga el bombeo. Si alguna medición no se pudo tomar en el tiempo indicado, se debe realizar la medición lo más inmediato posible e indicar el tiempo al que corresponde. Si se produce una suspensión involuntaria y se considera que pueden ser útiles los datos de abatimiento registrados hasta antes de la interrupción, se procede a medir la recuperación. De lo contrario, se debe esperar a que el nivel se recupere para iniciar el bombeo nuevamente.

A partir del comportamiento de los abatimientos de los niveles, la distancia entre los pozos de observación y el pozo bombeado y el caudal de bombeo, se puede obtener información sobre las características del acuífero, como su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y existencia de barreras impermeables cercanas. También se puede definir o confirmar el tipo de respuesta hidráulica del acuífero (libre, semiconfinado o confinado).

De acuerdo al tipo de respuesta hidráulica obtenida en la prueba, la cual se establece a partir de la gráfica Abatimiento vs Tiempo, se procede a analizar los resultados por los métodos establecidos para cada tipo de acuífero.

El método más utilizado para el análisis de pruebas de bombeo en acuíferos confinados es el de ajuste de curvas desarrollado por Theis en 1935.

#### **4.4.4.1. Método de Theis**

Theis (1935) desarrolló una fórmula para régimen de flujo transitorio, en la cual, se introduce el factor tiempo y el coeficiente de almacenamiento.

En el trabajo de Theis se considera que el caudal de descarga de un pozo en un acuífero confinado es directamente proporcional a los abatimientos multiplicados por el coeficiente de almacenamiento y esto sumado sobre el área de influencia. Debido a que el agua bombeada de un acuífero confinado proviene de la reducción de su almacenamiento, el nivel piezométrico descenderá continuamente, siempre y cuando el acuífero sea de extensión infinita. Por lo tanto, no existen condiciones de flujo permanente. Sin embargo, los abatimientos son menores a mayores distancias del pozo de bombeo y eventualmente llegan a ser tan pequeños, que para fines prácticos se consideran despreciables como para suponer flujo estable.

El método de ajuste de curvas de Theis (1935), se basa en las hipótesis de que el acuífero es homogéneo, isótropo y de espesor uniforme en el área de influencia de la prueba y que es de extensión infinita. También se asume que antes del bombeo, la superficie piezométrica es casi horizontal en el área que será influenciada por el bombeo, que el caudal que extrae el pozo por bombeo del acuífero, es constante, que el pozo penetra totalmente el acuífero, que el agua removida del almacenamiento es descargada instantáneamente al decrecer la carga hidráulica (nivel piezométrico) en el acuífero y que las pérdidas de carga en el pozo-acuífero son despreciables.

### Procedimiento

- Representar los datos de descensos - tiempos obtenidos de la prueba en un papel doble logarítmico: tiempos (en minutos) en el eje horizontal, descensos, (en metros) en el eje vertical.
- Sobreponer la curva de valores de la prueba a la curva tipo, manteniendo paralelos los ejes de ambas gráficas. Situar la posición en la cual exista la mejor sobreposición de las curvas.
- Conseguida la superposición, se marca un punto de ajuste, seleccionando un punto cualquiera del gráfico patrón. Para mayor sencillez es habitual tomar un punto de coordenadas simples (por ejemplo 10,1 o 100,1).
- Se anota en el gráfico patrón coordenadas del punto de ajuste  $W(u)$  y  $1/u$  y en la gráfica de campo se anotan los valores de tiempo y descenso para el mismo punto, obteniendo así un punto de dobles coordenadas.

### Cálculo de la Transmisividad

Se utiliza la ordenada del punto de ajuste en ambos gráficos, es decir: en el gráfico patrón,  $W(u,r/B)$  y la ordenada en el gráfico de campo: *descenso*. Se sustituye esta pareja de valores en la ecuación de Theis:



$$s = \frac{Q}{4\pi T} * W(u) \quad \text{Ec. (13)}$$

Dónde:

s= Descenso medido en la gráfica de campo

Q= Caudal de bombeo

T= Transmisividad.

W(u)= Se mide en el gráfico patrón

### **Cálculo del Coeficiente de Almacenamiento**

Se utiliza la abscisa del punto de ajuste en ambos gráficos: 1/u y tiempo. Se sustituye esta pareja de valores en la expresión general de la variable u:

$$u = \frac{r^2 * S}{4Tt} \quad \text{Ec. (14)}$$

Dónde:

t= Tiempo medido en la gráfica de campo

r= Distancia entre el pozo de bombeo y el pozo de observación

Q= Caudal de bombeo

T= Transmisividad

S= Coeficiente de almacenamiento

u= Se mide en el gráfico patrón.



## 5. GEOLOGÍA

### 5.1. GEOLOGÍA REGIONAL E HISTÓRICA

#### 5.1.1. Geología regional

La Formación de la Cordillera Oriental de Colombia se da como producto de la interacción de complejos procesos sedimentarios y tectónicos. En el modelo evolutivo de la Cordillera se reconoce la existencia de una fase de inversión tectónica, donde las fallas de tipo normal que afectaban secuencias sedimentarias Mesozoicas, se convirtieron en fallas inversas por efecto de eventos compresivos ocurridos en el Mioceno - Plioceno durante el levantamiento de la cordillera (Fabre, 1983). Además se cree que las fallas que aparecen como transversales, pueden estar asociadas a fallas longitudinales y actuar como rampas laterales de los cabalgamientos (Velandia & Bermudes, 2002).

La parte central de la cordillera se caracteriza por presentar una zona montañosa conformada por unidades sedimentarias del Cretácico y Paleógeno – Neógeno cubiertas por depósitos Cuaternarios de diverso origen dispuestas en amplios sinclinales y estrechos anticlinales con ejes de dirección predominante NE y una zona una zona plana, la Sabana de Bogotá, bordeada por la zona montañosa, Las estructuras presentes en la sabana de Bogotá son resultado de una combinación de mecanismos de tectónica de zócalo, diapirismo, erosión y fenómenos gravitatorios (Julivert, 1963) y se reconocen dos sistemas de fallas: longitudinales con dirección NE y transversales con dirección NW.

El sistema de fallas longitudinales se interpreta como fallas de tipo inverso, generalmente de cabalgamiento, con diferentes ángulos de inclinación y dirección de transporte tectónico SE y NW, asociadas al frente principal de cabalgamiento de la Cordillera Oriental o a fallas de retrocabalgamientos, respectivamente (Velandia & Bermudes, 2002), donde la zona de despegue de estas fallas estaría en las rocas del Cretácico inferior (Camargo, 1995). Las fallas transversales presentan un movimiento de rumbo conformando bloques tectónicos transversales, que a su vez pueden ser subdivididos por fallas longitudinales.

Las fallas de la región central de la Cordillera Oriental presentan actividad tectónica baja a moderada y los rasgos neotectónicos casi imperceptibles sugieren una actividad sísmica inferior a otras regiones de Colombia.



### 5.1.2. Geología Histórica

Los eventos cretácicos en la cordillera oriental inician con una transgresión marina que comenzaría en el límite Jurásico - Cretácico y continuaría durante todo el Cretácico hasta ocupar casi todo el territorio nacional. (Bürgl 1961). La depositación de la cuenca se da en una etapa de sinrift.

En el Hauteriviano tardío una somerización relativa, permite el depósito de la parte superior del Grupo Cáqueza. (Etayo-Serna 1968). Durante el Valanginiano – Barremiano, a causa de fluctuaciones eustáticas, condiciones climáticas con crisis de salinidad y cambios tectónicos, se generaron regresiones forzadas que conllevaron a la desecación de la cuenca y permitieron la depositación de capas de evaporitas. (Briceño, Buitrago & López.1990; Rincón & Hernández.1986).

En el Barremiano tardío, en un ambiente de plataforma media a externa, generado por una etapa de subsidencia se depositan sedimentos cada vez más arcillosos representados en la Formación Fόμεque; en el Albiano - Cenomaniano, a causa del descenso del nivel del mar, llegando a ambientes intermareales y barras litorales se deposita la Formación Une hacia el oriente de Bogotá. (Sarmiento, 2002). A partir de este punto, durante el Cenomaniano Tardío a Turoniano, se inicia un evento de profundización de la subcuenca alcanzando su máximo nivel en el Coniaciano - Santoniano, que se ve marcado por la litología arcillosa de la Formación Chipaque. (Cooper, et al., 1995).

La tendencia regresiva inicia a principios del Campaniano donde se deposita el Grupo Guadalupe (Campaniano a Maastrichtiano), al aumentar el aporte de sedimentos del Cratón de la Guyana de oriente; este retroceso se realiza en intervalos, existiendo un aumento relativo del nivel del mar que correspondería a la depositación de la Formación Plaeners.

En el periodo Maastrichtiano tardío se depositó la parte inferior de la Formación Guaduas y en el Paleoceno temprano, terminada la sedimentación marina y con dominio de un sistema deposicional de ríos meandriformes y trenzados, se depositó la parte alta de la Formación Guaduas y las Formaciones Cacho, Bogotá y Regadera. La finalización de la sedimentación marina fue ocasionada por la primera fase de deformación de la cordillera (Cooper, *et.al.*, 1995) a causa de la acreción de la cordillera occidental.

Otra fase de deformación importante es la producida en el Eoceno medio conocida como orogenia pre-andina (Duque-Caro, 1980; Villamil & Restrepo, 1997), que marcó el cese de la sedimentación paleógena. La máxima deformación ocurrió en el Mioceno (Villamil, 1999) aproximadamente hace 10,5 millones de años (Cooper, *et al.*, 1995), produciendo un rápido levantamiento de la cordillera a partir de antiguas fallas normales (Jurásico - Cretácico inferior) reactivadas como cabalgamientos, que favorecieron una alta erosión y sedimentación molásica hacia





los flancos de la cordillera; éste evento es el responsable de la generación de la mayor parte de estructuras de la cordillera Oriental (Acosta, 2002). En este periodo de deformación también se crearon los domos diapíricos en la Formación Chipaque, presentes en la sabana de Bogotá.

Después del evento de máxima deformación, en el Plioceno, se generaron cuencas intracordillera. En este mismo periodo se depositó la Formación Tilatá y se inició el levantamiento de la Sabana de Bogotá entre 1000 y 2000m (Hooghiemstra, 1984; en Copper, et al., 1995).

## **5.2. GEOLOGÍA LOCAL**

La zona de estudio se encuentra ubicada en la parte central de la Cordillera Oriental, en la sabana de Bogotá, donde afloran rocas sedimentarias de edad Cretácica y Cuaternaria, las cuales están afectadas por fallas y pliegues con inclinación al este producto de la tectónica compresiva que produjo la orogenia de la cordillera oriental y otras fallas longitudinales y transversales producto del diapirismo de sal localizado en el anticlinal de Nemocón.

### **5.2.1. Estratigrafía**

#### **5.2.1.1. Formación Chipaque (K<sub>2</sub>cp)**

El nombre de Chipaque fue utilizado por Hubach E. (1.931) y redefinido por Renzoni (1.962), para designar la parte alta del Grupo Villeta que aflora al Oriente de la Sabana de Bogotá. Esta formación es una sucesión monótona de lutitas físbiles, grises predominantes, y areniscas arcillosas, esquistos piritosos con intercalaciones de areniscas y gran abundancia de fauna.

En la memoria explicativa de la plancha 209 se describen cuatro segmentos levantados en el sector Manta-Machetá con un espesor de 1027m.

El segmento A de 80 m de arcillolitas grises oscuras, presenta gran cantidad de micas, restos de troncos, carbón y algunas concreciones ferruginosas. El segmento B es un horizonte silíceo de 15 m que presenta intercalaciones de liditas de color gris oscuro donde es común encontrar amonitas y arcillolitas carbonosas y limolitas silíceas con amonitas. El segmento C con un espesor de 540 m, está constituido predominantemente por material arcilloso y se encuentra cubierto en un 80%. El segmento D con un espesor de 392 m es el segmento más arenoso, y en este se presentan intercalaciones de limolitas con bioturbación, areniscas e intervalos de arcillolitas.



### Litología:

En el municipio de Nemocón, la formación Chipaque se sitúa en el núcleo del anticlinal de Nemocón y contiene el domo salino. Esta formación presenta pocos afloramientos ya que la mayor parte se encuentra cubierta.

Al sureste de la zona de estudio, en la vía Nemocón – Astorga (E:1023710 N:1051076), se observa un afloramiento perteneciente al del segmento D de la formación Chipaque y al segmento F de la Formación Conejo. En este lugar se levantó una columna estratigráfica de 50.41m (Anexo B) en una secuencia invertida asociada al anticlinal Nemocón Norte, distribuida así:

- ✓ 5.26m de intercalaciones de capas de 6cm hasta 1m de arenisca cuarzosa de color gris violáceo, con contenido de micas del 3%, tamaño de grano muy fino a fino, subangular, subelongado, buena selección, cemento silíceo, baja porosidad, moderadamente fracturada; con presencia de diaclasas rellenas con patinas de óxido de hierro y algunas concreciones del mismo. Algunas capas presentan bioturbación hacia el techo.
- ✓ 10.85m de lutitas negras fisibles, moderadamente meteorizadas, diaclasadas, con relleno de óxido de hierro; contenido de micas y porosidad secundaria media. En la parte media se reconoce una capa de 85cm de lutitas negras a grises laminadas, con presencia de gasterópodos (amonitas) y restos de plantas (Figura 12a) y al techo una capa de 10cm de arenisca ferruginosa con un contenido de micas del 7%.
- ✓ 1.40m de intercalación de láminas de lutitas negras compactas de estratificación plano paralela discontinua y láminas de arenisca con micas (3%), color gris claro, grano fino y buena selección, moderadamente duras con porosidad media y algunas inclusiones de óxido de hierro. En la parte media se encontraron equinodermos en una capa de 2cm de lutitas (Figura 12b).
- ✓ 4.85m de lutitas negras fisibles, altamente meteorizadas y diaclasadas con relleno de óxidos de hierro, estratificación plano paralela continua, porosidad secundaria.
- ✓ 22.31m de intercalación de láminas y capas muy gruesas de arenisca de grano muy fino con contenido de micas (3%), de color blanco grisáceo a violáceo, moderada selección, con porosidad primaria y estratificación plano paralela continua y lentes de arena de grano fino con inclusiones de hierro, presenta bioturbación hacia el techo y lutitas laminadas fisibles de color negro, en capas de hasta 1,20m, y patinas de óxido de hierro.

- ✓ 5.29m de lutitas negras fisibles muy meteorizadas, diaclasadas de color rojizo y hacia el techo 45cm de arenisca moderadamente meteorizada, de color blanco grisáceo a violáceo con patinas de óxido de hierro, diaclasada, selección moderada, tamaño de grano fino a medio.

Otros pequeños afloramientos de la Formación Chipaque en el sector la Cucariana (E: 1023456 N: 1051109) presentan intercalaciones de capas gruesas y medias de areniscas con lutitas fisibles. Estos afloramientos se ven afectados por fallas normales de poco salto y replegamiento de estratos.

En la zona de estudio, el contacto superior con la Formación Arenisca Dura es concordante con la estratificación de las rocas.

La edad de la Formación Chipaque es Cenomaniano Superior – Santoniano y se correlaciona con las Formaciones Simijaca, La Frontera y Conejo, que afloran en la parte occidental de la sabana de Bogotá; el segmento A de la Formación Chipaque corresponde a toda la Formación Simijaca, el segmento B con la Formación La Frontera y los segmentos C y D con toda la Formación Conejo.

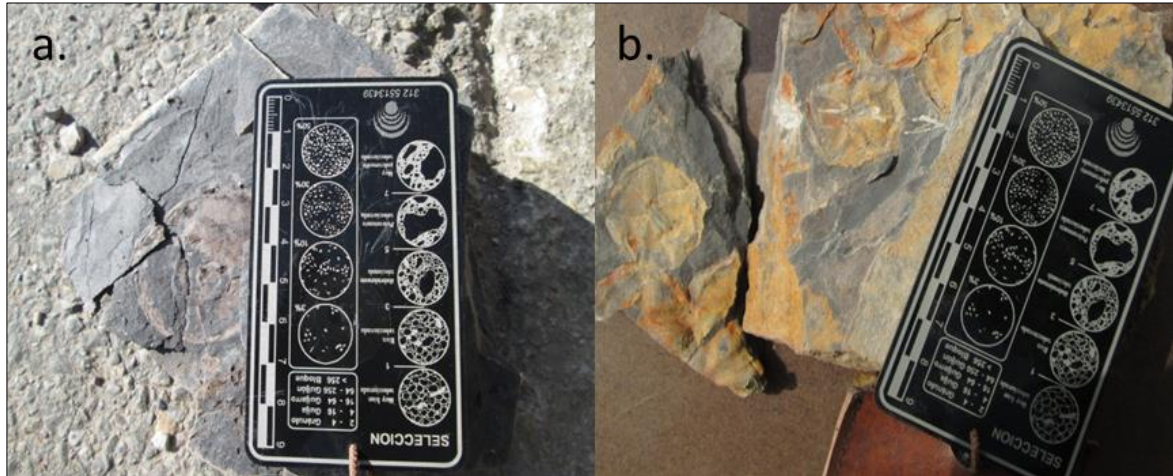
Figura 11. Panorámica del segmento D de la Formación Chipaque.



Fuente: Visita de campo.



Figura 12. Presencia de Fósiles en lutitas del segmento D de la Formación Chipaque. a. Amonita y restos de plantas. b. Equinodermos.



Fuente: Visita de campo.

### 5.2.1.2. Grupo Guadalupe

El Grupo Guadalupe definido al oriente de Bogotá, está conformado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna (Pérez & Salazar, 1978).

#### ➤ Formación Arenisca Dura (K<sub>2d</sub>)

Nombre propuesto formalmente por Pérez & Salazar (1978), para designar la unidad litoestratigráfica compuesta por una sucesión de areniscas en bancos gruesos 63,8% con intercalaciones de limolitas, lodolitas, liditas y arcillolitas 36,2%, que reposa concordante y transicionalmente sobre la Formación Chipaque y que es suprayacida por la Formación Plaeners. La sección tipo se localiza en el cerro El Cable (oriente de Bogotá) y tiene un espesor de 449 m.

Litología:

La Formación Arenisca Dura se localiza en el núcleo del anticlinal de Nemocón, bordeando el domo diapírico.

La parte basal de la formación se constituye de bancos de arenisca blanca, de grano muy fino, compacta de 1m de espesor caracterizada por presentar alta bioturbación y Skolithos reemplazados por óxido de hierro que suelen deformar completamente la estratificación de la roca. (Figura 13).

En la parte media de la formación, es común la presencia de capas lenticulares de areniscas de color blanco amarillento de grano fino y estratificación plana paralela continua a ondulada, con presencia de bioturbación sectorizada y diaclasadas con relleno de óxido de hierro de hasta 2.5cm de espesor (Figura 14). Estas areniscas

se presentan en bancos de hasta 2m de espesor y tienen buena porosidad y permeabilidad.

La parte superior de la formación consta de bancos de 2.5 a 5m de areniscas y capas interestratificadas de 5 a 70cm de limolitas silíceas y liditas muy compactas de color gris a pardo rojizo; arcillolitas de colores claros y capas delgadas de arenisca arcillosa. Las areniscas son de grano muy fino, en ocasiones compactas, bien seleccionadas, de color blanco a gris amarillento con contenido de micas alrededor del 1%, tienen alta porosidad, buena permeabilidad y presentan diaclasas con relleno de óxido de hierro. En general, las limolitas y areniscas son porosas por disolución de foraminíferos o nódulos fosfáticos y algunos fragmentos de conchas.

En la vereda Camacho (E: 1022090 N: 1051099), los bancos de areniscas presentan cantos armados de arcilla y arena (Figura 15).

Figura 13. Estructuras sedimentarias en la parte basal de la Formación Arenisca Dura, sector La Cucariana. a. Skolithos b. Bioturbación.



Fuente: Visita de Campo.

En la zona de estudio, el contacto de la Formación Arenisca Dura con la Formación Chipaque es concordante y con la Formación Plaeners en algunos sectores es fallado.

La Formación Arenisca Dura se depositó en un ambiente de plataforma marina interior a media durante una fase regresiva del mar. En el sector de la Sierra Nevada del Cocuy, esta formación se puede correlacionar por posición estratigráfica con la parte superior de la Formación La Luna (Fabre, 1985); en la parte central de la plancha 209, la correlación es con Lidita Superior y en el piedemonte llanero, Guerrero & Sarmiento (1996) la correlacionan con Arenitas de San Antonio, por tener la misma posición estratigráfica.



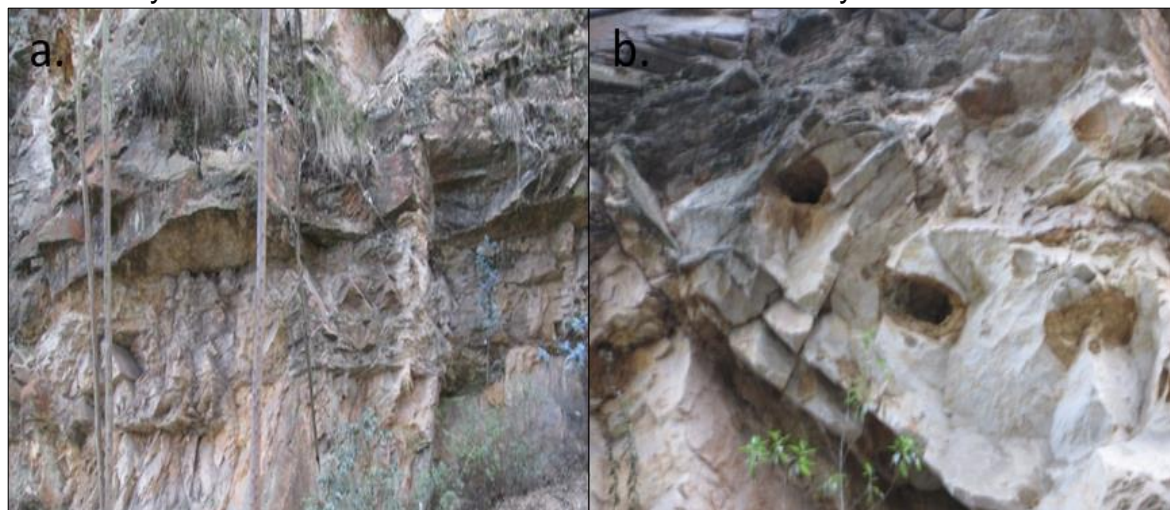
Al adolecer de fósiles para determinar su edad, esta se establece por la posición estratigráfica y correlaciones; para Etayo-Serna (1964) la Formación Arenisca Dura tiene una edad Santoniano - Campaniano.

Figura 14. Estratificación plano paralela continua a ondulada en areniscas. a. Acumulación de láminas de hierro. b. Presencia de lentes de arena con inclusiones de hierro.



Fuente: Visita de Campo.

Figura 15. Formación Arenisca Dura, Vereda Camacho. a. Intercalación de areniscas y limolitas silíceas. b. Cantos armados de arcilla y arena.



Fuente: Visita de Campo.



### ➤ Formación Plaeners (K<sub>2</sub>p)

Nombre formalizado por Pérez & Salazar (1978), para definir la unidad litológica que reposa concordantemente sobre la Formación Arenisca Dura y es suprayacida por la Formación Arenisca de Labor; en la sección tipo tiene un espesor de 73 m y está representada por arcillolitas, liditas, limolitas y en menor proporción por areniscas de grano muy fino.

Litología:

La formación Plaeners se encuentra aflorando en los flancos de los Anticlinales de Nemocón y Astorga y en los flancos del Sinclinal de Buenavista. En la zona de estudio es común encontrar estructuras de colapso, inversiones de estratos, replegamiento y formación de fallas en los flancos invertidos de anticlinales menores, pertenecientes a esta formación.

La Formación Plaeners está constituida por aproximadamente 90m de intercalaciones de capas gruesas de limolitas silíceas de color gris a negro, capas de areniscas de color gris claro a cremas de baja porosidad y contenido de micas de 5%, capas de areniscas arcillosas de color gris con tonos violáceos de porosidad secundaria alta por disolución de foraminíferos, capas de 2 a 30cm de arcillas caoliníticas de color gris claro de baja dureza y baja porosidad y capas de 15 a 20cm de lodolitas grises a negras, compactas a fisibles, altamente meteorizadas y diaclasadas de porosidad media, con estratificación plana paralela continua y patinas de óxido de hierro.

Figura 16. Capas de liditas, areniscas arcillosas y arcillas caoliníticas de la Formación Plaeners, Finca Chimisía.



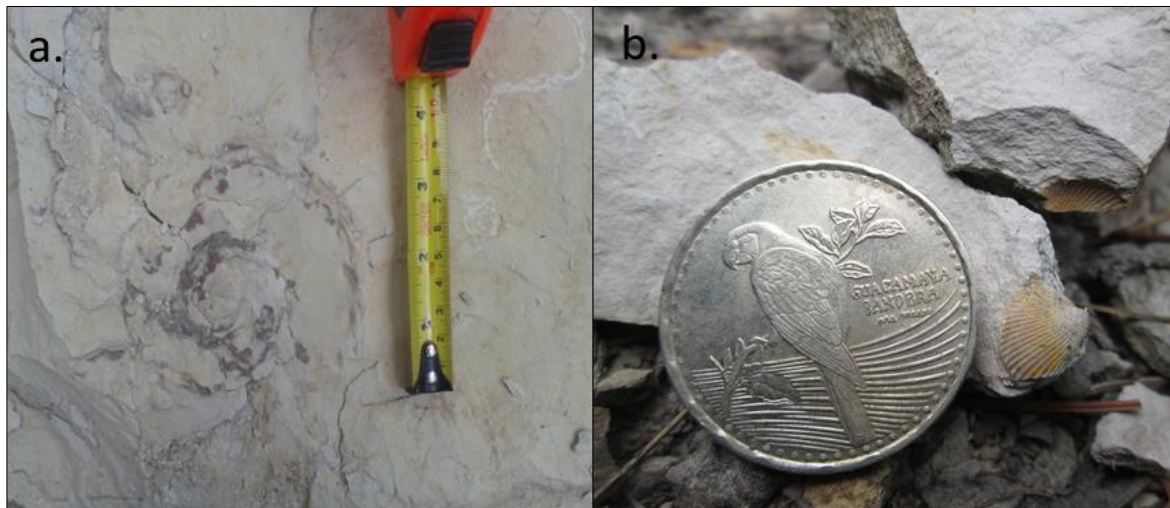
Fuente: Visita de Campo.

Es frecuente la presencia de foraminíferos bentónicos en toda la formación y fósiles como amonitas y bivalvos en capas de arcillas caoliniticas y areniscas arcillosas. (Figura 17).

El contacto de la formación Plaeners en la zona de estudio es fallado en ciertos sectores, en otros sectores el contacto superior con las Areniscas de Labor e inferior con la Arenisca Dura es normal. La edad para esta formación según Follmi et al. (1992 en Vergara y Rodríguez, 1997), con base en amonitas de la región de Tausa, es Campaniano Superior a Maestrichtiano temprano.

En la Sierra Nevada del Cocuy, la Formación Plaeners es correlacionable con la Formación Los Pinos en base a su posición cronoestratigráfica. El ambiente de formación Plaeners es de plataforma externa a media.

Figura 17. Fósiles de la Formación Plaeners. a. Amonita reemplazada por óxido de hierro en arcillas caoliníticas. b. Bivalvo en arcillas caoliníticas.



Fuente: Visita de Campo.

### ➤ Formación Arenisca Labor – Tierna (K<sub>2t</sub>)

Las Formaciones Arenisca de Labor y Arenisca Tierna fueron formalizadas por Pérez & Salazar (1978) al oriente de Bogotá. En su sección tipo, La arenisca de Labor tiene un espesor de 177m y está compuesta por capas gruesas de areniscas que se intercalan con capas delgadas de arcillolitas. La arenisca de Labor está separada de la arenisca Tierna por 19 m de lodolitas y arcillolitas Julivert (1968); la arenisca Tierna con un espesor de 49 m, se diferencia de la Labor por presentar capas muy gruesas de areniscas de tamaño más grueso (Pérez & Salazar, 1978).



Dada la similitud litológica y su expresión morfológica se agrupó como una sola unidad cartográfica denominada Arenisca Labor – Tierna y se establece desde el techo de la Formación Plaeners hasta la base de la Formación Guaduas.

#### Litología:

En los alrededores del casco urbano de Nemocón, en el flanco occidental invertido de un anticlinal fallado asociado al diapirismo, se encuentra aflorando la parte inferior y media de Formación Areniscas Labor – Tierna. En la vereda la puerta, y Astorga, en los flancos del Anticlinal de Nemocón, en una secuencia normal se puede observar la parte superior de esta formación.

La Formación Arenisca Labor – Tierna está constituida en su parte inferior por bancos de 1 a 2.5m de arenisca compacta de color blanco amarillento, grano muy fino y fino, subangular, subelongado, buena selección, con contenido de micas del 1%; estas areniscas se encuentran interestratificadas con capas de lodolitas compactas de fractura en prismas de 50cm y capas de arcilla de color blanco grisáceo de 20 a 25cm de espesor. La bioturbación es evidente en arcillas y esporádicamente se observan moldes de fragmentos de conchas en lentes de arena de grano medio a grueso entre las areniscas (Figura 18).

A continuación se aprecian bancos de 3 a 5m de arenisca cuarzosa de color amarillo crema, de compactación variable, grano fino a grueso, de selección buena a moderada, separada por finas capas de arcilla gris.

En su parte media de la formación está constituida por un conjunto de areniscas arcillosas de 50cm a 2m de espesor, de color blanco grisáceo a pardo rojizo de grano muy fino a fino, bien seleccionadas, muy compactas, algo micáceas, con presencia esporádica de glauconita; las areniscas se encuentran separadas por capas de arcillas gris y capas de liditas de color pardo rojizo, ambas litologías con un espesor similar al de las areniscas. (Figura 19).

La parte superior está compuesta por areniscas cuarcíticas de estratificación gruesa (de 50cm a 5m de espesor), intercaladas con capas delgadas de arcilla. Las areniscas son limpias, friables, de color blanco a gris claro, y granulometría variable que va desde grano grueso, pasando por segmentos de grano medio, hasta pequeñas fracciones de grava fina. La selección es variable; en algunos bancos es buena pero en otros es regular o mala y se suele observar secuencias granodecrescientes hacia el techo. Los icnofósiles se presentan solamente hacia los planos de estratificación y preferencialmente entre las capas intercaladas de arcilla, aunque se encontró bioturbación en muestras de arena (Figura 20.b).



Figura 18. Afloramiento parte inferior y media Formación Arenisca Labor – Tierna, sector Agua Caliente.



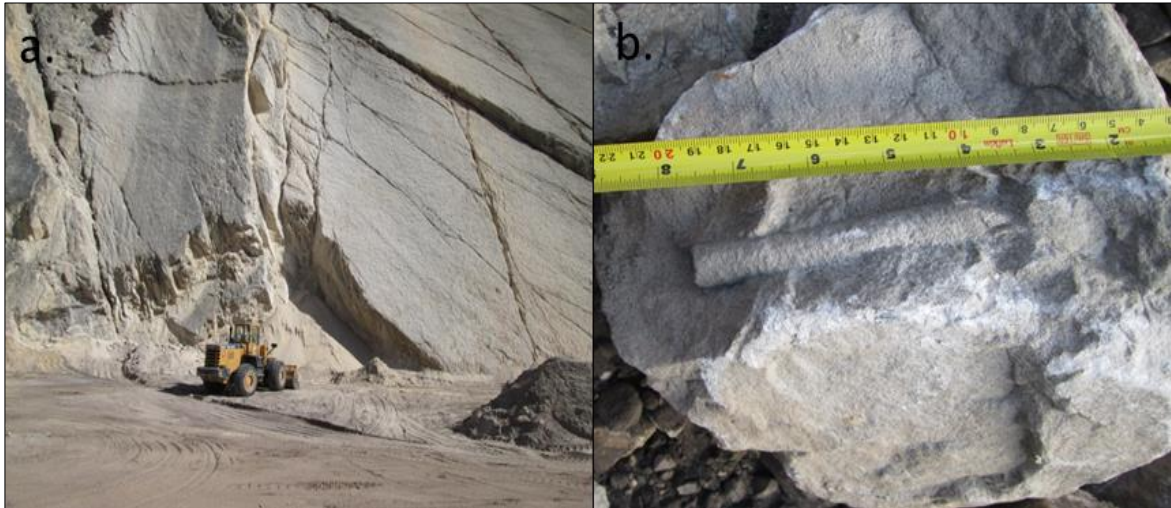
Fuente: Visita de campo.

Figura 19. Formación Arenisca Labor – Tierna, sector Salinas. a. Bioturbación intensa en capa de arcilla. b. Impresión de bivalvos en lentes de arena gruesa.



Fuente: Visita de Campo.

Figura 20. Afloramiento parte superior Formación Arenisca Labor – Tierna, Vereda la Puerta. a. Cantera Arenas de Nemocón. b. Bioturbación en muestra de arena.



Fuente: Visita de Campo.

El límite inferior de la Formación es transicional rápido y concordante con la Formación Plaeners y El contacto superior con la Formación Guaduas es neto y concordante.

La edad reportada para la Formación Arenisca Labor-Tierna es Maastrichtiano Inferior (Pérez & Salazar, 1978) y se puede correlacionar con el segmento superior de la Formación Ermitaño al Norte de Boyacá, con base en su posición estratigráfica. Esta formación se depositó en un ambiente marino somero litoral.

### 5.2.1.3. Formación Guaduas (K<sub>2</sub>E<sub>1g</sub>)

La Formación Guaduas fue descrita originalmente por Hettner (1892, en De Porta, 1974) para referirse a los materiales que afloran en la región de Bogotá y que están por encima del Grupo Guadalupe. Hubach (1931) la redefine y denomina piso Guaduas a la secuencia que suprayace al Grupo Guadalupe y es infrayacida por la Formación Cacho.

Consta de arcillolitas grises compactas, bioestratificada, arcillolita carbonácea, bancos de arenisca, arcillolita abigarrada, y numerosos bancos de carbón situados hacia la parte inferior y media de la formación. Guerrero y Sarmiento (1996), reportó espesores de 1100 m en el sinclinal de Checua Lenguaque, 800 m en el Sinclinal de Tunja y 450 m en Guatavita.

El contacto inferior de la Formación Guaduas con la Formación Arenisca Labor-Tierna, es neto y concordante con la geometría de las capas, pasa de un intervalo arenoso constituido por capas muy gruesas de arenisca a un intervalo lodolítico. El contacto superior con la Formación Cacho es neto, se pasa de un nivel arcilloso





de la Formación Guaduas a intercalaciones de capas medias y gruesas de areniscas de la Formación Cacho.

Por palinología la edad de la Formación Guaduas es Maastrichtiano Superior – Paleoceno Inferior (Sarmiento, 1992). La Formación Guaduas se depositó en una zona de contrabarreras y llanuras aluviales.

#### **5.2.1.4. Cuaternarios no consolidados**

En el área de estudio se pueden observar depósitos de origen fluvial y de pendiente, localizados a lo largo de los márgenes de las estructuras y pequeños valles de quebradas. Estos depósitos se clasifican por el tipo de proceso deposicional.

##### **➤ Depósitos de terrazas altas (Qt)**

Afloran como depósitos aplanados formando terrazas altas, con respecto al nivel actual de inundación del río Checua; se observan en cercanías al casco urbano del municipio. Las terrazas están conformadas por sedimentos conglomeráticos de diferentes rangos, en una matriz areno-arcillosa y presencia de lentes arcillosos y arenosos.

##### **➤ Depósitos coluviales (Qc)**

Se incluyen en esta denominación los depósitos de pendientes de origen local que forman unidades de conos coluviales, conos de talud, lóbulos de solifluxión, glaciares de acumulación y flujos torrenciales, siendo los más notorios, los flujos torrenciales observados en la cabecera municipal de Nemocón y glaciares de acumulación en el sector Chimisía. En general, estos depósitos son formados por procesos de escorrentía superficial, por flujo lento y viscoso del suelo saturado y no saturado, por acumulación mecánica de bloques angulares desprendidos por meteorización o por transporte de material de drenajes hacia la zona plana. La litología es de bloques angulares a subangulares de diferentes tamaños, embebidos en una matriz areno arcillosa o clastosoportados.

#### **5.2.2. Geología estructural**

La zona de estudio se encuentra en la parte axial de la cordillera oriental donde hay una combinación de estilos deformacionales, uno que genera vergencia de planos de falla hacia el occidente y otro que genera vergencia de planos de falla hacia el oriente; formando en la zona estrechos anticlinales con ejes de dirección preferencial entre N40-60E.





Asociadas al diapirismo de sal, se presentan estructuras remanentes de anticlinales invertidos, así como fallas importantes de tipo inverso con una dirección predominante al NE y fallas de corta longitud con dirección NS y NW-SE; las fallas se encuentran afectando las principales estructuras regionales, generando a menudo inversión de estratos.

Las principales estructuras geológicas y fallas se presentan en la Figura 21 y en el Mapa Geológico.

### **5.2.2.1. Fallas**

#### ➤ **Falla Regional de Nemocón**

Se inicia al sur del área y se extiende hacia el norte con un rumbo variable entre N20E a N60E bordeando el Anticlinal de Nemocón y el anticlinal de Guachaneca. Su salto más grande está entre Nemocón y Suesca. Presenta una geometría típica de falla de cabalgamiento que afecta toda la secuencia de rocas.

#### ➤ **Falla Nemocón Norte**

Falla cubierta por depósitos cuaternarios, con dirección NE que afecta el Grupo Guadalupe, está localizada al norte del polígono de concesión y atraviesa el casco urbano del municipio.

#### ➤ **Falla Camacho**

Falla de tipo inverso con dirección NS, donde su máximo salto pone en contacto las Formación Plaeners con la Formación Chipaque. Esta parcialmente cubierta por depósitos cuaternarios y hacia el oeste, limita el domo salino.

#### ➤ **Falla El Perico**

Falla de tipo inverso de gran extensión que afecta rocas del Grupo Guadalupe y Formación Chipaque, tiene un rumbo variable con dirección NE, delimita el domo salino en la parte norte y genera estratos invertidos en la parte central de la zona.

#### ➤ **Falla El Volador**

Es una falla de tipo inverso de gran extensión que limita el domo salino hacia la parte sur, afecta las rocas del Grupo Guadalupe y la Formación Chipaque y tiene una dirección preferencial al NE.

➤ **Falla El Sotá**

Es una falla de pequeña extensión que presenta una dirección NW, afecta rocas de las Formaciones Chipaque y Arenisca Dura, también afecta la continuidad del domo salino y las labores subterráneas de la mina de sal (Niveles Santa Isabel y Santa Úrsula).

➤ **Falla Chimisía**

Esta falla fue definida a partir de sondeos eléctricos verticales, presenta una orientación NW-SE, afecta las Formaciones Arenisca Dura y Chipaque y delimita el domo salino hacia el este.

➤ **Falla San Rafael**

Falla de tipo inverso con dirección preferencial NW que afecta las rocas del Grupo Guadalupe y la Formación Guaduas.

Existen otras fallas de poca extensión asociadas al diapirismo que afectan rocas del Grupo Guadalupe y la Formación Chipaque.

### 5.2.2.2. Pliegues

➤ **Anticlinal de Nemocón**

Este anticlinal de tipo regional, en la zona de estudio está afectado por procesos diapíricos y fallas regionales que lo dividen en 2 segmentos:

El segmento sur presenta un cierre estructural simétrico y hacia la zona de Nemocón queda interrumpido por diapirismo; su núcleo está ocupado por las formaciones Arenisca Dura y Chipaque y en sus flancos se observan las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca Labor-Tierna.

En el segmento norte, el eje se desplaza hacia el oriente, su núcleo se ubica en la Formación Chipaque, el flanco oriental dentro de la Formación Arenisca Dura está invertido y limitado por la Falla Nemocón, mientras el flanco occidental es amplio con las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Arenisca Labor-Tierna, Guaduas y Cacho.

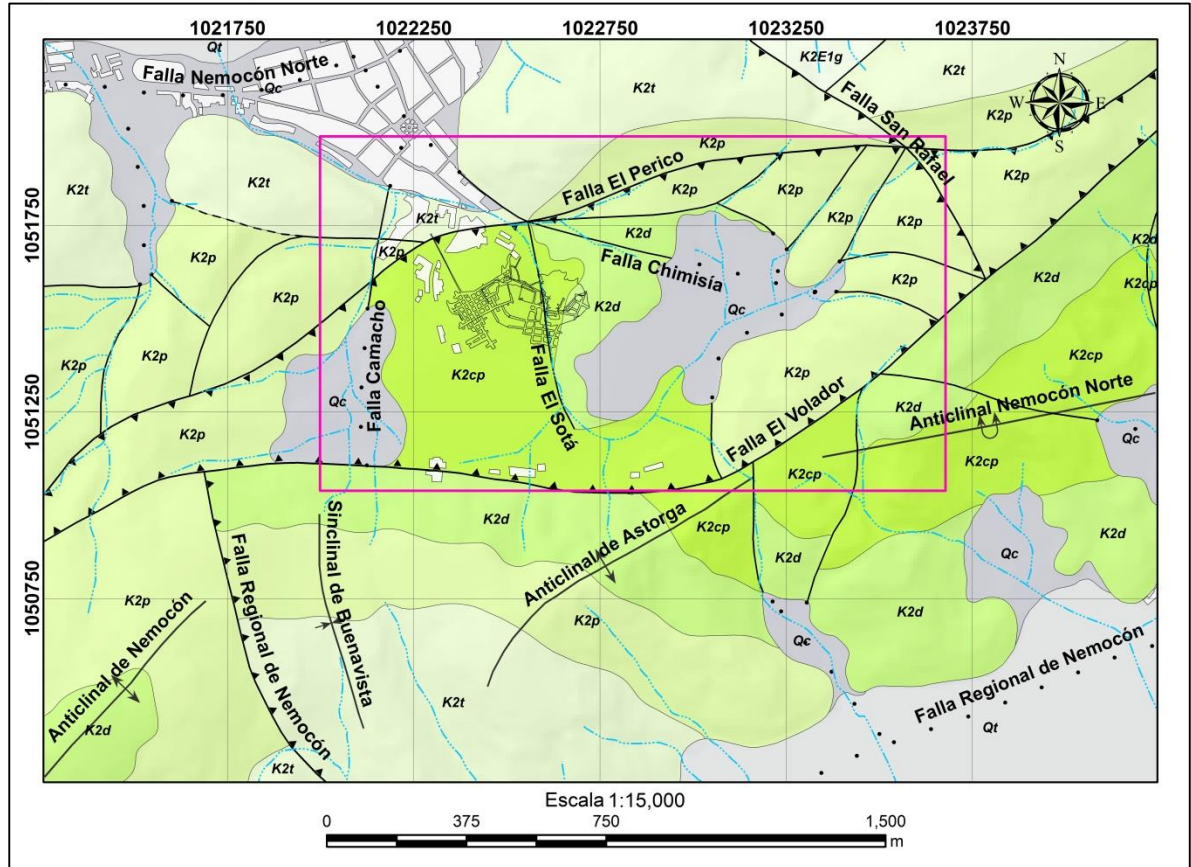
➤ **Anticlinal de Astorga**

Se encuentra en la parte sur del área de estudio, está limitado por las fallas de Nemocón, El Volador y otras de poca extensión. Presenta una dirección NE con su núcleo en la Formación Chipaque y sus flancos en las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca Labor - Tierna. Está Asociado al Anticlinal de Nemocón.

➤ **Sinclinal de Buenavista**

Es una estructura de tipo local que se encuentra en las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca Labor – Tierna, su eje presenta una dirección NS - NW.

Figura 21. Geología estructural de la zona.



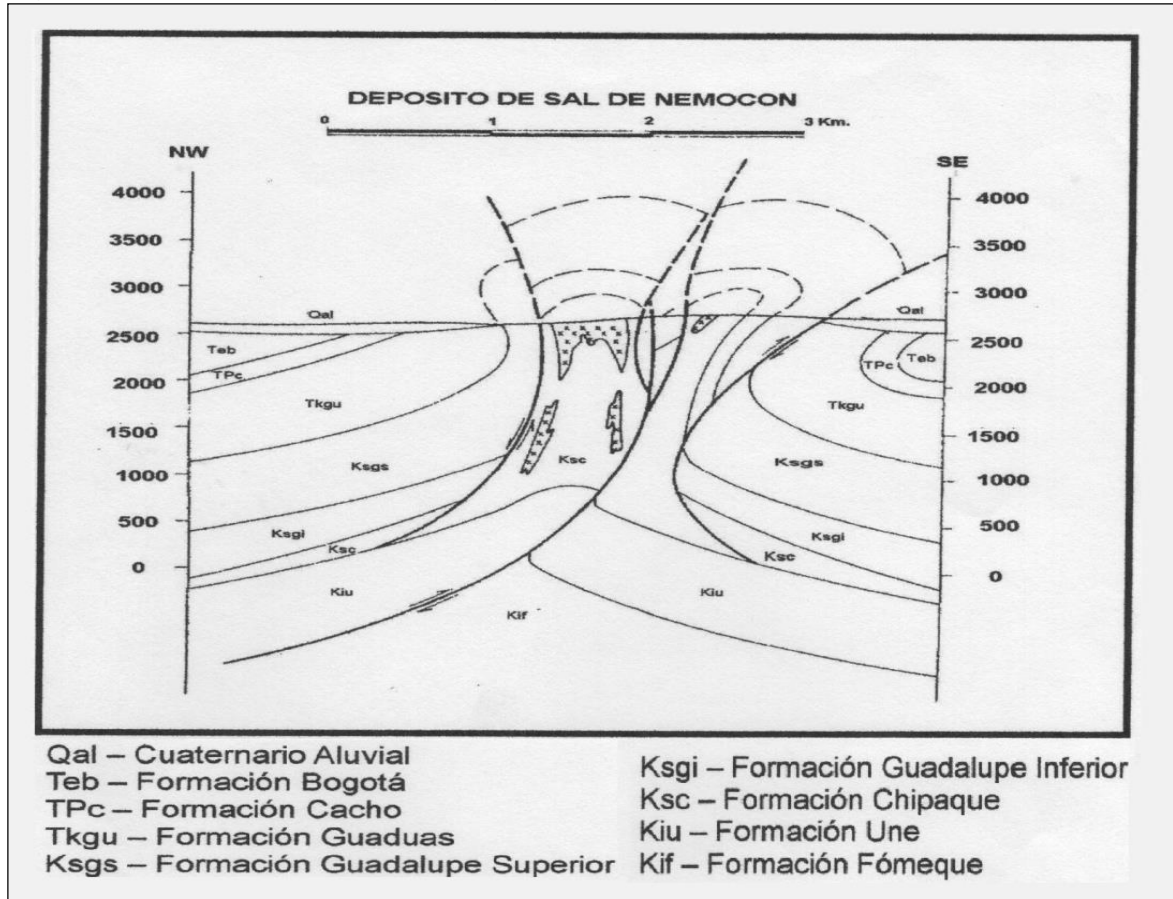
Fuente: Autor.

**5.3. GEOLOGÍA DEL YACIMIENTO**

El cuerpo salino se ubica en el Anticlinal de Nemocón. En las proximidades del diapiro la estructura geológica es muy complicada debido a la presencia de otras estructuras anticlinales y fallas de tipo inverso, las cuales en general rodean el diapiro.

Según Mc Laughlin & Arce (1971), el depósito de sal de Nemocón se localiza en la intersección de dos anticlinales afectados por fallamiento inverso y la mayor concentración de sal se ubica sobre el extremo nororiental del Anticlinal de Nemocón sur.

Figura 22. Sección transversal diagramática del depósito de sal de Nemocón.



Fuente: Modificado de Mc Laughlin & Arce, 1971.

El domo salino está cubierto casi en su totalidad por una capa o costra de material brechoso comúnmente llamado “rute”, compuesto por fragmentos de diversos tamaños, de arcillas negras bituminosas, ricas en cristales de pirita y capas de lutitas bastante duras. El espesor del estéril es variable y algunas veces de importancia, en algunos sitios esta adelgazado por el efecto de la conservación del domo salino.

En el domo se puede observar halita con tamaño de cristales de 2mm a 5mm, cuyo color varía desde gris claro hasta gris oscuro dependiendo del contenido de impurezas carbonoso – arcillosas presentes, también se pueden observar lentes y parches irregulares de sal gema en algunos lugares. Dentro del depósito de sal se encuentran capas y fragmentos de arcillolitas que van desde pequeñas láminas hasta bloques de 1m de diámetro, observándose en su mayoría bloques con algunos centímetros de diámetro. Los fragmentos están distribuidos erráticamente dentro del conjunto de la halita.





El proceso de ascenso de la sal en su etapa de formación creó flujos, los cuales quedaron marcados en el yacimiento al solidificarse el material. Estas líneas de flujo dejaron en el yacimiento un bandeamiento que forma una pseudoestratificación con inclusiones de arcilla, que presenta una orientación vertical preferente, pero que en ocasiones exhibe pequeñas inclinaciones. Entre más clara y pura sea la halita, mejores características geotécnicas tendrá.

### **5.3.1. Edad y ubicación estratigráfica del depósito**

Según Briceño, Buitrago & López (1990) y Rincón & Hernández (1986), los depósitos salinos de la sabana de Bogotá se dieron durante la época del Valanginiano – Barremiano, a causa de fluctuaciones eustáticas, condiciones climáticas con crisis de salinidad y cambios tectónicos que generaron regresiones forzadas del mar y conllevaron a la desecación de la cuenca, lo que permitió la depositación de capas de evaporitas. Estos depósitos de sal posteriormente se emplazaron en la Formación Chipaque, a causa de procesos tectónicos generados en la cuenca, durante la orogenia andina.

Hasta el momento, las evidencias sugieren que todos los depósitos de sal de la sabana de Bogotá se encuentran en la Formación Chipaque, pero es difícil precisar su posición estratigráfica dentro de esta formación por carencia de buenos afloramientos, complicaciones estructurales y variaciones de espesor de la Formación. Sin embargo, para el depósito de sal de Nemocón, se puede inferir la ubicación del domo en el segmento C de la Formación Chipaque, basándose en la litología de la perforación del pozo de producción de salmuera No. 7 (Anexo D).

## 6. GEOMORFOLOGÍA

La geomorfología permite explicar las formas de relieve que adquiere la corteza terrestre como consecuencia de la continua interacción de la litosfera, la hidrosfera, atmósfera y biosfera y todos los procesos endógenos y exógenos que ha sufrido la tierra desde sus inicios.

Para realizar el análisis geomorfológico de un lugar, se debe seguir un proceso analítico del terreno, empezando desde un punto de vista regional hasta llegar a uno local, donde se relacionen las jerarquías geomorfológicas con la escala aplicada; esto con el fin de lograr una mejor comprensión de los procesos y evolución que han experimentado las diferentes geoformas involucradas (Carvajal 2003).

La descripción geomorfológica de la zona se realizó con una escala de detalle 1:10.000, tomando como guía el mapa geomorfológico del municipio de Nemocón.

### 6.1. CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA

El área de estudio se localiza en las provincias fisiográficas de Cordillera Oriental y Sabana de Bogotá, con una unidad climática de tipo frío semi - húmedo. La provincia fisiográfica de Cordillera Oriental está constituida por el paisaje de montaña y la provincia fisiográfica de la Sabana de Bogotá está constituida por el paisaje de planicie aluvial del río Checua.

En general, la configuración actual del paisaje, se debe al desarrollo de procesos de sedimentación y acumulación de materiales, eventos tectónicos de plegamiento y fallamiento producto de la orogenia andina, procesos asociados a periodos glaciares e interglaciares que han afectado las zonas de mayor elevación y procesos de plegamiento y fallamiento asociados a diapirismo.

El esquema de jerarquización geomorfológica propuesta por el Instituto Colombiano de Geología y Minería INGEO MINAS en 2011, actual Servicio Geológico Colombiano SGC establece que para escalas de trabajo 1:10.000 a 1:25.000 se debe recurrir a la descripción de subunidades geomorfológicas.

Las subunidades geomorfológicas presentes en la zona, pertenecientes al paisaje de montaña y planicie aluvial, han sido generadas por procesos de agradación o degradación de materiales asociados a ambientes morfogenéticos de tipo fluvial y lagunar, glacial y periglacial, antropogénico, denudacional y morfoestructural.



Tabla 11. Subunidades geomorfológicas presentes en el área de estudio.

<b>Ambiente Morfogénético</b>	<b>Nombre</b>	<b>Símbolo</b>
Antropogénico	Cantera	Ac
Denudacional	Conos y lóbulos coluviales de solifluxión	Dco
Denudacional	Colina residual	Dcr
Denudacional	Glacis de Acumulación	Dga
Fluvial y Lagunar	Cono de deyección	Fcdy
Fluvial y Lagunar	Planicie y delta lacustrino	Fpla
Glacial y periglacial	Sierra anticlinal glaciada	Gsag
Glacial y periglacial	Sierra homoclinal glaciada	Gshg
Glacial y periglacial	Ladera en contrapendiente de sierra homoclinal glaciada	Gshlc
Glacial y periglacial	Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada	Gshle
Morfoestructural	Cerro estructural	Sce
Morfoestructural	Domo diapírico	Sdd
Morfoestructural	Escarpe de línea de falla	Sife
Morfoestructural	Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal	Sshcp
Morfoestructural	Ladera estructural de sierra homoclinal	Sshle

Fuente: Autor.

### 6.1.1. Subunidades geomorfológicas de origen Antropogénico

Corresponde a las formas del terreno, productos de la actividad del hombre que modifica la superficie terrestre, cuyo objetivo en este caso, es el de explotar los recursos que se encuentran en el subsuelo.

#### 6.1.1.1. Cantera Ac

Excavación escarpada con altura de 5 a 20m, de forma irregular o en terracedo, hecha en laderas para la extracción de materiales de construcción como piedra, arena y grava.

En la zona de estudio, esta geoforma se aprecia en la Vereda Camacho, Vereda la Puerta y el sector Agua Caliente, donde existen canteras de extracción de materiales de arcillas caoliníticas, arena y rebebo, respectivamente (Figura 23).

### 6.1.2. Subunidades geomorfológicas de origen Denudacional

Son geoformas determinadas por la actividad de los procesos erosivos hídricos y pluviales, y principalmente producto de procesos de meteorización, erosión y remoción en masa, sobre geoformas pre - existentes.

Figura 23. Cantera de explotación de arcillas caoliníticas, Vereda Camacho.



Fuente: Autor.

#### 6.1.2.1. Conos y lóbulos coluviales y de solifluxión Dco

Geoforma en forma de conos o lóbulos de longitudes cortas a largas, convexas e inclinaciones suaves a abruptas. Se originan respectivamente por acumulación de materiales sobre las laderas tanto por procesos de escorrentía superficial como por flujo lento y viscoso de suelos saturados y no saturados. Se constituyen de bloques angulares a subangulares de diferentes tamaños embebidos en material arcilloso en espesores del orden de 5 - 35 m.

#### 6.1.2.2. Colina residual Dcr

Geoforma con elevación del terreno de menor altura que una montaña, de laderas cortas convexas con inclinaciones superiores a 10 grados y divergencia en todas las direcciones a partir de cima redondeada, con una base aproximadamente circular, localmente asociada a suelos residuales gruesos y formaciones arcillosas. Su origen se debe posiblemente a procesos de erosión y meteorización en zonas de un curso fluvial o asociado a meteorización intensa en climas húmedos tropicales diferentes a los actuales.

#### 6.1.2.3. Glacis de acumulación Dga

Superficie de acumulación de longitudes moderadamente largas, forma cóncava y suavemente inclinada (7%). Su génesis se asocia a la acumulación del material fino en zonas bajas por procesos de escorrentía superficial y erosión laminar en zonas de ladera. Se incluyen igualmente los planos adyacentes, formados por rellenos de material coluvial fino con bloques producto de la erosión laminar de las laderas circundantes; presenta espesores de 3 - 10 m.

Figura 24. Subunidades de origen denudacional, morfoestructural, glacial y periglacial, Finca Chimisía.



Fuente: Autor.

Las geoformas de la zona son producto de la dinámica aluvial y coluvial, donde muchos materiales detríticos se movilizaron en las laderas por diferentes mecanismos y formaron depósitos hidrogravitatorios y aluviotorrenciales. Estas geoformas se ubican preferencialmente en la Finca de Chimisía y Vereda Camacho, en altitudes entre 2.650 m.s.n.m. y 2.800 m.s.n.m. asociados a depósitos coluviales de laderas con pendientes entre 7% y 25%, con formación de suelos en varias fases y presencia de horizontes de arcilla endurecida. También se pueden observar algunos remanentes de la formación Guaduas en zonas planas, producto de erosión y meteorización selectiva. Los procesos principales de agradación y degradación son la reptación superficial lenta, escurrimiento difuso y obturación de cauces que solo funcionan como respuesta directa a un régimen hídrico torrencial.

### 6.1.3. Subunidades geomorfológicas de origen fluvial y lagunar

Corresponden a las geoformas generadas por procesos de erosión y sedimentación, originadas por corrientes de agua tales como ríos y arroyos, lagos y lagunas respectivamente.



### 6.1.3.1. Cono de deyección Fcdy

Superficie en forma de cono, con inclinación de 10 a 25 grados, ubicado en puntos donde los canales o quebradas llegan a zonas de valles amplios. Originados por flujos torrenciales, deslizamientos, derrumbes, coluvionamiento, entre otros; se constituyen de arcilla, arena, grava y bloques de gran tamaño, en espesores donde los materiales más gruesos se localizan hacia el ápice en la zona de salida y los más finos en la zona distal. En general, se trata de una dinámica del pasado, con movimientos de detritos poco activa en el presente.

### 6.1.3.2. Planicie y delta lacustrino Fpla

Planicie extensa de aspecto aterrazado y morfología ondulada suavemente inclinada y limitada hacia los cauces por escarpes. Se constituye de arcillas grises e intercalaciones de arenas finas y delgados niveles de gravas, en capas paralelas producto de la acumulación de materiales en la cuenca ocupada por el antiguo lago del altiplano.

Figura 25. Subunidades de origen denudacional, fluvial y lagunar.



Fuente: Autor.

En la parte norte y sur de la zona de estudio se identifica un nivel continuo de sedimentos producidos por los ríos Checua y Bogotá y el antiguo lago del altiplano (espaciados temporalmente), donde los relictos del antiguo lago altiplano se encuentran disectados por las corrientes de los ríos Checua, Bogotá, y algunas quebradas menores. Los sedimentos fluvio-lacustres de la sabana presentan aportes laterales de arenas y gravillas asociadas a los conos de deyección y los procesos característicos de las geofomas de esta subunidad son la erosión en surcos producto de la agricultura y la ocurrencia estacional de encharcamiento por lluvias.



El casco urbano del municipio de Nemocón se localiza en un cono de deyección con una pendiente aproximada de 10 grados, esta geoforma marca la transición entre los cauces de la parte alta de la zona (Quebrada el Sotá y Camacho) y la depresión fluvio-lacustre.

#### **6.1.4. Subunidades geomorfológicas de origen glacial y periglacial**

Este ambiente está conformado por las geoformas originadas por los glaciares tanto continentales (casquetes polares) como de alta montaña.

##### **6.1.4.1. Sierra anticlinal glaciada Gsag**

Sierra elongada de morfología montañosa o colinada de cimas o crestas agudas o redondeadas, que siguen el eje anticlinal formado por el arqueamiento o combadura de los estratos o capas que se inclinan divergentemente a partir de su eje. Conforman laderas estructurales inclinadas a muy abruptas, rectas o convexas y de longitudes largas. Esta geoforma se encuentra afectada por procesos glaciales y periglaciales.

##### **6.1.4.2. Sierra homoclinal glaciada Gshg**

Sierra simétrica o ligeramente simétrica elongada de morfología montañosa de cimas agudas y formada por una secuencia estratos o capas apilados e inclinados en una misma dirección por efecto de replegamiento intenso y fallamiento, afectada por procesos glaciales y periglaciales.

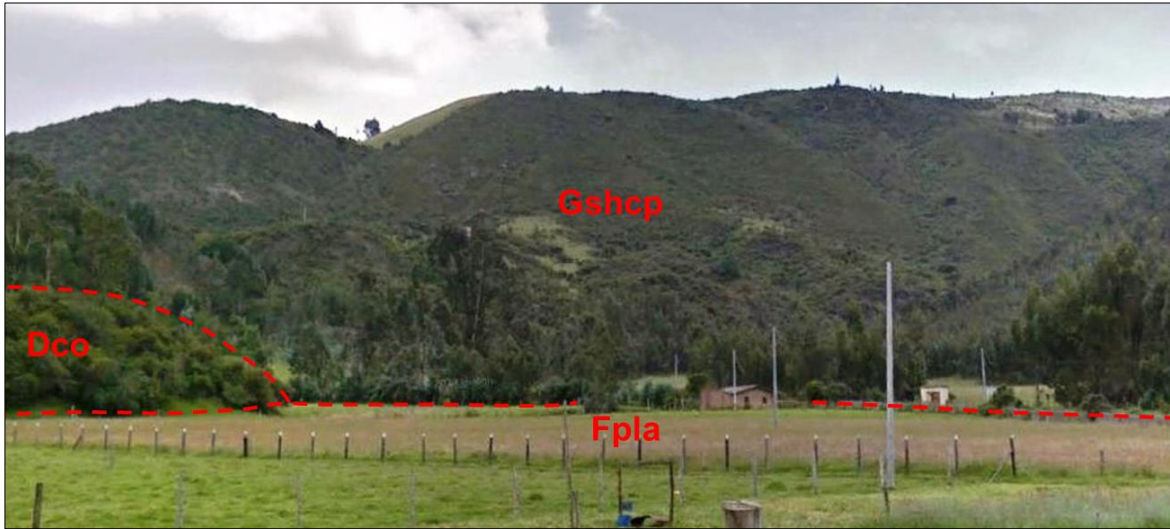
##### **6.1.4.3. Ladera de contrapendiente de sierra homoclinal glaciada Gshcp**

Ladera definida por la inclinación de los estratos en contra de la pendiente, de longitud moderada a larga, de formas concavas a irregulares escalonadas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas. Presenta interestratificación de rocas duras, moderadamente duras y blandas. La vegetación es muy pobre y muestra procesos coluviales y de soliflucción. Esta geoforma se ha visto afectada por procesos glaciales y periglaciales.

##### **6.1.4.4. Ladera estructural de sierra homoclinal glaciada Gshle**

Ladera definida por la inclinación de los estratos en favor de la pendiente ( $> 35^\circ$ ), de longitud corta a moderada larga de formas rectas a convexas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas. Está constituida por rocas duras a moderadamente duras, con presencia de poca vegetación y procesos de coluviación. Esta geoforma se ha visto afectada por procesos glaciares y periglaciares, que han erodado los suelos casi en su totalidad.

Figura 26. Subunidades de origen denudacional, fluvial y lagunar, glacial y periglacial, Vereda Astorga.



Fuente: Autor.

El modelado glacial identificado en la zona corresponde a la última glaciación denominada Cocuy o Fuquense (Van der Hammen, 1995). El origen de las geoformas en la zona es periglacial, ubicándose entre los 3.100 ( $\pm$  50 m.) y los 2.800 m.s.n.m. Estas zonas constituyen la alta montaña (Flórez, et al., 1996) y aunque no fueron cubiertas por hielo durante la última glaciación, si estuvieron sometidas a temperaturas bajas que impidieron el desarrollo de vegetación y las nevadas y su fusión, le imprimieron unas características específicas como son la ausencia casi total de regolitos y abundancia de cornisas rocosas con depósitos de derrubios. Los procesos más representativos de estas geoformas se relacionan con la reptación de suelos, escurrimiento superficial y pequeños movimientos en masa en los bordes inferiores de la subunidad.

### 6.1.5. Subunidades geomorfológicas de origen morfoestructural

Bajo esta clasificación se encuentran las geoformas generadas por la dinámica interna de la tierra, especialmente la asociada a plegamientos y fallamientos.

#### 6.1.5.1. Cerro estructural Sce

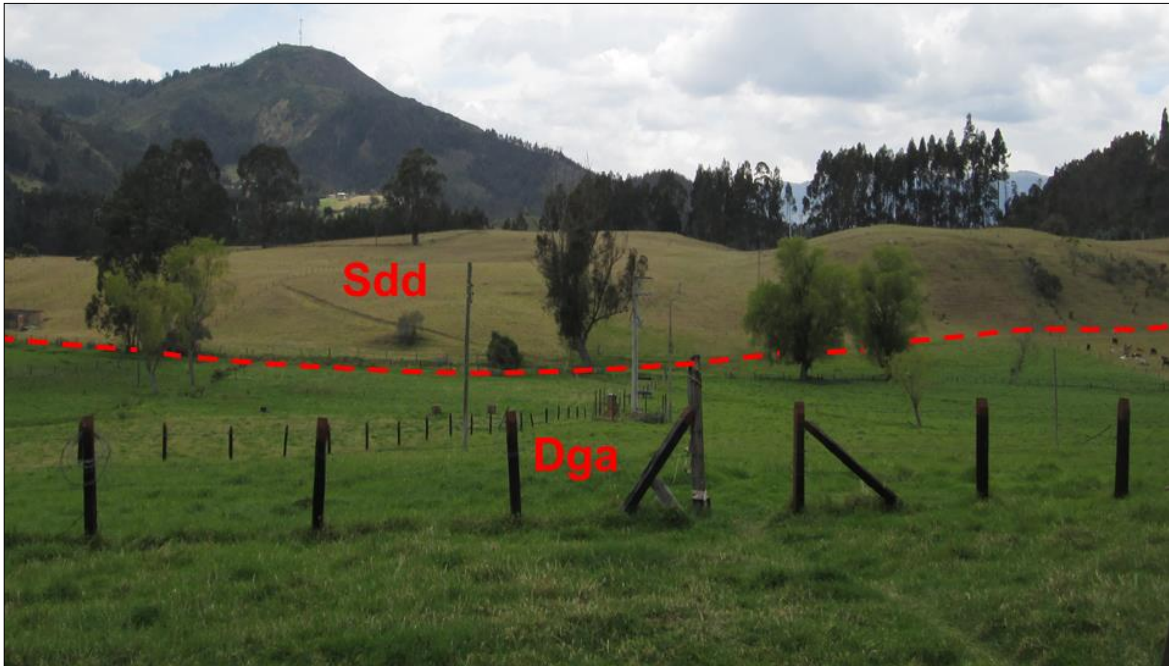
Se caracteriza por exhibir una prominencia topográfica aislada de morfología montañosa, con laderas de longitud corta, de forma irregular, poco disectadas, de pendientes escarpadas, las cuales han sido parcialmente aisladas de las zonas montañosas por fallamiento; sin presencia de procesos erosivos o movimientos en masa significativos.



#### 6.1.5.2. Domo diapírico Sdd

Geoforma de relieve suavemente ondulado y redondeado, donde los estratos buzan en todas direcciones y no es posible definir un eje longitudinal. Esta geoforma está asociada a procesos halotectónicos que generan presión en rocas adyacentes, lo que ocasiona que los estratos superiores sean levantados y posteriormente erosionados, formando estructuras de crestas concéntricas conformadas por los estratos más resistentes a la erosión.

Figura 27. Domo diapírico y glacis de acumulación, Fincha Chimisía.



Fuente: Autor.

#### 6.1.5.3. Escarpe de línea de falla Slfp

Escarpe corto, abrupto, cóncavo o convexo, originado por erosión acentuada a lo largo de una línea de falla definida por el truncamiento de estructuras topográficas y geológicas.

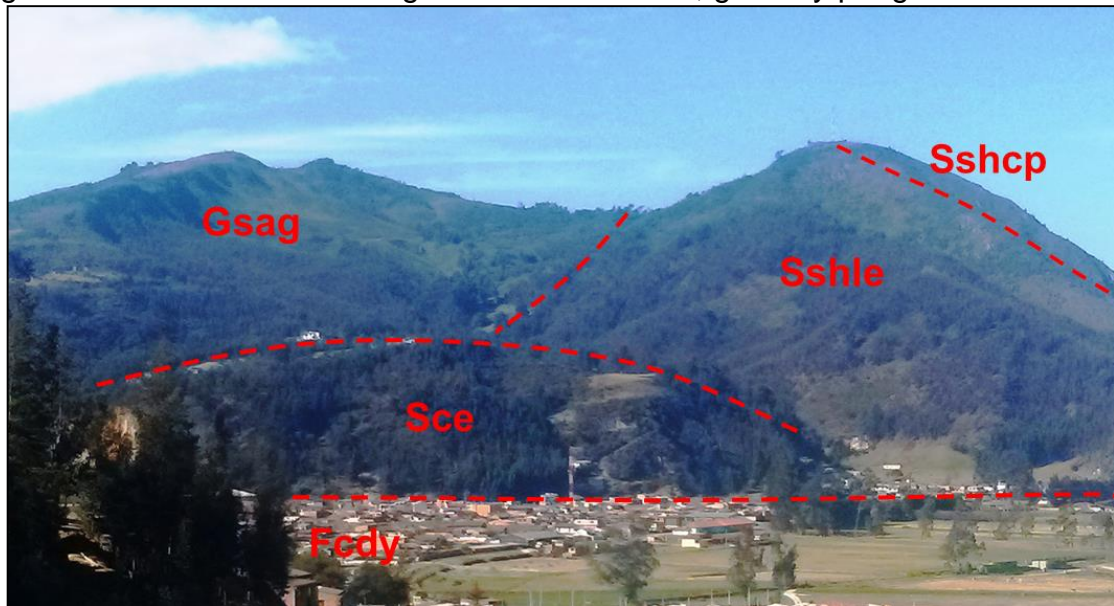
#### 6.1.5.4. Laderas de contrapendiente de sierra homoclinal Sshle

Laderas definidas por la inclinación de los estratos en contra de la pendiente, de longitud moderada a larga, de formas cóncavas a irregulares, escalonadas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas. Interestratificación de rocas duras, intermedias y blandas.

#### 6.1.5.5. Ladera estructural de sierra homoclinal Sshcp

Ladera definida por la inclinación de los estratos en favor de la pendiente ( $>35^\circ$ ), de longitud corta a moderada larga de formas rectas a convexas y con pendientes escarpadas a muy escarpadas. Rocas areníticas duras a intermedias y suelos residuales delgados.

Figura 28. Subunidades de origen morfoestructural, glacial y periglacial.



Fuente: Autor.

En su organización, la zona muestra una correspondencia con los principales ejes estructurales de plegamiento y de fallamiento asociados a procesos halotectónicos. Las fallas inversas controlan los ejes principales del drenaje y parte de las divisorias de agua corresponden con las cimas de las sierras homoclinales remanentes de anticlinales invertidos. Los procesos más representativos de estas geofomas son los movimientos en masa de tipo derrumbe en las zonas de contrapendiente y soliflucción lenta en las laderas estructurales.



## 7. GEOFÍSICA

La Geofísica emplea los fundamentos teóricos de la Física para investigar el comportamiento de algunos componentes de la Tierra con ayuda de técnicas que miden un parámetro físico específico (gravimetría, magnetometría, geoeléctrica, sísmica, entre otras).

En el plano de la hidrogeología, la técnica geofísica más aplicada a la solución de problemas es la geoeléctrica, ya que su campo físico de estudio está estrechamente ligado a la presencia o no de fluidos en las rocas, como es el caso del agua.

Este proyecto abarca los métodos geoeléctricos de Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Registro Eléctrico de pozo.

### 7.1. SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL

Para la zona de estudio, se realizó el análisis del documento denominado “Informe Estudio de Geoeléctrica en la mina de sal de Nemocón”<sup>3</sup> en el cual se realizaron 10 sondeos eléctricos verticales que abarcaron el valle de Chimisía (dos de ellos paramétricos) considerando su importancia hidrogeológica y 4 sondeos eléctricos verticales paralelos a la depresión de la quebrada El Sotá, estos últimos para determinar la continuidad del depósito salino. Los sondeos fueron realizados implementando el arreglo Schlumberger, con una separación  $ab/2$  de 150m a 300m y alcanzando una profundidad promedio de 70m aproximadamente.

Se determinó que el estudio presentaba una baja confiabilidad puesto que los resultados obtenidos no concordaban con la geología de la zona y las perforaciones empleadas para la interpretación litológica de los Sondeos paramétricos no se encontraban en las coordenadas reales.

Por tal razón, se procedió a reinterpretar los datos obtenidos en campo del informe antes citado, con apoyo del levantamiento geológico de la zona realizado en el presente estudio, la litología de perforaciones de la zona otorgadas por el IFI-Concesión salinas y el estudio geoeléctrico del Pozo de producción de salmuera No 7. La ubicación de los sondeos se muestra en la tabla 12 y la Figura 29.

---

<sup>3</sup> FRANCO, Carlos Andrés. Informe estudio de geoeléctrica en la Mina de Nemocón. IFI – CONCESIÓN SALINAS. Zipaquirá, Febrero 16 de 2004.

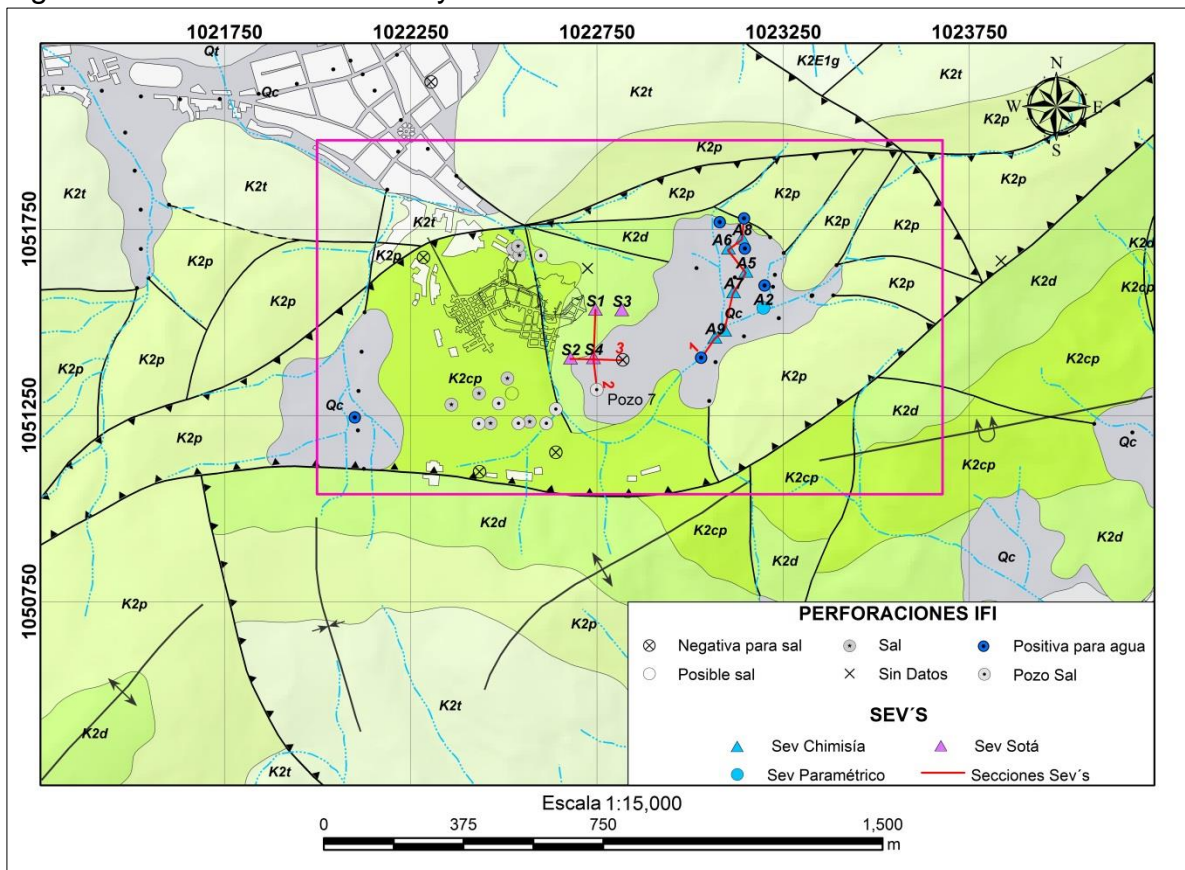


Tabla 12. Coordenadas SEV's.

Nombre	Este	Norte	Altura	Rumbo	AB/2	Observaciones
SEV-A1	1.023.197	1.051.540	2,646.12	N90°E	200	Sondeo paramétrico Perf. 67-2
SEV-A2	1.023.197	1.051.540	2,646.12	N10°E	150	Sondeo paramétrico Perf. 67-2
SEV-A3	1.023.093	1.051.480	2,644.81	N84°E	300	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-A4	1.023.093	1.051.480	2,644.81	N34°W	150	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-A5	1.023.150	1.051.638	2,648.04	N49°W	250	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-A6	1.023.103	1.051.700	2,648.67	N61°W	200	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-A7	1.023.117	1.051.583	2,645.76	N10°W	150	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-A8	1.023.140	1.051.727	2,650.38	N70°W	150	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-A9	1.023.067	1.051.461	2,644.50	N28°W	150	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-A10	1.023.117	1.051.583	2,645.76	S30°W	250	Sondeo Chimisia, búsqueda de agua
SEV-S1	1.022.746	1.051.536	2,654.36	N37°E	300	Sondeo paralelo Quebrada El Sotá
SEV-S2	1.022.679	1.051.405	2,648.38	N20°E	150	Sondeo paralelo Quebrada El Sotá
SEV-S3	1.022.817	1.051.535	2,669.83	N22°E	300	Sondeo paralelo Quebrada El Sotá
SEV-S4	1.022.741	1.051.406	2,660.29	N24°E	150	Sondeo paralelo Quebrada El Sotá

Fuente: Modificado de Estudio de Geoelectrica en la Mina de sal de Nemocón, 2004.

Figura 29. Localización SEV's y Perforaciones.



Fuente: Autores.

### 7.1.1. Interpretación

El procesamiento de los datos geoelectricos se realizó en el programa IPI2Win, graficando curvas bilogarítmicas de resistividad aparente en función de la profundidad y empleando la interpretación semiautomática, obteniendo así los valores de espesor y resistividad real de las capas geoelectricas en el punto de sondeo. <sup>4</sup>

En la interpretación de los sondeos se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones:

- ✓ Las arcillas y lutitas son impermeables aunque con alta porosidad, uniformes a lo largo de toda la formación y generalmente están impregnadas con aguas capilares de alta salinidad, lo que da una resistividad baja. Los valores oscilan entre 0.2 ohm-m hasta unos pocos ohm-m.
- ✓ Las rocas compactas e impermeables (tales como anhidrita, sal y formaciones calcáreas densas) son totalmente resistivas debido al bajo contenido de agua intersticial.
- ✓ Las rocas porosas permeables como las arenas, presentan resistividades con variaciones de magnitud amplia, dependiendo del fluido que contengan, de la salinidad del mismo y de la geometría de los vacíos. Las arenas pueden ser muy conductivas si el fluido es agua salada, o resistivas si la formación contiene considerables cantidades de agua dulce.

Con el fin de conocer los valores de resistividades de las rocas que conformaban el subsuelo se reinterpretaron los sondeos paramétricos con respecto a la perforación No 67-2.

Los sondeos paramétricos son sondeos medidos en puntos de geología conocida, generalmente por existencia de perforaciones con perfil estratigráfico disponible, tienen su centro en un mismo punto, pero las líneas de tendido son perpendiculares entre sí y los valores de resistividad aparente calculados para cada arreglo no presentan diferencias apreciables.

Con los resultados obtenidos se generó un rango de resistividades característico de las formaciones presentes y se terminó de conformar el modelo a medida que se analizaban las curvas interpretadas en una formación específica. También se hizo uso del registro eléctrico y columna estratigráfica del pozo No 7 (Anexo D).

En la tabla 13 se presentan los rangos de resistividades de las formaciones presentes en el área. Los resultados de los análisis de las curvas de resistividad de los 14 SEV's se muestran en el Anexo C.

<sup>4</sup> IPI2Win. Guía de usuario, UNIVERSIDAD ESTATAL DE MOSCÚ, 2000.



Tabla 13. Rangos de resistividades.

Unidad Litoestratigráfica	Litología	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )
Cuaternario Coluvial	Suelo arenoso desnudo	>1000
	Suelo arenoso cubierto con césped	300 - 400
	Suelo areno-arcilloso cubierto con césped	100 - 200
	Suelo arcilloso cubierto con césped	20 - 100
	Arena de grano grueso y arcilla	90 - 95
	Arenisca arcillosa y sus combinaciones con limo	40 - 70
	Arcilla arenosa (en función al contenido de Arena)	24 - 39
	Arcilla y sus combinaciones con limo	4 - 15
Formación Plaeners	Arcilla, arenisca y lidita intercalada	130 - 170
	Arenisca arcillosa y sus combinaciones con limo	40 - 75
	Arcilla arenosa y limo	27 - 39
	Arcilla y sus combinaciones con limo	3 - 19
Formación Arenisca Dura	Arenisca de grano medio a grueso	200 - 700
	Arenisca saturadas	200 - 300
	Arenisca arcillosa y sus combinaciones con limo	44 - 46
	Arcilla Arenosa (en función del contenido de arena)	20 - 32
	Arcilla	2.5 - 5
Formación Chipaque	Arcilla (Rute)	1 - 4

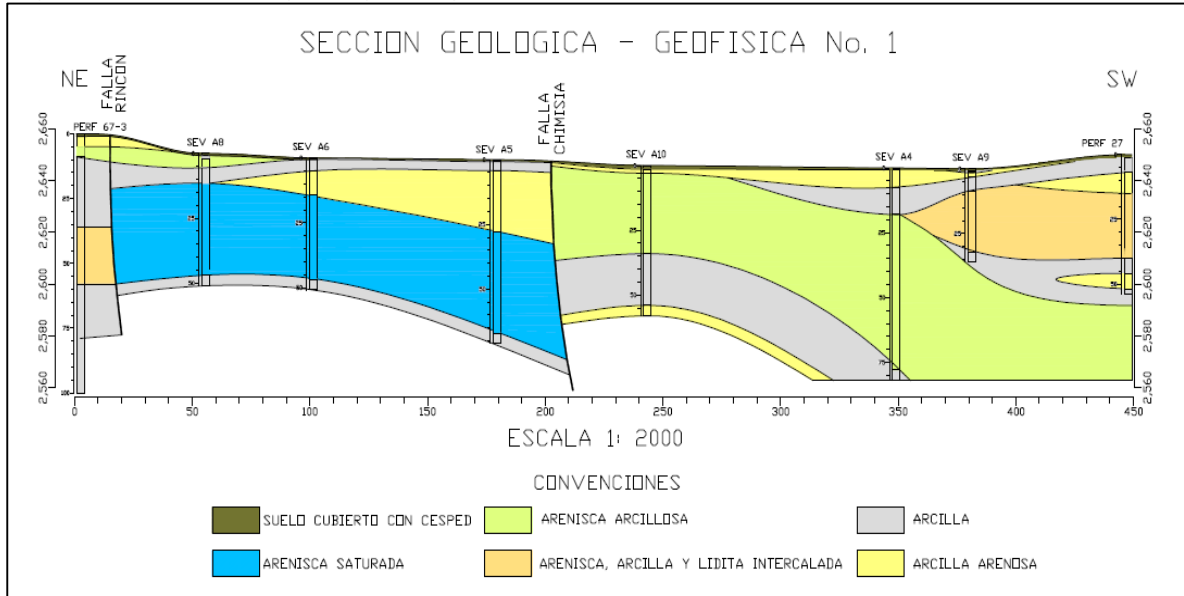
Fuente: Autores.

Con base en los SEV's interpretados, se realizaron 3 secciones geoelectricas, la primera en el valle de Chimisía y las dos restantes en el Sector Quebrada El Sotá (Figura 29). A partir de las secciones geoelectricas se generaron las respectivas secciones geológicas – geofísicas.

#### 7.1.1.1. Sección geológica - geofísica 1.

En esta sección se detectó el contacto entre la Formación Arenisca Dura y Formación Plaeners, la presencia de un deposito cuaternario y la presencia de dos fallas: Falla Chimisía y Falla Rincón, a partir de los datos obtenidos de los SEV's A8, A6, A5, A10, A4, A9 y las perforaciones 67-3 y #27, en dirección Noreste – Suroeste. Se interpretó una sucesión de areniscas y algunas intercalaciones de arcillas, los valores de resistividades entre 200 – 300 ohm/m determinados se pueden asociar a la presencia de areniscas saturadas que evidencian la presencia de un acuífero con un espesor de 20m a 30m. Este perfil es de gran expectativa para la extracción de aguas subterráneas (Figura 30).

Figura 30. Sección geológica - geofísica No. 1.



Fuente: Autor.

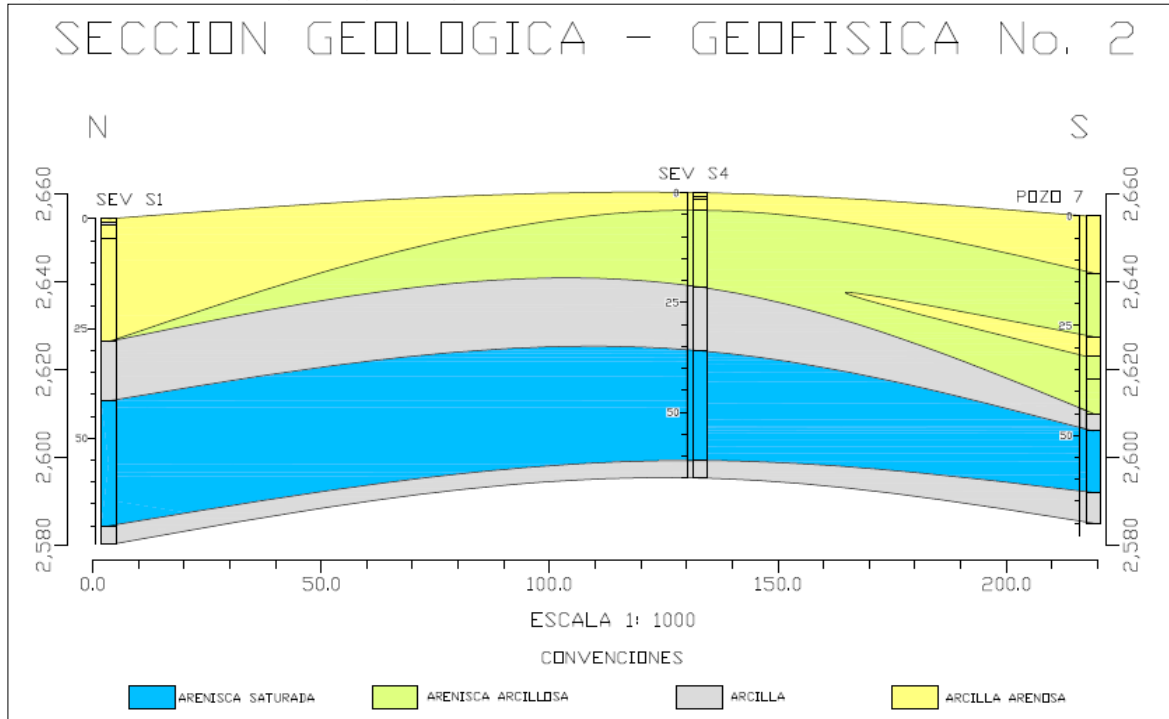
### 7.1.1.2. Sección geológica - geofísica 2.

Esta sección se desarrolló a partir de los SEV's S1, S4 y la columna estratigráfica del Pozo 7 en dirección Norte - Sur. En esta sección se puede apreciar la litología de la Formación Arenisca Dura que corresponde a areniscas de grano medio a grueso, arenisca arcillosa y areniscas saturadas con delgadas intercalaciones de arcilla. De esta sección se puede inferir que el domo salino presente en la formación Chipaque a una profundidad de 160m se puede ver afectado por la presencia de capas permeables como las areniscas saturadas de la Formación Arenisca Dura, que podrían generar infiltraciones y disolución del mismo, puesto que la zona es muy fallada (Figura 31).

### 7.1.1.3. Sección geológica - geofísica 3.

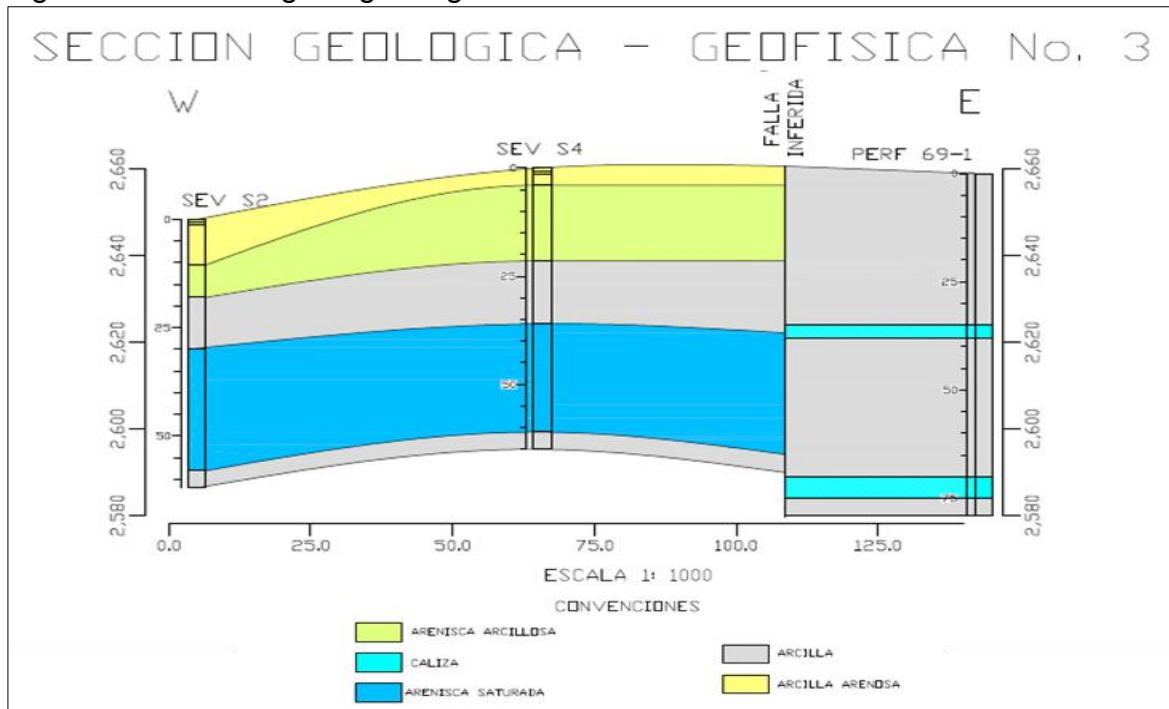
Se realizó a partir de los SEV's S2, S4 y la perforación No 69 – 1 en dirección Oeste - Este. En esta sección se puede apreciar la existencia de una falla de tipo inverso que pone en contacto los estratos arcillosos y calcáreos de la formación Chipaque con las areniscas saturadas y areniscas arcillosas de la Formación Arenisca Dura. Esta falla también puede estar afectando la continuidad del domo salino ya que en la perforación exploratoria No. 69 – 1 con una profundidad de 135 m no encontró presencia de halita y no presenta relación a la litología de la perforación del pozo 7 (Figura 32).

Figura 31. Sección geológica - geofísica No. 2



Fuente: Autor.

Figura 32. Sección geológica - geofísica No. 3



Fuente: Autor.



## **7.2. REGISTRO ELÉCTRICO DE POZO**

La empresa Colsalminas Ltda cuenta con el registro eléctrico del pozo de producción de salmuera No 7, realizado por INDEPENDENCE DRILLING S.A. en el año 2006, así como la caracterización de muestras cada 10 m y descripción de muestras corazonadas a profundidades de 177.31m, 272.40m y 390m con una longitud de 1m, consignados en el Informe Final de Obra del Contrato Estatal No. 077 de 2006 realizado por la firma ARTURO LIZARAZO & CIA LTDA.

El registro eléctrico de este pozo esta conformado por los registros de potencial espontáneo, resistencia de punto sencillo, resistencia lateral, registro de resistividad normal corta y normal larga, además del registro de rayos gamma.

A partir de este registro eléctrico se establecieron algunas características geoelectricas de las rocas perforadas y se desarrolló la columna estratigráfica del pozo con la ayuda de la caracterización de las muestras tomadas cada 10m y las muestras corazonadas. El registro eléctrico y la columna estratigráfica obtenida, sirvieron de apoyo para el análisis de los Sondeos Electricos Verticales y la elaboración de las secciones geológicas – geofísicas descritas anteriormente.

### **7.2.1. Interpretación**

Para la interpretación del registro de pozo, este se dividió en siete secciones dependiendo de la respuesta de las formaciones a los diferentes registros aplicados. Los registros evaluados fueron los de rayos gamma, potencial espontáneo, y resistividad normal, pues mostraban las lecturas más continuas y representativas del registro.

El registro eléctrico de pozo y la columna estratigráfica obtenida se muestran en el Anexo D.

#### **7.2.1.1. Sección 1**

(Profundidad 0 – 32m). Se observa el contacto entre depósito cuaternario y la Formación Arenisca Dura a una profundidad de 13m aproximadamente. El registro de potencial espontáneo muestra una deflexión hacia la izquierda debido a que La Formación Arenisca Dura presenta buena porosidad y permeabilidad. El registro de rayos gamma alcanza lecturas de hasta 50 CPS debido a la presencia de arcilla en la formación. El registro de resistividad muestra cambios bruscos en las lecturas debido a la combinación de litologías.



#### **7.2.1.2. Sección 2.**

(Profundidad 32 – 63 m). Formación Arenisca Dura. El registro de potencial espontáneo alcanza la línea de las arenas exhibiendo la buena porosidad y permeabilidad de la formación. El registro de rayos gamma no muestra mayor cambio de valores, encontrándose en el rango de 25 a 35 CPS evidenciando un mayor contenido de arenas con presencia de pirita y algunos minerales pesados. Los valores de resistividad disminuyen notablemente a una profundidad de 32m debido al cambio de roca seca a saturada. A continuación se observa que los valores de resistividad se salen de la gráfica, encontrándose fuera del rango de 0 – 250 ohm/m, indicando una alta resistividad en areniscas.

#### **7.2.1.3. Sección 3.**

(Profundidad 63 – 130 m). Segmento D de la Formación Chipaque. El registro de potencial espontáneo presenta variaciones desde la línea base de las arcillas hasta la línea base de las arenas debido a la intercalación de limolitas, arcillas y areniscas. El registro de rayos gamma muestra variación de lecturas pasando de valores de 10 a 60 CPS debido a la intercalación de litologías. Los valores de resistividad se encuentran fuera del rango de 0 – 250 ohm/m.

#### **7.2.1.4. Sección 4.**

(Profundidad 130 – 165 m). Presencia de dolomita y primera manifestación de halita a los 145m. El registro de potencial espontáneo tiende a alcanzar la línea base de las arenas debido a la porosidad secundaria de la dolomita. En este mismo punto la lectura de rayos gamma alcanza valores de 40 CPS en presencia de dolomita y de 5 – 10 CPS en presencia de halita. Los valores de resistividad se encuentran fuera del rango de 0 – 250 ohm/m, ya que tanto la halita como la dolomita presentan resistividades mayores a este rango.

#### **7.2.1.5. Sección 5.**

(Profundidad 165 – 212 m). Inicio del Domo salino. Los valores de potencial espontáneo comienzan a disminuir hasta alcanzar la línea base de las arcillas. El registro de rayos gamma presenta valores bajos del orden de 5 a 10 CPS, debido a la presencia de sal. Los valores de resistividad se encuentran fuera del rango de 0 – 250 ohm/m, ya que la sal gema o halita presenta un grado de pureza superior al 90% y por ende presenta resistividades muy altas.

#### **7.2.1.6. Sección 6.**

(Profundidad 212 – 552 m). En los primeros 8m de esta sección el registro de potencial espontáneo presenta una deflexión hacia la derecha alcanzando la línea de las arenas, esto debido a que hay una zona de fractura que representa un





aumento en la porosidad de la formación. En este mismo punto el registro de resistividad vuelve a aparecer en el rango de 0 a 250 ohm/m, presentando una reducción en la resistividad de la formación. Tanto el registro de rayos gamma como el de resistividad exhiben anomalías cuando en la formación se presenta intercalaciones de arcilla. Las intercalaciones de lutita en ocasiones alcanzan los 15m de espesor.

#### **7.2.1.7. Sección 7.**

(Profundidad 552 – 672 m). En esta sección, el registro de potencial espontáneo, muestra una deflexión pasando de derecha a izquierda debido a que el agua de la formación se hace mayor a la del lodo. Los registros de resistividad presentan deflexiones cuando en el domo salino se presenta intercalaciones de arcillas o arenas. El registro de rayos gamma también muestra anomalías, aumentando su lectura cuando se presentan intercalaciones de arcilla. Las intercalaciones de arena y arcilla no sobrepasan los 5m de espesor.

La longitud total de la perforación es de 672 m. A partir de la interpretación del registro eléctrico se puede concluir que las litologías perforadas corresponden al Cuaternario Coluvial con un espesor de 13 m, Formación Arenisca Dura con un espesor de 50 m y el segmento D de la Formación Chipaque con un espesor de 67m. El domo salino se encuentra a una profundidad de 165m dentro del segmento C de la Formación Chipaque, con un espesor perforado de 507m, donde conserva su continuidad y por tal razón no se puede conocer su espesor total.

## 8. HIDROLOGÍA

La hidrología es el estudio del agua en todas las zonas de la tierra, incluyendo su existencia, movimiento, distribución e interacción con el medio ambiente y los organismos vivos. Su tema central de estudio es el ciclo hidrológico así como sus diferentes componentes (precipitación, evapotranspiración, escorrentía e infiltración) y la variación espacio temporal de los mismos a diferentes escalas.

La principal herramienta de desarrollo de la hidrología es el balance hídrico, ya que permite cuantificar las componentes del ciclo hidrológico en un lugar y tiempo determinado.

### 8.1. CARACTERIZACIÓN HIDROLÓGICA

Para realizar la caracterización hidrológica de la zona se procedió a definir la cuenca, subcuenca o microcuenca presente y calcular los respectivos parámetros morfométricos. También se evaluaron los diferentes parámetros hidrometeorológicos que inciden en el ciclo hidrológico.

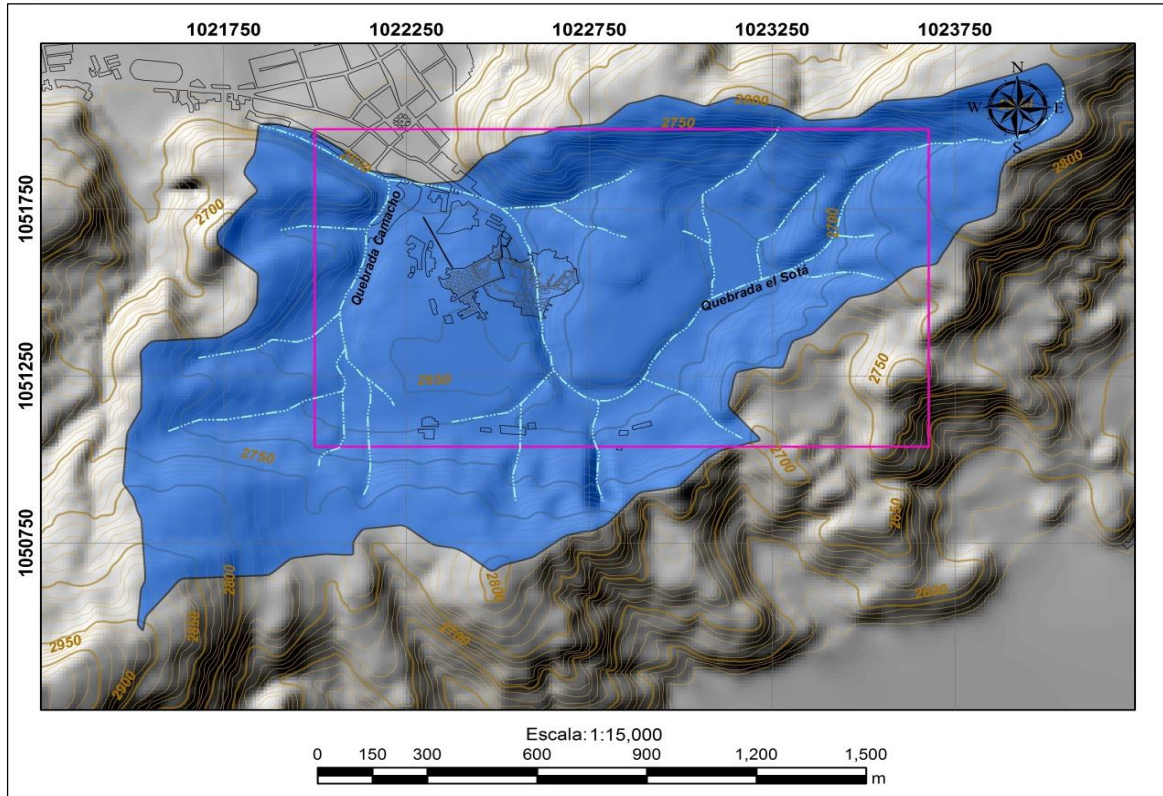
#### 8.1.1. Delimitación de cuencas

La delimitación de cuencas se realizó en el software ARCGIS 10.2.1, empleando el modelo digital de elevación DEM y la herramienta Hydrology. Este procedimiento se efectuó a partir de los puntos más elevados de la topografía que generalmente corresponden a los puntos de divisorias de aguas, donde se entiende que el movimiento del agua superficial y sub-superficial drena hacia un mismo punto y no hay más aportes de agua de zonas cercanas.

Como resultado se tiene que la zona de estudio se encuentra en inmediaciones de la microcuenca Quebrada el Sotá. Esta microcuenca cubre un 75% del Polígono de concesión y el flujo preferencial de agua se da en dirección sureste - noroeste (Figura 33).

La Quebrada El Sotá desemboca en el Río Checua y pertenece a la Subcuenca Río Neusa. Nace en el Sector de La Moya a una altura de 2905 m.s.n.m. y su cota de salida es de 2583 m.s.n.m. Esta quebrada atraviesa el polígono de concesión y pasa por encima de las labores mineras, siendo una posible fuente de infiltración. Es un drenaje de tipo intermitente al igual que sus tributarios, que genera escasez en épocas de sequía e inundaciones en épocas de alta precipitación.

Figura 33. Delimitación de la Microcuenca Quebrada el Sotá.



Fuente: Autor.

### 8.1.1.1. Análisis morfométrico

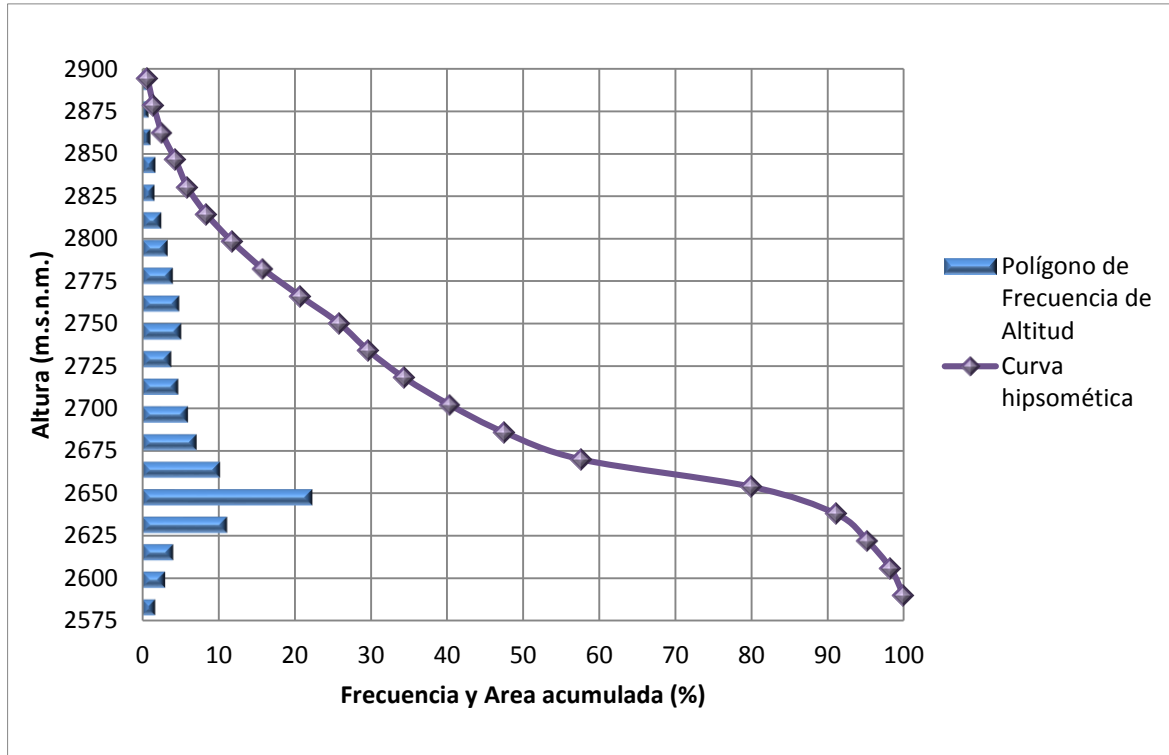
Para entender mejor el comportamiento hidrológico de la microcuenca se hallaron los diferentes parámetros morfométricos como tiempo de concentración, coeficiente de forma, índice de compacidad, pendiente media, curva hipsométrica, entre otros. Los resultados se presentan en la Figura 34 y Tabla 14.

La curva Hipsométrica indica que la Microcuenca Quebrada El Sotá es una microcuenca con valles moderadamente extensos y cumbres escarpadas, donde la mayor parte del área de la cuenca se encuentra por debajo de los 2675 m.s.n.m. y la altura más frecuente es de 2653.8 m.s.n.m. Además tiene un potencial erosivo moderado a alto y está en fase de juventud.

Según los parámetros morfométricos determinados se establece que la Microcuenca Quebrada El Sotá es una microcuenca pequeña, con una longitud de cauce corto y con buena densidad de drenaje. Su pendiente media indica que es una microcuenca montañosa con susceptibilidad a la erosión. Tiene una forma oval redonda a oval oblonga, además su tiempo de concentración es muy bajo lo cual incide en el alto índice de concentración de agua escorrentía, generando

mayor susceptibilidad a crecidas. El tipo de suelo y cobertura vegetal juegan un papel importante en cuanto a la retención de la lluvia y la infiltración.

Figura 34. Curva hipsométrica y Frecuencia de altitudes Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.

Tabla 14. Parámetros Morfométricos Microcuenca Quebrada el Sotá.

Parámetro	Unidad	Valor
Área	Km <sup>2</sup>	2.27
Perímetro	Km	8
Cota máxima	m.s.n.m.	2905.35
Cota de salida	m.s.n.m.	2583.22
Longitud mayor	Km	3.32
Longitud menor	Km	0.68
X centroide	m	1022676.9
Y centroide	m	1051378.4
Z centroide	m.s.n.m.	2741.5
Diferencia de Alturas	m	322.1
Elevación media	m.s.n.m.	2681.2
Elevación más frecuente	m.s.n.m.	2653.8
Pendiente media de la cuenca	%	11.73
Índice de compacidad de Gravelius	Un	1.5
Coefficiente de forma	Un	0.2
Orden del cauce principal	Un	4

...Continuación tabla14.

Parámetro	Unidad	Valor
Longitud del cauce principal	Km	3.1
Altura máxima del cauce principal	m.s.n.m.	2881.16
Altura mínima del cauce principal	m.s.n.m.	2582.62
Pendiente media del cauce principal	m/m	0.096
Densidad de drenaje	km/km <sup>2</sup>	4.13
Densidad de corriente	Un	12.33
Longitud Total de la red hídrica	km	9.37
Tiempo de concentración (Kirprich y CHPW)	Horas	0.39

Fuente: Autor.

### 8.1.2. Parámetros hidrometeorológicos

Para el cálculo de los parámetros hidrometeorológicos de la microcuenca se seleccionaron las estaciones hidrometeorológicas cercanas a la zona de estudio y subcuencas vecinas que permitieran obtener cada una de las variables del ciclo hidrológico con mayor grado de confiabilidad, dando mayor importancia a las estaciones cercanas a la zona de estudio por ser consideradas como representativas (Tabla 15 y Figura 35). Se solicitó la serie histórica de cada estación activa o suspendida con el fin de homogenizar los datos.

Tabla 15. Estaciones Hidrometeorológicas cercanas al área de estudio.

Código	Tipo	Estación	Municipio	Este	Norte	Altura	Entidad
2120693	ME	COLOMBIANO EL	Sesquilé	1027456.00	1048030.00	2567	IDEAM
2120187	PG	BOMBAS SESQUILÉ	Sesquilé	1030081.73	1050803.06	2600	CAR
2120141	PM	ACANDY	Nemocón	1020073.78	1051361.76	2594	CAR
2120540	CP	CHÉCUA	Nemocón	1024347.18	1057279.30	2610	CAR
2401537	CO	REPRESA NEUSA	Tausa	1012190.10	1059626.14	3019	CAR
2120541	AU	REPRESA DEL NEUSA	Tausa	1012190.10	1059626.14	3019	CAR
2120167	PG	HOYO ARRIBA EL	Suesca	1028239.12	1060266.49	2899	CAR
2120095	PM	BARRANCAS	Suesca	1029608.58	1062896.49	2903	CAR
2120170	PG	LLANO EL	Suesca	1028056.17	1063427.28	2824	CAR
2120169	PG	LADERA GRANDE	Tausa	1025413.76	1063444.73	2583	CAR
2120138	PG	ENCANTO EL	Tausa	1020991.12	1063983.93	3173	CAR
2120633	CO	BARRANCAS	Tausa	1025361.05	1062513.97	2720	CAR
2120597	ME	HDA STA ANA	Nemocón	1023378.52	1053872.34	2572	IDEAM

Fuente: Autor.

Los parámetros solicitados fueron los de Precipitación media mensual, Evaporación media mensual, Temperatura media mensual, Humedad relativa media mensual, Brillo solar medio mensual, Velocidad y dirección del viento.

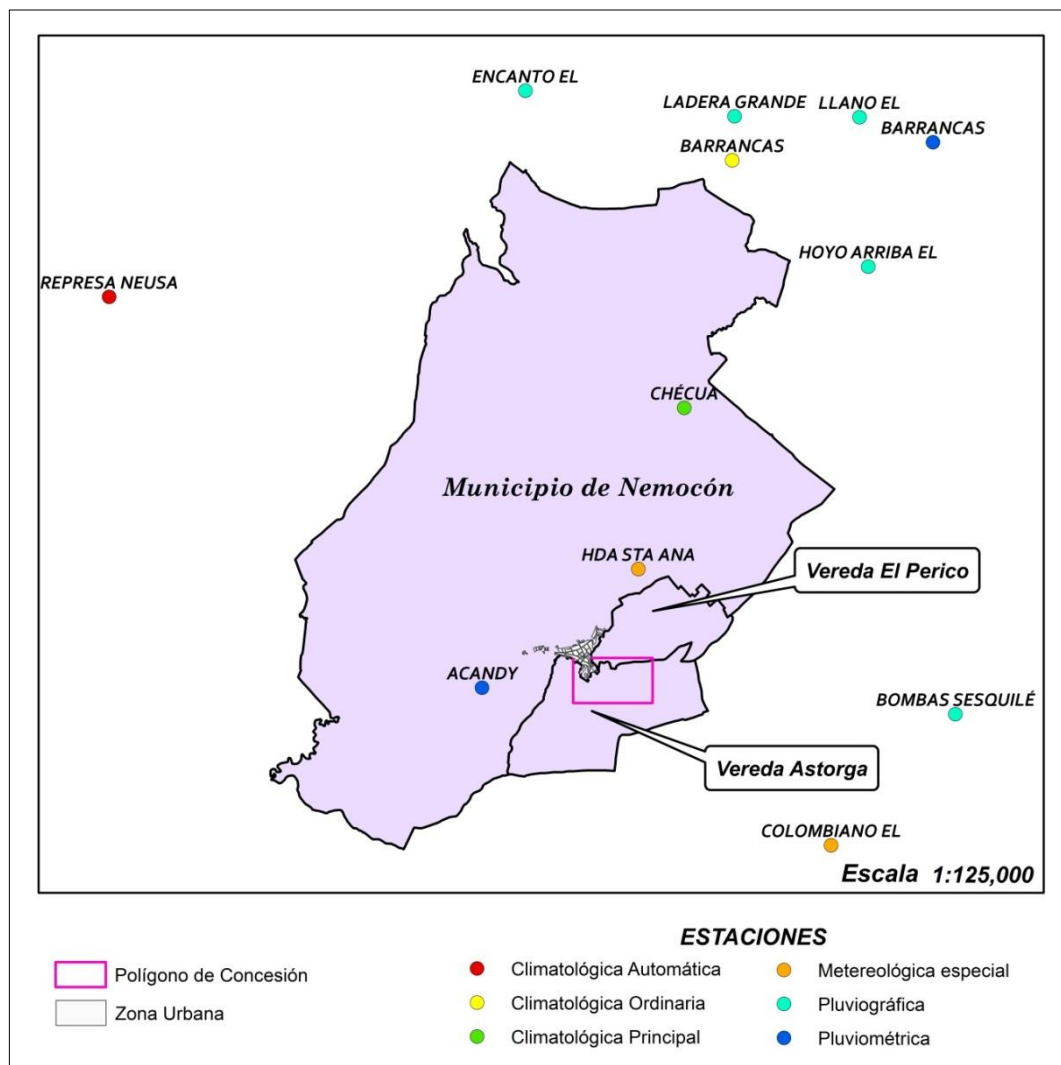
Una vez recopilada la información se procedió a verificar los valores medios mensuales y su valor medio o total multianual. Para la obtención de los valores



promedio representativos de las variables se tuvo en cuenta los años que contarán con información de al menos ocho meses, completando los meses faltantes con el valor promedio mensual histórico de la estación. Este procedimiento se hizo en base al estudio *Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca del río Bogotá Subcuenca del río Neusa – 2120-15*.<sup>5</sup>

Con los datos adquiridos y rectificadas de las estaciones, se halló cada uno de los parámetros empleando el software ARCGIS 10.2.1 y la herramienta de interpolación Spline.

Figura 35. Estaciones hidrometeorológicas del municipio de Nemocón y áreas cercanas.



Fuente: Autor.

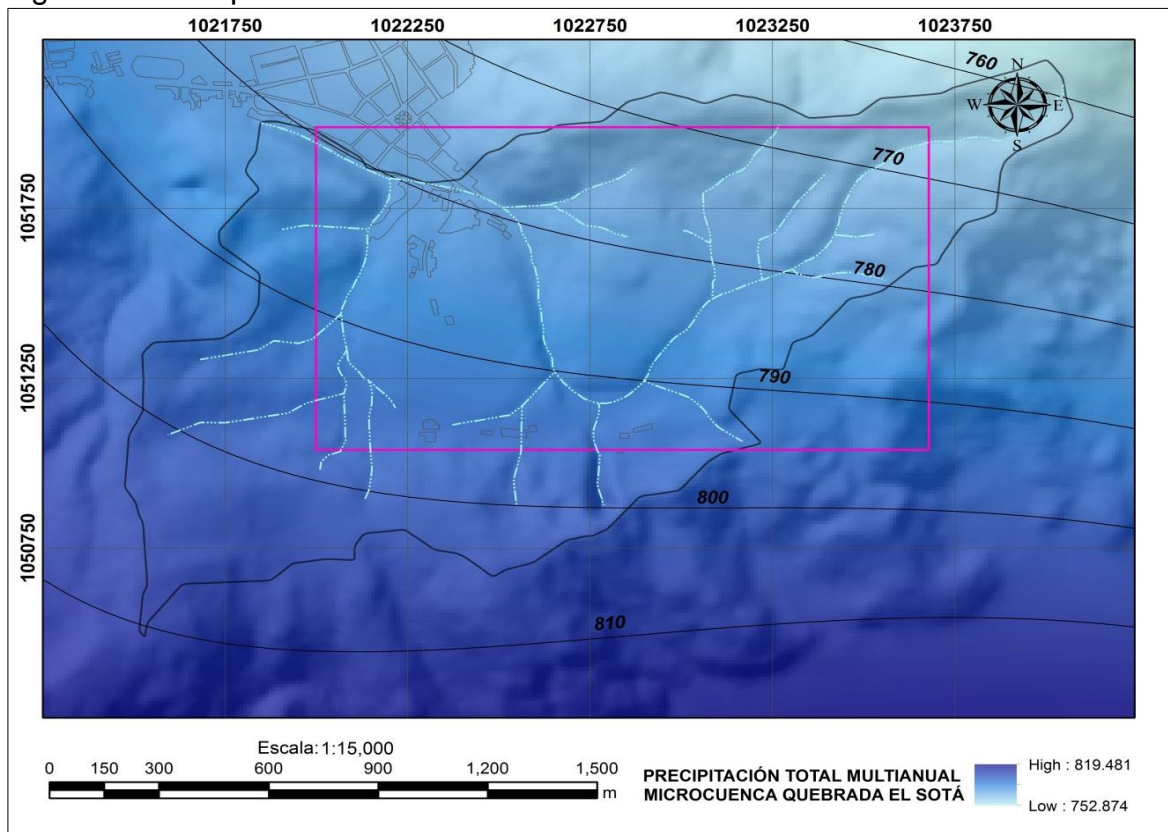
<sup>5</sup> *Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá. Subcuenca río Neusa – 2120-15. PDF. pp.36 - 37. Consultado en línea en: [www.car.gov.co](http://www.car.gov.co).*

### 8.1.2.1. Precipitación

Los valores de precipitación media mensual multianual y total para la microcuenca y el polígono de concesión se obtuvieron por el método de las isoyetas. Para la microcuenca se tienen valores de precipitación media mensual multianual de 65.5 mm/año y precipitación total multianual de 786.41 mm/año. El polígono de concesión presenta una precipitación media mensual multianual de 65.29 mm/año y una precipitación total multianual 783.7 mm/año.

Espacialmente, los valores de mayor precipitación se generan hacia la parte suroeste de la zona en el sector Buenavista, con valores de 800 a 819 mm/año, hacia la parte noreste en el sector de Chimisía y La Moya los valores fluctúan entre 752 y 780 mm/año, considerándose bajos (Figura 36).

Figura 36. Precipitación total multianual Microcuenca Quebrada El Sotá.

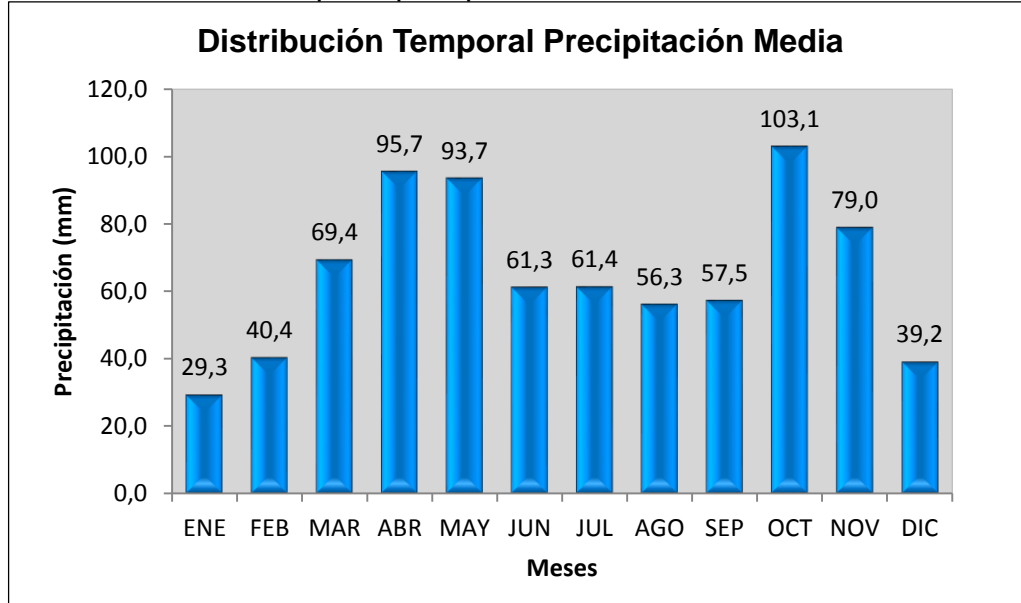


Fuente: Autor.

El régimen de lluvia en la microcuenca es de tipo bimodal, donde se demarca dos periodos secos, un periodo que inicia en el mes de Diciembre y va hasta finales de Febrero y otro que va desde Junio hasta finales de Septiembre donde el valor de precipitación más bajo se da en el mes de Enero con un promedio de 29.3 mm y el más alto se da en Octubre con un promedio de 103.1mm. Los periodos más

lluviosos son los de Marzo – Mayo y Octubre – Noviembre con el mayor valor de precipitación en el mes de Octubre (101.3 mm). (Figura 37).

Figura 37. Distribución temporal precipitación Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.

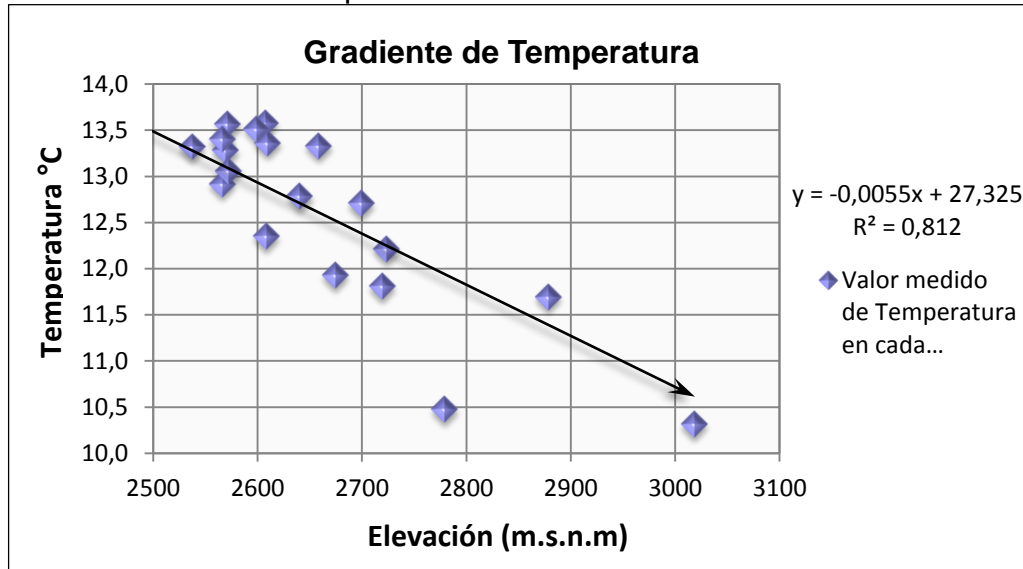
### 8.1.2.2. Temperatura

Esta variable es de gran importancia para la caracterización hidrológica de la microcuenca ya que influye de manera importante en el proceso de evapotranspiración.

Para la obtención del mapa de isotermas, se procedió a corregir los valores tomados en las estaciones hidrometeorológicas con respecto a la altura para obtener un gradiente de temperatura. Se determinó que el gradiente de temperatura varía en un valor de  $0.55^{\circ}\text{C}$  cada 100m (Figura 38).

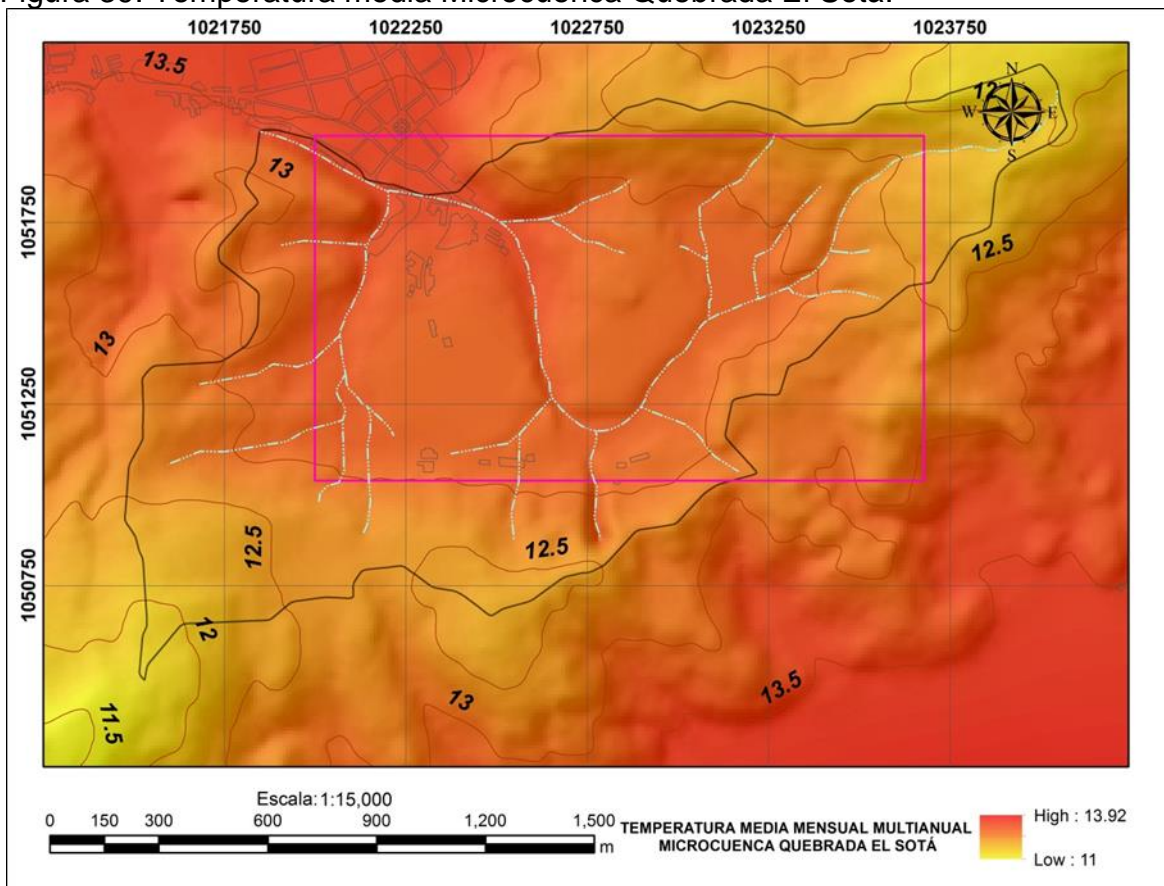
Debido a que la temperatura es inversamente proporcional a la altura, a mayor altitud las temperaturas serán más bajas; por tanto, las temperaturas más bajas se presentan en las partes alta de la zona. La temperatura varía entre  $11^{\circ}\text{C}$  a  $13.9^{\circ}\text{C}$ , presentándose los valores más bajos de temperatura en los meses de Junio y Julio, y los más altos en los meses de Septiembre y Noviembre (Figura 39).

Figura 38. Gradiente de Temperatura



Fuente: Autor.

Figura 39. Temperatura media Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.



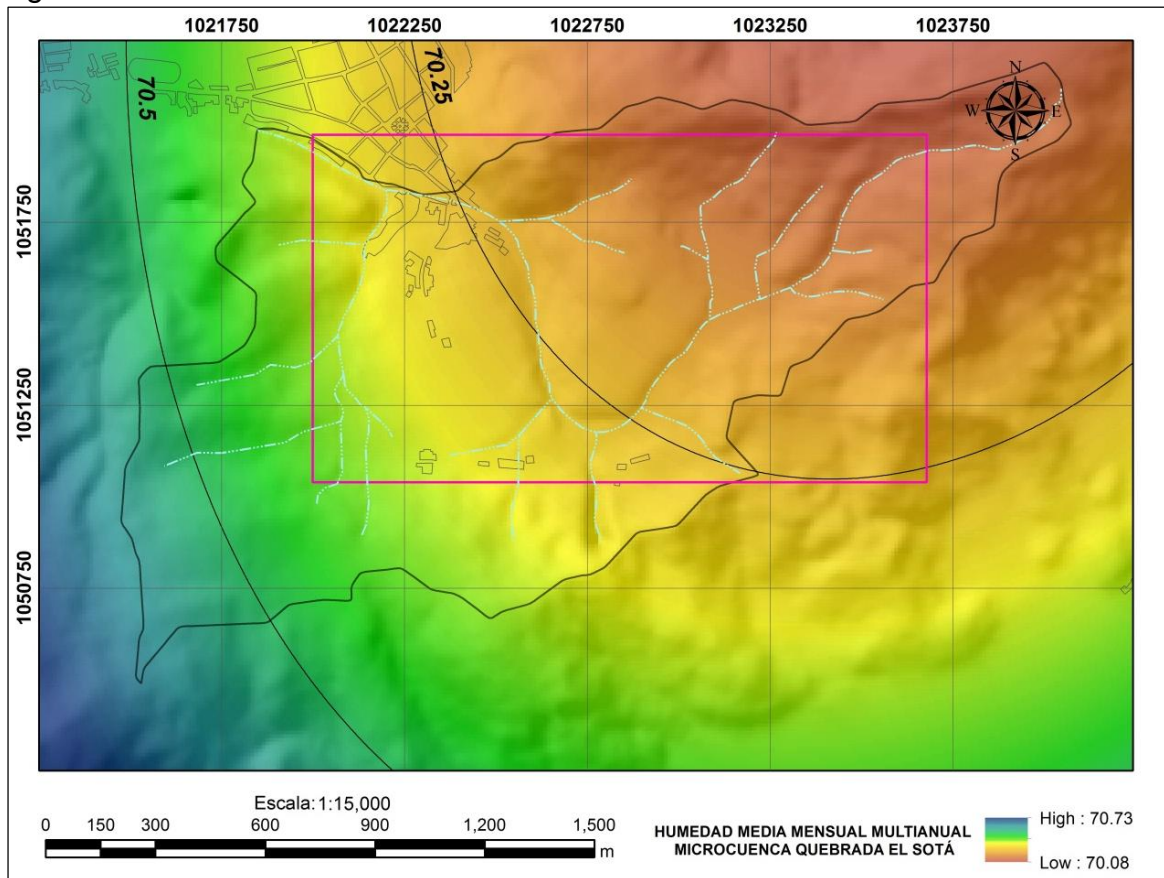
### 8.1.2.3. Humedad Relativa

La humedad atmosférica influye en la velocidad con que tiene lugar la evapotranspiración, ya que a mayor humedad la evapotranspiración será menor.

El porcentaje de humedad relativa en la microcuenca varía entre 70.08% y 70.73%, con un valor promedio de 70.28%, presentándose los valores más bajos hacia la parte noreste de la zona.

El porcentaje de humedad relativa más bajo se da en el mes Enero con un valor de 67.3% y los porcentajes más altos de humedad se presentan en los meses de Octubre y Noviembre con un valor promedio de 73.8%, coincidiendo así con los meses de menor y mayor precipitación y evapotranspiración, respectivamente.

Figura 40. Humedad Relativa Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.

### 8.1.2.4. Brillo solar

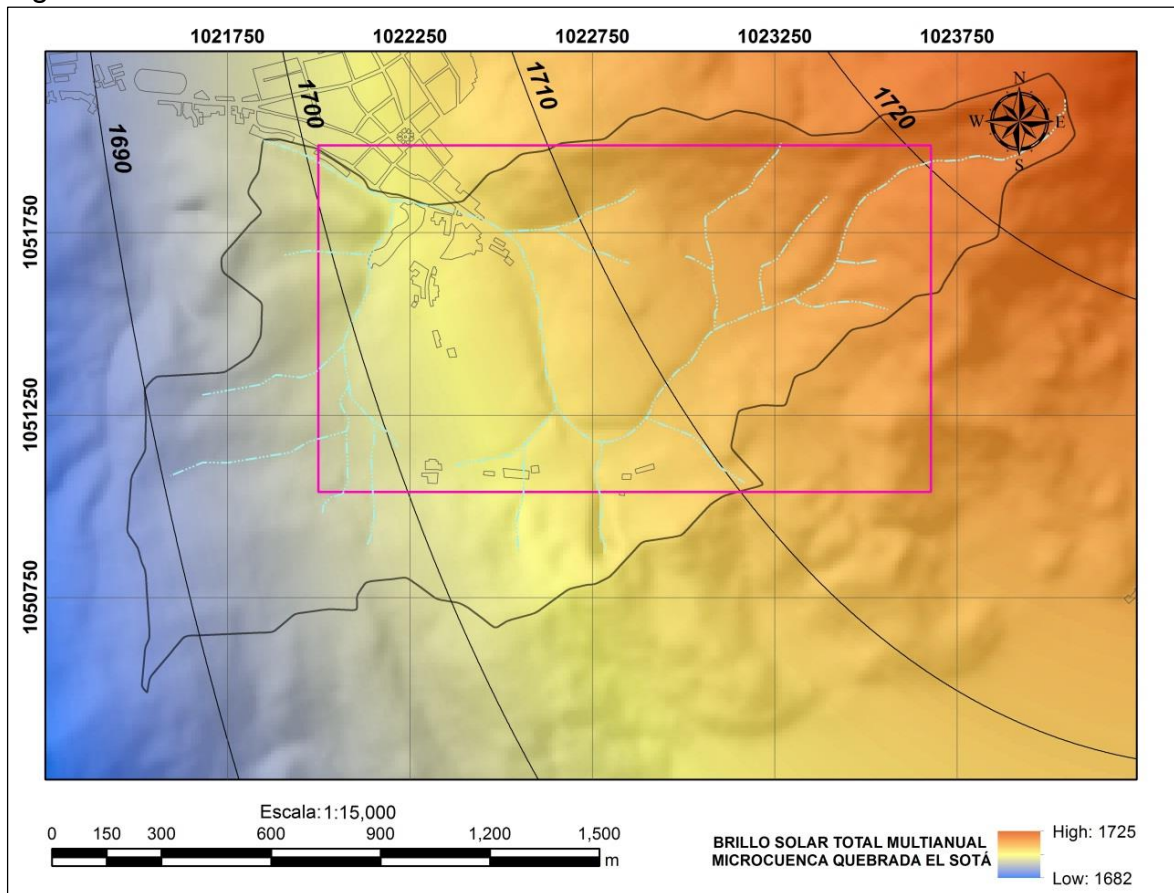
El mapa multianual de isohelias muestra un régimen de brillo solar con valores que oscilan entre 1682 y 1725 horas promedio, donde los mayores valores se



presentan en la parte noreste del área de estudio. El promedio mensual de horas de brillo solar para la microcuenca es de 142.69 horas.

La distribución temporal de horas de brillo solar es de tipo antimodal presentando los máximos valores de brillo solar para los meses de Diciembre, Enero y Febrero con valores de 157 a 190 horas, coincidiendo con el bajo régimen de lluvia de esta época; para los meses de Mayo, Junio y Julio los valores de brillo solar son mínimos con un valor promedio de 118 horas.

Figura 41. Brillo Solar Total Multianual Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.

### 8.1.2.5. Velocidad del viento

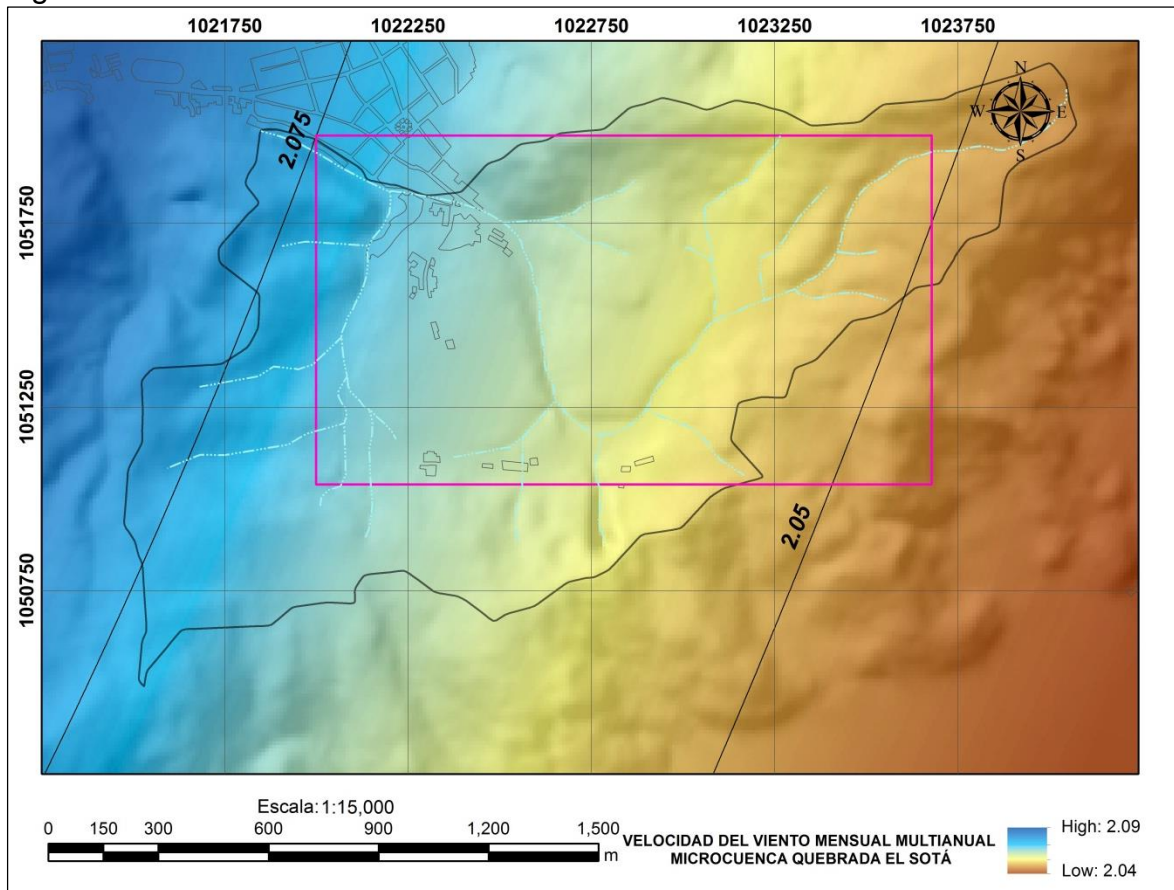
Esta variable tiene gran incidencia en el cálculo de la evapotranspiración ya que a medida que la velocidad del viento aumenta, también aumenta la evapotranspiración.

La velocidad media del viento en la microcuenca presenta una distribución de tipo monomodal a lo largo del año con valores alrededor de los 2 m/s, presentando los

valores más altos en los meses de Junio, Julio, Agosto y Septiembre, con un registro máximo en el mes de Julio de 2.3 m/s. Los valores más bajos, se observan en los meses de Octubre, Noviembre y Diciembre, con un registro mínimo de 1.83 m/s en el mes de Noviembre. El valor promedio anual es de 2.062 m/s.

La dirección predominante del viento es este, a lo largo de todos los meses del año.

Figura 42. Velocidad del Viento Microcuenca Quebrada El Sotá.



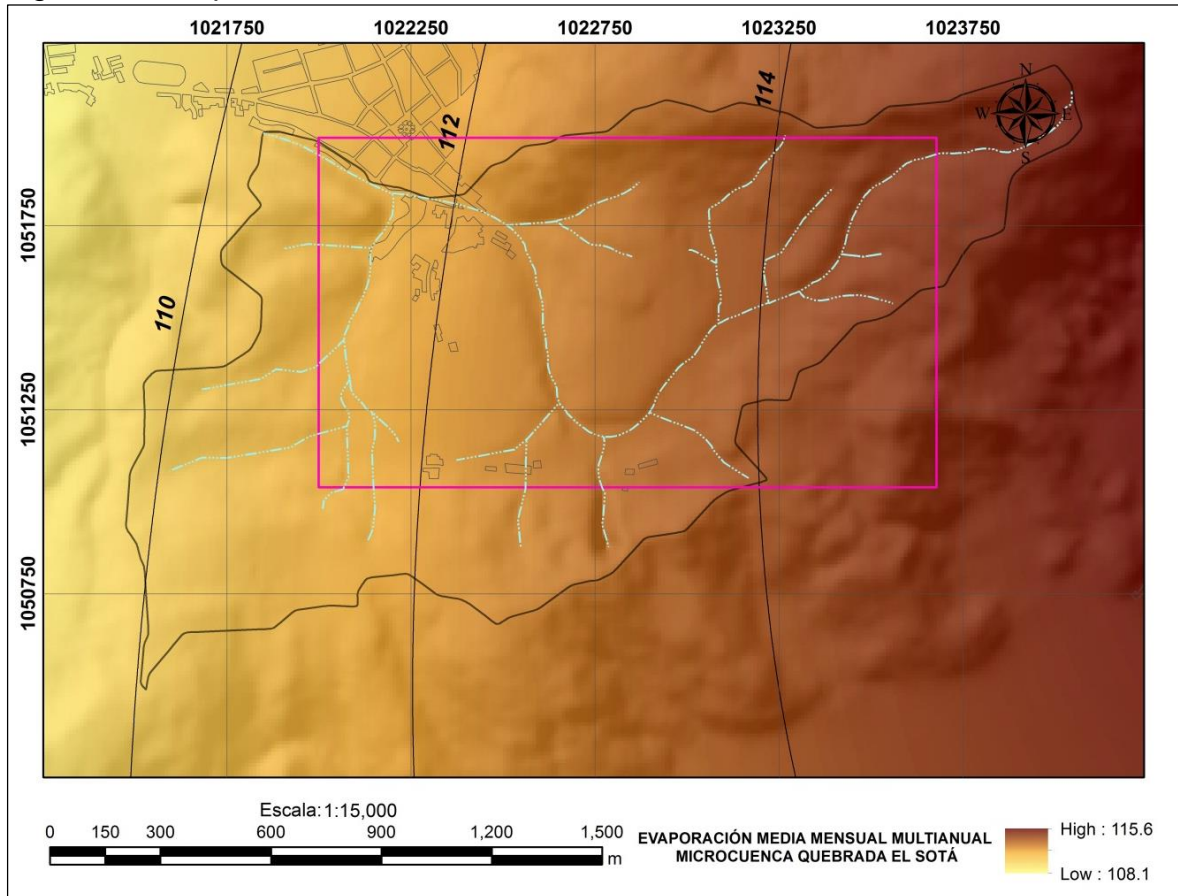
Fuente: Autor.

### 8.1.2.6. Evaporación

Son varios los factores que condicionan el proceso de evaporación, los más importante son la radiación solar, la temperatura y velocidad del viento que inciden positivamente en el proceso. El proceso de evaporación permite que el agua ascienda a la atmosfera en forma de vapor.

El mapa de Isolíneas de evaporación muestra que en los sectores de mayor incidencia de brillo solar y vientos más fuertes y rápidos, la evaporación es mayor. Los evaporación media mensual oscila entre 108.1 a 115.6 mm, con un valor promedio de 112.59 mm. La evaporación total multianual de 1351.08 mm.

Figura 43. Evaporación media mensual Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.

### 8.1.2.7. Evapotranspiración

La evapotranspiración es un componente muy importante en el ciclo hidrológico pues mide las pérdidas de agua generadas por evaporación y transpiración desde una superficie de suelo.

El cálculo de la evapotranspiración potencial y real para la microcuenca se realizó por el método de Hargreaves Ec. (3) y Ec. (4). El uso de este método se debe a que emplea mayor número de variables que otros métodos, permite calcular la ETR directamente a partir de la ETP y en varios estudios hechos en el Departamento de Cundinamarca, resulta ser una de las técnicas que estima con mayor exactitud la evapotranspiración.

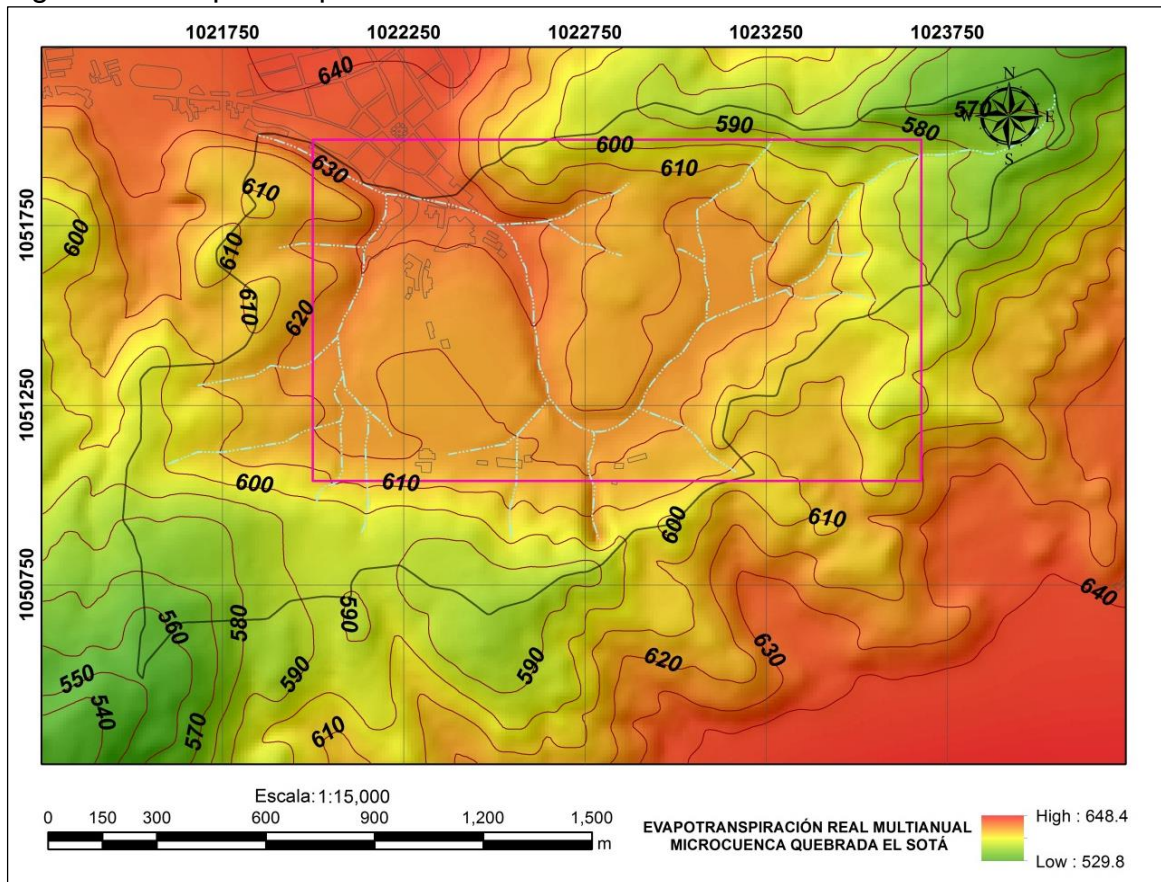


Para el cálculo de la Evapotranspiración real  $E_c$  (4), el valor de  $K$  se tomó como 0.66, que es el promedio de valores  $K_c$  para los tipos de coberturas predominantes en la microcuenca como lo son bosques, cultivos, pastos limpios y enmalezados (Figura 4).

Los valores de  $K_c$  son valores medios típicos que se pueden esperar bajo condiciones climáticas estándar, las cuales son definidas como aquellas correspondientes a climas subhúmedos, con una humedad relativa mínima diaria de 45% y con velocidades del viento bajas a moderadas, con un promedio de 2 m/s (que es el caso de la Microcuenca Quebrada El Sotá).<sup>6</sup>

Los resultados del cálculo de ETP y ETR por el método de Hargreaves, al igual que una figura comparativa de la ETP calculada por diferentes métodos, se muestran en el Anexo E.

Figura 44. Evapotranspiración Real Microcuenca Quebrada El Sotá.



Fuente: Autor.

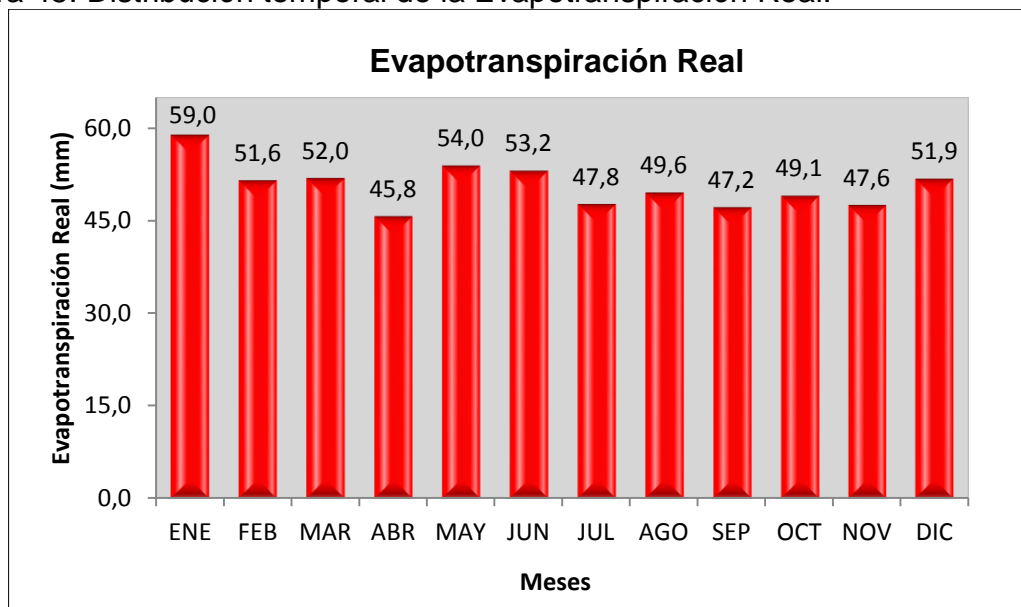
<sup>6</sup> ALLEN, Richard. PEREIRA, Luis. RAES, Dirk. SMITH, Martin. Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Pág. 109 – 114. PDF. Consultado en línea en <http://www.fao.org/3/a-x0490s/x0490s02>.

Espacialmente, la mayor evapotranspiración se da en las zonas con menor altitud, es decir, hacia la parte central de la microcuenca, y los valores más bajos se dan en los extremos noreste y suroeste ya que son los puntos con mayor elevación, donde hay mayor precipitación, menor temperatura y menor velocidad de viento.

La evapotranspiración real multianual para la microcuenca presenta un valor total medio de 608.62 mm, con valores que oscilan entre 529.8 y 648.4 mm/año.

La distribución temporal de la evapotranspiración real es uniforme, los valores más bajos se presentan en los meses de Abril y Septiembre y los más altos en los meses de Enero y Mayo.

Figura 45. Distribución temporal de la Evapotranspiración Real.



Fuente: Autor.

### 8.1.2.8. Escorrentía

La escorrentía es el agua procedente de la lluvia que se forma cuando las precipitaciones superan la capacidad de infiltración del suelo. Este parámetro depende de las condiciones de humedad del suelo, así como el tipo de práctica con la que se cultiva, la pendiente del terreno, y la condición hidrológica del mismo.

El cálculo de la escorrentía fue realizado por el método de Número de Curva Ec. (9) y Ec. (10), desarrollado por el Soil Conservation Service SGS de los Estados Unidos, hoy llamado Natural Resources Conservation Service NRCS que se emplea generalmente en pequeñas cuencas donde no se cuenta con información

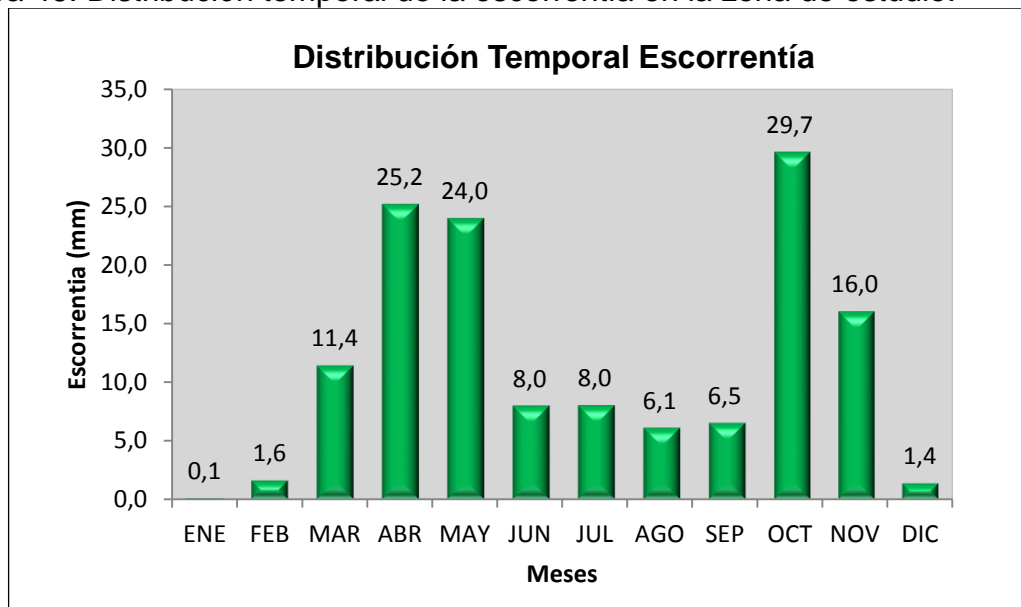


de caudales que permita hallar la escorrentía directamente, como es el caso de la Microcuenca Quebrada El Sotá.

El valor estimado de escorrentía total para la Microcuenca Quebrada El Sotá es de 138.11mm/año, con un promedio mensual de 11.51mm. El cálculo de este parámetro se puede observar en el Anexo F.

La distribución temporal de la escorrentía es de tipo bimodal, donde los valores más altos se presentan en los meses de Abril, Mayo, Octubre y Noviembre, concordando con los meses de mayor precipitación. El valor más bajo de escorrentía se presenta en el mes de Enero donde tiende a cero debido a que es el mes más seco del año.

Figura 46. Distribución temporal de la escorrentía en la zona de estudio.



Fuente: Autor.

## 8.2. BALANCE HÍDRICO

El Balance hídrico fue empleado para hallar la cantidad de agua de recarga en la microcuenca que sería almacenada en las diferentes formaciones acuíferas y que podría causar problemas de infiltración en las labores mineras.

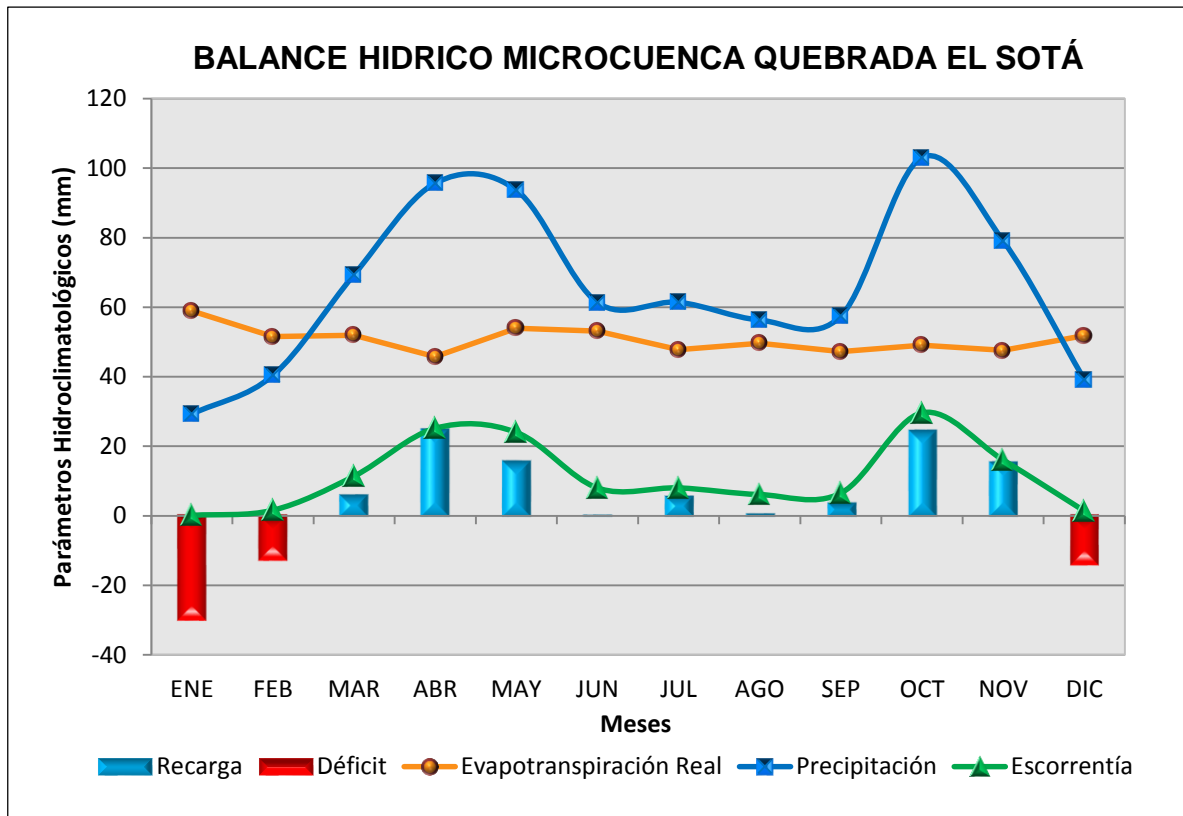
La fórmula utilizada para calcular la recarga fue la ecuación general del balance hídrico Ec (11). Los valores obtenidos se muestran en la Tabla 16 y Figura 47.

Tabla 16. Cálculo del Balance Hídrico para la Microcuenca.

<b>BALANCE HIDRICO MICROCUENCA QUEBRADA EL SOTÁ</b>													
PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
<b>PM</b>	29.3	40.4	69.4	95.7	93.7	61.3	61.4	56.3	57.5	103.1	79.0	39.2	786.4
<b>ETR</b>	59.0	51.6	52.0	45.8	54.0	53.2	47.8	49.6	47.2	49.1	47.6	51.9	608.6
<b>ESC</b>	0.1	1.6	11.4	25.2	24.0	8.0	8.0	6.1	6.5	29.7	16.0	1.4	138.1
<b>DIF</b>	-29.8	-12.8	6.0	24.7	15.7	0.2	5.6	0.6	3.7	24.4	15.4	-14.1	39.7
<b>DEFICIT</b>	29.8	12.8										14.1	56.6
<b>RECARGA</b>			6.0	24.7	15.7	0.2	5.6	0.6	3.7	24.4	15.4		96.3

Fuente: Autor.

Figura 47. Balance Hídrico.



Fuente: Autores.

Como el balance hídrico da positivo, se puede afirmar que la microcuenca en general no presenta problemas de abastecimiento de agua. Los meses con déficit de agua son Diciembre, Enero y Febrero, ya que en estos meses la evapotranspiración es mayor que la precipitación.

Los mayores índices de escorrentía se presentan en los meses de Abril y Octubre, coincidiendo con los meses de mayor precipitación y crecidas en la Quebrada El Sotá. Las crecidas de esta quebrada generan algunas inundaciones en el casco



*Modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Nemocón,  
contrato de concesión HIQO – 01*

---



urbano del municipio de Nemocón y en algunas zonas de la microcuenca, además influyen directamente en el problema de infiltración de las labores mineras.

La microcuenca se recarga en los meses de Marzo a Noviembre con un total de volumen de recarga de 218.402 m<sup>3</sup> /año, que se traduce en un caudal de recarga de 0.0069 m<sup>3</sup>/seg.

Las zonas de recarga de los acuíferos, se dan en las partes altas de las montañas debido a la disposición de los estratos, presencia de fallas y gran superficie de afloramiento de las formaciones.



## 9. HIDROGEOQUÍMICA

La hidrogeoquímica es la combinación de la química, geología y biología, aplicada al estudio del origen, evolución y los procesos de cambio de composición del agua subterránea y superficial relacionados con el ciclo hidrológico y la hidrogeología.

Esta herramienta además de que ayuda a determinar la calidad del agua para diferentes usos, también puede proporcionar información al modelo hidrogeológico como localización de zonas de recarga y descarga, dirección de flujo subterráneo, mezclas e interconexiones de agua de diferente origen o diferentes acuíferos y ocurrencias de aguas termales y minerales.

### 9.1. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOQUÍMICA DE LA ZONA

Para realizar la caracterización química de las aguas subterráneas de la zona, se recolectaron 10 muestras de agua tomadas en distintos tipos de captaciones y litologías.

El criterio principal para la elección de los puntos de muestreo fue el tomar muestras distribuidas en todas las unidades geológicas de la zona cercanas al domo salino para establecer las principales características fisicoquímicas del agua en cada formación y así tratar de establecer de donde proviene el agua de infiltración que está afectando las labores mineras de los niveles Santa Isabel y Santa Úrsula, pertenecientes a la mina de sal de Nemocón.

De las 10 muestras de agua tomadas, 2 corresponden a aguas subterráneas de infiltración localizadas en las labores mineras del yacimiento, 2 son de manantiales de aguas subterráneas termales pertenecientes a la Formación Arenisca Labor – Tierna, 3 fueron tomadas en manantiales de las Formaciones Arenisca Dura y Plaeners, y las 3 muestras de agua restantes, fueron tomadas en pozos pertenecientes a depósitos cuaternarios coluviales y las Formaciones Arenisca Dura y Plaeners.

Los sitios de muestreo seleccionados se presentan en la Tabla 17 y la Figura 48.

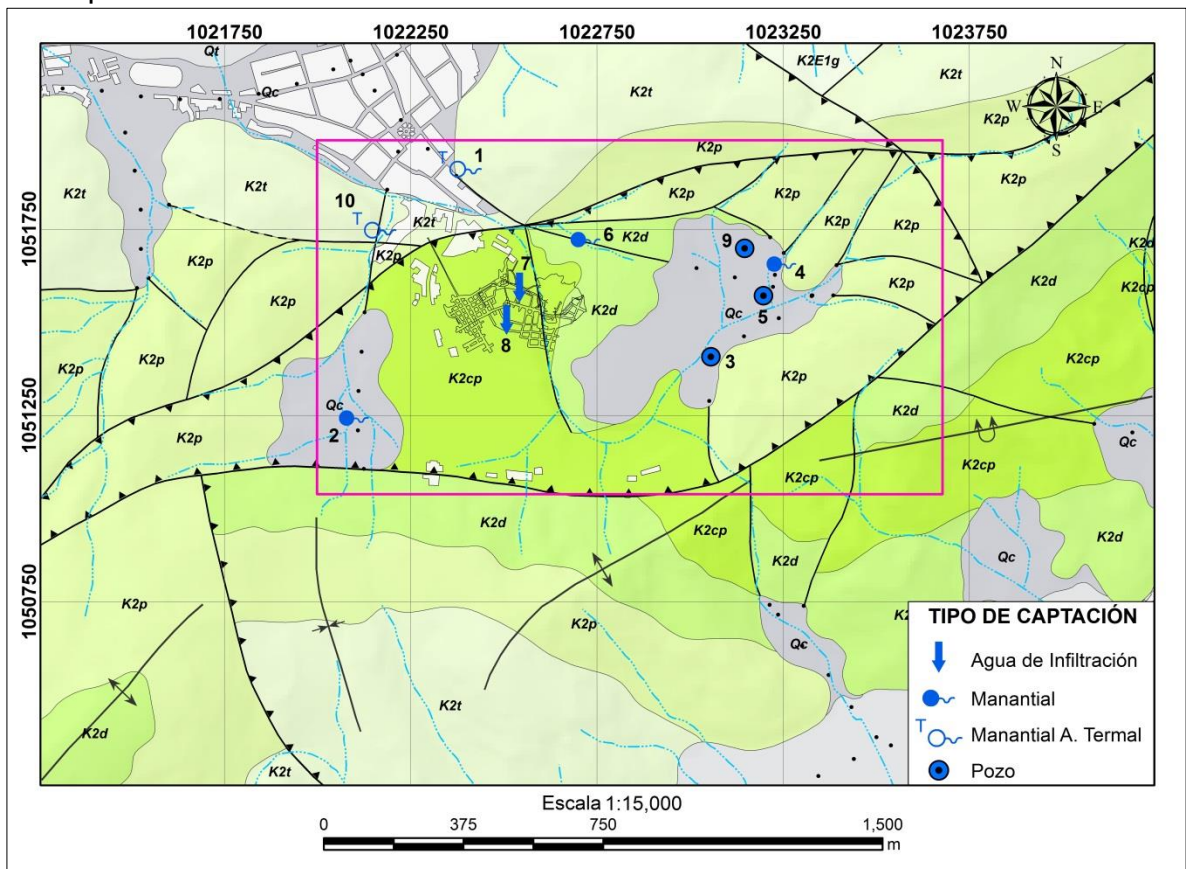
Para realizar el muestreo del agua subterránea y garantizar su preservación y posterior manejo, se siguieron las normas técnicas colombianas NTC-ISO 5667-11 “Guía para el muestreo de aguas subterráneas” y NTC-ISO 5667-3 “Directrices para la conservación y el manejo de muestras”.

Tabla 17. Coordenadas puntos de muestreo de agua subterránea para análisis Físicoquímico.

No.	Estación	Este	Norte	Altura	Captación	Geología
1	Manantial Con Galerías	1022377	1051924	2591.4	Agua Termal	F. Labor-Tierna
2	Manantial Tanques Camacho	1022098	1051244	2634.17	Manantial	F. Plaeners
3	Pozo 4	1023056	1051408	2641.31	Pozo	Cuaternario
4	Manantial Q. El Sotá	1023246	1051657	2655.55	Manantial	F. Plaeners
5	Pozo 5	1023197	1051572	2646.9	Pozo	F. Plaeners
6	Manantial Circulares	1022720	1051723	2635.24	Manantial	F. Arenisca Dura
7	Inclinado El Infierno	1022543	1051593	2560	A. Infiltración	F. Chipaque (sal)
8	Inclinado Santa Isabel	1022508	1051506	2567	A. Infiltración	F. Chipaque (sal)
9	Pozo 0	1023200	1051600	2643.66	Pozo	F. Arenisca Dura
10	Manantial Sector A. Caliente	1022148	1051760	2632.11	Agua Termal	F. Labor-Tierna

Fuente: Autor.

Figura 48. Localización puntos de muestreo de agua subterránea para análisis físicoquímico.



Fuente: Autor.

Se emplearon recipientes de polietileno de 2.000ml previamente higienizados, para la realización de todos los análisis físicoquímicos. Estos recipientes fueron



debidamente rotulados, indicando el nombre, número y coordenadas de la estación, así como fecha y hora de la toma de la muestra. Posteriormente, los recipientes fueron llevados al laboratorio de aguas de la UPTC para realizar los respectivos análisis.

Figura 49. Recolección de muestras de agua en superficie y zonas de infiltración en labores mineras.



Fuente: Autor.

El análisis de laboratorio consistió en determinar las propiedades fisicoquímicas (pH, temperatura, dureza, sólidos totales disueltos), realizar un análisis completo de Iones (Cationes: Potasio, Sodio, Calcio, Magnesio, Estroncio, Litio; Aniones: Cloruros, Fluoruros, Sulfuros, Amonio, Nitratos, Nitritos, Sulfatos, Carbonatos, Bicarbonatos, Anhídrido carbónico, Hidróxidos) y metales (Hierro, Níquel, Cobalto, Zinc) presentes en el agua.

Figura 50. Desarrollo de análisis fisicoquímico en el laboratorio de aguas UPTC.



Fuente: Datos de estudio.

Los resultados de los parámetros obtenidos en laboratorio se muestran en el Anexo G.

### 9.1.1. Evaluación de los resultados químicos

Para determinar si los análisis químicos efectuados son fiables, se debe realizar la ecuación de balance iónico Ec (15), para establecer si la muestra de agua es eléctricamente neutra. Esta ecuación mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en meq/L, obtenidos en laboratorio para la muestra de agua.

$$\text{Error (\%)} = \frac{[\Sigma\text{cationes} - \Sigma\text{aniones}]}{[\Sigma\text{cationes} + \Sigma\text{aniones}]} * 100 \quad \text{Ec (15)}$$

Un error de balance iónico aceptable para determinar la calidad de los análisis químicos según Nordstrom et al. (2008) debe ser menor a  $< \pm 20 \%$ . Cuando el balance iónico arroja un porcentaje de error inadmisibles, se puede concluir que existe algún tipo de interferencia química en la muestra o se puede concluir simplemente, que la determinación de cationes y aniones es errónea y por tanto el análisis debe ser excluido.

Tabla 18. Error de Balance Iónico.

No. Muestra	Nombre	Error de Balance Iónico (%)
1	Manantial Con Galerías	+9%
2	Tanques Camacho	-7%
3	Pozo 4	-31%
4	Manantial Quebrada El Sotá	+9%
5	Pozo 5	-3%
6	Manantial Tanques Circulares	-15%
7	Inclinado El Infierno	-43%
8	Inclinado Santa Isabel	-33%
9	Pozo 0	+7%
10	Manantial Sector Agua Caliente	0%

Fuente: Autor.

La mayoría de las muestras presentan un error de balance iónico aceptable, a excepción de las muestras 3, 7 y 8. Este error se da debido a que el carácter ácido de las muestras tiende a generar alta concentración de aniones, además estas muestras presentan gran concentración de sedimentos. Se ha decidido emplear todos los resultados de las muestras de agua para la ejecución del proyecto.

### 9.1.2. Características impartidas por litología

En general, para la zona de estudio, las características específicas del agua subterránea están asociadas a tres tipos principales de litología: Areniscas, arcillas y arcillas con contenido de evaporitas. Para estos tres tipos de litología se tiene que:

- Las aguas provenientes de areniscas se caracterizan por presentar baja salinidad, tener mayor concentración de Bicarbonato, concentraciones de Sodio, Calcio y Magnesio en cantidades similares y presentar buen sabor.
- Las aguas provenientes de rocas arcillosas se caracterizan por presentar alta salinidad, sabor pobre, ser ocasionalmente no potables y tener mayores concentraciones de Cloruro.
- Las aguas procedentes de rocas arcillosas con concentraciones de evaporíticas presentan alta salinidad, cuando están asociadas a yeso, el anión dominante es el Sulfato y el catión dominante es el Calcio seguido por el Sodio y el Magnesio; cuando están asociadas a halita, el anión dominante es el Cloruro y el catión dominante es el Sodio. En general, no son potables y su sabor es amargo.

### 9.1.3. Concentración de metales en el agua subterránea

Como constituyentes importantes de muchas aguas subterráneas se puede encontrar un número importante de metales, que en la mayoría de los casos aparecen como trazas.

En la zona de estudio, en las aguas de infiltración de las labores subterráneas, es común encontrar grandes cantidades de óxido de hierro que le dan un color pardo rojizo a las paredes de los machones, es por ello que resulta conveniente medir las concentraciones de este metal en las muestras de agua recolectadas, para establecer el posible origen de este elemento y determinar así la naturaleza de las aguas de infiltración.

Con el hierro, también se midió la concentración de los metales Níquel, Cobalto y Zinc. Los valores de concentración de estos metales se muestran en la Tabla 19.

Como resultado se tiene que la muestra 9 es la única que exhibe contenido de Níquel, esto se debe a que es un pozo de extracción de agua en funcionamiento que presenta un grado moderado de sobreexplotación.

Las muestras 4 y 10 presentan concentraciones de Cobalto apreciables, donde la mayor concentración se da en la muestra 10 debido a que es un agua termal de tipo mineral.

Los valores de Zinc se encuentran relacionados a la presencia de Hierro en el agua y aunque generalmente se asocian a problemas de contaminación, la presencia en la zona se debe a la acumulación de elementos pesados en las formaciones.

Tabla 19. Concentración de metales en el agua subterránea.

No. Muestra	Estación	Concentración (mg/L)				
		Ni	Zn	Co	Fe	Total
1	Manantial Con Galerías	0	13.7	0	11.22	24.88
2	Tanques Camacho	0	238.5	0	58.28	296.77
3	Pozo 4	0	0	0	0	0
4	Manantial Quebrada El Sotá	0	0	2.9	4.17	7.07
5	Pozo 5	0	170.2	0	39.03	209.26
6	Manantial Tanques Circulares	0	24.9	0	39.9	64.88
7	Inclinado El Infierno	0	37762.6	0	1512.8	39275.38
8	Inclinado Santa Isabel	0	36756.9	0	1545.3	38301.27
9	Pozo 0	16.03	0	0	36.1	52.13
10	Manantial Sector Agua Caliente	0	291.3	103.97	88.1	483.33

Fuente: Autor.

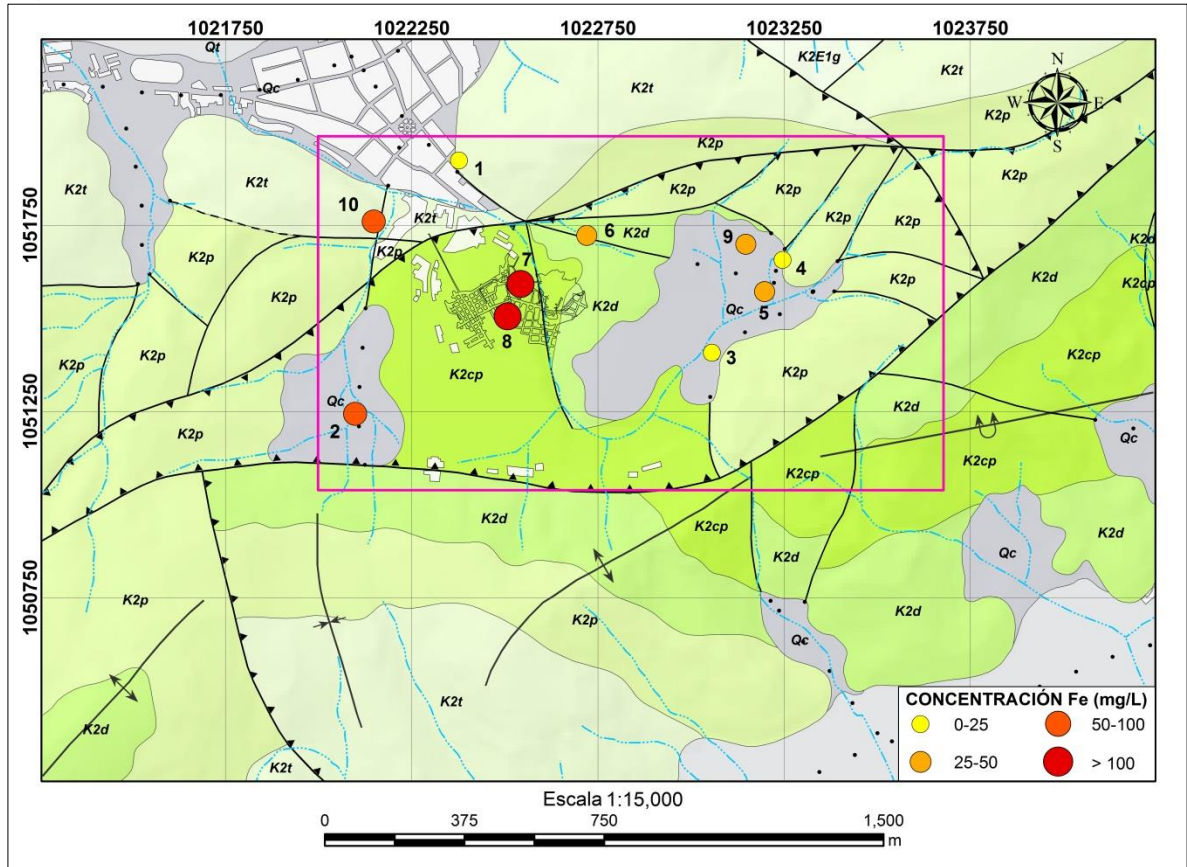
En determinadas circunstancias, la presencia de Hierro en las aguas subterráneas es indicadora de la combinación de condiciones reductoras y oxidantes en el acuífero, que causan la alteración de minerales ferromagnesianos y la oxidación de sulfuros de hierro (pirita).

Esto podría explicar la alta presencia de hierro en todas las muestras de agua, ya que las formaciones de donde proviene el agua en la zona, contienen pirita, minerales ferromagnesianos, además presentan acumulaciones de hierro en diaclasas y planos de estratificación y también se observan concreciones del mismo. Estas características se dan especialmente en las formaciones Chipaque, Arenisca Dura, y en menor proporción, en la Formación Plaeners.

Debido a que la Formación Chipaque, la cual contiene el yacimiento salino, presenta altas concentraciones de hierro en sus estratos al igual que la Formación Arenisca Dura, que se encuentra ubicada sobre la Formación Chipaque, se puede concluir que el agua de infiltración proviene de estas formaciones, en especial de la Formación Arenisca Dura, y a medida que el agua viaja por las rocas en condiciones reductoras y oxidantes, se va enriqueciendo de este metal hasta llegar a las labores mineras inundadas donde se presentan las mayores concentraciones.



Figura 51. Variación en la concentración de hierro para la zona de estudio.



Fuente: Autor.

## 9.2. CLASIFICACIÓN DEL AGUA SUBTERRANEA

### 9.2.1. Clasificación por pH

Los valores de pH obtenidos en las muestras de agua son de tipo ácido y neutro, donde el valor menor de pH es de 3.55 y el más alto es de 7.15 (Tabla 20).

Los valores de pH más bajos pertenecen a las muestras de agua tomadas en manantiales y en pozos donde es poco el tiempo de recorrido del agua. También se identificaron pH ácidos en las aguas de infiltración de las labores mineras, debido a que estas aguas no presentan un tiempo de residencia considerablemente alto y parte de esta agua proviene de infiltración de la Quebrada El Sotá en época de lluvias, tiempo en el que se tomaron las muestras.

Las muestras de agua 1 y 10, ubicadas en la Formación Arenisca Labor – Tierna, presentan valores de pH cercanos a 7 asociados a la presencia de bicarbonato



como uno de los iones mayoritarios. Las muestras de agua 2 y 5, presentan valores de pH ligeramente superiores a 7, esto debido a que se ubican en acuitardos donde el tiempo de residencia del agua es mayor, además han sucedido procesos de disolución de silicatos, que a su vez han consumido acidez, convirtiéndolas en aguas neutras.

Tabla 20. Clasificación por pH de las muestras de agua.

No. Muestra	Nombre	pH	Tipo de Agua
1	Manantial Con Galerías	6.99	Neutra
2	Tanques Camacho	7.15	Neutra
3	Pozo 4	3.55	Ácida
4	Manantial Quebrada El Sotá	5.49	Ácida
5	Pozo 5	7.06	Neutra
6	Manantial Tanques Circulares	6.7	Neutra
7	Inclinado El Infierno	6.08	Ácida
8	Inclinado Santa Isabel	5.99	Ácida
9	Pozo 0	5.3	Ácida
10	Manantial Sector Agua Caliente	6.79	Neutra

Fuente: Autor.

### 9.2.2. Clasificación por Dureza

Para la clasificación de agua por dureza, se empleó el criterio de clasificación de Romero, Jairo (2009) detallado en la tabla 21.

Tabla 21. Clasificación del agua por dureza.

Dureza como CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	Interpretación
0-75	Blanda
75-200	Moderadamente Dura
200-300	Dura
> 300	Muy Dura

Fuente: Romero, Jairo. 2002.

En la zona de estudio se presentan aguas blandas, moderadamente duras y muy duras (Tabla 22).

Las aguas blandas se encuentran próximas a las zonas de recarga, por lo que presentan poca concentración de iones que contribuyen a la dureza del agua. A medida que aumenta el tiempo de residencia del agua en las rocas, estas se vuelven más duras pues captan más iones de Calcio y Magnesio, así como Sulfatos y Cloruros que influyen directamente en el aumento de la dureza.

Las aguas de infiltración de las labores mineras presentan valores muy elevados de dureza debido a la alta concentración de iones de Calcio, Magnesio, Cloruros y

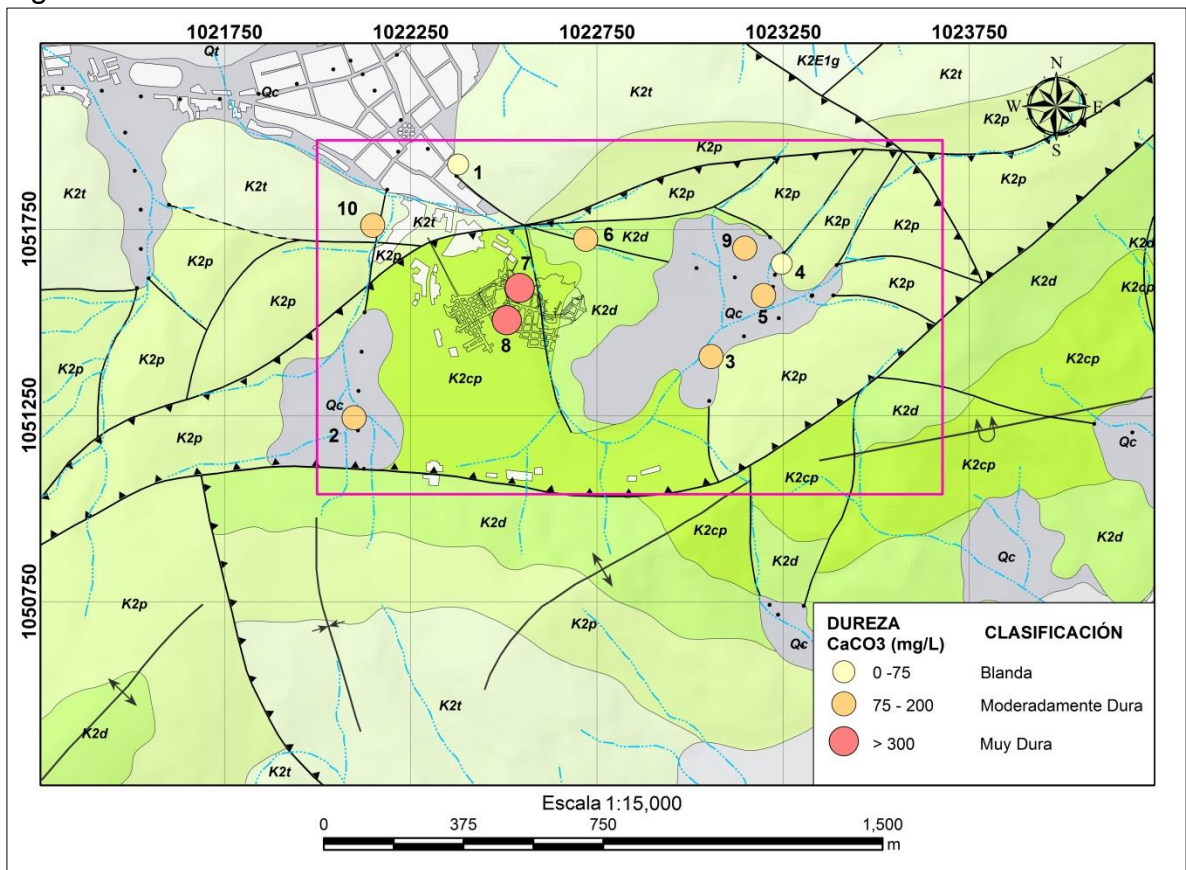
Sulfatos, además de Hierro. Su alta dureza ocasiona problemas de incrustabilidad en las tuberías de extracción de salmuera.

Tabla 22. Clasificación por dureza de las muestras de agua según Romero, Jairo. 2002.

No. de Muestra	Nombre	Dureza CaCO <sub>3</sub> (mg/L)	Clasificación
1	Manantial Con Galerías	42.7	Blanda
2	Tanques Camacho	190.1	Moderadamente dura
3	Pozo 4	199.1	Moderadamente dura
4	Manantial Quebrada El Sotá	14.0	Blanda
5	Pozo 5	138.7	Moderadamente dura
6	Manantial Tanques Circulares	124.5	Moderadamente dura
7	Inclinado El Infierno	4650.9	Muy Dura
8	Inclinado Santa Isabel	6186.4	Muy Dura
9	Pozo 0	124.5	Moderadamente dura
10	Manantial Sector Agua Caliente	110.5	Moderadamente dura

Fuente: Autor.

Figura 52. Variación de la dureza en la zona de estudio.



Fuente: Autor.

### 9.2.3. Clasificación por contenido de Sólidos totales disueltos

El agua se puede clasificar a partir de los sólidos totales disueltos que permitirán determinar el grado de salinidad. La categorización de salinidad del agua subterránea por TDS para la zona de estudio se realizó a partir de la clasificación propuesta por Freeze & Cherry (1979).

Tabla 23. Clasificación del Agua subterránea basada en los Sólidos Totales Disueltos.

Sólidos Totales Disueltos (mg/L)	Clasificación
< 500	Agua potable
500 - 1,000	Agua dulce
1,000 - 10,000	Agua salobre
10,000 - 100,000	Agua salina
> 100,000	Salmuera
35,000	Agua de Mar

Fuente: Adaptado de Freeze & Cherry, 1979

Como los valores de TDS obtenidos en laboratorio arrojaban valores muy elevados, estos se consideraron poco confiables y los TDS utilizados para la clasificación del agua se obtuvieron a partir de la suma de todos los iones presentes.

Tabla 24. Clasificación por TDS de las muestras de agua según Freeze & Cherry, 1979.

No. de Muestra	Nombre	TDS (mg/L)	Clasificación
1	Manantial Con Galerías	120.25	Agua potable
2	Tanques Camacho	1239.2	Agua salobre
3	Pozo 4	790	Agua dulce
4	Manantial Quebrada El Sotá	33.346	Agua potable
5	Pozo 5	900.01	Agua dulce
6	Manantial Tanques Circulares	405.58	Agua potable
7	Inclinado El Infierno	224820	Salmuera
8	Inclinado Santa Isabel	205080	Salmuera
9	Pozo 0	253	Agua potable
10	Manantial Sector Agua Caliente	1000	Agua salobre

Fuente: Autor.

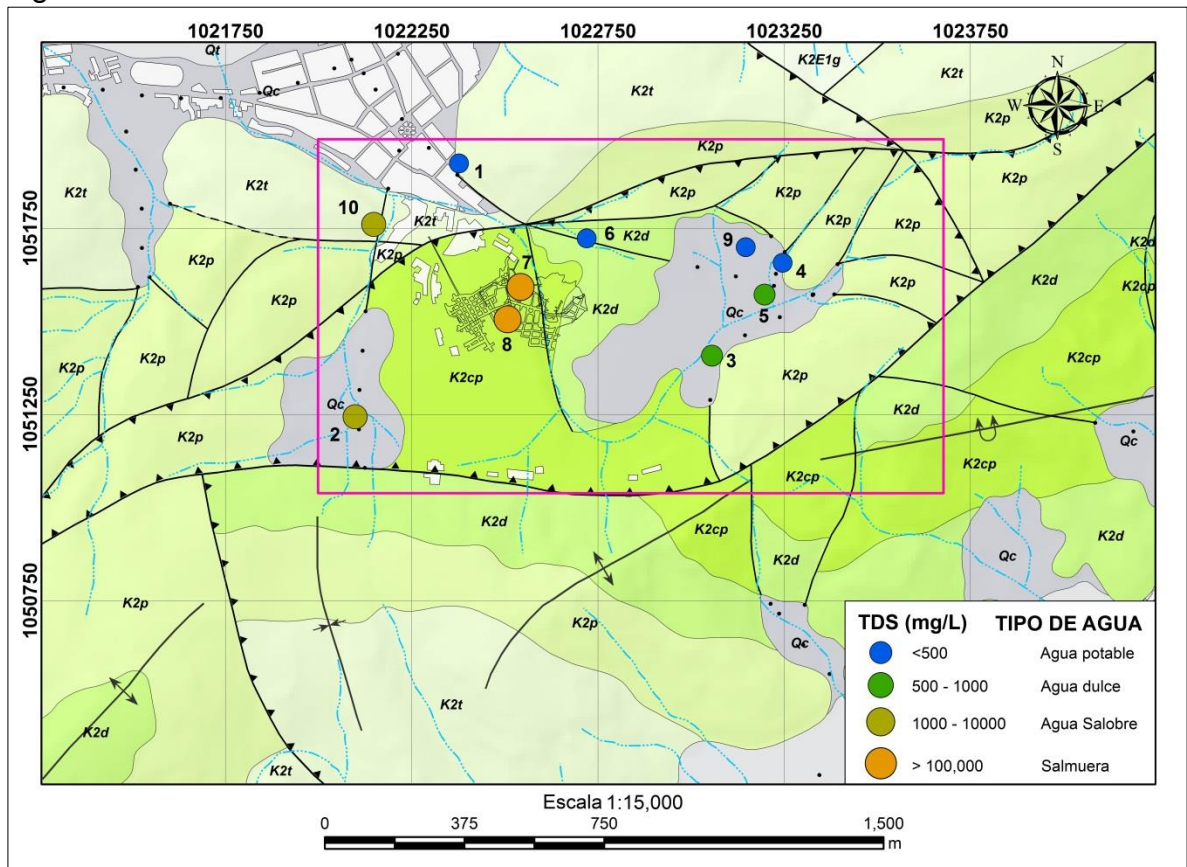
En la zona de estudio se presentan aguas con bajo contenido de TDS, consideradas como potables, también se presentan aguas con TDS aceptable que permite clasificarlas como agua dulce, aguas con TDS altos clasificadas como salobres y aguas con TDS muy altos que las clasifica como salmueras.

Las aguas que se encuentran próximas a las zonas de recarga, por lo general presentan bajos contenidos de TDS, asociados a poca concentración de iones. A

medida que aumenta el tiempo de residencia del agua en las rocas, también aumenta la concentración de iones, y por consiguiente, también los Sólidos Totales Disueltos.

En general, los valores de Sólidos Totales disueltos aumentan desde las partes más lejanas de la zona hacia la parte central, a medida que el agua circula desde las zonas de recarga a las de descarga. El recorrido del agua por acuitardos aumenta la concentración de iones en el agua y por consiguiente también aumenta la concentración de Sólidos Totales Disueltos.

Figura 53. Variación de la concentración de Sólidos Totales Disueltos en la zona.



Fuente: Autor.

#### 9.2.4. Clasificación por iones dominantes

La clasificación por iones dominantes utiliza herramientas gráficas para su representación, entre las herramientas graficas más utilizadas se encuentran los diagramas de Stiff, Piper y Schöeller- Berkaloff.

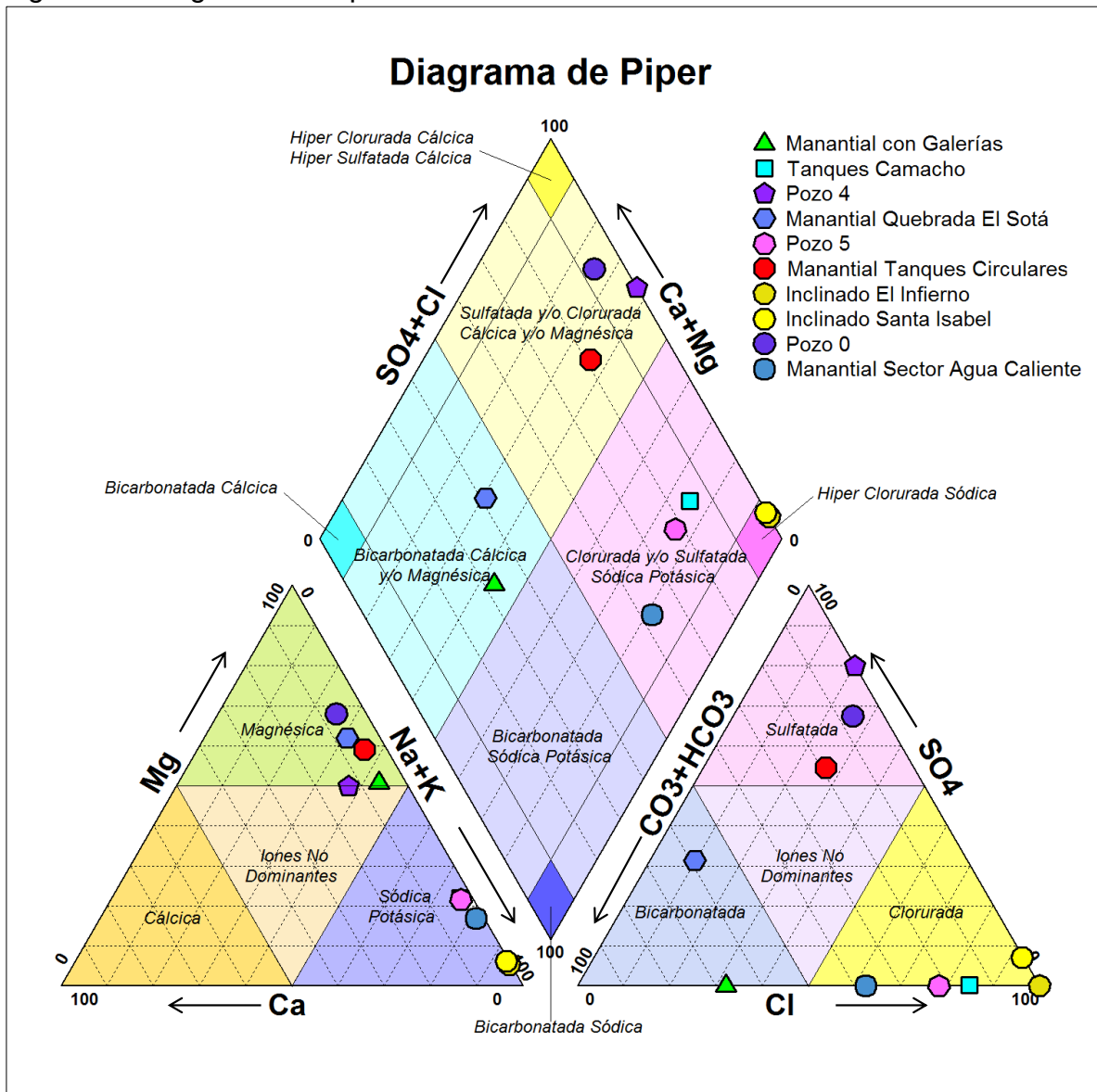


En general, El agua se nombra por el anión o catión que sobrepasa el 50% de concentración y si ninguno sobrepasa el 50%, se nombran los dos más abundantes. También se puede añadir el nombre de algún ion menor de interés y que esté en concentración anormalmente alta, de ser necesario.

### 9.2.4.1. Diagrama de Piper

Este diagrama permite representar en una sola grafica el análisis de varias muestras de agua sin dar origen a confusiones.

Figura 54. Diagrama de Piper.



Fuente: Autor.



A partir del diagrama de Piper se pueden establecer los siguientes tipos agua: Aguas Bicarbonatada Magnésica y Bicarbonatada Sódica Magnésica, correspondientes a aguas que han sufrido un corto recorrido por las zonas más superficiales, meteorizadas o fracturadas.

Aguas Sulfatadas Magnésicas, constituidas por aguas que han sufrido una evolución mayor por el substrato. Entre los puntos de agua con esta composición, algunos presentan considerables proporciones de cloruros y pH ácido.

Aguas Cloruradas Sódicas y Cloruradas Bicarbonatadas Sódicas que tienden a localizarse cerca al cuerpo salino o proceder de rocas arcillosas y areno arcillosas próximas a zonas de falla.

#### **9.2.4.2. Diagrama de Stiff**

Esta gráfica está compuesta por tres ejes horizontales, cada uno de ellos un cation y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama y los aniones al derecho (Figura 55).

En general, se determinaron cuatro tipos de aguas predominantes en el área de estudio (Figura 56).

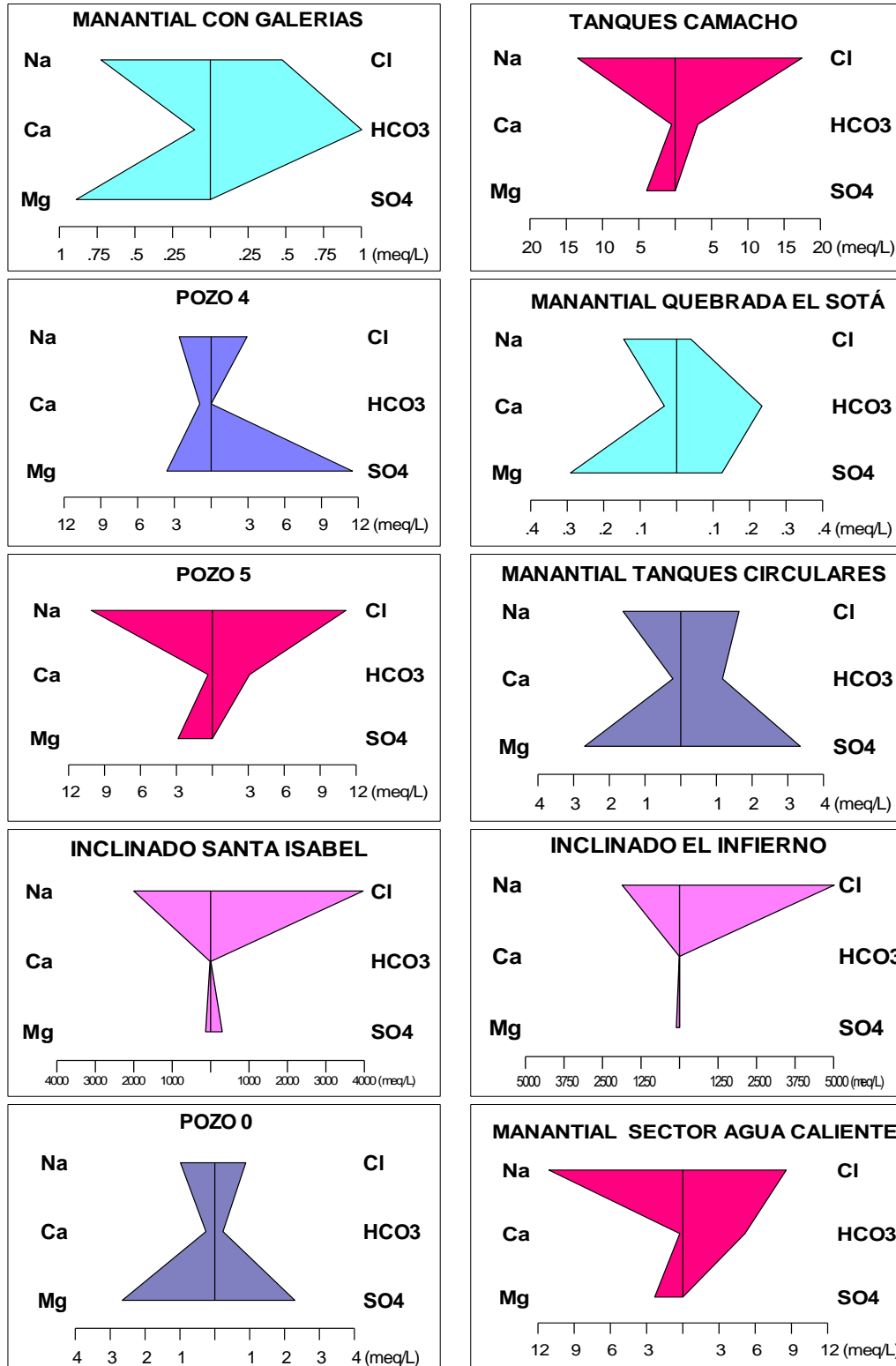
El primer tipo de agua corresponde a la clase Bicarbonatada Magnésica Sódica (HCO<sub>3</sub> - Mg - Na), ubicada cerca a zonas de recarga.

El segundo tipo de agua corresponde a la clase Sulfatada Magnésica Sódica (Mg-SO<sub>4</sub> - Mg - Na), ubicada en los pozos y manantiales de la Formación Arenisca Dura y el deposito coluvial ubicados en la finca Chimisía. La muestra 6 presenta mayor concentración de iones que la muestra 9, ambas ubicadas en la Formación Arenisca Dura, marcando así una línea de flujo en el acuífero.

Un tercer tipo de agua es la Clorurada Bicarbonatada Sódica Magnésica (Cl - HCO<sub>3</sub> - Na - Mg). Estas aguas son provenientes de zonas internas en las que prevalecen los materiales arcillosos. La muestra 10 aunque proviene de material areno arcilloso y se encuentra cerca de una zona de recarga, adquiere este carácter Sódico Potásico por ser un agua de tipo termal que se encuentra cerca de una falla inversa, lo que produce una mezcla de agua subterránea con agua más superficial.

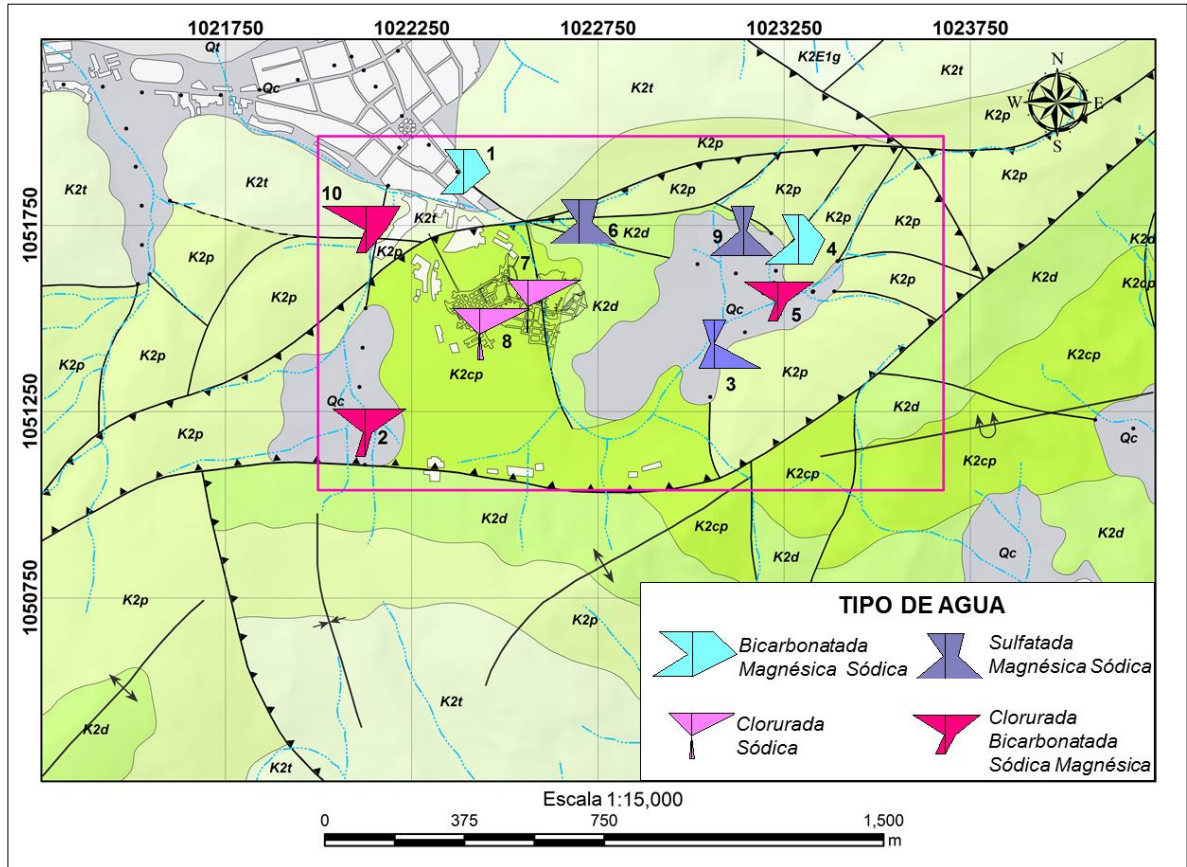
Por último, se tiene un cuarto tipo de agua, la Clorurada Sódica (Na-Cl), perteneciente a las muestras ubicadas en las labores mineras del domo salino.

Figura 55. Diagramas de Stiff.



Fuente: Autor.

Figura 56. Distribución de Diagramas de Stiff en la zona de estudio.



Fuente: Autor

### 9.2.4.3. Diagrama de Schöeller- Berkaloff.

Se dispone en varias semirrectas o columnas verticales paralelas, igualmente espaciadas y divididas en escala logarítmica. A cada semirrecta se le asocia un anión o un catión y el orden de las columnas es Ca, Mg, Na, Cl, SO<sub>4</sub>, HCO<sub>3</sub>. Este diagrama muestra la evolución del agua subterránea en la zona (Figura 57).

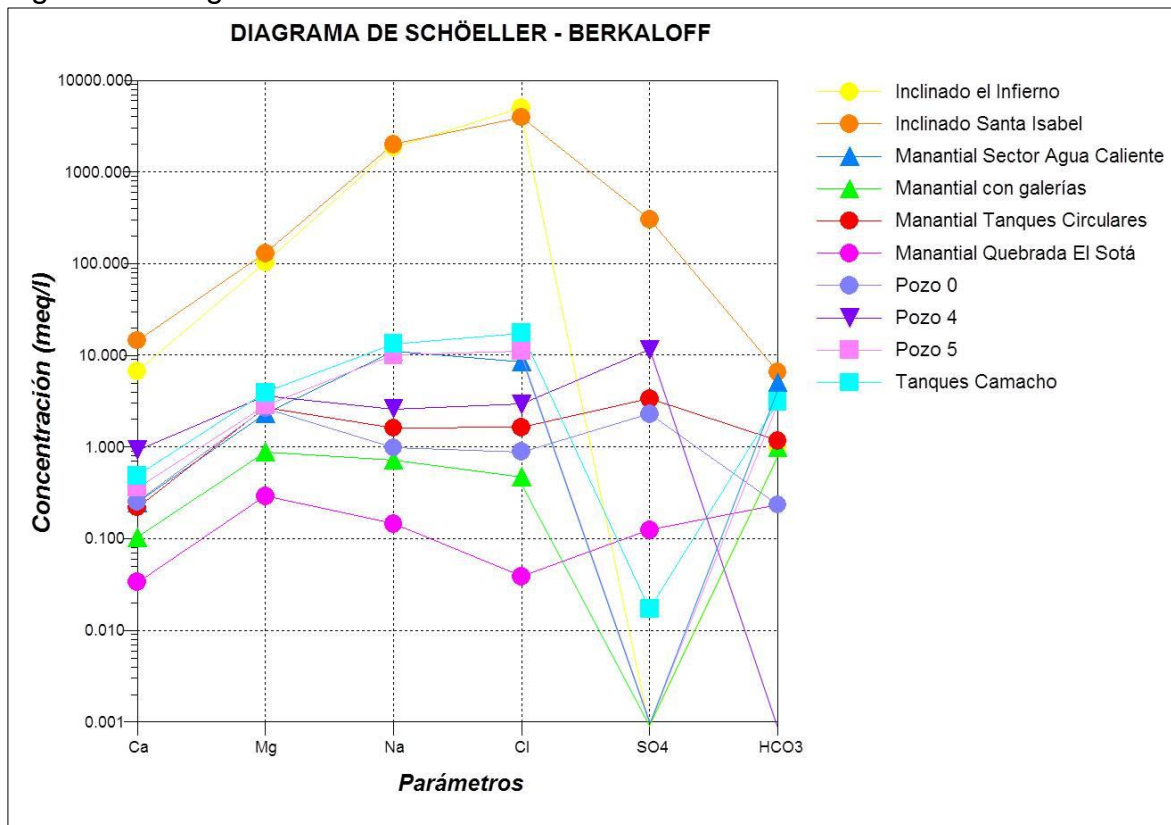
En este diagrama se puede apreciar que las aguas con menor contenido de iones son las tomadas en el Manantial Quebrada el Sotá y el Manantial con Galerías, ubicadas en zonas próximas a la recarga y asociadas a litología arcillosa y arenosa arcillosa, respectivamente.

Las muestras de agua tomadas en los pozos 0, 4 y 5 muestran una composición diferente entre sí, marcada por la presencia o no de sulfatos y bicarbonatos, todas las aguas con un tiempo considerable de residencia en el acuífero.

Las muestras de agua pertenecientes a los manantiales Tanques Camacho, Tanques Circulares y Sector Agua Caliente, presentan una mayor evolución y

tiempo de residencia en el acuífero marcada por una mayor concentración de iones, enriquecidos en Cloruro y Sodio. En las dos primeras muestras esta composición se debe a la procedencia de una formación arcillosa. La tercera muestra toma esta composición por estar cerca de una zona de falla y tener mezcla de agua subterránea con agua más superficial.

Figura 57. Diagrama de Schöeller- Berkaloff.



Fuente: Autor.

Tabla 25. Clasificación de aguas subterráneas por iones dominantes.

No. Muestra	Tipo de Agua	Descripción
1	Mg-Na-HCO3-Cl	Bicarbonatada Clorurada Magnésica Sódica
2	Na-Mg-Cl	Clorurada Sódica Magnésica
3	Mg-Na-SO4-Cl	Sulfatada Clorurada Magnésica Sódica
4	Mg-Na-HCO3-SO4	Bicarbonatada Sulfatada Magnésica Sódica
5	Na-Mg-Cl-HCO3	Clorurada Bicarbonatada Sódica Magnésica
6	Mg-Na-SO4-Cl-HCO3	Sulfatada Clorurada Bicarbonatada Magnésica Sódica
7	Na-Cl	Híper Clorurada Sódica
8	Na-Cl	Híper Clorurada Sódica
9	Mg-Na-SO4-Cl	Sulfatada Clorurada Magnésica Sódica
10	Na-Cl-HCO3	Clorurada Bicarbonatada Sódica

Fuente: Autor.



A partir de todas las clasificaciones de agua subterránea descritas anteriormente se puede concluir que:

- Las muestras con menor salinidad presentan un carácter bicarbonatado con concentraciones de Magnesio y Sodio en proporciones similares, reflejando las características de un agua de recarga más joven y con menor tiempo de tránsito.
- Las muestras cloruradas deben esta composición a la disolución de gran cantidad de halita, asociadas al domo salino, así como intensos procesos de transformación de la albita a caolinita e intercambio de Calcio por Sodio, presentes en rocas arcillosas.
- Las aguas subterráneas que se encuentran próximas al domo salino o a zonas de falla muestran una paulatina salinización, donde se va incrementando de manera progresiva el contenido relativo de los iones Cloruro, Sodio y en menor medida Magnesio, Calcio y Sulfatos, y decreciendo la concentración del ion Bicarbonato.
- Los sulfatos en el agua proceden de la disolución en ambiente oxidante de sulfuros metálicos, correspondientes a presencia de pirita en la formación.
- A medida que aumenta el tiempo de residencia del agua en las rocas también aumenta la concentración de iones, siendo más representativa esta concentración en aguas con procedencia de rocas arcillosas, arenos arcillosas y por supuesto, aquellas más cercanas al domo salino.
- Los cambios en la composición química del agua subterránea con respecto a los iones mayores y cambios en los valores de pH en las muestras de agua ubicadas en cercanías a fallas y fracturas, demuestran que estas actúan como fronteras de flujo.



## 10. HIDROGEOLOGÍA

La zona de estudio presenta características hidrogeológicas favorables para la acumulación y extracción de aguas subterráneas debido al alto fracturamiento de rocas y formación de pliegues producto del halotectonismo que genera una porosidad y permeabilidad secundaria en las Formaciones. Puesto que el área presenta un clima frío semi – húmedo con un balance hídrico positivo caracterizado por una alta precipitación y humedad relativa, permite la infiltración de agua en las Formaciones.

### 10.1. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

El inventario de puntos de agua en la zona fue realizado a partir de visitas de campo tanto en superficie como en labores subterráneas, identificando las principales características geológicas, hidrogeológicas y el tipo de captación para cada punto.

En total se identificaron 67 puntos, de los cuales 13 corresponden a pozos profundos, 27 son manantiales, 11 son cuerpos de agua, 9 son aguas de infiltración presentes en las labores mineras, 4 corresponden a manantiales de agua termal, 2 son humedales y tan solo se presenta 1 aljibe.

Tabla 26. Tabla resumen de inventario de puntos de agua.

<b>Formación Geológica</b>	<b>Pozo</b>	<b>Manantial</b>	<b>Aljibe</b>	<b>Manantial A. Termal</b>	<b>Humedal</b>	<b>Cuerpo de Agua</b>	<b>A. de Infiltración</b>	<b>Total</b>
Chipaque		1				5	9	15
Arenisca Dura	4	3						7
Plaeners	6	9						15
A. Labor - Tierna		10		4				14
Guaduas	1							1
C. Coluvial	2	4	1		2	3		12
Terrazas Altas						3		3
<b>Total</b>	<b>13</b>	<b>27</b>	<b>1</b>	<b>4</b>	<b>2</b>	<b>11</b>	<b>9</b>	<b>67</b>

Fuente: Autor.

Los pozos presentes en la zona se encuentran ubicados principalmente en las Formaciones Arenisca Dura y Plaeners, aunque también se encontraron pozos de extracción de agua en la Formación Guaduas y Depósitos Cuaternarios Coluviales. Los Pozos identificados presentan una profundidad promedio de 90m y caudales entre 0.01 L/seg a 2.44 L/seg. De los 13 pozos existentes, solo dos se

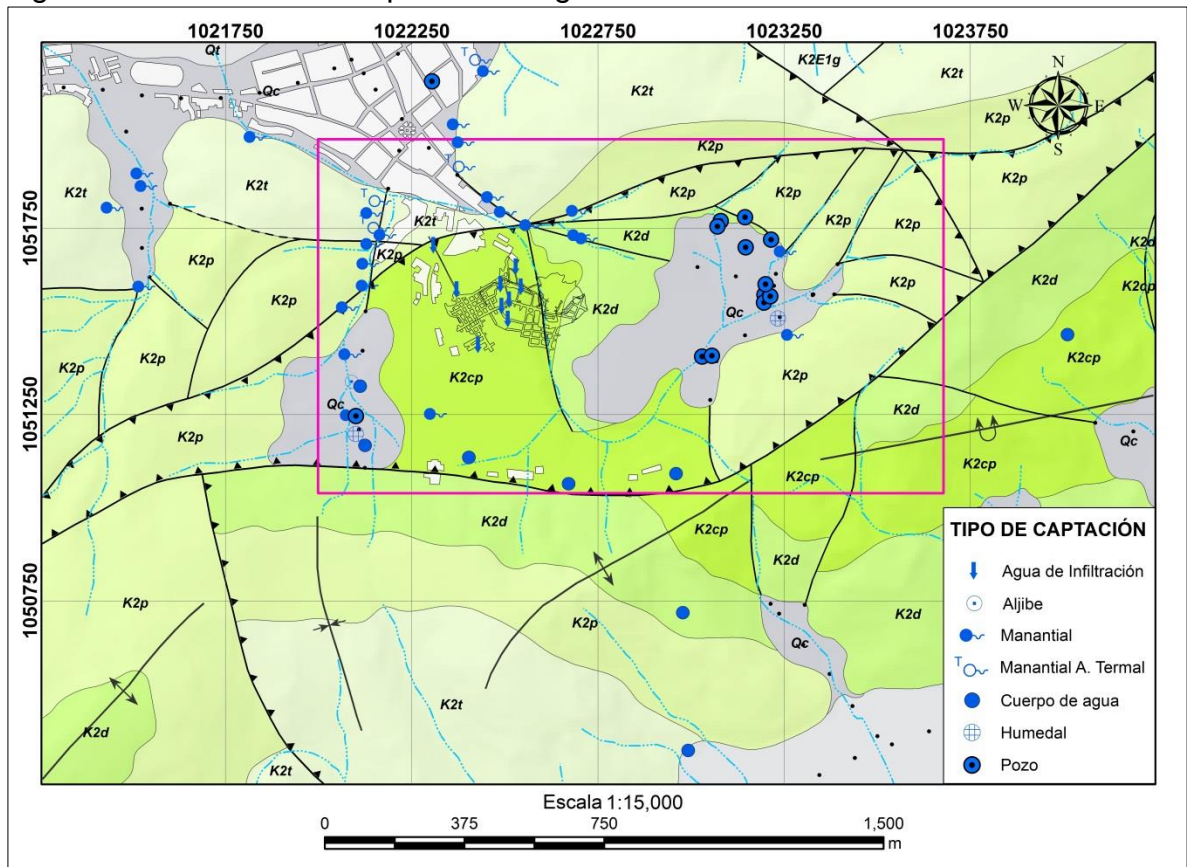
encuentran activos actualmente, uno extrae agua de la Formación Arenisca Dura y el otro extrae agua de un depósito coluvial, ambos ubicados en la Finca Chimisía.

Los manantiales captan agua esencialmente de las Formaciones Plaeners, Arenisca Labor – Tierna y depósitos cuaternarios. Estos manantiales se ubican principalmente en las partes bajas de las laderas, representando la descarga natural de los acuíferos; están asociados a fallas o contactos litológicos de las Formaciones. La mayoría de estas captaciones son utilizadas para uso doméstico, riego y usos agrarios.

Los manantiales de agua termal se encuentran ubicados en la Formación Arenisca Labor –Tierna y están destinados para recreación; su presencia se asocia a fallas regionales.

Los 9 puntos identificados como agua de infiltración se localizan en las labores subterráneas del domo salino perteneciente a la Formación Chipaque, estos puntos están asociados a zonas de falla. Los puntos de infiltración más críticos se presentan en el inclinado de ventilación y en los niveles 2 y 3 de la mina de sal.

Figura 58. Localización de puntos de agua en la zona.

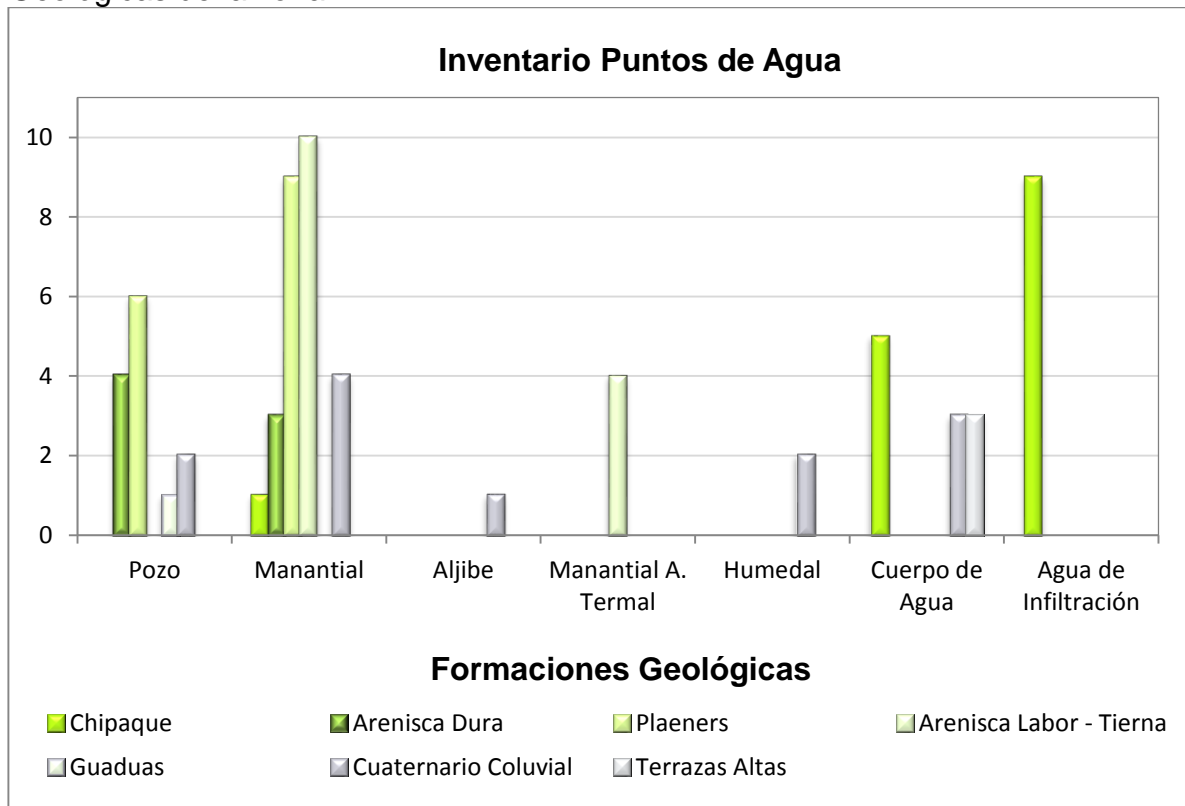


Fuente: Autor.

La distribución de los diferentes tipos de captación presentes en las Formaciones Geológicas se puede apreciar en la Figura 59.

El inventario general de puntos de agua realizado en la zona se presenta en el Anexo H.

Figura 59. Distribución de puntos de agua en las diferentes Formaciones Geológicas de la zona.



Fuente: Autor.

## 10.2. CARACTERIZACIÓN HIDRÁULICA DE ACUÍFEROS

Las propiedades hidráulicas de las Formaciones y los depósitos no consolidados determinan de manera importante la cantidad de agua que pueden proporcionar y almacenar.

La caracterización hidráulica de los acuíferos en la zona se realizó mediante la realización de pruebas de bombeo y medición de niveles piezométricos en los pozos existentes.

### 10.2.1. Datos piezométricos

La toma de datos piezométricos permite establecer la posible dirección del flujo subterráneo en las formaciones.

De los 13 pozos identificados en el inventario de puntos de agua, se tomaron medidas de niveles piezométricos en 10, 4 pertenecientes a la Formación Arenisca Dura, 3 pertenecientes a la Formación Plaeners y 1 perteneciente al depósito coluvial, todos ubicados en la Finca Chimisía. Los 2 restantes se ubican en el la Vereda Camacho y casco urbano del municipio, pertenecientes a la Formación Plaeners y Guaduas, respectivamente.

Debido a que la zona de estudio se encuentra altamente fallada y no existe una cantidad suficiente de captaciones que permitan medir niveles de agua, no se puede establecer un nivel piezométrico característico para cada formación.

Tabla 27. Datos piezométricos.

Nombre	Este	Norte	Altura	Formación Geológica	Nivel Freático
Pozo 0	1023147	1051699	2650	Arenisca Dura	2646.08
Pozo 1	1023071	1051755	2650	Arenisca Dura	2647.90
Pozo 2	1023080	1051770	2652	Arenisca Dura	2649.29
Pozo 3	1023215	1051720	2658	Arenisca Dura	2655.56
Pozo 4	1023056	1051408	2650	C. Coluvial	2646.53
Pozo 5	1023213	1051568	2650	Plaeners	2650
Pozo 6	1023196	1051551	2650	Plaeners	2650
Pozo 7	1023197	1051572	2650	Plaeners	2650
Perf No 82-1	1022101	1051246	2640	Plaeners	2640
Perf No 81-1	1022305	1052145	2580	Guaduas	2577.9

Fuente: Autor.

A partir de los niveles piezométricos tomados, se puede concluir que todos los pozos ubicados en la Formación Plaeners son pozos surgentes que se encuentran a una presión mayor que la atmosférica.

Los pozos ubicados en la Formación Arenisca Dura presentan un nivel promedio de 2.5m de profundidad, ligeramente superior al nivel piezométrico de la zona. El nivel piezométrico tomado en el pozo 0 es menor que los demás niveles medidos en la misma formación, lo cual marca el cono de depresión producido por el bombeo en dicho pozo.

### 10.2.2. Pruebas de bombeo

Las pruebas de bombeo tienen como objetivo determinar las principales características hidráulicas de un acuífero a partir del comportamiento de los

abatimientos de los niveles, la distancia entre los pozos de observación (cuando existen) y el pozo bombeado, así como el caudal de bombeo. También se puede definir o confirmar el tipo de respuesta hidráulica del acuífero (libre, semiconfinado o confinado).

Ya que estas pruebas estudian al acuífero y al pozo en sí, más no a la bomba, también son llamadas pruebas de acuífero.

Según el inventario de puntos de agua subterránea, de los 13 pozos presentes en la zona, solo uno cumple con las condiciones necesarias para la realización de pruebas de bombeo, es decir, cuenta con la infraestructura instalada de bomba y tuberías, así como la columna litológica respectiva y se pueden medir los niveles piezométricos fácilmente.

Debido a esta situación, se decidió hacer dos de pruebas de bombeo: una en el pozo habilitado ubicado en la Formación Arenisca Dura y otra en las labores subterráneas de la mina, para establecer las propiedades hidráulicas de estas unidades y determinar la probabilidad de filtración de agua desde la Formación Arenisca Dura hacia las labores mineras.

Tabla 28. Localización pruebas de bombeo.

Nombre	Norte	Este	Altura	Formación Geológica
Pozo 0	1023147	1051699	2650	Arenisca Dura
Nivel Santa Isabel	1022508	1051506	2567	Chipaue (Domo Salino)
Nivel Santa Úrsula	1022543	1051593	2560	Chipaue (Domo Salino)

Fuente: Autor.

#### 10.2.2.1. Pozo 0

Este pozo extrae agua de la Formación Arenisca Dura y se encuentra ubicado en la Finca Chimisía, limitado por fallas que le conceden una porosidad secundaria a la unidad. Tiene una profundidad de 82m y su litología es predominantemente arenosa y areno arcillosa. El caudal de extracción es de 2.44 L/seg y el agua es utilizada para el beneficio de salmuera. Debido a su alto contenido de hierro, se restringe su uso para consumo humano.

Para la realización de la prueba, se hizo necesario dejar de bombear el pozo por un periodo de dos días para que el nivel estático del acuífero se recuperara. A continuación se procedió a medir el nivel estático o inicial del pozo 0 y los dos pozos de observación situados a menos de 100m.

En el desarrollo de la prueba, se realizaron medidas de abatimiento en los pozos de observación 1 y 3 cada diez minutos. Las mediciones de abatimiento en el pozo 0 se realizaron a cortos intervalos de tiempo, aumentando gradualmente estos intervalos a medida que se extendía la duración de la prueba.



Debido a problemas técnicos, la prueba de bombeo tuvo una duración de solo dos horas y puesto que el agua del pozo se extrae constantemente para la producción de sal en la planta Conversalco, no hubo posibilidad de repetir la prueba. Por tal motivo, se procedió a medir los niveles de recuperación de los tres pozos en los intervalos utilizados para la medición de abatimiento con una duración de dos horas.

Aunque la prueba se ejecutó en un tiempo relativamente corto, se decidió realizar el análisis con los datos obtenidos, debido a que se establece que los mayores abatimientos se presentan en las primeras horas de bombeo y por tanto, estos podrían ser representativos.

Las medidas de abatimiento y recuperación tomadas en la prueba de bombeo, al igual que la ubicación de los pozos de observación y la columna litológica de pozo 0 se observan en el Anexo I.

De acuerdo a la curva característica obtenida en la prueba, se establece que el pozo se encuentra ubicado en un acuífero confinado. La interpretación de la prueba se desarrolló por el método de ajuste de curvas de Theis, aplicando las Ecuaciones 13 y 14.

Tabla 29. Resultados prueba de bombeo Pozo 0.

Horas Bombeo	Q Bombeo (L/s)	N.E	N.D	s	T m <sup>2</sup> /día	S	K (m/día)
2	2.44	3.92	7.08	3.16	42	10 <sup>-4</sup> a 10 <sup>-5</sup>	7.5x10 <sup>-1</sup>

Fuente: Autor.

La conductividad hidráulica obtenida se correlaciona a litología arcillo arenosa o arena muy fina con moderada permeabilidad. El valor de transmisividad obtenido clasifica al acuífero como un acuífero pobre a regular algo permeable a permeable. Aunque los pozos de observación no mostraron cambios significativos de nivel, a partir del programa Aquifer Test se obtuvieron valores para S entre 10<sup>-4</sup> a 10<sup>-5</sup> que clasifican al acuífero como confinado.

#### 10.2.2.2. Labores Subterráneas

Con el fin de determinar el caudal de infiltración y las propiedades hidráulicas del domo salino en las labores inundadas, se colocó una reglilla en el inclinado Santa Isabel para la medición de abatimiento y recuperación de agua en la labor. También se colocó una reglilla de medición en el “Inclinado el Infierno” perteneciente al Nivel Santa Úrsula.

Debido a que estas labores se encuentran totalmente inundadas y que además de presentar problemas de estabilidad, también presentan altos niveles de metano y monóxido de carbono que dificultan la permanencia en el lugar para realizar lecturas periódicas en las reglillas, se procedió a tomar únicamente el tiempo de

encendido de la bomba, lectura de niveles inicial, de abatimiento y recuperación final en las labores y lectura del contador de volumen de salmuera extraído, este último ubicado en superficie. Basados en estos valores, se calculó de forma directa el caudal de infiltración.

Tabla 30. Resumen Prueba de Bombeo en Labores Subterráneas.

<b>Prueba de Bombeo Labores Subterráneas</b>		
<b>Datos Estación</b>	<b>Nivel Santa Isabel</b>	<b>Nivel Santa Úrsula</b>
Este	1022508	1022543
Norte	1051506	1051593
Altura	2567	2560
Lectura Inicial (m)	0.705	0.507
Contador Inicial (m)	25201	25201
Tiempo de Bombeo (h)	25.7	25.7
Contador Final (m)	25448	25448
Caudal de Bombeo (m <sup>3</sup> /h)	9.61	9.61
Lectura de Abatimiento (m)	0.588	0.42
Abatimiento Promedio (m/h)	0.0046	0.0034
Tiempo de Recuperación (h)	9.08	9.08
Lectura de Recuperación (m)	0.618	0.424
Recuperación Promedio (m/h)	0.0033	0.0004
Caudal de Infiltración (m <sup>3</sup> /h)	6.97	1.25

Fuente: Autor.

Se establece un caudal de infiltración para el Nivel Santa Isabel de 6.97 m<sup>3</sup>/h y para el Nivel Santa Úrsula un caudal de 1.25 m<sup>3</sup>/h. Aunque estas dos labores se encuentran conectadas, existe una gran diferencia en el caudal de infiltración, esto podría deberse a que el agua de infiltración proviene principalmente de rocas suprayacentes así como de la Quebrada el Sotá que se infiltra a través de la Falla con el mismo Nombre, que se encuentran situadas directamente sobre el nivel Santa Isabel.

Se debe tener en cuenta que el valor calculado es solo una aproximación que tiene como fin dar un indicio sobre la magnitud de la infiltración en las labores pero que podría no ser un dato representativo.

Se recomienda realizar pruebas de recuperación slug test en la zona para determinar un caudal de infiltración más preciso y determinar las propiedades hidráulicas de la roca salina en las labores inundadas.

Debido a que la Formación Arenisca Dura se encuentra ubicada sobre la Formación Chipaque cerca al domo salino y que estas dos formaciones presentan alto fracturamiento y por consiguiente buena porosidad secundaria, se puede concluir que el agua proveniente la Formación Arenisca Dura influye en cierta medida en los problemas de infiltración presentes en la mina de sal.



### 10.3. CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA DE LA ZONA

Las Formaciones y depósitos presentes en la zona adquieren sus características hidrogeológicas a partir del ambiente en que se formaron así como todos los procesos físicos, geológicos y tectónicos que han sufrido a lo largo del tiempo. En base a estos aspectos, las unidades adquieren un determinado grado de porosidad y permeabilidad que permitirá o no el paso de agua a través de sus intersticios.

#### 10.3.1. Unidades Hidrogeológicas

La identificación de las unidades hidrogeológicas se realizó a partir de la caracterización fisicoquímica y aspectos geohidráulicos de las Formaciones Geológicas, evaluados con base en observaciones directas en campo, ensayos de laboratorio, registros geofísicos, perforaciones, pruebas de bombeo y medición de niveles piezométricos..

##### 10.3.1.1. Formación Chipaque (K<sub>2</sub>cp)

Está compuesta por un intervalo de arcillolitas grises oscuras con contenido de micas, restos de plantas y concreciones ferruginosas, seguido por un intervalo de intercalaciones de liditas, arcillolitas carbonosas y limolitas silíceas y un segmento superior compuesto por intercalaciones de capas medias a gruesas de arenisca cuarzosa de grano fino y baja porosidad con lutitas negras fisibles, moderadamente meteorizadas, diaclasadas con relleno de óxido de hierro y porosidad secundaria media.

Aunque esta formación generalmente se clasifica como Acuífugo debido al predominio de lutitas y limolitas, en la zona de estudio se clasifica como Acuitardo - Acuífero local debido a la presencia de fallas, pliegues y niveles de arenisca con alto grado de fracturamiento que le confieren una porosidad secundaria media a alta. Esta formación también contiene el domo salino, el cual muestra porosidad secundaria alta debido a la presencia de labores mineras, pozos de lixiviación activos y abandonados, así como fallas.

La zona de afloramiento y donde adicionalmente recibe su recarga, se localiza en la parte central y sureste del área, en el núcleo del anticlinal de Nemocón y Anticlinal de Astorga.

##### 10.3.1.2. Formación Arenisca Dura (K<sub>2</sub>d)

La Formación Arenisca Dura se localiza en el núcleo del anticlinal de Nemocón, bordeando el domo diapírico.

La parte inferior y media de la formación está constituida por bancos de arenisca blanca de grano muy fino y capas lenticulares de areniscas de grano fino. Las areniscas presentan alta bioturbación y tienen buena porosidad y permeabilidad. La parte superior de la formación consta de bancos de areniscas y capas interestratificadas de limolitas silíceas, liditas compactas y capas delgadas de arenisca arcillosa. Las limolitas y areniscas son porosas por disolución de foraminíferos o nódulos fosfáticos y algunos fragmentos de conchas.

Esta formación se considera como un Acuífero de porosidad primaria y secundaria de mediana productividad, debido a su alto fracturamiento y su litología. Con base en el inventario de puntos de agua y los SEV's realizados en la zona, esta unidad se considera de alto interés hidrogeológico.

La recarga de esta unidad se da por infiltración directa por precipitación e infiltración desde los depósitos cuaternarios. Actualmente existe un pozo en esta formación con un caudal de extracción de 2.44 L/seg.

#### **10.3.1.3. Formación Plaeners (K2p)**

La Formación Plaeners en la zona está constituida por intercalaciones de capas gruesas de limolitas silíceas, capas de areniscas, capas de areniscas arcillosas, capas de arcillas caoliníticas y capas de lodolitas altamente meteorizadas y diaclasadas con presencia de patinas de óxido de hierro. Esta formación presenta alto grado de fracturamiento y replegamiento producto de la actividad halotectónica de la zona.

Por sus características de alto fracturamiento y diaclasamiento que originan una permeabilidad secundaria alta, así como una alta porosidad secundaria por disolución de foraminíferos bentónicos, la Formación Plaeners, se caracteriza como un acuífero de porosidad secundaria, con moderada importancia hidrogeológica. Sobre esta Formación se presentan pozos artesianos con caudales de 2L/seg y también se pueden observar manantiales con caudales entre 0.02 y 0.11L/seg.

La zona de afloramiento donde adicionalmente recibe su recarga, se localiza principalmente en la parte central de la zona de estudio, limitada por fallas de tipo inverso.

#### **10.3.1.4. Formación Labor y Tierna (K2t)**

Esta formación se caracteriza por presentar areniscas, areniscas arcillosas y lodolitas interestratificadas. La parte inferior y media de la formación, está constituida por areniscas arcillosas compactas con estratificaciones de capas delgadas a medias de arcillas y lodolitas silíceas. La parte superior está compuesta por areniscas cuarcíticas de estratificación gruesa e intercalaciones de



capas delgadas de arcilla. En general, la formación presenta alta porosidad y alta permeabilidad primaria y secundaria.

De acuerdo a las observaciones en campo y las condiciones estructurales de la zona, es una unidad con moderado a alto valor hidrogeológico y se clasifica como un acuífero de media a alta productividad de extensión regional. Manantiales presentes en la zona generan caudales del orden de 6 a 7 L/seg.

Esta formación aflora alrededor del casco urbano del municipio y en parte de los flancos del anticlinal de Nemocón. Su recarga se da por infiltración producto de la precipitación.

#### **10.3.1.5. Formación Guaduas (K<sub>2</sub>E<sub>1g</sub>)**

Está compuesta por una secuencia de arcillolitas, lutitas con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino y varios mantos de carbón, arcillolitas con intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino y capas de areniscas arcillosas; en el techo existe un conjunto de arcillolitas con intercalaciones de areniscas arcillosas de grano fino.

La Formación, en la mayor parte del área, por su composición principalmente arcillosa se comporta como un sello clasificándola como Acuífugo. Sin embargo, la parte correspondiente a la secuencia arenosa presenta buena porosidad primaria y moderada permeabilidad que la puede considerar como un acuífero local de baja productividad. En el casco urbano del municipio se encuentra un pozo abandonado que generaba un caudal de 2.4L/seg en un estrato de arenisca permeable de esta formación. Esta formación se ha clasificado como un Acuitardo local en base a pozos y manantiales inventariados por la CAR en la zona.

#### **10.3.1.6. Depósitos Cuaternarios no consolidados (Terrazas Altas y Cuaternario Coluvial)**

Los depósitos cuaternarios de la zona son de origen fluvial, lacustrino y coluvial. Los depósitos de origen fluvial y lagunar cubren una parte representativa de la zona de estudio, presentándose los mayores espesores hacia la parte norte y sur del área (30m de espesor). Los depósitos de tipo coluvial se ubican en la parte central de la zona y en los costados de las laderas que rodean el diapiro, con espesores máximos de 15m, localizados en la Finca Chimisía.

Estos depósitos están constituidos por bloques de diferentes tamaños de gravas, arena y arcilla embebidos en una matriz areno arcillosa; se caracterizan por ser acuíferos de porosidad primaria con alta permeabilidad.





Estos depósitos se establecen como un acuífero de mediana productividad. La infiltración de agua en la unidad es infiltración directa por precipitación que recoge aguas de escorrentía superficial y subsuperficial.

### **10.3.2. Clasificación general de unidades hidrogeológicas**

La clasificación de unidades hidrogeológicas en la zona se realizó en base a su capacidad de almacenar y ceder agua (acuíferos, acuitardos acuícludos y acuífugos), relacionadas principalmente a características de porosidad y permeabilidad. Además se relaciona su importancia hidrogeológica, características hidráulicas y características hidrogeoquímicas.

#### **10.3.2.1. Acuitardo Chipaque (K<sub>2</sub>cp)**

Acuitardo local de porosidad y permeabilidad secundaria asociada a presencia de fallas, pliegues y niveles de arenisca con alto grado de fracturamiento. Adicionalmente, en el domo salino se presenta alta porosidad y permeabilidad secundaria debido a la presencia de labores mineras, disolución de la roca salina en zonas con alto grado de fracturamiento y presencia de pozos de lixiviación activos y abandonados. Se considera de productividad baja a media. La recarga se da principalmente por infiltración en zonas de falla o a través de formaciones acuíferas suprayacentes.

#### **10.3.2.2. Acuífero Arenisca Dura (K<sub>2</sub>d)**

Acuífero libre a confinado por presencia de estratos de arcilla en techo y base. Porosidad primaria por litología predominantemente arenosa y secundaria por alto fracturamiento y disolución de fósiles y nódulos fosfáticos. Productividad media y alto interés hidrogeológico local, limitado a zonas de Falla. Conductividad hidráulica y permeabilidad moderada a regular. Su recarga se da por infiltración directa por precipitación e infiltración desde depósitos cuaternarios. Debido a su alto contenido de hierro, se restringe el uso del agua a actividades agrícolas e industriales.

#### **10.3.2.3. Acuífero Plaeners (K<sub>2</sub>p)**

Acuífero de alta porosidad y permeabilidad secundarias con flujo esencialmente a través de fracturas en estratos de arcillolitas, limolitas síliceas y liditas, intercaladas con areniscas de grano fino. Es considerado de baja a media productividad e importancia hidrogeológica local. Presenta caudales desde 0.01 hasta 2L/seg en pozos profundos. El agua no es apta para consumo humano ya que presenta alta salinidad y alto contenido de hierro. La recarga proviene de lluvias y se da esencialmente a través de lineamientos de fallas.



#### **10.3.2.4. Acuífero Arenisca Labor - Tierna (K2t)**

Acuífero regional de mediana a alta productividad e importancia hidrogeológica, de porosidad y permeabilidad primaria asociada a secuencias arenosas y conglomeráticas con intercalación de arcillas y limolitas y secundaria asociada a plegamiento y fallamiento. Caudales entre 5 y 6 L/seg. El agua localmente es potable con bajo a moderado contenido de hierro. Se presentan manantiales termales asociados a fallas regionales. La recarga proviene por infiltración directa por precipitación.

#### **10.3.2.5. Acuitardo Guaduas (K2E1g)**

Acuífero en su mayor parte debido a su composición principalmente arcillosa. Localmente considerado como acuitardo de alta porosidad primaria, moderada permeabilidad y baja productividad e importancia hidrogeológica asociado a bancos de areniscas friables de grano fino a medio. En la zona se presenta un pozo con caudal de 2.4 L/seg asociado a un estrato arenoso. Su recarga se da por infiltración.

#### **10.3.2.6. Acuífero Cuaternario Coluvial (Qc)**

Acuífero libre local, de mediana a alta productividad, porosidad y permeabilidad primaria y flujo esencialmente intergranular determinado por el contenido de material arcilloso y presencia de bloques de arena y grava. El agua es apta para consumo humano y para riego aunque puede presentar altos niveles de pH. La recarga se da por infiltración directa por precipitación que recoge aguas de escorrentía superficial y subsuperficial.

#### **10.3.2.7. Acuífero Terrazas Altas (Qt)**

Acuífero regional de tipo libre a semiconfinado, de media a alta productividad, porosidad y permeabilidad primaria. La recarga se da por infiltración por precipitación o a través de acuíferos coluviales suprayacentes.

### **10.3.3. Dirección del Flujo subterráneo**

La tendencia del movimiento del flujo de agua distingue cuatro rutas principales divididas por fallas geológicas.

La primera corresponde al Flujo en dirección sur - sureste con pequeños cambios al suroeste que marca dos zonas: antes de la Falla El Perico limitada al norte por la falla San Rafael y después de la Falla El Volador limitada por la Falla regional de Nemocón y Fallas menores en el sector La Cucariana. Este flujo atraviesa las



Formaciones Arenisca Labor Tierna, Plaeners y en menor medida la Formación Arenisca Dura y Chipaque.

La segunda tendencia de Flujo se da en dirección convergente al domo diapírico limitada por las Fallas El Perico, El volador, Camacho y Chimisia, presentando cambio de direcciones locales en el flujo por la presencia de fallas menores, disposición estructural de las Formaciones cerca al domo y presencia de pozos de explotación de agua. Este flujo se da en las Formaciones Chipaque, Arenisca Dura y Plaeners.

La tercera tendencia se da en dirección divergente desde el eje del Anticlinal de Nemocón hacia sus flancos en la parte suroeste y noreste de la zona. El flujo se da principalmente en las Formaciones Plaeners, Arenisca Dura y Chipaque.

La última tendencia de flujo se da en los depósitos cuaternarios ubicados en la parte norte y sur del área y obedece a una dirección de flujo regional.

#### **10.3.4. Zonas de recarga y descarga**

Las zonas de recarga y descarga se presentan principalmente en los lugares con mayor elevación y en zonas de falla, plegamiento y contactos litológicos.

##### **10.3.4.1. Zonas de recarga**

La recarga natural en el área se da especialmente por infiltración directa por precipitación. Esta infiltración se da principalmente en la zona montañosa donde la capacidad de infiltración de los suelos es alta. Además, la zona de estudio posee una geología estructural bastante compleja conformada por dos sistemas estructurales principales que generan recarga a través de pliegues, fallas y fracturas en la en las formaciones.

La escorrentía que se produce en el área, se dirige hacia las zonas bajas y hacia aquellos sectores en que las condiciones de los suelos y las rocas tienen una mayor capacidad de infiltración, producto de fracturas o fallas que hacen que la recarga aumente localmente.

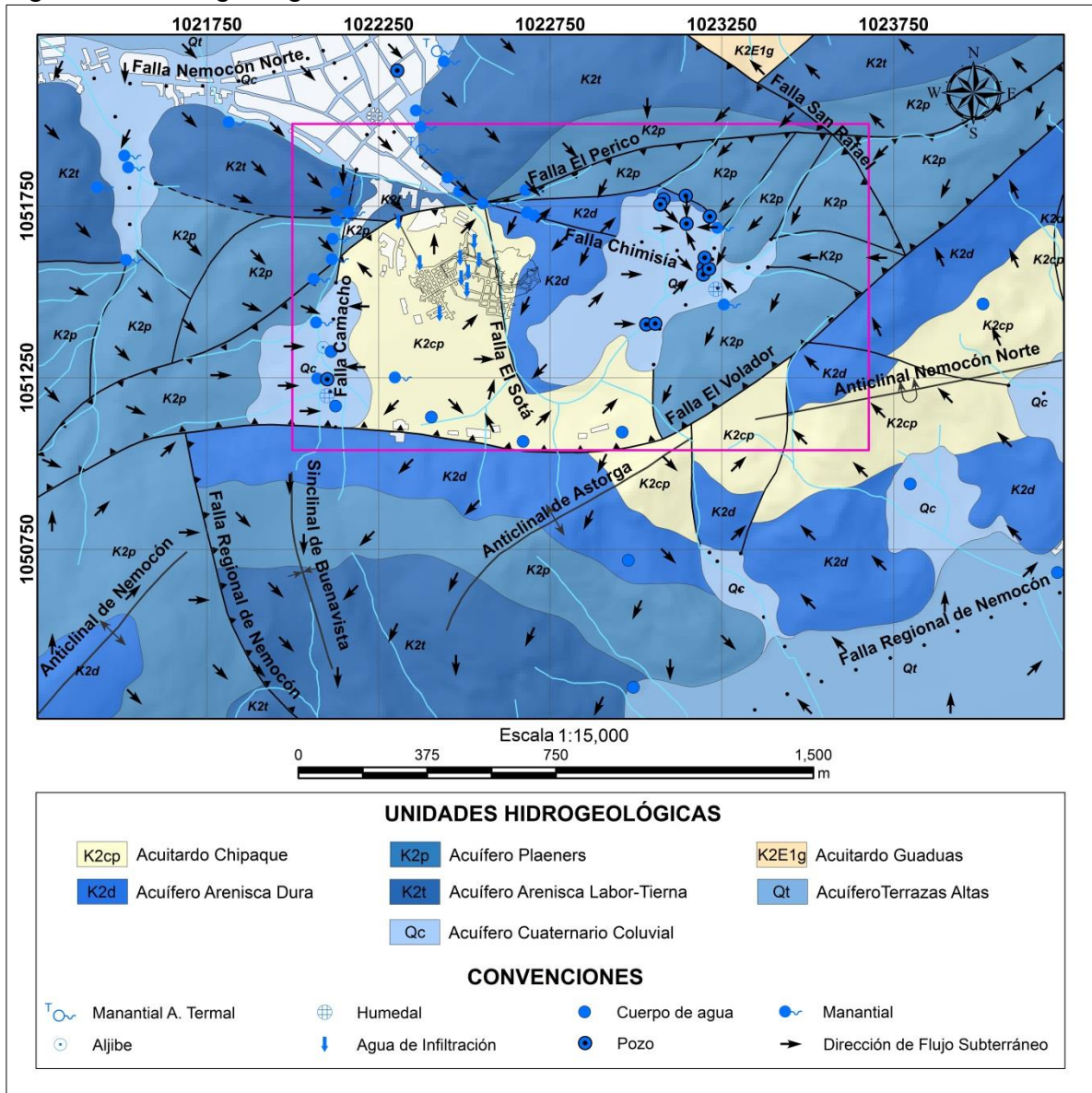
El aporte desde las quebradas existentes en zona sucede en aquellos lugares en que las fallas se alinean con el cauce o atraviesan dichas quebradas. Esto sucede principalmente en el domo salino a través de la Quebrada el Sotá.

También se puede establecer una posible recarga artificial, generada por actividad humana asociada a fugas en sistema de agua potable, alcantarillado de aguas negras y alcantarillado de recolección de aguas lluvias, así como el sobre riego de cultivos y pastizales y la construcción de pozos sépticos.

### 10.3.4.2. Zonas de descarga

Las descargas naturales principales en la zona se encuentran determinadas por el afloramiento de manantiales en las márgenes de las laderas, cuya presencia se asocia mayormente con las fallas geológicas y en menor medida al contacto de formaciones. La descarga artificial está representada por la extracción de agua dulce de pozos ubicados en la Finca Chimisia y salmuera en la mina de sal, para uso industrial.

Figura 60. Hidrogeología de la zona de estudio.



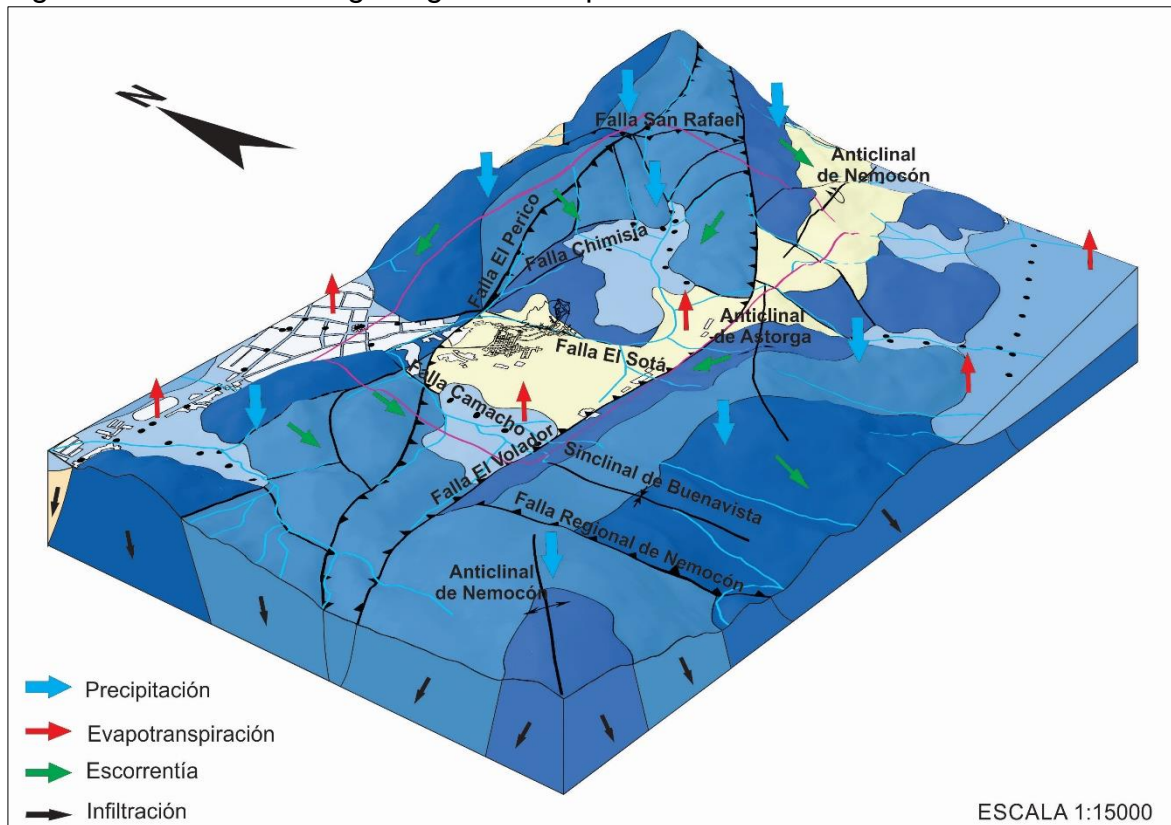
Fuente: Autor.



## 11. MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL

En base a la información recolectada para la zona, se propone el siguiente modelo hidrogeológico conceptual.

Figura 61. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la zona.



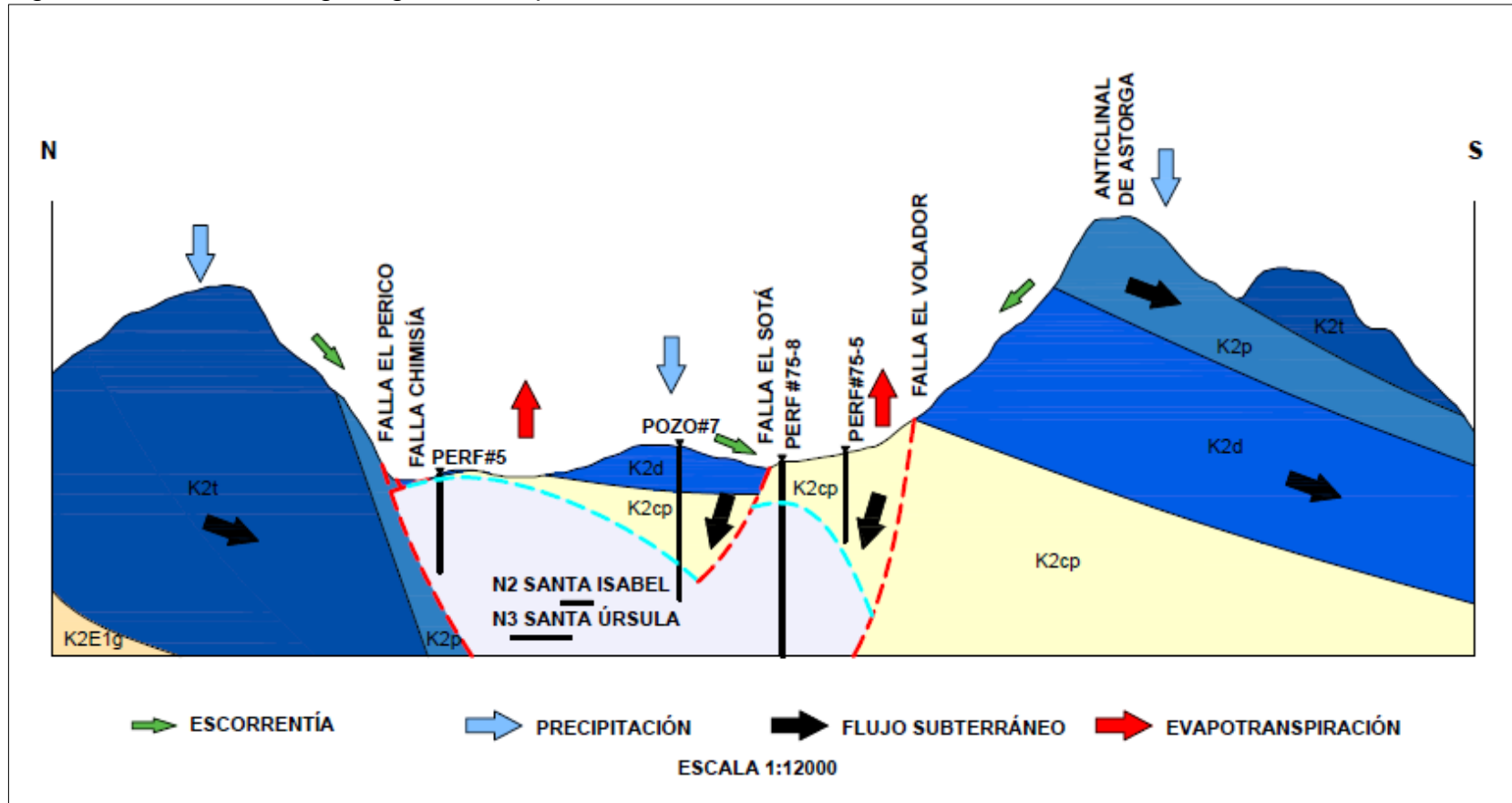
Fuente: Autor.

Los principales componentes del modelo se enfocan en la presencia de agua subterránea y componentes del ciclo hidrológico, así como zonas de recarga y descarga y dirección del flujo subterráneo.

Se puede apreciar que la ocurrencia del agua subterránea dentro del área de estudio se encuentra asociada principalmente a las Formaciones Arenisca Labor – Tierna, Plaeners y Arenisca Dura. El comportamiento del flujo en las diferentes formaciones se ve fuertemente influenciado por las fallas geológicas existentes, en donde se dan los puntos de mayor productividad de los acuíferos. Los depósitos no consolidados se encuentran ubicados en las partes medias y bajas de la zona.



Figura 62. Modelo Hidrogeológico Conceptual de la mina sal, dirección N - S.



Fuente: Autor.



El modelo hidrogeológico conceptual propuesto para la mina de sal indica que las principales unidades acuíferas presentes son Las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca Labor – Tierna.

La Formación Arenisca Dura se encuentra ubicada encima de las labores subterráneas afectadas por infiltración (Nivel Santa Isabel y Nivel Santa Úrsula) y está limitada por las Fallas El Sotá y Falla Chimisía que le confieren una porosidad secundaria. Esta unidad se caracteriza por presentar una moderada permeabilidad y moderada conductividad hidráulica.

La información hidrogeoquímica obtenida indica que parte del agua de infiltración proviene de la Formación Arenisca Dura, marcando un aumento de contenido de hierro a medida que el agua se mueve a través de las rocas en condiciones reductoras y oxidantes hasta llegar a las labores mineras inundadas, donde se presentan las mayores concentraciones.

La Falla El Sotá, adicionalmente, se encuentra afectando la Formación Chipaque y el domo salino y su línea de proyección hacia el noroeste se ubica directamente encima de los niveles 2 y 3 de la mina de sal. Esta falla ayuda a la infiltración por precipitación en la zona puesto que ocasiona una alta porosidad y permeabilidad de las rocas adyacentes, además se encuentra alineada con la Quebrada El Sotá que recoge las aguas de escorrentía y acrecienta aún más la infiltración de agua hacia el domo y las labores subterráneas.



## CONCLUSIONES

Las rocas sedimentarias de edad Cretácica y Cuaternaria aflorantes en el área, se encuentran afectadas por plegamiento y fallamiento producto de la orogenia andina y el diapirismo de sal localizado en el segmento C de la Formación Chipaque, en el núcleo del anticlinal de Nemocón. Las subunidades geomorfológicas más representativas del área son las de origen denudacional, morfoestructural y periglacial puesto que permiten la infiltración y acumulación de agua en las formaciones.

A partir de la interpretación del registro eléctrico del pozo 7 se establecen espesores representativos de la parte central del área de estudio en cercanías a la Finca Chimisía, limitados a la presencia de la Falla El Sotá. Estos espesores corresponden a 13m para el Cuaternario Coluvial, 50m para la Formación Arenisca Dura, 67m para el segmento D de la Formación Chipaque y un espesor aparente de 507m para el yacimiento salino, donde conserva su continuidad y por tal razón no se puede establecer su espesor real.

En la finca Chimisía se presenta una capa acuífera con valores de resistividad entre 200 – 300 ohm/m y espesor de 20m a 30m asociada a una litología de areniscas saturadas, interrumpida por fallas locales, perteneciente a la Formación Arenisca Dura. En esta Finca también se presentan pozos de extracción de agua en capas de limolitas, arcillas y areniscas intercaladas, de resistividades entre 100-200 ohm/m asociadas a la Formación Plaeners y un depósito cuaternario de litología predominantemente areno arcillosa con espesor de 9 a 13m aproximadamente, el cual presenta altas resistividades en el intervalo seco y resistividades menores a 100 ohm/m en el intervalo saturado.

Hidrológicamente, la zona de estudio se encuentra en inmediaciones de la Microcuenca Quebrada el Sotá. Esta cubre un 75% del Polígono de concesión y su cauce principal pasa por encima de las labores mineras; tiene un potencial erosivo moderado a alto, está en fase de juventud y se caracteriza por presentar una mayor susceptibilidad a crecidas; su recarga se presenta en los meses de Marzo a Noviembre con un total de volumen de recarga de 218.402 m<sup>3</sup> /año, que se traduce en un caudal de recarga de 0.0069 m<sup>3</sup>/seg.

Hidrogeoquímicamente, se establece que las muestras de agua 1 y 10 son aguas de recarga más joven, con menor tiempo de tránsito y mayor contenido del ion Bicarbonato, también se establece que las muestras de agua tomadas en los pozos presentan un carácter sulfatado proveniente de la disolución en ambiente oxidante de sulfuros metálicos (pirita). Además, se puede observar que las muestras tomadas en la Formación Plaeners presentan un carácter clorurado asociado a intensos procesos de transformación de la albita a caolinita e



intercambio de Calcio por Sodio y que las aguas subterráneas que se encuentran próximas al domo salino o a zonas de falla muestran una paulatina salinización.

La ocurrencia del agua subterránea en el área se encuentra asociada principalmente a las Formaciones acuíferas Arenisca Labor – Tierna, Plaeners y Arenisca Dura, seguida por los depósitos no consolidados. La recarga se da especialmente por infiltración directa por precipitación en la zona montañosa y a través de pliegues, fallas y fracturas en las formaciones; las descargas se presentan a través de manantiales en las márgenes de las laderas asociados a fallas geológicas y al contacto de formaciones, así como en pozos de extracción de agua dulce en la Finca Chimisía, pozos de lixiviación y salmuera extraída de labores inundadas. El comportamiento de la dirección del flujo en las diferentes formaciones se ve fuertemente influenciado por las fallas geológicas existentes que marcan los puntos de mayor productividad de los acuíferos.

La Formación arenisca Dura limitada en la zona por fallas de tipo local y regional, presenta una porosidad primaria y secundaria moderada. A partir de la prueba de bombeo realizada en el pozo 0, se tiene que la formación es un acuífero confinado pobre a regular, de litología predominantemente arcillo arenosa a arenosa muy fina con moderada permeabilidad ( $T= 42 \text{ m}^2/\text{día}$ ,  $K= 7.5 \times 10^{-1} \text{ m/día}$  y  $S = 10^{-4}$  a  $10^{-5}$ ). Los pozos ubicados en la Finca Chimisía presentan un nivel promedio de 2.5m de profundidad, ligeramente superior al nivel piezométrico de la zona.

La principal fuente de infiltración de agua hacia las labores subterráneas es la Falla El Sotá, la cual afecta las Formaciones Arenisca Dura, Chipaque y el domo salino y además pasa directamente sobre los niveles 2 y 3 de la mina. Esta falla ayuda a la infiltración por precipitación puesto que ocasiona porosidad y permeabilidad secundaria en las rocas adyacentes y se encuentra alineada con la Quebrada El Sotá que recoge las aguas de escorrentía que se infiltran a través de la misma Falla. Con los análisis fisicoquímicos, se establece además, que parte del agua de infiltración proviene de la Formación Arenisca Dura, marcando un aumento de contenido de hierro y otros parámetros, a medida que el agua se mueve a través de las rocas en condiciones redox hasta llegar a las labores mineras inundadas, donde se presentan las mayores concentraciones.

Adicional a los problemas de infiltración en los niveles 2 y 3, cuyos caudales de infiltración son  $6.97 \text{ m}^3/\text{h}$  y  $1.25 \text{ m}^3/\text{h}$ , respectivamente, se presentan problemas de infiltración en el túnel de ventilación y otros sectores de la mina, esto debido a condiciones de alto fracturamiento y diaclasamiento presentes en la zona que ponen en manifiesto características hidrogeológicas de tipo secundario en el domo y las Formaciones adyacentes. Los periodos más críticos de infiltración en las labores son los de Marzo - Mayo y Octubre – Noviembre, que es donde se presentan los picos más altos de precipitación y escorrentía, y por ende, de infiltración.



## RECOMENDACIONES

Se recomienda realizar un estudio de Gravimetría o Sísmica para poder delimitar con mayor exactitud el domo salino y establecer mejor el límite de formaciones con respecto al mismo, así como la presencia de fallas.

Propiciar ante las entidades competentes la instalación de estaciones hidrometeorológicas en la zona para la medición de variables climáticas con mayor exactitud, así como la realización de aforos en la Quebrada El Sotá para analizar de forma más detallada su relación con los problemas de infiltración.

Se recomienda realizar pruebas de bombeo de mayor duración en el pozo 0 y demás pozos cercanos al domo salino para establecer los parámetros hidráulicos de las Formaciones.

Realizar pruebas de recuperación slug test en las labores inundadas para determinar un caudal de infiltración real y determinar las propiedades hidráulicas de la roca salina. Adicional a esto, se recomienda determinar los caudales de infiltración en los demás puntos presentes en la mina y describir su evolución en el tiempo.

Se recomienda la utilización de trazadores en la zona, para confirmar la conexión del agua procedente de la Formación Arenisca Dura y la Quebrada El Sotá con las aguas de infiltración en las labores mineras y determinar posibles mezclas de agua.





## BIBLIOGRAFÍA

BARRERA DE CALDERON, Marcia Lizeth. Caracterización hidrogeoquímica e isotópica de áreas de recarga en el acuífero de San Salvador .Tesis de Maestría. UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR ,2010.

CAR. Elaboración del Diagnóstico, Prospectiva y Formulación de la Cuenca Hidrográfica del río Bogotá. Subcuenca río Neusa – 2120-15. PDF.

CAR Y EL INSTITUTO COLOMBIANO DE GEOLOGÍA Y MINERÍA - INGEOMINAS. Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá. Bogotá D.C. 1989.

CASTRO, Jorge Arturo. Informe visita técnica de emergencia municipio de Nemocón- Cundinamarca. SERVICIO GEOLOGICO COLOMBIANO. Bogotá, Noviembre de 2011.

CASTRO, M., & GUZMÁN, O. Estudio comparativo de fórmulas de evapotranspiración potencial en Colombia. Instituto Colombiano de Hidrología, Meteorología y Adecuación de Tierras (HIMAT). Bogotá, 1985.

CHIAPPE, R. Técnicas de evaluación de Evapotranspiración Potencial y Balance Hídrico, 1998. En MEIACOL, Manual de Evaluación de Impactos Ambientales de Colombia (CD>ROM 1.0 ed., págs. 324-348). Ministerio del Medio Ambiente de Colombia.

FAO. Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Roma, Italia: Estudio FAO Riego y Drenaje 56, 2006.

FRANCO, Carlos Andrés. Informe estudio de geoelectrica en la Mina de Nemocón. IFI – CONCESIÓN SALINAS. Zipaquirá, Febrero 16 de 2004.

FREEZE, R. A., & CHERRY, J. A. Groundwater. United States of America. Prentice Hall, Inc. 1979.

GÓMEZ RAVE, Juan Camilo. Geología, Geofísica, Hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de Turbo. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellin. 2009.

HARGREAVES, G. Irrigation water requirements based on climatic data. Journal of Irrigation and Drainage Division. Proceeding Paper 1105 1-10, 1956.



IGAC. Cuencas Hidrográficas Cundinamarca. Instituto Geográfico Agustín Codazzi. Gobernación de Cundinamarca, 2005.

INGEOMINAS, Programas De Exploración de Aguas Subterráneas. Bogotá DC. Diciembre de 2004.

JARAMILLO, A. Evapotranspiración de referencia en la región Andina de Colombia. Cenicafé. 2006.

LOZANO QUIROGA, Hernando. Explotaciones de sal en Colombia. PROYECTO MUSEO DE SAL. Ibagué, Junio de 1998.

MARÍN VALENCIA, Valentina. Evaluación de la relación entre la evapotranspiración potencial teórica y la evaporación registrada en los departamentos de Cundinamarca y Valle del Cauca. Tesis de grado. Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá D.C. 2010.

MEMORIAS VI CURSO HISPANOAMERICANO DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA. Clasificación del Agua subterránea basada en los Solidos Totales Disueltos. Uruguay, 2009.

MONTOYA ARENAS Diana María, REYES TORRES Germán Alfonso. Memoria Explicativa Geología de la Plancha 209 Zipaquirá. Bogotá, Junio de 2003.

MONTOYA Diana María y REYES Germán. Geología de la plancha 209 – Zipaquirá.

MONTOYA ARENAS Diana María, REYES TORRES Germán Alfonso. Geología de la Sabana de Bogotá. Bogotá, Marzo de 2005.

MOTAVITA MEDELLIN, Diego Fernando. Estimación del volumen precipitado sobre el área aferente aguas arriba de la quebrada El Sotá, zona de influencia Mina de Sal municipio de Nemocón. COLSALMINAS LTDA. Zipaquirá, Agosto 04 de 2011.

PÉREZ, Gildardo, SALAZAR, Armando. Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Bogotá, Diciembre de 1973.

POVEDA, G., CUARTAS, L., BARCO, O., & MESA, O. Estimación de la evapotranspiración en Colombia. En S. C. Ingenieros (Ed.), Memorias XIII Seminario Nacional de Hidráulica e Hidrología, (Pág. 729-738). 1998.



## **ANEXOS**

### **ANEXO A. MAPA GEOLÓGICO**



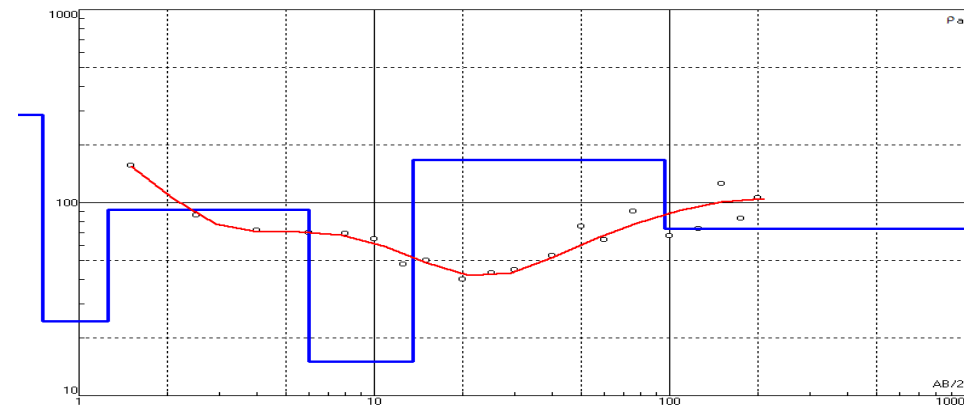
## **ANEXO B. COLUMNA ESTRATIGRÁFICA DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE VIA NEMOCÓN SUESCA, SECTOR LA CUCARIANA**

## ANEXO C. INTERPRETACIÓN DE LAS CURVAS DE RESISTIVIDAD Y CORRELACIÓN LITOLÓGICA CON LAS PERFORACIONES EXISTENTES

### ANEXO C-I. Análisis SEV A1

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	285	0.75	0.75	-0.75
2	24.2	0.5	1.25	-1.25
3	92	4.75	6	-6
4	15	7.5	13.5	-13.5
5	167	82.5	96	-96
6	73.5			



Correlación litológica

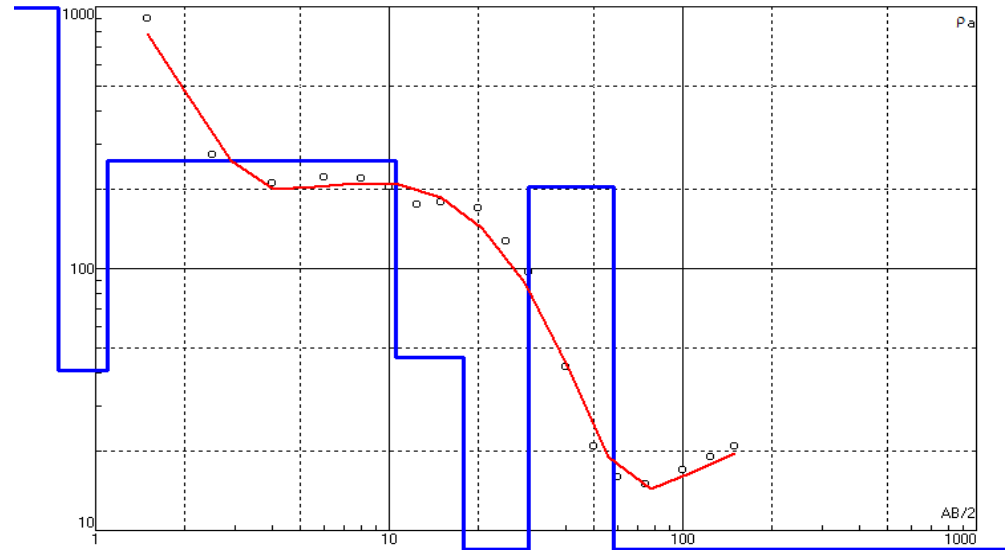
Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	285	<0.75	Suelo areno-arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	24,2	0.75-1.25	Arcilla arenosa	Cuaternario Coluvial
3	92	1.25-6	Arena de grano grueso y arcilla	Cuaternario Coluvial
4	15	6-13.5	Arcilla	Formación Plaeners
5	167	13.5-96	Arcilla, arenisca y lidita intercalada	Formación Plaeners
6	73,5	>96	Arenisca arcillosa	Formación Arenisca Dura



### ANEXO C-II. Análisis SEV A2

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	156	0.75	0.75	-0.75
2	37.4	6.75	7.5	-7.5
3	15.6	9.5	17	-17
4	54	17	34	-34
5	132	36	70	-70
6	3			



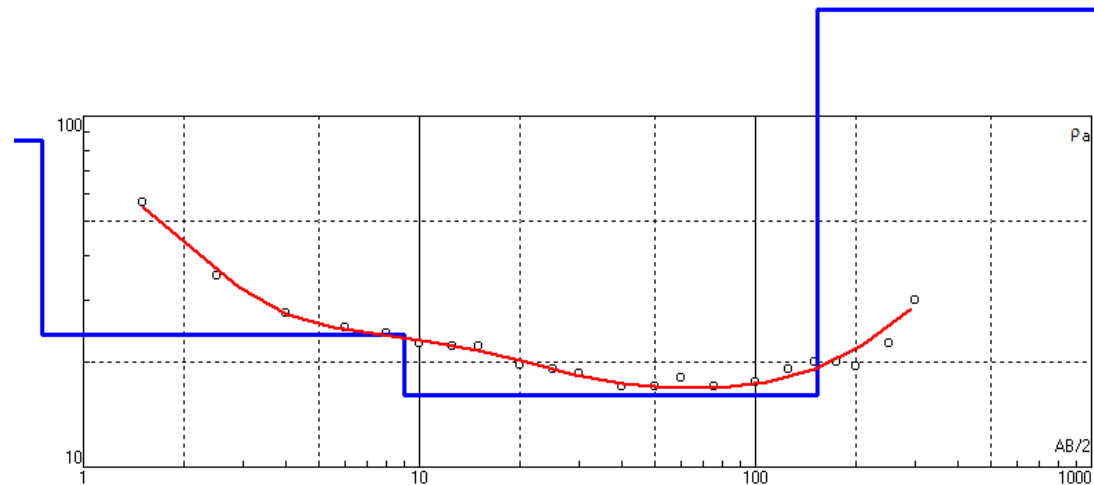
Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	156	<0.75	Suelo areno-arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	37,4	0.75-7.5	Arcilla arenosa	Cuaternario Coluvial
3	15,6	7.5-17	Arcilla	Formación Plaeners
4	54	17-34	Arenisca arcillosa	Formación Plaeners
5	132	34-70	Arcilla, areniscas lidita intercalada	Formación Plaeners
6	3	>70	Arcilla	Formación Plaeners

### ANEXO C-III. Análisis SEV A3

#### Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	85.3	0.75	0.75	-0.75
2	23.9	8.25	9	-9
3	16	144	153	-153
4	201			



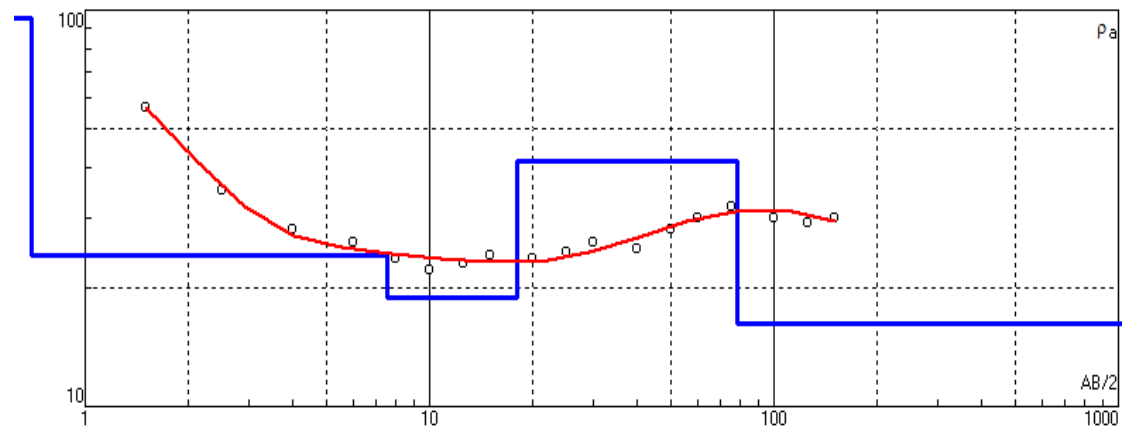
#### Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	85,3	<0.75	Suelo arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	23,9	0.75-9	Arcilla arenosa	Cuaternario Coluvial
3	16	9-153	Arcillas	Formación Plaeners
4	201	>153	Arenisca saturadas	Formación Arenisca Dura

### ANEXO C-IV. Análisis SEV A4

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	95	0.7	0.7	-0.7
2	24.1	6.8	7.5	-7.5
3	18.9	10.5	18	-18
4	41.5	60	78	-78
5	16.2			



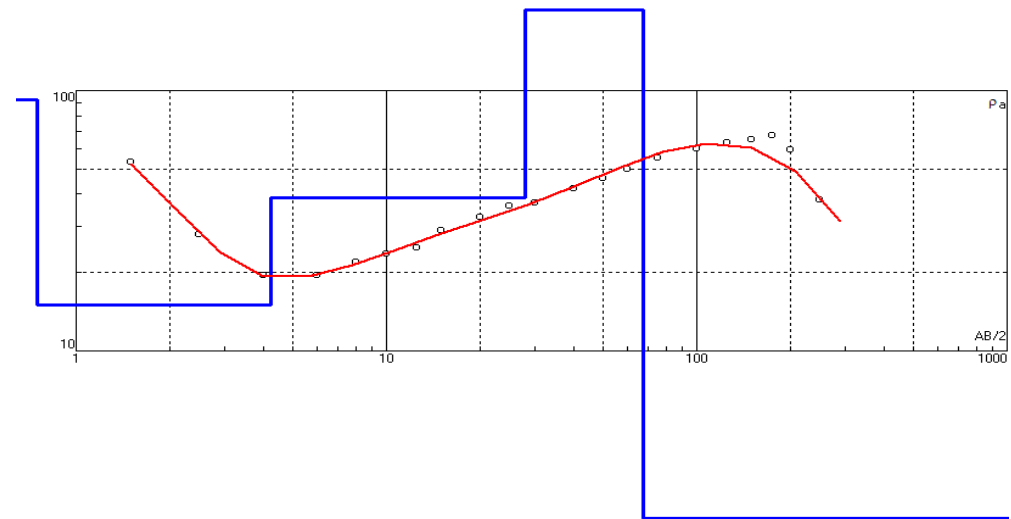
Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	95	<0.7	Suelo arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	24,1	0.7-7.5	Arcilla arenosa	Cuaternario Coluvial
3	18,9	7.5-18	Arcilla	Formación Plaeners
4	41,5	18-78	Arenisca arcillosa	Formación Plaeners
5	16,2	>78	Arcilla	Formación Plaeners

### ANEXO C-V. Análisis SEV A5

#### Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	92.5	0.75	0.75	-0.75
2	15	3.5	4.25	-4.25
3	38.7	23.8	28	-28
4	204	39	67	-67
5	1			



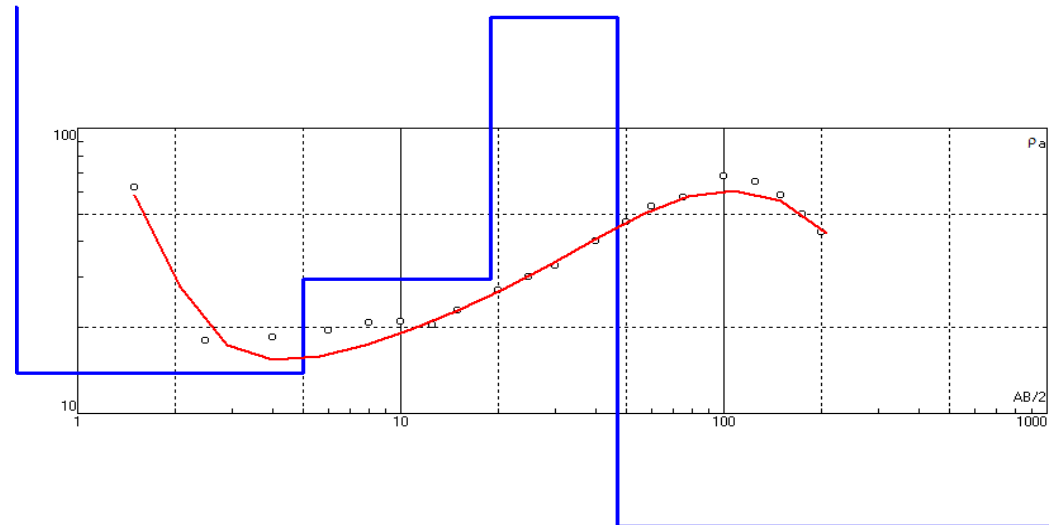
#### Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	92,5	< 0.75	Suelo arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	15	0.75-4.25	Arcilla	Cuaternario Coluvial
3	38,7	4.25-28	Arcilla arenosa	Formación Arenisca Dura
4	204	28-67	Arenisca saturada	Formación Arenisca Dura
5	1	>67	Arcilla	Formación Chipaque

### ANEXO C-VI. Análisis SEV A6

#### Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	264	0.5	0.5	-0.5
2	13.9	4.5	5	-5
3	29.6	14	19	-19
4	245	28	47	-47
5	4			



#### Correlación litológica

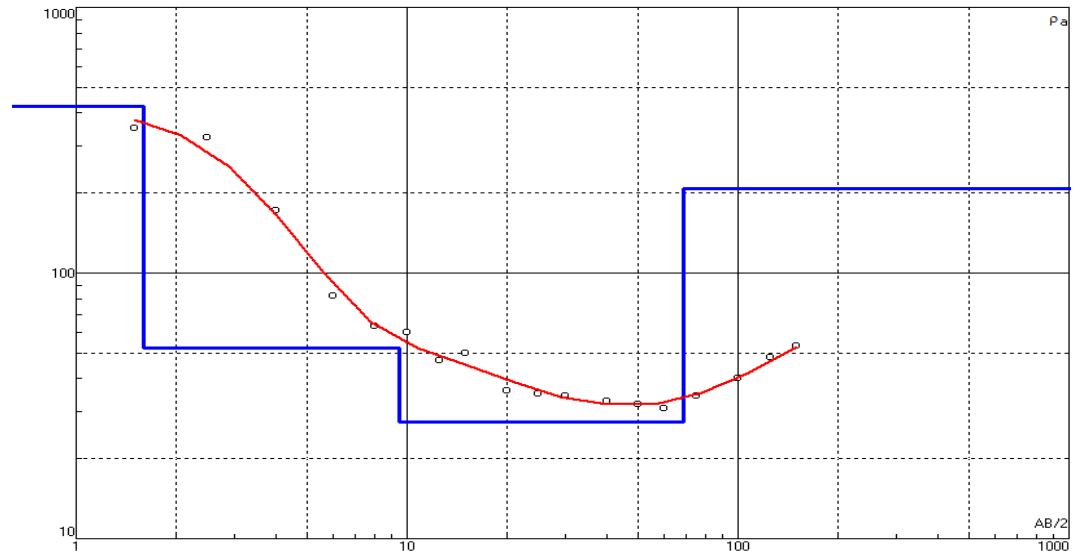
Capa	$\rho$ ( $\Omega^*m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	264	< 0.5	Suelo areno-arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	13,9	0.5-5	Arcilla	Cuaternario Coluvial
3	29,6	5-19	Arcilla arenosa	Formación Arenisca Dura
4	237	19-47	Arenisca saturada	Formación Arenisca Dura
5	4	>47	Arcilla	Formación Arenisca Dura



### ANEXO C-VII. Análisis SEV A7

#### Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	423	1.6	1.6	-1.6
2	52.1	7.9	9.5	-9.5
3	27.5	59	68.5	-68.5
4	208			



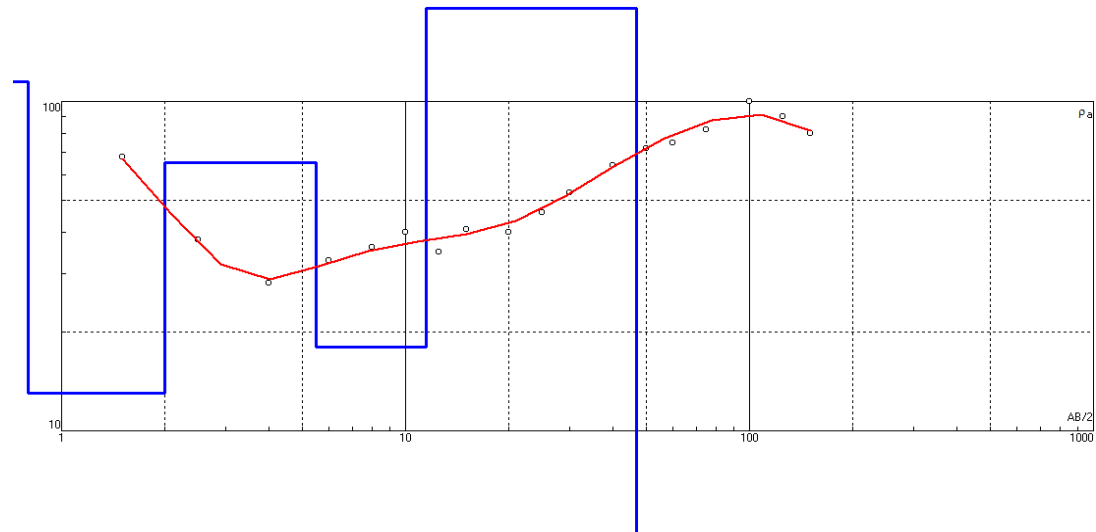
#### Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	423	< 1.6	Suelo arenoso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	52,1	1.6-9.5	Arenisca arcillosa	Cuaternario Coluvial
3	27,5	9.5-68.5	Arcilla arenosa	Formación Plaeners
4	208	>68.5	Arenisca saturada	Formación Arenisca Dura

### ANEXO C-VIII. Análisis SEV A8

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	115	0.8	0.8	-0.8
2	13	1.2	2	-2
3	65.4	3.5	5.5	-5.5
4	18	6	11.5	-11.5
5	298	35.5	47	-47
6	2.5			



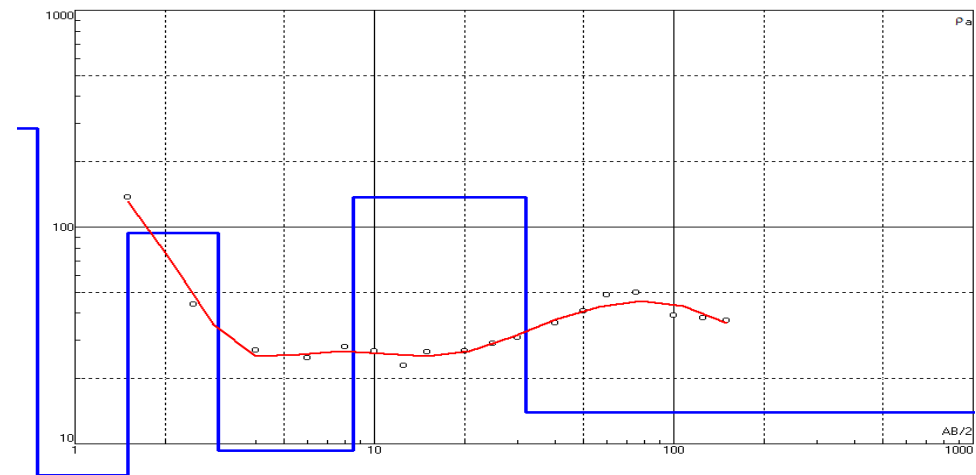
Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	115	< 0.8	Suelo areno-arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	13	0.8-2	Arcilla	Cuaternario Coluvial
3	65,4	2-5.5	Arenisca arcillosa	Cuaternario Coluvial
4	18	5.5-11.5	Arcilla	Formación Plaeners
5	298	11.5-47	Arenisca saturada	Formación Arenisca Dura
6	2,5	>47	Arcilla	Formación Arenisca Dura

### ANEXO C-IX. Análisis SEV A9

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	285	0.75	0.75	-0.75
2	6.7	0.75	1.5	-1.5
3	94	1.5	3	-3
4	9.3	5.5	8.5	-8.5
5	137	23.5	32	-32
6	14			



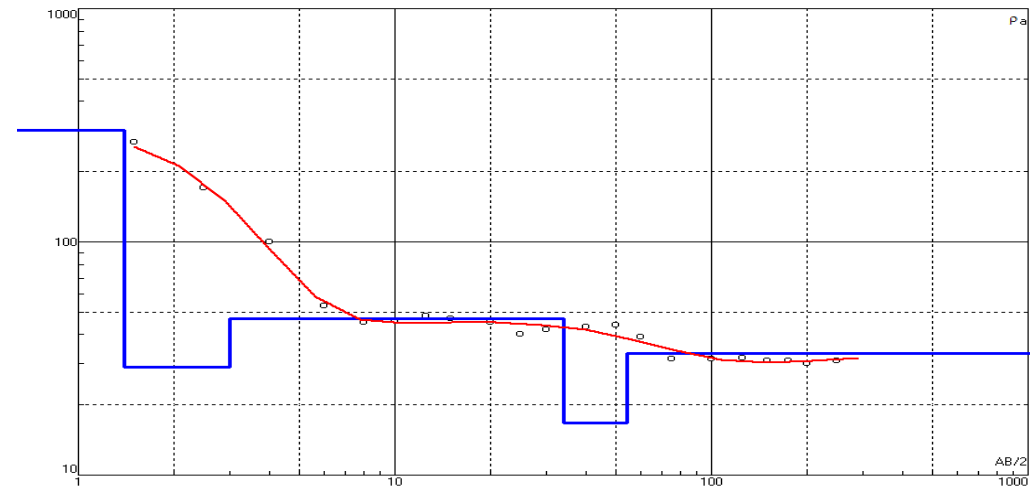
Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	285	< 0.75	Suelo areno-arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	6,7	0.75-1.5	Arcilla	Cuaternario Coluvial
3	94	1.5-3	Arena de grano grueso y arcilla	Cuaternario Coluvial
4	9,3	3-8.5	Arcilla	Cuaternario Coluvial
5	137	8.5-32	Arcilla, arenisca y lidita intercalada	Formación Plaeners
6	14	>32	Arcilla	Formación Plaeners

### ANEXO C-X. Análisis SEV A10

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	302	1.4	1.4	-1.4
2	28.9	1.6	3	-3
3	46.7	31	34	-34
4	16.7	20	54	-54
5	33.3			



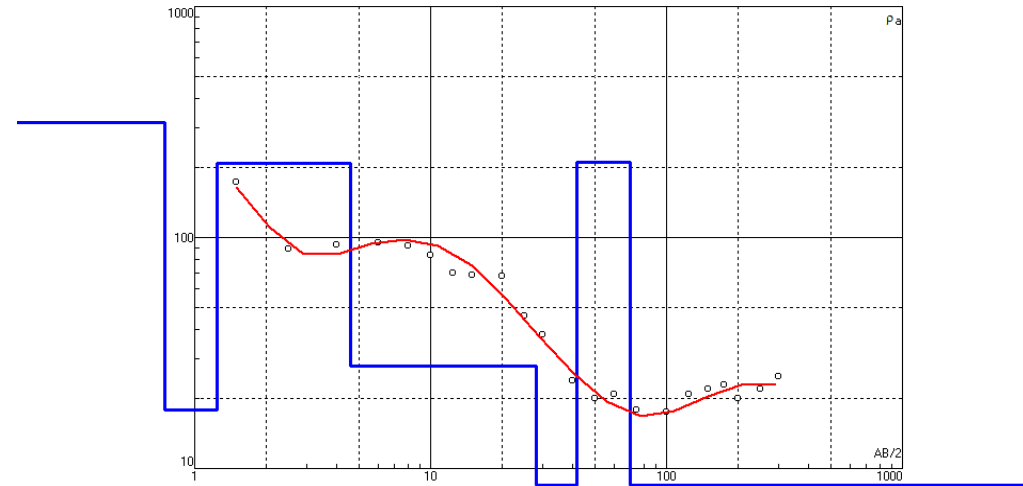
Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	302	< 1.4	Suelo arenoso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	28,9	1.4-3	Arcilla arenosa	Cuaternario Coluvial
3	46,7	3.0-34	Arenisca arcillosa	Formación Plaeners
4	16,7	34-54	Arcilla	Formación Plaeners
5	33,3	>54	Arcilla arenosa	Formación Plaeners

### ANEXO C-XI. Análisis SEV S1

#### Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	315	0.75	0.75	-0.75
2	18	0.5	1.25	-1.25
3	210	3.35	4.6	-4.6
4	27.8	23.4	28	-28
5	3.25	13.5	41.5	-41.5
6	213	28.5	70	-70
7	3.87			



#### Correlación litológica

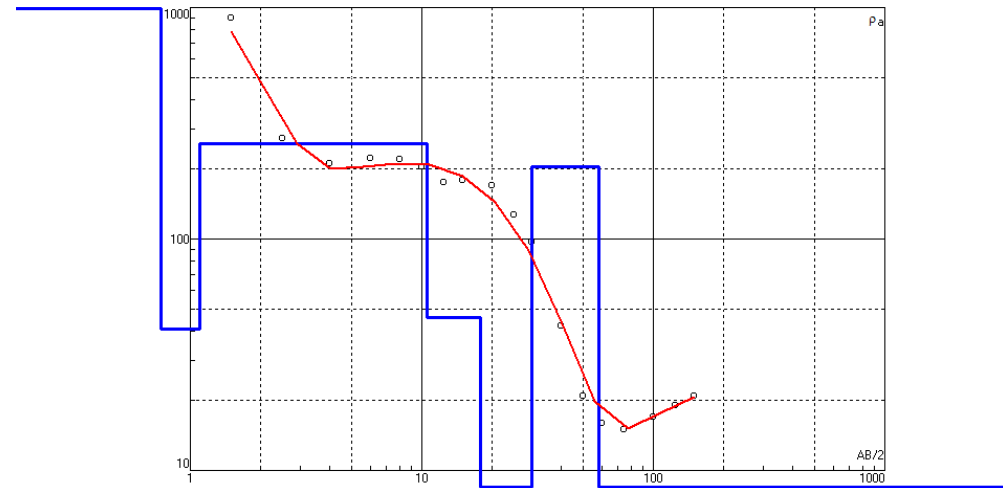
Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	315	< 0.75	Suelo arenoso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	18	0.75-1.25	Arcilla	Cuaternario Coluvial
3	210	1.25-4.6	Arenisca de grano medio a grueso	Cuaternario Coluvial
4	27,8	4.6-28	Arcilla Arenosa	Formación Arenisca Dura
5	3,25	28-41.5	Arcilla	Formación Arenisca Dura
6	213	41.5-70	Arenisca saturada	Formación Arenisca Dura
7	3,87	>70	Arcilla	Formación Chipaque



### ANEXO C-XII. Análisis SEV S2

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	1651	0.75	0.75	-0.75
2	40.8	0.35	1.1	-1.1
3	258	9.4	10.5	-10.5
4	46	7.5	18	-18
5	2.7	12	30	-30
6	205	28	58	-58
7	1			



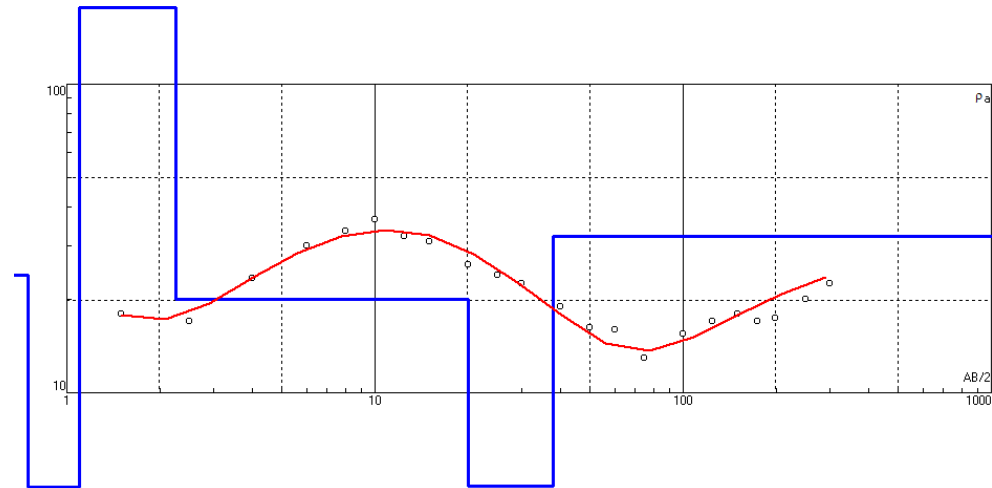
Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	1651	< 0.75	Suelo arenoso desnudo	Cuaternario Coluvial
2	40,8	0.75-1.1	Arenisca arcillosa	Cuaternario Coluvial
3	258	1.1-10.5	Arenisca de grano medio a grueso	Cuaternario Coluvial
4	46	10.5-18	Arenisca arcillosa	Formación Arenisca Dura
5	2,7	18-30	Arcilla	Formación Arenisca Dura
6	205	30-58	Arenisca saturada	Formación Arenisca Dura
7	1	>58	Arcilla	Formación Chipaque

### ANEXO C-XIII. Análisis SEV S3

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	24	0.75	0.75	-0.75
2	3.5	0.35	1.1	-1.1
3	206	1.15	2.25	-2.25
4	20	17.8	20	-20
5	5	18	38	-38
6	32			



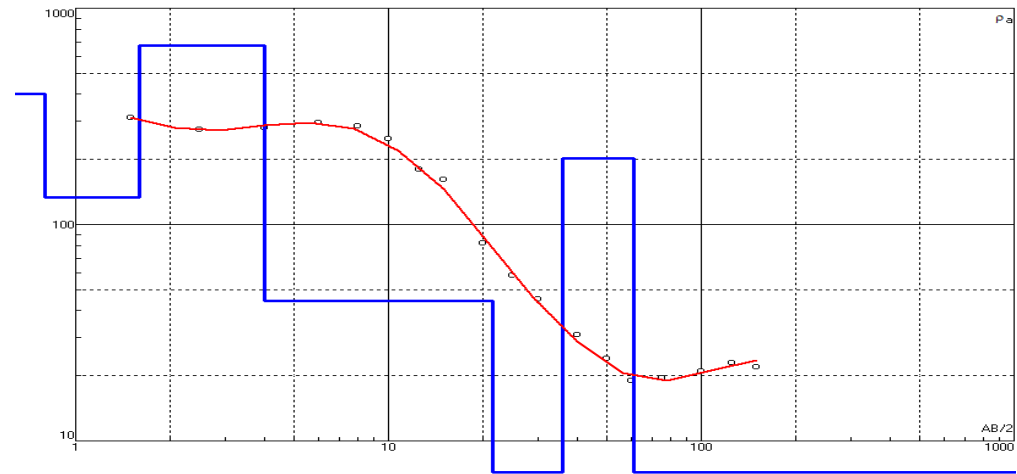
Correlación litológica

Capa	$\rho$ ( $\Omega^*m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	24	< 0.75	Suelo arcilloso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	3,5	0.75-1.1	Arcilla	Cuaternario Coluvial
3	206	1.1-2.25	Arenisca de grano medio a grueso	Cuaternario Coluvial
4	20	2.25-20	Arcilla Arenosa	Formación Arenisca Dura
5	5	20-38	Arcilla	Formación Arenisca Dura
6	32	>38	Arcilla Arenosa	Formación Arenisca Dura

### ANEXO C-XIV. Análisis SEV S4

Curva de resistividad y modelo de capas

N	$\rho$	h	d	Alt
1	403	0.8	0.8	-0.8
2	134	0.8	1.6	-1.6
3	675	2.4	4	-4
4	44.3	17.5	21.5	-21.5
5	4.5	14.5	36	-36
6	202	25	61	-61
7	1			



Correlación litológica

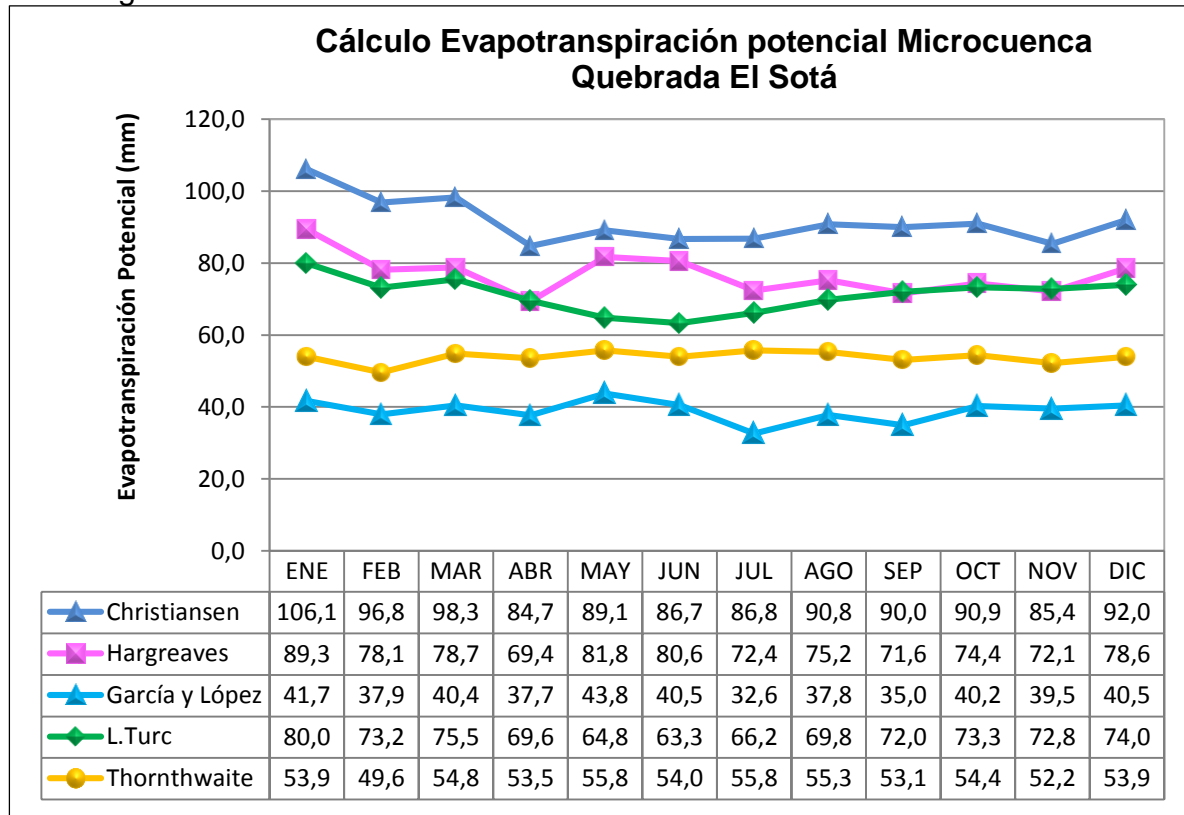
Capa	$\rho$ ( $\Omega \cdot m$ )	Prof. (m)	Litología	Unidad Litoestratigráfica
1	403	< 0.8	Suelo arenoso cubierto con césped	Cuaternario Coluvial
2	134	0.8-1.6	Arena de grano grueso con arcilla	Cuaternario Coluvial
3	675	1.6-4	Arenisca de grano medio a grueso	Cuaternario Coluvial
4	44,3	4-21.5	Arenisca arcillosa	Formación Arenisca Dura
5	4,5	21.5-36	Arcilla	Formación Arenisca Dura
6	202	36-61	Arenisca saturada	Formación Arenisca Dura
7	1	>61	Arcilla	Formación Chipaque



**ANEXO D. INTERPRETACIÓN REGISTRO ELÉCTRICO DEL POZO DE  
PRODUCCIÓN DE SALMUERA No. 7, FINCA CHIMISÍA**

## ANEXO E. CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Y REAL MICROCUENCA QUEBRADA EL SOTÁ

ANEXO E-I. Cálculo de la evapotranspiración potencial Microcuenca Quebrada El Sotá según diferentes métodos.



Fuente: Autor.





ANEXO E-II. Cálculo de la evapotranspiración potencial y real Microcuenca Quebrada el Sotá por el método de Hargreaves ,1956.

CÁLCULO EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL Y REAL													
PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
Humedad	67.3	67.4	70.5	73.8	64.9	64.0	72.8	72.0	71.6	73.1	73.8	72.3	
Brillo Solar	191	158	148	120	119	119	136	135	136	142	144	165	
Vel. Viento m/s	2.08	2.09	2.01	2.03	2.07	2.28	2.31	2.15	2.03	1.89	1.84	1.95	
Vel. Viento Km/día	180	181	174	176	179	197	200	186	176	164	159	168	
Temperatura (T)	12.8	12.8	13.0	13.2	12.8	12.5	12.3	12.8	12.6	13.3	13.4	13.2	
n (h/día)	6.15	5.59	4.77	4.00	3.83	3.96	4.39	4.36	4.54	4.56	4.81	5.32	
N	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	
P	8.32	7.57	8.47	8.29	8.66	8.41	8.68	8.60	8.23	8.42	8.07	8.30	
C	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	12.5	
D	1.00	0.91	1.02	0.99	1.04	1.01	1.04	1.03	0.99	1.01	0.97	1.00	
HN	46.0	46.1	49.1	52.3	43.8	43.0	51.3	50.5	50.2	51.6	52.3	50.9	
FH	0.54	0.54	0.51	0.48	0.56	0.57	0.49	0.49	0.50	0.48	0.48	0.49	
CW	1.09	1.09	1.09	1.09	1.09	1.11	1.11	1.10	1.09	1.08	1.07	1.08	
S	0.52	0.47	0.40	0.33	0.31	0.32	0.36	0.36	0.38	0.38	0.41	0.45	
CI	0.78	0.75	0.71	0.67	0.66	0.67	0.69	0.69	0.70	0.70	0.71	0.74	
CA	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	1.22	
<b>ETP</b>	<b>89.3</b>	<b>78.1</b>	<b>78.7</b>	<b>69.4</b>	<b>81.8</b>	<b>80.6</b>	<b>72.4</b>	<b>75.2</b>	<b>71.6</b>	<b>74.4</b>	<b>72.1</b>	<b>78.6</b>	<b>922.1</b>
<b>ETR= ETP * 0.66</b>	<b>59.0</b>	<b>51.6</b>	<b>52.0</b>	<b>45.8</b>	<b>54.0</b>	<b>53.2</b>	<b>47.8</b>	<b>49.6</b>	<b>47.2</b>	<b>49.1</b>	<b>47.6</b>	<b>51.9</b>	<b>608.6</b>

Fuente: Autor.

## ANEXO F. CÁLCULO DE LA ESCORRENTIA MICROCUENCA QUEBRADA EL SOTÁ POR EL MÉTODO DE NÚMERO DE CURVA CN

ANEXO F-I. Valor estimado de número de curva CN.

TIPO DE VEGETACION	AREA (Km <sup>2</sup> )	AREA Dec.	TIPO DE SUELO				CN
			A	B	C	D	
Agua a Cielo Abierto	0.006	0.003	100	100	100	100	0.267
	0.001	0.0001	100	100	100	100	0.041
Fincas y Caseríos con Vías de Acceso y Alrededores	0.071	0.031	59	74	82	86	2.309
	0.037	0.016	59	74	82	86	1.327
Pastizales	0.266	0.117	25	59	75	83	6.929
	0.027	0.012	25	59	75	83	0.885
Suelo Desnudo	0.002	0.001	77	86	91	94	0.077
	0.026	0.011	77	86	91	94	1.046
Bosques Plantados	0.083	0.037	35	62	73	80	2.277
	0.009	0.004	35	62	73	80	0.298
Bosque Ripario V	0.036	0.016	15	44	54	61	0.702
	0.005	0.002	15	44	54	61	0.131
Bosques Fragmentados III	0.133	0.058	36	60	70	75	3.509
	0.136	0.060	36	60	70	75	4.187
Bosques Abiertos IV	0.070	0.031	26	52	63	69	1.601
	0.187	0.082	26	52	63	69	5.191
Prados Permanentes	0.020	0.009	30	58	71	78	0.499
	0.061	0.027	30	58	71	78	1.917
Matorral - Herbazal Predominando Matorral	0.003	0.001	30	48	65	73	0.063
	0.103	0.045	30	48	65	73	2.956
Matorral - Herbazal Presencia Moderada de Matorral	0.048	0.021	35	56	70	77	1.185
	0.167	0.073	35	56	70	77	5.143
Matorral - Herbazal Predominando Herbazal	0.030	0.013	48	67	77	83	0.885
	0.064	0.028	48	67	77	83	2.170
Vegetación Secundaria II	0.056	0.025	36	60	73	79	1.798
Montes con Pastos	0.198	0.087	45	66	77	83	5.772
	0.064	0.028	45	66	77	83	2.168
Combinación de Arbolado, Herbazal y Cultivos	0.179	0.079	43	65	76	82	5.125
	0.009	0.004	43	65	76	82	0.301
Cultivos	0.003	0.001	60	72	80	84	0.092
	0.169	0.075	60	72	80	84	5.961
<b>2.268</b>							<b>66.768</b>

Fuente: Autor.

ANEXO F-II. Calculo de la escorrentía (Q) mediante la fórmula de Ponce y Hawkins.

VAR.	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL	PROM
<b>PMM</b>	29.30	40.44	69.41	95.70	93.66	61.34	61.42	56.31	57.51	103.11	79.04	39.17	786.41	65.53
<b>CN</b>	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77	66.77		
<b>S</b>	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4	126.4		
<b>Q</b>	0.12	1.62	11.42	25.19	24.00	8.00	8.03	6.11	6.54	29.65	16.04	1.37	138.11	11.51

Fuente: Autor.



Modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Nemocón,  
contrato de concesión HIQQ – 01



**ANEXO G. RESULTADO DE ANÁLISIS FÍSICOQUÍMICOS DE LAS MUESTRAS DE AGUA RECOLECTADAS**

MUESTRA N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
PARÁMETROS FÍSICO - QUÍMICOS	MANANTIAL CON GALERIAS	TANQUES CAMACHO	POZO "4"	MANANTIAL QUEBRADA EL SOTÁ	POZO "5"	MANANTIAL TANQUES CIRCULARES	INCLINADO EL INFIERNO	INCLINADO SANTA ISABEL	POZO "0"	MANANTIAL SECTOR AGUA CALIENTE
Temperatura °C *	34	25	12.2	12	12.5	12.2	14	14	12.5	34
pH	6.99	7.15	3.55	5.49	7.06	6.70	6.08	5.99	5.30	6.79
TDS *	120	1239	790	33	900	406	224820	205080	253	1000
Dureza Ca	5.21	24.47	46.63	1.68	18.08	10.96	335.91	726.41	12.76	12.47
Dureza Mg	37.48	165.64	152.45	12.27	120.63	113.56	4315.02	5460.04	111.78	98.02
Dureza CaCO3 Total	42.69	190.10	199.08	13.95	138.71	124.52	4650.93	6186.45	124.54	110.49
Balance Iónico *	9%	7%	31%	9%	3%	15%	43%	33%	7%	0%
<b>CATIONES</b>										
Li	0.000	0.066	0.080	0.000	0.055	0.000	9.123	0.000	0.000	0.157
Na	16.664	308.928	60.043	3.338	232.309	37.188	42832.496	45930.316	22.631	255.012
NH4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	1.402	4.013	3.978	0.000	1.620	1.336	0.000	0.000	0.690	5.868
Mg	10.805	47.748	43.947	3.536	34.773	32.735	1243.881	1573.952	32.223	28.257
Ca	2.084	9.794	18.666	0.674	7.239	4.389	134.465	290.784	5.109	4.991
Sr	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	984.322	0.000	0.000	0.000
Cationes Totales	30.955	370.549	126.714	7.548	275.996	75.648	45204.287	47795.052	60.653	294.285
<b>ANIONES</b>										
OH	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
CO3	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
HCO3	61.20	189.72	0.00	14.28	189.72	71.40	61.20	401.88	14.28	314.16
F	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cl	16.873	619.133	103.927	1.376	395.319	57.906	178043.562	140774.047	31.435	303.658
NO2	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Br	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
NO3	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
PO4	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
SO4	0.000	0.822	553.380	5.972	0.000	160.686	0.000	14561.094	110.130	0.000
Aniones Totales	78.073	809.675	657.31	21.628	585.04	289.992	178104.762	155737.021	155.845	617.818
<b>METALES</b>										
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	16.025	0.000
Zn	13.657	238.487	0.000	0.000	170.228	24.944	37762.637	36755.992	0.000	291.270
Co	0.000	0.000	0.000	2.895	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	103.967
Fe	11.221	58.281	0.000	4.170	39.032	39.935	1512.742	1545.275	36.100	88.097
Metales Totales	24.878	296.768	0.000	7.065	209.260	64.879	39275.379	38301.267	52.125	483.334



## ANEXO H. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Punto	Este	Norte	Altura	Tipo de Captación	Formación Geológica	Caudal (L/seg)	Observación
1	1022144	1051708	2610	Manantial	Plaeners		Sector agua caliente
2	1022089	1051249	2640	Manantial	Plaeners		Sector agua caliente
3	1022404	1051136	2650	Cuerpo de agua	Chipaque		Planta Colsalminas
4	1022960	1051092	2666	Cuerpo de agua	Chipaque		Finca Don Marín
5	1022978	1050719	2690	Cuerpo de agua	Chipaque		Villa Hermosa (SUMICOL)
6	1023080	1051770	2652	Pozo	Arenisca Dura		Pozo 2 Inactivo
7	1023197	1051572	2650	Pozo	Plaeners		Pozo 7 Inactivo
8	1023071	1051755	2650	Pozo	Arenisca Dura		Pozo 1 Inactivo
9	1023196	1051551	2650	Pozo	Plaeners	0.001	Pozo 6 Inactivo
10	1023213	1051568	2650	Pozo	Plaeners	0.02	Pozo 5 Inactivo
11	1023273	1051464	2664	Manantial	Plaeners		Tributario Q. El Sotá
12	1023246	1051657	2656	Manantial	Plaeners	0.11	Quebrada El Sotá
13	1023147	1051699	2650	Pozo	Arenisca Dura	0.65	Pozo 0 Activo
14	1024228	1050684	2569	Cuerpo de agua	Terrazas Altas		Vereda Astorga
15	1023799	1050941	2593	Cuerpo de agua	Depósito Coluvial		Vereda Astorga
16	1023056	1051408	2650	Pozo	Depósito Coluvial		Pozo de extracción inactivo
17	1023030	1051406	2650	Pozo	Depósito Coluvial		Pozo Activo Finca Don Marín
18	1022100	1051198	2640	Humedal	Depósito Coluvial		Vereda Camacho
19	1022125	1051168	2640	Cuerpo de agua	Depósito Coluvial		Vereda Camacho
20	1022112	1051327	2635	Cuerpo de agua	Depósito Coluvial		Vereda Camacho
21	1022089	1051339	2631	Aljibe	Depósito Coluvial		Vereda Camacho
22	1022085	1051412	2625	Manantial	Depósito Coluvial		Vereda Camacho
23	1022144	1051791	2648	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Sector agua caliente
24	1022148	1051760	2633	Manantial A. Termal	Arenisca Labor - Tierna	6	Sector agua caliente
25	1022179	1051732	2601	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Sector agua caliente
26	1022502	1051794	2609	Manantial	Arenisca Labor - Tierna	7	Acueducto Municipal
27	1022468	1051834	2608	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Varios manantiales en barrio salinas
28	1022457	1052172	2587	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Varios manantiales Gabriela Mistral
29	1022508	1052340	2583	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Barrio profesores
30	1022377	1051924	2593	Manantial A. Termal	Arenisca Labor - Tierna		Piscina Municipal
31	1022389	1051981	2598	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Parque Didáctico
32	1022376	1052029	2590	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Parque Didáctico
33	1022672	1051065	2657	Cuerpo de agua	Chipaque		Finca Don Marín
34	1022151	1051832	2597	Manantial A. Termal	Arenisca Labor - Tierna		Sector agua caliente
35	1023215	1051720	2658	Pozo	Arenisca Dura		Pozo 3 Inactivo



Modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Nemobón,  
contrato de concesión HIQO – 01



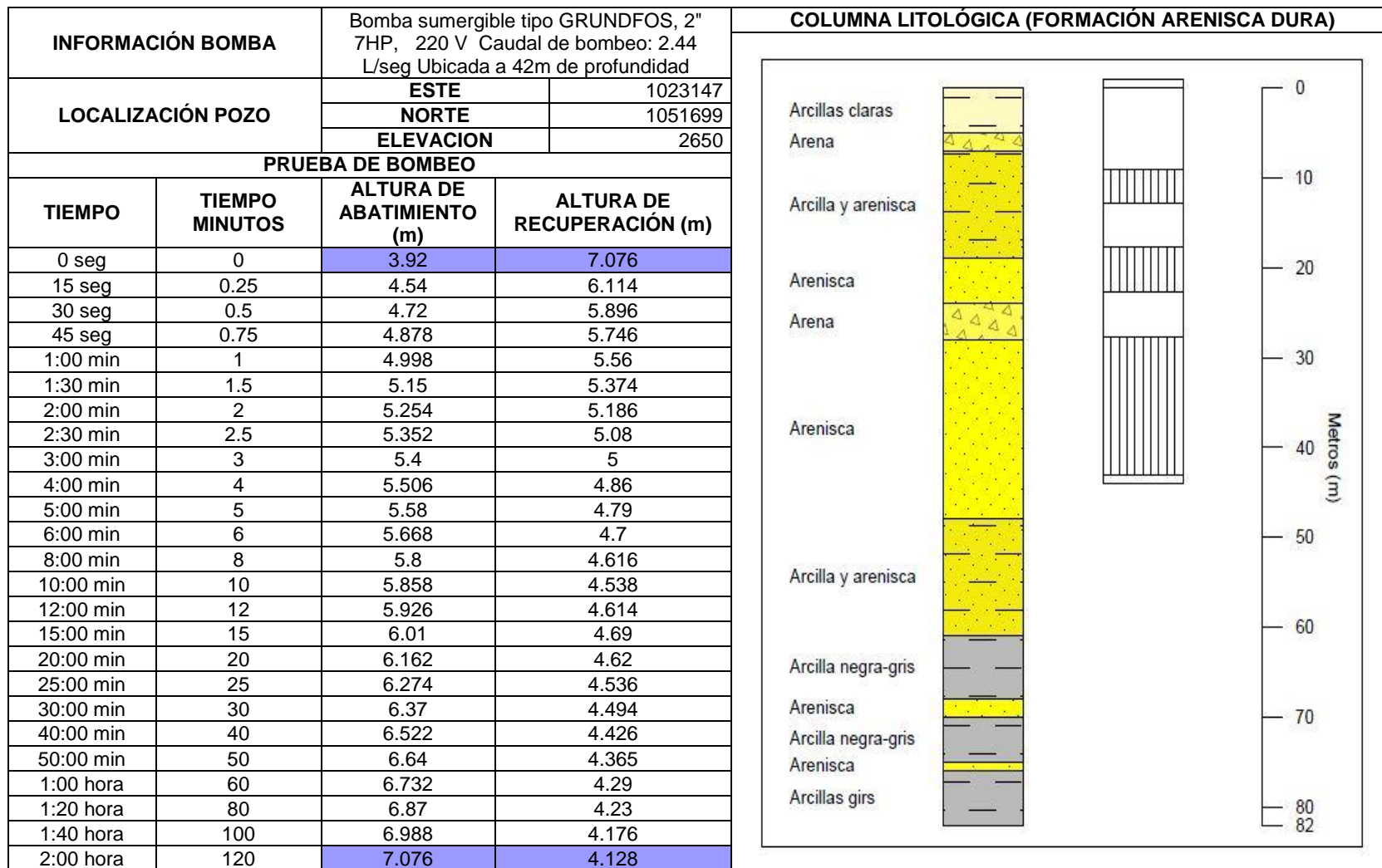
Punto	Este	Norte	Altura	Tipo de Captación	Formación Geológica	Caudal (L/seg)	Observación
36	1022305	1052145	2580	Pozo	Guaduas	2.4	Pozo de extracción inactivo
37	1022421	1052211	2580	Manantial A. Termal	Arenisca Labor - Tierna		Parque Didáctico
38	1023145	1051780	2662	Pozo	Plaeners		Pozo de extracción inactivo
39	1022308	1051704	2611	Infiltración	Chipaque		Túnel de Ventilación
40	1022370	1051585	2635	Infiltración	Chipaque		Túnel de Ventilación
41	1022529	1051647	2607	Infiltración	Chipaque		Entrada Bocamina
42	1022488	1051600	2631	Infiltración	Chipaque		Cámara de Recibo
43	1022511	1051558	2634	Infiltración	Chipaque		Tercer Tramo Puertas Alemanas
44	1022491	1051541	2639	Infiltración	Chipaque		Tanque Santa Bárbara
45	1022428	1051437	2650	Infiltración	Chipaque		Ciudad de las Estalactitas
46	1022543	1051593	2616	Infiltración	Chipaque		Labor Inundada Inclinado El Infierno
47	1022508	1051506	2640	Infiltración	Chipaque		Labor Inundada Nivel Santa Isabel
48	1023200	1051600	2650	Pozo	Plaeners		Pozo de extracción inactivo
49	1022314	1051252	2650	Manantial	Chipaque		Vereda Camacho
50	1022101	1051246	2640	Pozo	Plaeners	2	Pozo exploratorio negativo para sal
51	1022720	1051723	2639	Manantial	Arenisca Dura		Tanques Circulares
52	1022699	1051732	2631	Manantial	Arenisca Dura		Tanques Circulares
53	1022696	1051797	2645	Manantial	Plaeners		Sector Salinas
54	1022570	1051759	2600	Manantial	Arenisca Dura		Sector Salinas
55	1021447	1051805	2628	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Barrio Santa Ana
56	1021538	1051863	2593	Manantial	Depósito Coluvial		Barrio Santa Ana
57	1021527	1051897	2590	Manantial	Depósito Coluvial		Barrio Santa Ana
58	1024011	1051465	2680	Cuerpo de agua	Chipaque		Vereda Astorga
59	1022993	1050349	2578	Cuerpo de agua	Terrazas Altas		Vereda Astorga
60	1022940	1050104	2570	Cuerpo de agua	Terrazas Altas		Vereda Astorga
61	1024426	1051054	2586	Manantial	Depósito Coluvial		Vereda Astorga
62	1021830	1051995	2596	Manantial	Arenisca Labor - Tierna		Monte Carmelo
63	1021532	1051594	2622	Manantial	Plaeners		Barrio Santa Ana
64	1022133	1051655	2610	Manantial	Plaeners		Sector agua caliente
65	1022131	1051596	2610	Manantial	Plaeners		Sector agua caliente
66	1022078	1051538	2623	Manantial	Plaeners		Sector agua caliente
67	1023233	1051508	2650	Humedal	Depósito Coluvial		Fincha Chimisía

Fuente: Autor.

### ANEXO I. PRUEBA DE BOMBEO POZO 0 FINCA CHIMISÍA

#### POZO 0





POZOS DE OBSERVACIÓN						
LOCALIZACIÓN	POZO 1		POZO 3		LOCALIZACIÓN ESQUEMÁTICA	
	<b>ESTE</b>		1023071	<b>ESTE</b>		1023215
	<b>NORTE</b>		1051755	<b>NORTE</b>		1051720



Modelo hidrogeológico conceptual de la mina de sal de Nemobón,  
contrato de concesión HIQO – 01



		ELEVACION 2650.05		ELEVACION 2657.85	
TIEMPO	TIEMPO MINUTOS	ALTURA DE ABATIMIENTO (m)	ALTURA DE RECUPERACIÓN (m)	ALTURA DE ABATIMIENTO (m)	ALTURA DE RECUPERACIÓN (m)
0 seg	0	2.09	2.093	2.295	2.299
10:00 min	10	2.1			
20:00 min	20			2.325	
30:00 min	30	2.095			
40:00 min	40			2.298	
50:00 min	50	2.094			
1:00 hora	60			2.312	
1:20 hora	80	2.095			
1:40 hora	100			2.297	2.31
1:50 hora	110		2.102		
2:00 hora	120	2.093			

Fuente: Autor.



## **ANEXO J. MAPA HIDROGEOLÓGICO**



## **ANEXO K. ESTRUCTURA DEL DOMO SALINO Y UBICACIÓN DE LABORES SUBTERRÁNEAS EN 3 DIMENSIONES**