

POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DEL SINCLINAL SUESCA-TEUSACÁ (SECTOR
CENTRAL) COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO EN EL MUNICIPIO DE TOCANCIPÁ,
CUNDINAMARCA (COLOMBIA)

ALEJANDRO PÉREZ VEGA

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.

2021

POTENCIAL HIDROGEOLÓGICO DEL SINCLINAL SUESCA-TEUSACÁ (SECTOR
CENTRAL) COMO FUENTE DE ABASTECIMIENTO EN EL MUNICIPIO DE TOCANCIPÁ,
CUNDINAMARCA (COLOMBIA)

ALEJANDRO PÉREZ VEGA

Trabajo de Maestría

DIRECTOR DEL TRABAJO DE MAESTRÍA

DIEGO FELIPE GÓMEZ GUTIÉRREZ

Geólogo Ph.D.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO
FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL
MAESTRÍA EN HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.

2021

Nota de aceptación:

El trabajo de maestría “Potencial hidrogeológico del sinclinal Suesca-Teusacá (sector central) como fuente de abastecimiento en el municipio de Tocancipá, Cundinamarca (Colombia)” presentado por el estudiante Alejandro Pérez Vega, para optar por el título de Magíster en Hidrogeología Ambiental de la Universidad Antonio Nariño, cumple con todos los requisitos establecidos y recibe nota aprobatoria.

Firma del director del Trabajo de Maestría.

Firma del jurado

Firma del jurado

Bogotá D.C., 24 de mayo de 2021

“El recurso más costoso es aquel que al momento de necesitarlo no está disponible.

Cuidemos y valoremos el agua subterránea”

Sentido común

Esta tesis está impregnada del amor que siento hacia mi esposa Ibett y por mis hijos Sergio David y Diego Alejandro.

AGRADECIMIENTOS

Desde una óptica profesional, esta investigación es fruto de muchas horas de dedicación y esfuerzo, no solamente mío, sino también del Dr. Diego Felipe Gómez Gutiérrez a quien agradezco su orientación para estructurar y desarrollar el trabajo, y en lo esencial por brindarme su amistad.

Igualmente agradezco a los profesores y compañeros de la Universidad Antonio Nariño, especialmente al Dr. Cristian Camilo López Velandia por sus dinámicas clases y aportes constructivos durante la etapa de análisis de resultados del componente hidrogeoquímico. A mis compañeros de maestría Neida Alvarado, Diana Paola Granados, Deivi Díaz y Diego Ruiz por compartir sus experiencias enriqueciendo las discusiones académicas.

Al Ingeniero Geólogo Diego Alejandro Satizábal, y al Geólogo Sergio Torrado por sus sugerencias y apoyo durante la elaboración de los mapas y figuras que acompañan el documento.

En lo personal, agradezco a aquellos usuarios de pozos profundos del municipio de Tocancipá quienes facilitaron la toma de información en campo. Al Ingeniero José Manuel Morales Oñate, gerente de la empresa Geocing SAS, así como al Ingeniero Rómulo Camacho de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR - por el suministro de información que resultó relevante para sustentar este trabajo, y al Ingeniero Jairo Beltrán Cruz por su solidaridad con el desarrollo del estudio.

En lo Familiar, le agradezco a Stellita y a Fabiola por su ejemplo inspirador para retornar a la academia. A Fanor, Beatriz y Andrés Fernando por las observaciones en la revisión y edición del documento. A Yaneth, quien sin dudarlo siempre ha estado presente en momentos muy difíciles. A mis padres, y a mis hermanos, Mabel y Miguel, por su apoyo moral.

Agradezco y reconozco la comprensión de mi esposa Ibett y de mis hijos, Sergio David y Diego Alejandro, por su incondicional apoyo y constante motivación, sin ellos este importante logro hubiera sido mucho más difícil de alcanzar, tal vez hoy no sería una realidad.

Finalmente, a la vida por cruzar en este proceso a de cada una de estas personas, y a aquellas que sin querer no mencioné.

RESUMEN

El municipio de Tocancipá se localiza en el sector delimitado como Sabana Centro de la cuenca alta del río Bogotá, y se ha convertido en un polo de desarrollo agrícola e industrial de la región. La sostenibilidad de este crecimiento requiere prever la identificación de nuevas fuentes para el abastecimiento de agua que garanticen el suministro ante la demanda, y en ese sentido el recurso hídrico subterráneo surge como una alternativa viable en este propósito. Estudios geológicos, hidrológicos, hidráulicos e hidrogeoquímicos soportan el modelo hidrogeológico conceptual propuesto, el cual concluye que el sinclinal Suesca – Teusacá ofrece condiciones propicias para el almacenamiento de agua en las Formaciones Sabana, Cacho, Arenisca Labor y Tierna, Arenisca Dura.

Conforme a lo anterior, se hizo la reconstrucción geométrica del sinclinal a partir de los resultados de 26 Sondeos Eléctricos Verticales, 13 ensayos de Magneto Telúrica, ensayos geoeléctricos y la información de 29 perforaciones de pozos profundos realizadas en el municipio de Tocancipá. El procesamiento de la información se realizó con el software ArcGis. Resultado de la caracterización geológico – estructural de los materiales geológicos presentes en el área de estudio, se calcularon los espesores de las unidades de acuerdo a su disposición espacial en la estructura sinclinal, llegando a inferir la existencia de una falla inversa tipo cabalgamiento, la cual se propone denominar “Falla de Tocancipá”, localizándose a lo largo de los cerros orientales del área de estudio, afectando rocas de edad Cretácico y del Paleógeno, siendo cubierta por los depósitos de la Formación Sabana.

Se realizó el análisis hidrológico sobre datos históricos de siete estaciones hidrometeorológicas que abarcan un periodo de 26 años. Estos datos fueron evaluados mediante análisis gráficos que condujeron a la complementación de datos faltantes, y finalmente se realizó un análisis comprobatorio a fin de verificar que el modelo fuera estadísticamente significativo. Posteriormente se calculó el balance hídrico bajo criterios definidos en el método de Schosinsky, que determinó valores de precipitación promedio mensual multianual que varían de 860 mm a 970 mm, y con ellos la identificación de zonas de recarga potencial, de tránsito y descarga de agua superficial. El análisis muestra como las zonas de recarga en los cerros se ve afectada por la intervención antrópica en el desarrollo de actividades mineras y de urbanismo.

Los parámetros hidráulicos de cada unidad geológica fueron recopilados de 33 pruebas de bombeo realizadas dentro de cada pozo y con base a ellos se clasificaron los acuíferos siguiendo los lineamientos de nomenclatura propuestos por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos–IAH (1983). Por otra parte, el comportamiento hidrodinámico del área fue evaluado a partir de los resultados de monitoreo de nivel estático en 30 puntos. El análisis concluyó la presencia de flujos de agua con carácter local e intermedio para las Formaciones Sabana y Cacho respectivamente, que se integran a un flujo regional. En la Formación Arenisca Labor y Tierna se evidencia que el flujo es de tipo regional con dirección predominante en sentido NE-SW. Es importante resaltar que las zonas de descarga de flujos subterráneos se encuentran fuera del área del Municipio, y no hay evidencia de conexión hidráulica entre alguno de estos acuíferos con el río Bogotá, drenaje principal de la zona. La evolución de niveles piezométricos tuvo en cuenta registros disponibles de la red de monitoreo de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) desde el año 1998, y mostró una tendencia al descenso generalizado en los acuíferos que no supera los 20

m de profundidad en el lapso de 22 años. La caracterización hidrodinámica se complementó con una serie de consideraciones de dominio geológico y condiciones de frontera como base en futuros análisis de modelamiento numérico, igualmente con el cálculo de reservas explotables que estableció un volumen total de $5,49E+08 \text{ m}^3$.

Se evaluaron los resultados físico químicos de siete muestras depara determinar las características hidroquímicas suministradas por particulares en el periodo comprendido entre noviembre de 2020 y marzo de 2021. Los registros fueron tabulados, procesados empleando el software libre Diagrammes, y posteriormente filtrados para excluir aquellos datos que presentaron errores en el balance iónico mayor al 10%, y censurar resultados que estuvieron por debajo del límite de detección. Posteriormente fueron agrupados de acuerdo a la unidad geológica. El análisis permitió identificar que la principal facie presente en todos los acuíferos es de tipo bicarbonatada con cationes mayoritarios de Calcio en la Formación Sabana, Sodio en la Formación Cacho y clorurada en la Formación Arenisca Labor y Tierna. Mediante relaciones iónicas e indicadores cloros alcalinos se evidenció la complejidad que existe en procesos de intercambio catiónico, principalmente ocurridos en las Formaciones Sabana y Cacho. En la Formación Arenisca Labor y Tierna se aprecia cierta estabilidad química del agua. De manera complementaria se realizó un análisis comparativo de los parámetros físico químicos con los criterios establecidos en la resolución 1076 de MinAmbiente (2015), encontrando que el agua puede ser utilizada para consumo humano y doméstico, uso agrícola y pecuario previo tratamiento con métodos convencionales de algunos indicadores.

Finalmente, se integran las caracterizaciones geológica-geofísica, hidrológica, hidrodinámica e hidrogeoquímica, y con ello se desarrolla un modelo hidrogeológico conceptual que permite plantear cinco zonas de interés hidrogeológico referidas a la posición espacial que ocupa la Formación Cacho. El volumen que aporta esta unidad supera el 50% del volumen total explotado en el área, y con ello se evidencia el potencial acuífero que tiene el SS-Tsc para considerar el recurso hídrico subterráneo como una fuente alterna para el abastecimiento en el municipio de Tocancipá.

Palabras Clave: Acuífero, Formación Cacho, Zonas de interés hidrogeológico

ABSTRACT

The municipality of Tocancipá is located in the zone denominated as Sabana Centro of the upper basin of Bogotá river, it has become a spot of agricultural and industrial development in the region. The sustainability of this growth requires foreseeing the identification of new sources for the supply of water that guarantee the amount in the face of demand, in this sense, the underground water resource emerges as a viable alternative for this purpose. Geological, hydrological, hydraulic and hydrogeochemical studies support the proposed conceptual hydrogeological model, which concludes that the Suesca - Teusacá syncline offers favorable conditions for the storage of water in the Sabana, Cacho, Arenisca Sabana and Tierna, Arenisca Dura formations.

According to the paragraph above, the geometric reconstruction of the synclinal was made from the results of 26 Vertical Electrical Soundings, 13 Magneto Telluric tests, geoelectric tests and the information of 29 deep well drilling carried out in the municipality of Tocancipá. Information processing was done with ArcGis software. Results of the geological-structural characterization of the geological materials present in the study area, and the thicknesses of the units were calculated according to their spatial arrangement in the synclinal structure, inferring the existence of an inverse thrust-type fault, which It is proposed to name "Tocancipá Fault", located along the eastern hills of the study area, affecting rocks of Cretaceous and Paleogene age, being covered by the deposits of the Sabana Formation.

Hydrological analysis was made based on historical data from seven hydrometeorological stations taking into account a specific period of 26 years. These data were assessed through graphical analyzes that led to the completion of missing data, and finally a confirmatory analysis was performed in order to verify that the model was statistically significant. Subsequently, the water balance was calculated under criteria defined in the Schosinsky method, which determined multiannual monthly average precipitation values that vary from 860 mm to 970 mm, and with them the identification of areas of potential recharge, transit, and release of surface water. The analysis clearly shows how the recharge zones in the hills are currently affected by anthropic intervention in the development of mining activities and urban planning.

Hydraulic parameters of each geological unit were compiled from 33 pumping tests carried out inside each well and based on them, the aquifers were classified following the nomenclature guidelines proposed by the International Association of Hydrogeologists – IAH (1983). On the other hand, the hydrodynamic behavior of the area was evaluated from the results of monitoring the static level at 30 points. The analysis concluded the presence of local and intermediate water flows for the Sabana and Cacho Formations respectively, which are integrated into a regional flow. In the Arenisca Labor and Tierna Formation it is evidenced that the flow is regional in nature with a predominant direction in the NE-SW direction. It is important to highlight that the underground flow discharge areas are outside the area of the Municipality, and there is no evidence of hydraulic connection between any of these aquifers with the Bogotá River, the main drainage of the area. The evolution of piezometric levels took into account available records from the monitoring network of the Regional Autonomous Corporation of Cundinamarca (CAR) since 1998, and showed a generalized downward trend in aquifers that did not exceed 20 Meters in depth in a time frame of 22 years. The hydrodynamic characterization was complemented with a series of considerations of geological domain and boundary conditions as a basis in future numerical modeling analyzes, also the measure of exploitable reserves that established a total volume of $5.49E + 08 \text{ m}^3$.

Also, Physical-chemical results of seven samples were evaluated to determine the hydrochemical characteristics supplied by individuals in the period between November 2020 and March 2021. The records were stored and processed using the software Diagrammes, and later filtered to exclude those data that presented faults in the ionic balance greater than 10%, and censoring results that were below the detection limit. After, data was successfully grouped according to the geological unit, the analysis allowed to identify that the main facie present in all the aquifers is the bicarbonate type with major cations of Calcium in the Sabana Formation, Sodium in Cacho Formation and chlorinated in Arenisca Labor and Tierna Formation. Through ionic relationships and chlor-alkali indicators, the complexity that exists in cation exchange processes, mainly occurring in the Sabana and Cacho Formations, was evidenced. In the Arenisca Labor and Tierna Formation, a certain chemical stability of the water is observed. In a complementary way, a comparative analysis of the physical-chemical parameters was carried out with the criteria established in resolution 1076 of MinAmbiente (2015), finding that water can be destined for human and domestic consumption, agricultural and livestock use after treatment with conventional methods of some indicators.

Finally, the geological-geophysical, hydrological, hydrodynamic and hydrogeochemical characterizations are integrated, and with this a conceptual hydrogeological model is developed and allows to propose five zones of hydrogeological interest referred to the spatial position occupied by the Cacho Formation. The volume contributed by this unit exceeds 50% of the total volume exploited in the area, with this, the aquifer potential of the SS-Tsc is evidenced to consider the underground water as an alternative resource for supply in the municipality of Tocancipá.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	7
ABSTRACT.....	9
GLOSARIO.....	21
INTRODUCCIÓN	22
1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA.....	24
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO	24
1.2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO.....	25
2. OBJETIVOS	27
2.1 OBJETIVO GENERAL	27
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	27
3. MARCO TEÓRICO.....	28
3.1 MODELO GEOLÓGICO – GEOFÍSICO	28
3.1.1 Contexto Geológico Regional	28
3.1.2 Geología y Estratigrafía Local	33
3.1.2.1 Formación Arenisca Dura (K2d).....	33
3.1.2.2 Formación Plaeners (K2p).....	33
3.1.2.3 Formación Labor y Tierna (K2t).....	33
3.1.2.4 Formación Guaduas (K2E1g).....	36
3.1.2.5 Formación Cacho (E1c).....	37
3.1.2.6 Formación Bogotá (E1b).....	38
3.1.2.7 Formación Sabana (Q1sa).....	39
3.1.2.8 Formación Chía (Q2ch).....	39
3.1.2.9 Depósitos Coluviales (Q2c).....	39
3.1.2.10 Depósitos Aluviales recientes (Q2da).....	39
3.1.3 Estudios geofísicos.....	39
3.2 MODELO HIDROLÓGICO	40
3.3 MODELO HIDRODINÁMICO.....	40
3.4 HIDROGEOQUÍMICA	41
3.4.1 Hidroquímica.....	41
3.4.2 Calidad del agua.....	42
3.5 MODELO HIDROGEOLOGICO CONCEPTUAL.....	45
4. MARCO METODOLÓGICO.....	46
4.1 ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN BASE	46
4.2 MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO	47
4.2.1 Procesamiento y análisis	47
4.2.2 Integración y resultados	47
4.3 MODELO HIDROLÓGICO	48
4.3.1 Adquisición de información base.....	49
4.3.2 Procesamiento y análisis	49
4.3.2.1 Homogeneización y complementación de datos	49
4.3.2.2 Validación de datos	51
4.3.2.3 Análisis temporal de registros históricos.....	51
4.3.2.4 Distribución espacial (Mapa de isolíneas).....	52

4.3.2.5	Parámetros del balance hídrico.....	52
4.3.3	Integración y resultados	55
4.3.3.1	Cálculo del balance hídrico	56
4.3.3.2	Recarga potencial	56
4.3.3.3	Zona de recarga y descarga	56
4.4	MODELO HIDRODINÁMICO	59
4.4.1	Procesamiento y análisis	59
4.4.2	Integración y resultados	60
4.4.2.1	Zona de interés hidrogeológico	60
4.4.2.2	Reservas hidrogeológicas	60
4.5	MODELO HIDROGEOQUÍMICO.....	61
4.5.1	Procesamiento y análisis	61
4.5.1.1	Análisis de datos.....	61
4.5.1.2	Relaciones iónicas	62
4.5.2	Integración y resultados	62
4.5.2.1	Distribución espacial	62
4.5.2.2	Calidad del agua	63
4.6	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	63
4.7	POTENCIAL DEL RECURSO HÍDRICO	63
5.	ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES	65
5.1	MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO.....	65
5.1.1	Estratigrafía	65
5.1.1.1	Grupo Guadalupe	67
Formación Arenisca Dura (K2d).....	67	
Formación Plaeners (K2p)	67	
Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t).....	68	
5.1.1.2	Formación Guaduas (K2E1g).....	70
5.1.1.3	Formación Cacho (E1c)	71
5.1.1.4	Formación Bogotá (E1b).....	73
5.1.1.5	Formación Sabana (Q1sa)	73
5.1.1.6	Formación Chía (Q2ch).....	74
5.1.1.7	Depósitos Recientes	75
Depósitos Coluviales (Q2c)	75	
Depósitos Aluviales Recientes (Q2da).....	76	
Depósitos Rellenos Antrópicos (Q2ra).....	76	
5.1.2	Geología estructural	77
5.1.2.1	Falla de Chocontá - Pericos.....	77
5.1.2.2	Falla de Tocancipá	77
5.1.2.3	Anticlinal de Sopó - Sesquilé	77
5.1.2.4	Anticlinal de Nemocón.....	78
5.1.2.5	Sinclinal Suesca – Teusacá.....	79
5.1.3	Análisis de la información geológica - geofísica	79
5.1.3.1	Perforaciones	81
5.1.3.2	Tomografías	81
5.1.3.3	SEV	81
5.1.3.4	MT	84
5.1.4	Modelo geológico geofísico	85
5.1.5	Síntesis de conclusiones	89
5.2	MODELO HIDROLÓGICO	90
5.2.1	Características físicas de la subcuenca	90

5.2.1.1	Vegetación.....	90
5.2.1.2	Cobertura y uso del suelo.....	90
5.2.1.3	Patrón de drenaje.....	92
5.2.2	Parámetros climatológicos.....	92
5.2.2.1	Validación y tratamiento de datos.....	94
	Análisis exploratorio gráfico.....	94
	Complementación de datos.....	97
	Análisis cuantitativo o confirmatorio.....	97
5.2.2.2	Precipitación.....	97
	Comportamiento estacional de la Precipitación.....	98
	Mapas de Isoyetas.....	99
5.2.2.3	Temperatura.....	99
	Comportamiento estacional.....	99
	Mapas de Isotermas.....	101
5.2.2.4	Evapotranspiración Potencial (ETP).....	101
5.2.3	Balace hídrico.....	103
5.2.3.1	Parámetros del balance hídrico.....	104
	Precipitación (P).....	104
	Precipitación que infiltra (Pi).....	104
	Evapotranspiración Real (ETPR).....	104
	Escorrentía Superficial (ESC).....	105
5.2.3.2	Recarga potencial (Rp).....	105
5.2.4	Zonas de recarga.....	107
5.2.4.1	Zonas de recarga potencial.....	107
5.2.4.2	Zonas de recarga efectiva.....	110
5.2.4.3	Zonas de tránsito y descarga.....	112
5.2.5	Modelo hidrológico.....	112
5.2.6	Síntesis de conclusiones.....	114
5.3	MODELO HIDRODINÁMICO.....	115
5.3.1	Inventario de puntos de agua.....	115
5.3.2	Parámetros hidráulicos.....	117
5.3.2.1	Transmisividad (T).....	117
5.3.2.2	Capacidad Específica (CE).....	117
5.3.2.3	Comportamiento hidráulico.....	118
5.3.3	Clasificación de acuíferos.....	118
5.3.4	Piezometría.....	122
5.3.5	Líneas de flujo.....	124
5.3.5.1	Acuífero Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t).....	125
5.3.5.2	Acuífero Formación Cacho (E1c).....	125
5.3.5.3	Acuífero Formación Sabana (Q1sa).....	125
5.3.6	Zonas de recarga y tránsito.....	129
5.3.6.1	Zona de Recarga y tránsito del acuífero Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). 129	
5.3.6.2	Zona de Recarga y tránsito del acuífero Formación Cacho (E1c).....	129
5.3.6.3	Zona de Recarga y tránsito del acuífero Formación Sabana (Q1sa).....	129
5.3.7	Zonas y volumen de descarga.....	130
5.3.8	Dominio geológico y condiciones de frontera.....	130
5.3.8.1	Dominio de unidades geológicas.....	130
5.3.8.2	Condiciones de frontera del modelo.....	131
5.3.9	Reservas hidrogeológicas.....	132
5.3.9.1	Consideraciones previas.....	132

5.3.9.2	Reservas Dinámicas (<i>QDinámica</i>)	133
5.3.9.3	Reservas Estáticas (<i>QEstática</i>).....	133
5.3.9.4	Reservas Explotable (<i>QT</i>)	133
5.3.10	Modelo hidrodinámico	134
5.3.11	Síntesis de conclusiones	134
5.4	MODELO HIDROGEOQUÍMICO.....	137
5.4.1	Validación de datos	140
5.4.2	Análisis estadístico descriptivo	140
5.4.3	Diagramas de facies	141
5.4.3.1	Diagrama de Piper-Hill	141
5.4.3.2	Diagrama de Schöeller - Berkaloff.....	142
5.4.3.3	Diagrama de Gibbs.....	144
5.4.3.4	Diagrama de Stiff	145
5.4.4	Relaciones iónicas	146
5.4.5	Evolución del flujo (Local – Intermedio – Regional)	149
5.4.6	Parámetros e indicadores de Calidad del agua	152
5.4.6.1	Parámetros Físico químicos.....	152
5.4.6.2	Relación de Absorción de Sodio (RAS).....	152
5.4.6.3	Porcentaje de Sodio Posible (PSP).....	152
5.4.6.4	Carbonato de Sodio Residual (CSR).....	154
5.4.7	Modelo hidrogeoquímico	155
5.4.8	Síntesis de conclusiones	157
5.5	MODELO HIDROGEOLÓGICO	158
5.5.1	Formación Arenisca Labor y Tierna (k2t).....	162
5.5.2	Formación Cacho (E1c)	163
5.5.3	Formación Sabana (Q1sa)	164
5.6	POTENCIAL DEL APROVECHAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO	165
5.6.1	Definición de parámetros	165
5.6.2	Modelamiento geométrico y espacial.....	166
5.6.3	Desarrollo y construcción del mapa	166
6.	CONCLUSIONES	169
7.	BIBLIOGRAFÍA.....	171

LISTA DE ANEXOS

Anexo A. Localización de perforaciones de pozos consultadas.....	178
Anexo B. Correlación hidrogeológica cualitativa de SEV	179
Anexo C. Perfiles geofísicos a partir de SEVs	182
Anexo D. Perfil geofísico transversal y longitudinal a partir de MT	183
Anexo E. Balance Hídrico de Suelos	184
Anexo F. Inventario de puntos de agua, unidad geológica de captación, aforo y nivel estático de pozos de agua subterránea en Tocancipá	188
Anexo G. Parámetros hidráulicos registrados por unidad geológica de captación	190
Anexo H. Caudal por descarga artificial	191
Anexo I. Resultados ensayos Físico Químicos	192
Anexo J. Resultados de Estadística de concentraciones de cationes por unidad hidrogeológica	193

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localización municipio de Tocancipá.	26
Figura 2. Mapa geológico Regional Cuenca del río Bogotá.	29
Figura 3. Leyenda Mapa geológico Regional Cuenca del río Bogotá.....	30
Figura 4. Unidades geológicas en el municipio de Tocancipá y área de estudio.	34
Figura 5. Columna estratigráfica de la Formación Arenisca Labor y Tierna. Sección Tausa – Boquerón.	35
Figura 6. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Guaduas. Sección de Sutatausa.	36
Figura 7. Columna estratigráfica de la Formación Cacho. Sección vereda Soatama – Machetá.	37
Figura 8. Columna estratigráfica de la Formación Bogotá. Sección Quebrada El Mochuelo (Zo Grande) Usme.	38
Figura 9. Flujograma general de la metodología.....	46
Figura 10. Flujograma detallado de la metodología del Modelo Geológico - Geofísico.	48
Figura 11. Flujograma detallado de la metodología del Modelo Hidrológico.	50
Figura 12. Flujograma detallado de la metodología del Modelo Hidrodinámico.	59
Figura 13. Flujograma detallado de la metodología del Modelo Hidrogeoquímico.	61
Figura 14. Mapa geológico de Tocancipá.	66
Figura 15. Panorámica de Unidades Estratigráficas en desde La vereda La Esmeralda, Tocancipá.	67
Figura 16. Panorámica de Unidades Estratigráficas en desde la vereda La Fuente, Tocancipá.	67
Figura 17. Afloramiento de intercalación de capas de areniscas y arcillolitas de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda Quindingua. (E: 1020550 N: 1041477).....	68
Figura 18. Afloramiento de limolitas de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda Canavita, sector Tablón Alto, sobre la vía que conduce a Guatavita. (E: 1020550 N: 1041477).	69
Figura 19. Afloramiento de areniscas de grano medio a fino de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda La Esmeralda, sector Chuchilla Peña Blanca. (E: 1021316 N: 1039449).	69
Figura 20. Afloramiento de capas de arenisca grano medio a grueso de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda La Esmeralda. (E: 1019688 N: 1040776).....	70
Figura 21. Morfología de la Formación Guaduas (K2E1g). Vereda Banderillas, Finca El Camino, Zipaquirá. (E: 1014260 N: 1043960).	70
Figura 22. Formación Guaduas (K2E1g). Vereda El Porvenir. (E: 1018588 N: 1044629).	71
Figura 23. Contacto Formación Cacho (E1c) y Formación Guaduas (K2E1g). Vereda La Fuente. Tocancipá (E: 1016252 N: 1045093).	71
Figura 24. Arenisca de la Formación Cacho (E1c). Vereda La Fuente. (E: 1016252 N: 1045093).	72

Figura 25. Sección delgada tomada con objetivo 100 X sobre muestra de la Formación Cacho (E1c).....	72
Figura 26. Morfología Formación Sabana (Q1sa). Vereda La Fuente. (E: 1015501 N: 1043935).	73
Figura 27. Formación Sabana (Q1sa). Vereda La Fuente. (E: 1015481 N: 1044146).	74
Figura 28. Formación Sabana (Q1sa). Vereda La Esmeralda. (E: 1018773 N: 1040408).	74
Figura 29. Morfología Formación Chía (Q2ch). Vereda El Porvenir. (E: 1020180 N: 1042626).	75
Figura 30. Formación Chía (Q2ch). Vereda El Porvenir. (E: 1020195 N: 1042379).	75
Figura 31. Morfología Depósito Coluvial (Q2c). Vereda La Esmeralda. (E: 1019712 N: 1040447).	76
Figura 32. Pliegue Anticlinal de Tocancipá, flanco Occidental del Anticlinal de Sopó - Sesquilé. Vereda La Esmeralda. (E: 1019688 N: 1040776).	78
Figura 33. Pliegues Anticlinal de Tocancipá, flanco occidental del Anticlinal de Sopó – Sesquilé. Vereda Quindigua. (E: 1020488 N: 1041934).	78
Figura 34. Anticlinal de Nemocón. Vereda La Fuente. (E: 1014719 N: 1046207).	79
Figura 35. Localización de ensayos de geo eléctrica y de perforaciones analizadas.	80
Figura 36. Perfil de SEVs y perforaciones consultadas.	82
Figura 37. Modelo 3D geológico geofísico del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.	88
Figura 38. Patrón de drenaje en el municipio de Tocancipá.	93
Figura 39. Gráficas de series de tiempo de la precipitación de la Estación Checua.	95
Figura 40. Gráficas de series de tiempo de la Precipitación de la estación Zipaquirá.	95
Figura 41. Gráficas de series de tiempo de la Precipitación de la estación San Isidro.....	95
Figura 42. Diagrama de cajas Estaciones seleccionadas.	96
Figura 43. Gráfica de doble masa para estaciones seleccionadas.	96
Figura 44. Hietogramas de las estaciones seleccionadas.	98
Figura 45. Mapa de Isoyetas.	100
Figura 46. Valores medios de Temperatura para la estación Checua y Zipaquirá.	101
Figura 47. Mapa de Isotermas.	102
Figura 48. Valores medios mensuales de ETP para las estaciones Checua y Guasca.....	103
Figura 49. Parámetros del balance hídrico.	104
Figura 50. Déficit de capacidad de campo (DCC) y Recarga potencial (Rp).	105
Figura 51. Balance hídrico para las diferentes coberturas en el Territorio.....	106
Figura 52. Zonas de recarga hídrica potencial.	109
Figura 53. Zonas de recarga hídrica efectiva.	111
Figura 54. Zonas de inundación en suelos de textura arcillosa.	112
Figura 55. Esquema del modelo hidrológico.....	113

Figura 56. Localización de inventario de puntos de agua.	116
Figura 57. Monitoreo de nivel piezométrico. (E:1018340 N:1043930).	122
Figura 58. Evolución de nivel piezométrico de la Formación Sabana.	123
Figura 59. Evolución de nivel piezométrico de la Formación Cacho.	123
Figura 60. Evolución de nivel piezométrico de la Formación Arenisca Labor y Tierna.	124
Figura 61. Sistema local, intermedio y regional de flujo de agua subterránea.	124
Figura 62. Mapa de Isopiezas Acuífero de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t).	126
Figura 63. Mapa de Isopiezas Acuífero de la Formación Cacho (E1c).	127
Figura 64. Mapa de Isopiezas Acuífero de la Formación Sabana (Q1sa).	128
Figura 65. Modelo hidrodinámico 3D para unidades de interés hidrogeológico en el municipio de Tocancipá.	135
Figura 66. Modelo hidrodinámico 2D para unidades de interés hidrogeológico en el municipio de Tocancipá.	136
Figura 67. Localización puntos con información de ensayos físico químicos.	139
Figura 68. Diagrama de Piper para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.	142
Figura 69. Diagrama de Schöeller – Berkaloff para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.	143
Figura 70. Diagrama de Gibbs para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.	144
Figura 71. Diagrama de Stiff para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.	145
Figura 72. Conductividad Eléctrica vs TDS.	147
Figura 73. Relación iónica para evaluación de intercambio catiónico en el agua.	147
Figura 74. Relación de indicadores cloro alcalinos (CAI 1 y CAI 2).	148
Figura 75. Relación $(\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ vs $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+})$	149
Figura 76. Evolución del flujo de agua subterránea.	150
Figura 77. Esquema de la evolución del flujo local, intermedio y regional del agua subterránea.	150
Figura 78. Dirección de flujo regional del agua subterránea.	151
Figura 79. Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.	159
Figura 80. Leyenda del Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.	160
Figura 81. Mapa Hidrogeológico Conceptual (MHC) del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.	161
Figura 82. Diagrama de Proceso para la zonificación de acuíferos en Tocancipá.	165
Figura 83. Zonas de interés en función de la profundidad en el municipio de Tocancipá.	168

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Correlación Regional del Cretácico al Neógeno en la Sabana de Bogotá.....	32
Tabla 2. Criterios de la calidad del agua para consumo humano y doméstico, uso agrícola y pecuario establecidos en el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 MADS.....	43
Tabla 3. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos.....	53
Tabla 4. Profundidad de las raíces para diferentes cultivos.	53
Tabla 5. Componentes del coeficiente de infiltración por pendiente.	53
Tabla 6. Componentes del coeficiente de infiltración por cobertura vegetal.	54
Tabla 7. Número de horas máximo de sol mensual para latitud 5° Norte.	55
Tabla 8. Atributos, Ponderación y Calificación de Zonas Recarga.....	57
Tabla 9. Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica.	58
Tabla 10. Ponderación de la recarga potencial por precipitación.....	58
Tabla 11. Áreas de potencial interés hidrogeológico.	64
Tabla 12. Correlación entre tipo de material y la resistividad.....	81
Tabla 13. Espesor promedio por unidad geológica de referencia INGEOMINAS vs SEVs y MT.	84
Tabla 14. Resumen de caracterización Geológica Geofísica de las Unidades Geológicas en Tocancipá.....	86
Tabla 15. Cobertura vegetal y % de ocupación del área en el municipio de Tocancipá.	91
Tabla 16. Estaciones seleccionadas hidroclimáticas seleccionadas.	94
Tabla 17. Ecuaciones para complementación de datos y cantidad de datos faltantes.	97
Tabla 18. Pruebas estadísticas para el análisis confirmatorio.	97
Tabla 19. Precipitación promedio anual de las estaciones seleccionadas.	97
Tabla 20. Distribución temporal de la precipitación (mm año ⁻¹).	99
Tabla 21. Evapotranspiración Potencial por el método de Thornthwaite.	101
Tabla 22. Ponderación de atributos para cálculo de zonas de recarga potencial.....	108
Tabla 23. Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Transmisividad.....	117
Tabla 24. Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Capacidad Específica (CE).	118
Tabla 25. Parámetros Hidráulicos de las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.	119
Tabla 26. Caracterización de unidades hidrogeológicas en el municipio de Tocancipá.	120
Tabla 27. Volumen estimado de descarga artificial en el municipio de Tocancipá.	130
Tabla 28. Condiciones de frontera SS-Tsc.....	131
Tabla 29. Cálculo de Reservas explotables por tipo de acuífero.....	132
Tabla 30. Reservas Explotables en unidades hidrogeológicas en el municipio de Tocancipá. .	133

Tabla 31. Constituyentes iónicos en aguas subterráneas.....	137
Tabla 32. Origen de principales iones disueltos en agua subterránea.	138
Tabla 33. Localización puntos de ensayos Físico Químicos asociados a la unidad geológica.	138
Tabla 34. Resumen estadístico de las unidades hidrogeológicas.	141
Tabla 35. Comparación de parámetros físico químicos del agua vs Decreto 1076 (MinAmbiente, 2015).	153
Tabla 36. Modelo hidrogeoquímico del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.....	156
Tabla 37. Zonificación de acuíferos en función de la profundidad.....	166

GLOSARIO

BASN	:	BOSQUES AREAS SEMI NATURALES
CAM	:	CORPORACIÓN AUTÓNOMA DEL ALTO MAGDALENA
CAR	:	CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE CUNDINAMARCA
CE	:	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA
Ce	:	CAPACIDAD ESPECÍFICA
DAMA	:	DEPARTAMENTO TÉCNICO ADMINISTRATIVO DEL MEDIO AMBIENTE
EAAB	:	EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO DE BOGOTÁ
ERA	:	ESTUDIO REGIONAL DEL AGUA
ESPT	:	EMPRESA DE SERVICIOS PÚBLICOS DE TOCANCIPÁ
IDEAM	:	INSTITUTO DE HIDROLOGÍA, METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES
IGAC	:	INSTITUTO GEOGRÁFICO AGUSTÍN CODAZZI
JICA	:	JAPAN INTERNATIONAL COOPERATION AGENCY
LRS	:	LÍNEAS DE REFRACCIÓN SÍSMICA
MAVDT	:	MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL
MHC	:	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL
MT	:	MAGNETO TELÚRICA
OIEA	:	ORGANISMO INTERNACIONAL DE ENERGÍA ATÓMICA
PNGIRH	:	POLÍTICA NACIONAL DE GESTIÓN INTEGRAL DEL RECURSO HÍDRICO
SDA	:	SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE
SEV	:	SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL
SGC	:	SERVICIO GEOLÓGICO COLOMBIANO
SS-Tsc	:	SINCLINAL SUESCA-TEUSACA SECTOR CENTRAL
RAS	:	REGLAMENTO TÉCNICO DEL SECTOR DE AGUA POTABLE Y SANEAMIENTO BÁSICO
TAg	:	TERRITORIOS AGRÍCOLAS
TArCU	:	TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS DE CENTROS URBANOS
TArPM	:	TERRITORIOS ARTIFICIALIZADOS POLIGONO MINERO

INTRODUCCIÓN

En Colombia la Política Nacional de Gestión Integral del Recurso Hídrico (PNGIRH) 2010-2022 tiene como objetivo general garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico, mediante su gestión y su uso eficiente y eficaz. Esta política está articulada al ordenamiento, al uso del territorio y a la conservación de los ecosistemas que regulan la oferta hídrica, por tanto, el agua se considera como un factor de desarrollo económico y de bienestar social, para lo cual es necesario implementar procesos de participación equitativa e incluyente (MinAmbiente, 2010). Conforme a lo anterior, la administración del recurso hídrico para la cuenca del río Bogotá está asignada a la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR –, donde se localiza el municipio de Tocancipá y se desarrolla el objeto de este estudio.

El marco de la investigación se dio a partir de la recopilación y análisis sistemático de documentación e información técnica existente asociada con los componentes geológico, hidrológico, hidráulico e hidrogeoquímico, los cuales junto con datos obtenidos en campañas de campo (actualización de la cartografía geológica, elaboración de secciones geológicas, análisis fisicoquímicos de puntos de agua subterránea, monitoreo de niveles piezométricos entre otros), que permitieron la elaboración de un modelo hidrogeológico conceptual (MHC) asociado a la estructura geológica del sinclinal Suesca-Teusacá en el sector central (SS-Tsc).

El modelo geológico-geofísico se basó principalmente en la documentación existente de informes del Servicio Geológico Colombiano (SGC) antes — INGEOMINAS —, en la consulta de 95 expedientes de la CAR, en estudios de empresas particulares y finalmente siendo verificada y actualizada a partir de salidas de campo que permitieron su representación mediante modelos 2D (mapas geológicos y secciones geológicas) y 3D (bloque diagramas), empleando diagramación convencional y computacional de softwares especializados.

Los registros climatológicos obtenidos de estaciones meteorológicas fueron sometidos a un análisis estadístico para desarrollar una complementación de datos faltantes de los parámetros de precipitación, temperatura y evapotranspiración. Posteriormente se realizó un test de consistencia para evaluar la tendencia mediante el coeficiente de correlación, la Normalidad mediante la prueba de Shapiro Wilks y finalmente se llevó a cabo los análisis de distribución espacial y temporal de los parámetros hidroclimáticos seleccionados empleando la función del software ArcGis utilizando la herramienta de interpolación Kriging. Para calcular los parámetros del balance hídrico de infiltración, escorrentía superficial y evapotranspiración potencial real se utilizó la metodología propuesta por Schosinsky, mientras que la evapotranspiración potencial fue calculada por el método de Thornthwaite, lo que permitió estimar el volumen de agua que drena del suelo hacia el acuífero y su distribución espacial.

El cálculo de la infiltración y la identificación de zonas potenciales de recarga fueron elementos básicos en la comprensión de la dinámica del agua subsuperficial. Además, con los datos piezométricos obtenidos en la campaña de campo, los parámetros hidráulicos de las unidades acuíferas tomados de literatura e informes anteriores, y junto con la interpretación de la información geológica e hidrológica se establecieron las condiciones de frontera en la concepción del modelo hidrodinámico.

Por otro lado, la caracterización hidrogeoquímica se basó en el análisis de relaciones iónicas de las muestras de agua tomadas en boca de pozo y su correlación hidroquímica entre los tipos de aguas identificados y las unidades hidrogeológicas asociadas, la validación de datos se estableció a partir de relaciones cuantitativas comparativas del parámetro STD y las concentraciones de iones mayoritarios. Posteriormente se determinaron las facies hidrogeoquímicas con base a los diagramas de Piper-Hill, Schöeller-Berkaloff, Stiff y Gibbs, empleando el software libre Diagrammes.

Como resultado de la integración de los diferentes modelos base se elaboró el MHC, el cual permitió ampliar la comprensión de los acuíferos, su caracterización, identificar zonas potenciales de recarga y descarga, establecer la dirección del flujo subterráneo, de mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes (aguas superficiales y subterráneas, entre acuíferos) y variaciones de niveles estáticos.

Finalmente, se reconstruyó la geometría del límite inferior de la Formación Cacho y el límite superior de la Formación Arenisca Labor y Tierna para ser cruzadas con planos horizontales a diferentes profundidades y obtener una serie de puntos que fueron proyectados en superficie y posteriormente unidos para generar un mapa de contornos. En cada punto de la intersección se analizó la profundidad de ocurrencia de la Formación Sabana lo que permitió establecer cinco zonas con potencial de aprovechamiento de agua subterránea en función de la profundidad de las 3 unidades de interés hidrogeológico en Tocancipá.

1. PROPÓSITO DEL TRABAJO DE MAESTRÍA

El MHC permite identificar la existencia del recurso hídrico subterráneo respecto a sus características y distribución espacial, convirtiéndolo en una herramienta clave para que entes gubernamentales, administrativos y de control, encaminen esfuerzos técnicos y económicos en la búsqueda de un sistema de abastecimiento de agua en beneficio de la población que garantice el crecimiento y desarrollo de futuros proyectos.

El municipio de Tocancipá se ubica en la cuenca hidrológica de montañas e intramontañas, que se disponen en la Cordillera Oriental colombiana conocida como cuenca del río Bogotá, con una proyección de crecimiento de su población para el año 2035 de 73.211 habitantes, (Alcaldía de Tocancipá, 2014). Es decir, duplica su población actual, a raíz de lo cual surge la pregunta ¿qué alternativa de oferta hídrica existe en el municipio de Tocancipá que garantice el suministro de agua potable para el desarrollo de futuros proyectos inmobiliarios, agrícolas e industriales?

Actualmente la administración local tramita ante CAR la ampliación de la concesión de toma del río Bogotá, a la vez que considera el recurso hídrico subterráneo para cubrir la demanda futura, ante lo cual surge como propósito de la investigación de plantear el aprovechamiento de agua subterránea a partir del análisis de los sistemas acuíferos presentes en el (SS-Tsc), en jurisdicción del Municipio, como alternativa viable que garantice la oferta hídrica con niveles óptimos en calidad y cantidad para la creciente población y que soporte el desarrollo de los futuros proyectos inmobiliarios e industriales.

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El municipio de Tocancipá es georreferencialmente privilegiado. Su economía ha presentado un desarrollo rápido y vertiginoso, y se ha observado el cambio en la totalidad de los comportamientos rurales y su producción agrícola, por una orientación hacia la producción netamente industrial y técnica, de apoyo logístico y de producción manufacturera incluyendo la minería de canteras. En ese sentido, el Municipio mantiene un crecimiento positivo de su población, evidenciado en un conjunto de proyectos que se encuentran en trámite o licenciados, lo que implicará en el mediano plazo una revisión en los escenarios futuros de ocupación del territorio según la guía metodológica RAS del MAVDT. (Alcaldía de Tocancipá, 2014).

Actualmente la empresa de servicios públicos de Tocancipá (ESPT) cuenta con cuatro (04) sistemas de abastecimiento de agua potable y tramita ante la CAR la ampliación de la concesión 3537 de 2009 y modificación 855 de 2011 para la captación y toma de agua del río Bogotá, y disponer de un caudal total de 200 l s^{-1} , (Empresa de Servicios Públicos de Tocancipá, 2019), pues bajo las condiciones actuales se prevé un déficit de agua para el suministro de la población en el año 2030.

Regionalmente se cuenta con la conformación de grupos de municipios de interés para ayudar a la descontaminación del río Bogotá, sin embargo, aún no se tienen resultados tangibles, y es por esto que la administración municipal de Tocancipá con el fin de lograr continuidad en el servicio suscribe de manera regular contratos y convenios para el mantenimiento, optimización y control en el sistema de abastecimiento.

Ante el inminente incremento en la demanda del recurso hídrico la presente investigación plantea elaborar un MHC que describa el comportamiento de los acuíferos presentes en el SS-Tsc, y la identificación de áreas con interés hidrogeológico en jurisdicción del municipio de Tocancipá, que le permita a la administración municipal considerar el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo como una alternativa viable para concretar sus planes de desarrollo y crecimiento.

Los resultados obtenidos a partir de esta investigación, son el producto de la recopilación, obtención, análisis e interpretación de información técnica – científica actual. Con esta información se busca plantear una base conceptual para objetivos y problemas hidrogeológicos no contemplados en esta investigación que necesiten de la aplicación de nuevas técnicas y metodologías que complementen el alcance del presente proyecto académico.

1.2 LOCALIZACIÓN DEL PROYECTO

El municipio de Tocancipá está localizado al 47 km de la ciudad de Bogotá por la carretera central del norte, y pertenece a la provincia de Sabana Centro, limita con los municipios de Gachancipá, Cajicá, Zipaquirá, Sopó, Guatavita y Guasca, su extensión total es de 73,51 km², con una temperatura promedio de 16° C. (Corporación Red Jóvenes Constructores de Paz, 2013). Figura 1.

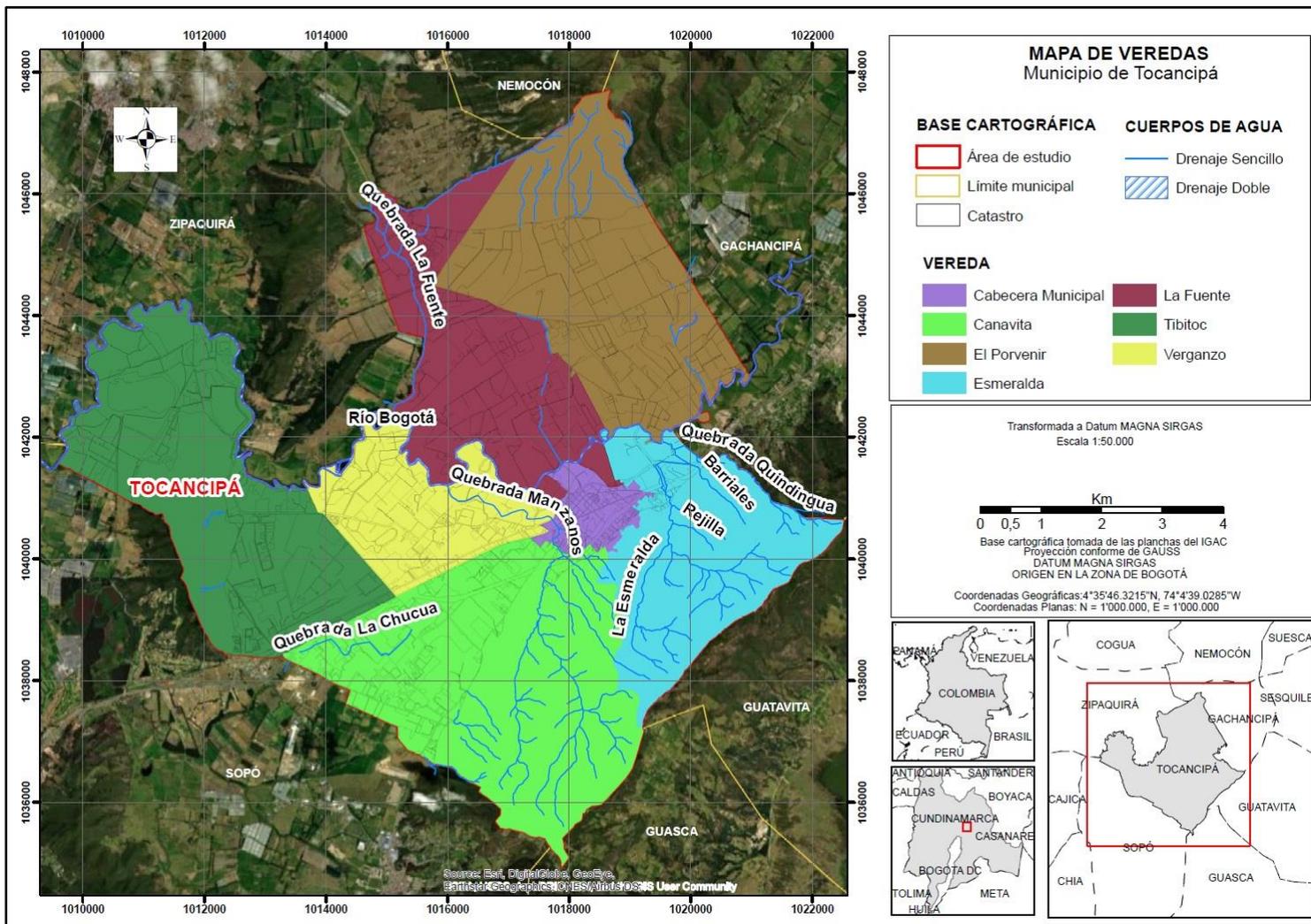


Figura 1. Localización municipio de Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Identificar el aprovechamiento de aguas subterráneas como una alternativa viable de oferta hídrica en el municipio de Tocancipá, que permitirá a la administración pública contar con una provisión cuantitativa y de calidad confiable de agua para la población creciente y los planes, programas y proyectos de desarrollo.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analizar la información y datos geológicos, geofísicos, hidrológicos, hidráulicos e hidroquímicos disponibles en las diferentes fuentes bibliográficas consultadas de entidades públicas y privadas, permitiendo sistematizar la información sobre la base del desarrollo del conocimiento teórico de diversos aspectos característicos del acuífero.
- Elaborar el modelo hidrológico a partir del cálculo del balance hídrico asociado al área de estudio con el fin de identificar zonas y cálculo de la recarga potencial de los acuíferos.
- Realizar un modelo hidráulico a partir de la información técnica existente, obteniendo parámetros hidráulicos como conductividad (K), Caudales, Capacidad específica (CE), Transmisividad (T) para establecer condiciones de frontera de los acuíferos.
- Proponer áreas de interés hidrogeológico para la explotación de agua subterránea con base al potencial de aprovechamiento en función de la profundidad de ocurrencia de los acuíferos.
- Caracterizar fisicoquímicamente el agua subterránea del SS-Tsc con base a los constituyentes iónicos, identificar los procesos que intervienen en las diferentes facies hidroquímicas y establecer su comportamiento espacial y tipología del agua, así como relación con las unidades hidrogeológicas propuestas.
- Elaborar el MHC del SS-Tsc en jurisdicción del municipio de Tocancipá, departamento de Cundinamarca, que permita ampliar el conocimiento de los sistemas acuíferos presentes y su potencial uso como alternativa de suministro viable y sustentable de agua potable.

3. MARCO TEÓRICO

En sectores rurales de países latinoamericanos, tales como Colombia, se ha dado el crecimiento de la población y el correspondiente desarrollo de actividades agropecuarias, ganaderas, industriales y domésticas, (González y Arboleda, 2015). Esto ha llevado a las comunidades a la búsqueda de fuentes alternas para consumo de agua mediante la extracción del recurso hídrico subterráneo, considerado generalmente de buena calidad, al presentar menor contaminación por su limitado contacto con las actividades que se desarrollan en la superficie y el proceso de filtración natural durante su percolación (Elumalai et al, 2017).

En el subsuelo de la Sabana de Bogotá el recurso hídrico ha tenido una alta relevancia desde la década de los 80 debido a su explotación, para uso en actividades agrícolas e industriales principalmente, y para garantizar una adecuada gestión, por parte de entidades administrativas y de control estatal, se han realizado diversos estudios con el fin de conocer el funcionamiento de los sistemas acuíferos claves en el desarrollo de la región. En este sentido, y con base en las caracterizaciones geológicas, hidrológicas, hidráulicas e hidroquímicas un MHC permite la comprensión espacial y dinámica del recurso hídrico subterráneo como fuente alterna para el abastecimiento de una población, y, que además garantice el desarrollo de sus actividades y proyectos agrícolas e industriales en el mediano y largo plazo.

3.1 MODELO GEOLÓGICO – GEOFÍSICO

3.1.1 Contexto Geológico Regional

A nivel regional en el área de la cuenca del río Bogotá, INGEOMINAS (2007) refiere en específico de la Sabana de Bogotá la confluencia de las planchas geológicas a escala 1:100.000 “209 Zipaquirá (Montoya y Reyes, 2003), 208 Villeta (Ulloa y Acosta, 2001), 227 La Mesa (Ulloa y Acosta, 2001), 228 (Bogotá Oriental), 246 Fusagasugá (Ulloa y Acosta, 1998)” (p. 11), elaboradas con diferentes nomenclaturas y conceptos geológicos que dificultan el empate entre ellas, incluso en los depósitos cuaternarios, de tal forma que resulta conveniente corroborar la identificación de las unidades geológicas que conforman el SS-Tsc presentes en el municipio de Tocancipá.

Desde la perspectiva geológica, la región está conformada por rocas y depósitos de origen sedimentario, con una secuencia que inicia en el periodo Cretácico seguida por rocas del periodo Paleógeno que presentan discordancias en el Eoceno Temprano y Tardío. Por último, el periodo Cuaternario corresponde a depósitos de origen aluvial o lacustre y coluvial que en varios casos cubren las anteriores secuencias. Ver Figura 2 y 3.

A finales del Cretácico Superior, en el Campaniano, las condiciones de sedimentación cambiaron y se depositó la Formación Arenisca Dura en zonas proximales, en el Campaniano Superior se continuó con la sedimentación de la Formación Plaeners, la regresión marina se finaliza con la depositación de la Formación Labor y Tierna y la parte inferior de la Formación Guaduas dando paso al inicio de una sedimentación continental de ríos meandriformes de tipo principalmente fluvial y lacustre. (INGEOMINAS, 2005, pág.9).

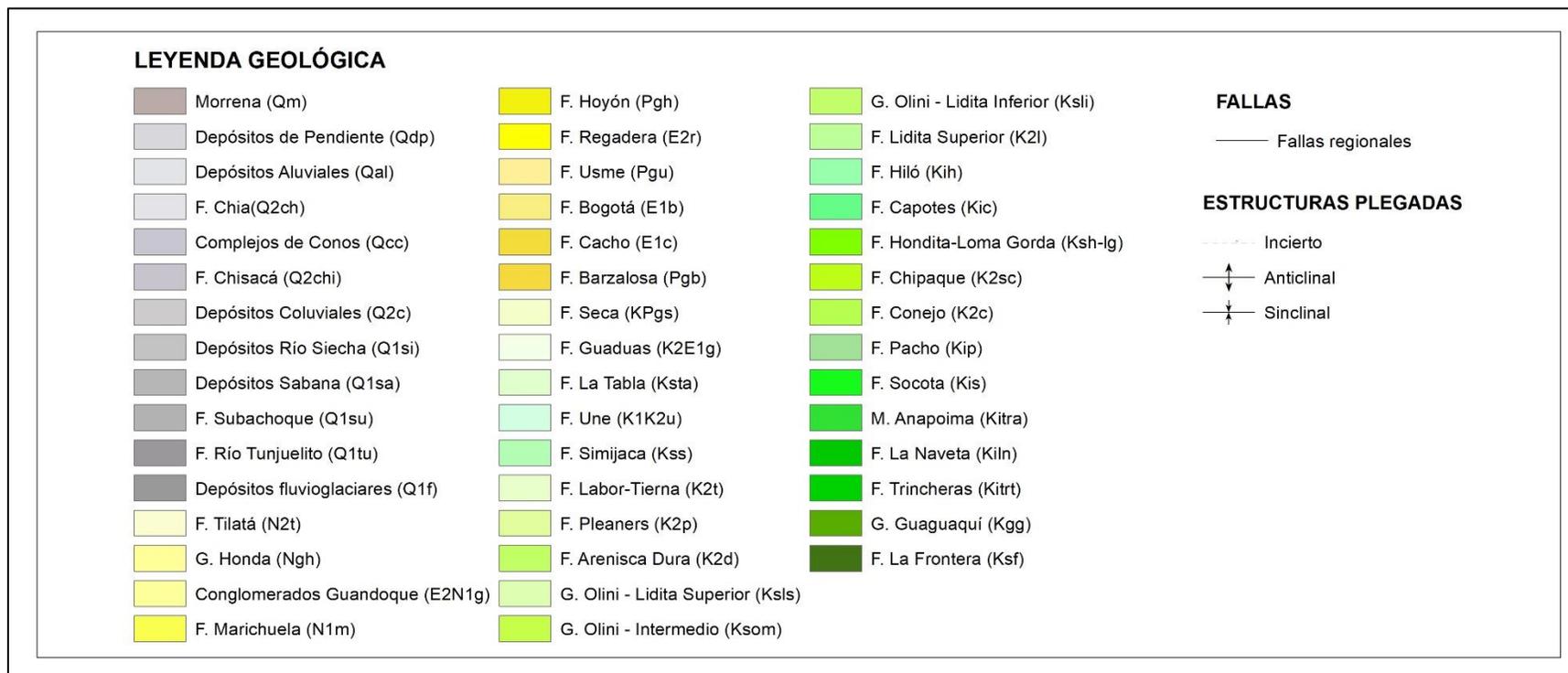


Figura 3. Leyenda Mapa geológico Regional Cuenca del río Bogotá.
Fuente: Tomado y modificado de Planchas 228 y 209, INGEOMINAS.

En el Paleógeno y Neógeno la sedimentación fluvial dio origen a las Formaciones Cacho, Bogotá, Regadera y parte de Tilatá, pero la secuencia no se observa en toda el área debido a una alta erosión y sedimentación molásica hacia los flancos de la cordillera. De hecho, es este evento el responsable de la generación de la mayor parte de las estructuras de la cordillera Oriental (Acosta y Pineda, 2002).

Durante el Neógeno se da el levantamiento de la Cordillera Oriental como resultado de los esfuerzos compresivos que incluyen la convergencia entre las placas Suramérica, Nazca y Caribe. Esta interacción generó una deformación intensa, que dio lugar a la inversión tectónica de antiguas fallas normales, que se reactivaron como cabalgamientos que estarían conectados a las unidades superficiales con el basamento, los cuales son el transporte que favorecen el paso de fluidos calientes que brotan como fuentes termales y están asociados a los trazos de las Fallas de Chocontá-Pericos y Nemocón. Adicionalmente se puede mencionar que el Cuaternario se encuentra representado por depósitos de origen fluvial o lacustre como son la Formación Sabana y Formación Chía.

Por su parte Díaz (2016), refiere que en la Cordillera Oriental Colombiana el “Eoceno superior corresponde a una secuencia deposicional que fosiliza la superficie de primer orden constituida por la discordancia del Eoceno Inferior” (pág. 23). Esta secuencia estratigráfica se aprecia a lo largo de las actuales subcuencas, las cuales se orientan en forma paralelas con dirección predominante al NE y con geometría de forma alargada y de tipo valle.

Se debe mencionar también que las unidades litoestratigráficas Paleógenas y Neógenas, utilizadas en la Sabana de Bogotá y alrededores, fueron referenciadas según nomenclatura adoptada por INGEOMINAS (2007) y correlacionadas por varios autores. (Ver Tabla 1).

Estructuralmente se destaca la existencia de fallas bajo la cobertera cuaternaria, las cuales pueden ejercer control en el comportamiento hidrogeológico. Los lineamientos se pueden asociar con las fallas de dirección NE, las cuales se denominan fallas longitudinales, y fallas en sentido NW denominadas fallas transversales, “que no necesariamente coinciden con las propuestas en trabajos anteriores de otros autores” (INGEOMINAS, 2002, pág.41).

Estos dos sistemas de fallas conforman un enrejado en la región de la Sabana localizados sobre cada flanco de la Cordillera Oriental. El sinclinal de Checua separa los dos estilos, uno al oriente cuyas “fallas principales son de cabalgamiento, con vergencia al oriente y otras fallas de menor importancia que se comportan como retrocabalgamiento con vergencia hacia el occidente”, (INGEOMINAS, 2007, pág. 9).

De igual manera, INGEOMINAS (2007) define al occidente un “segundo estilo estructural representado por fallas de cabalgamiento con vergencias al occidente como sistemas imbricados que nacen y son controlados por fallas de dirección que sirven como rampas laterales” (pág. 9), por tanto, generadores de sinclinales amplios y anticlinales estrechos, algunos afectados por diapirismo.

Tabla 1. Correlación Regional del Cretácico al Neógeno en la Sabana de Bogotá.

EDAD		ETAYO (1979) APULO	INGEOMINAS (ACOSTA Y ULLOA) PLANCHAS 208-227-246	INGEOMINAS (MONTROYA Y REYES) CENTRAL S.OCCIDENTAL	ETAYO (1968) VILLA DE LEYVA	INGEOMINAS (MONTROYA Y REYES) S. ORIENTAL		
PLIOCENO				TILATÁ		TILATÁ		
	MIOCENO							
OLIGOCENO								
EOCENO						USME		
						REGADERA		REGADERA
PALEOCENO				BOGOTÁ		BOGOTÁ		BOGOTÁ
				GUADUAS		CACHO		CACHO
MAASTRICHTIANO				TIERNA - LABOR		GUADUAS		GUADUAS
				LABOR TIERNA		PLAENERS	F. TIERNA-LABOR	TIERNA-LABOR
CAMPANIANO	SUP			LABOR TIERNA		DURA	PLAENERS	PLAENERS
	INF	DURA	LIDITA SUPERIOR		DURA			
SANTONIANO	LIDITA SUPERIOR		↑	LIDITA SUPERIOR	↑			
CONIACIANO	RAIZAL	↑	↑	↑	↑			
	LIDITA INFERIOR	↓	↓	↓	↓			
TURONIANO	SHALES INDENOMINADOS	↓	↓	↓	↓			
	LA FRONTERA	LA FRONTERA	LA FRONTERA	A	SAN RAFAEL			
UNIDAD INDENOMINADA	LA FRONTERA	SIMIJACA	B					
CENOMANIANO		SIMIJACA	CHURUVITA	CHURUVITA	UNE			

* ESTE TRABAJO

Fuente: Tomado y modificado de INGEOMINAS (2007, pág. 23).

3.1.2 Geología y Estratigrafía Local

La información de las planchas geológicas 3a Sabana de Bogotá de INGEOMINAS (2005), 209 de Zipaquirá a escalas 1:100.000 y de INGEOMINAS (2003) aportan la descripción de la geología, geomorfología, comportamiento tectono- estructural regional del municipio de Tocancipá y alrededores, que al integrar los mapas de Helmens y Van der Hammen (1995) con los mapas geomorfológicos a escala 1:25.000 realizados por Carvajal et al. (2004) permitió a INGEOMINAS (2007) la actualización de la cartografía geológica del área de la Sabana de Bogotá, y que corresponden al documento más reciente y actualizado de este instituto. Esta información se tomó como base para la elaboración del mapa de Tocancipá presentado en la Figura 4, con un registro de edad desde el Cretácico superior (Formación Labor y Tierna) hasta el Cuaternario (depósitos recientes). Se debe mencionar que las rocas que componen El Grupo Guadalupe son las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, y se encuentran suprayacidas en toda la Sabana de Bogotá por la Formación Guaduas. En el área de estudio afloran las Formaciones Arenisca Dura y Labor y Tierna.

3.1.2.1 Formación Arenisca Dura (K2d).

Nombre propuesto por Pérez y Salazar (1978), para referirse a una sucesión de bancos muy gruesos de areniscas con intercalaciones delgadas de materiales finos de limolitas, lodolitas, iditas y arcillolitas de color claro que reposan concordante sobre la Formación Chipaque y es suprayacida por la Formación Plaeners. Posee la característica de generar escarpes, derivada principalmente por su litología. Presentan intercalaciones de areniscas en capas medianas a gruesas, tamaño de grano muy fino, de color blanco, los clastos son subangulares y esféricos. Texturalmente son areniscas maduras, bien seleccionadas con matriz arcillosa.

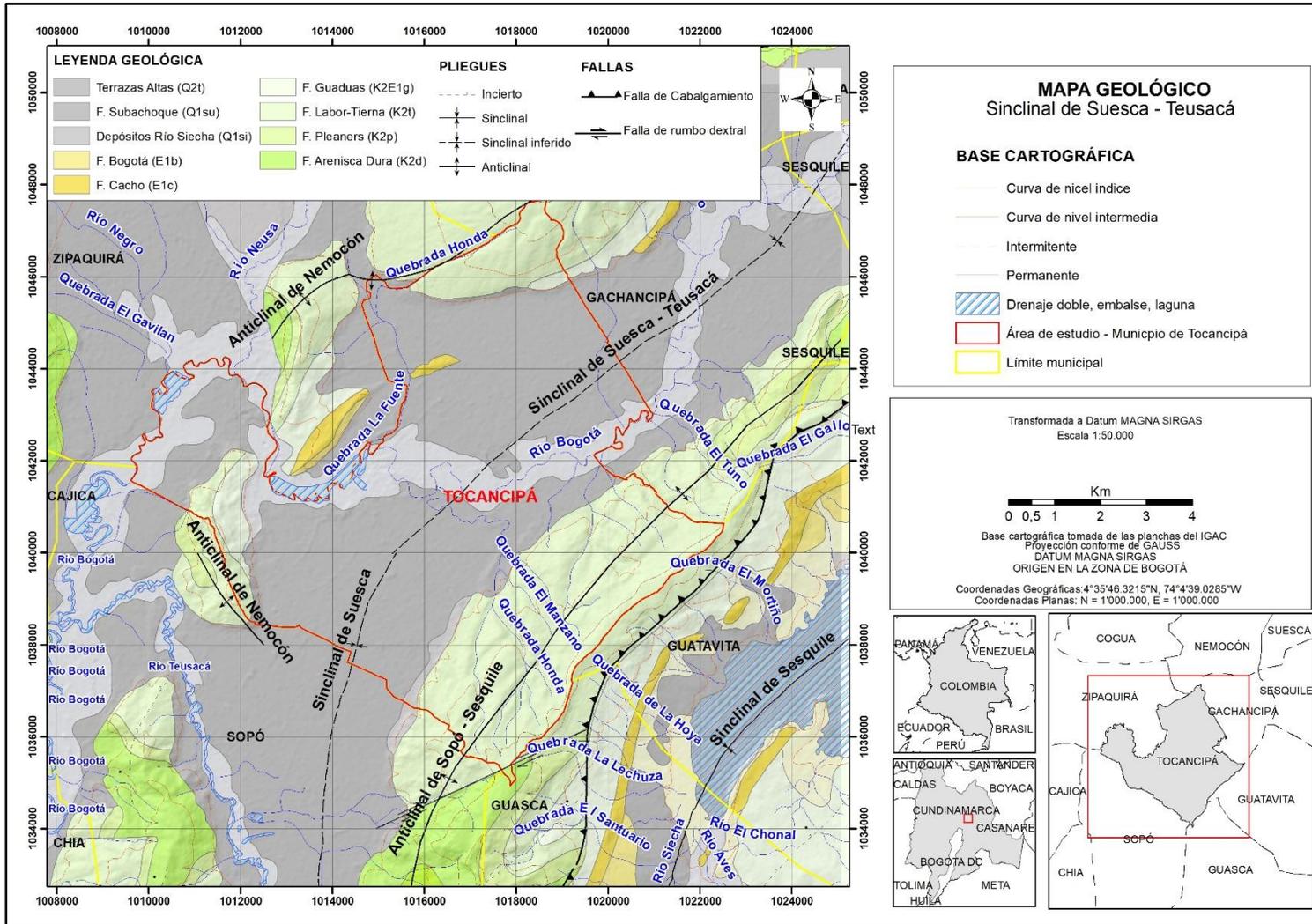
3.1.2.2 Formación Plaeners (K2p).

Nombre formalizado por Pérez y Salazar (1978), para la unidad litológica que reposa en el sector oriental, de forma neta y concordante sobre la Formación Arenisca Dura y es suprayacida por la Formación Labor y Tierna. Litológicamente se caracteriza por presentar limolitas silíceas, en capas delgadas intercaladas con lodolitas grises. Presenta una morfología suave y genera una hondonada debido a su litología fina, contrastando con las pendientes abruptas de La Formación Arenisca Dura.

3.1.2.3 Formación Labor y Tierna (K2t).

Dada su similitud litológica y expresión morfológica se agrupan las Formaciones Arenisca Labor con un espesor de 177 m, Arenisca Tierna con espesor de 19 m y el segmento de lodolitas y arcillolitas con espesor de 19 m que separa las dos formaciones originando un escarpe fuerte influenciado por su composición litológica donde predominan cuarzoarenitas en capas tabulares o lenticulares (INGEOMINAS, 2003).

En la Figura 5, se aprecia la columna estratigráfica de la Formación Arenisca Labor y Tierna en la sección Tausa – Boquerón con 62 m de espesor en el Segmento A (Arenisca Labor) conformado por cuarzoareniscas, areniscas de grano fino en capas delgadas, intercalaciones de arcillolitas, limolitas arenosas en capas planas paralelas y continuas. Con 19 m de espesor el segmento B lo constituyen niveles de limolitas con laminación lenticular e intercalaciones de arenisca; y finalmente el Segmento C con 95 m (Arenisca Tierna) presenta areniscas con laminación ondulosa, arcillolitas e intervalos de limolitas y areniscas con laminación lenticular.



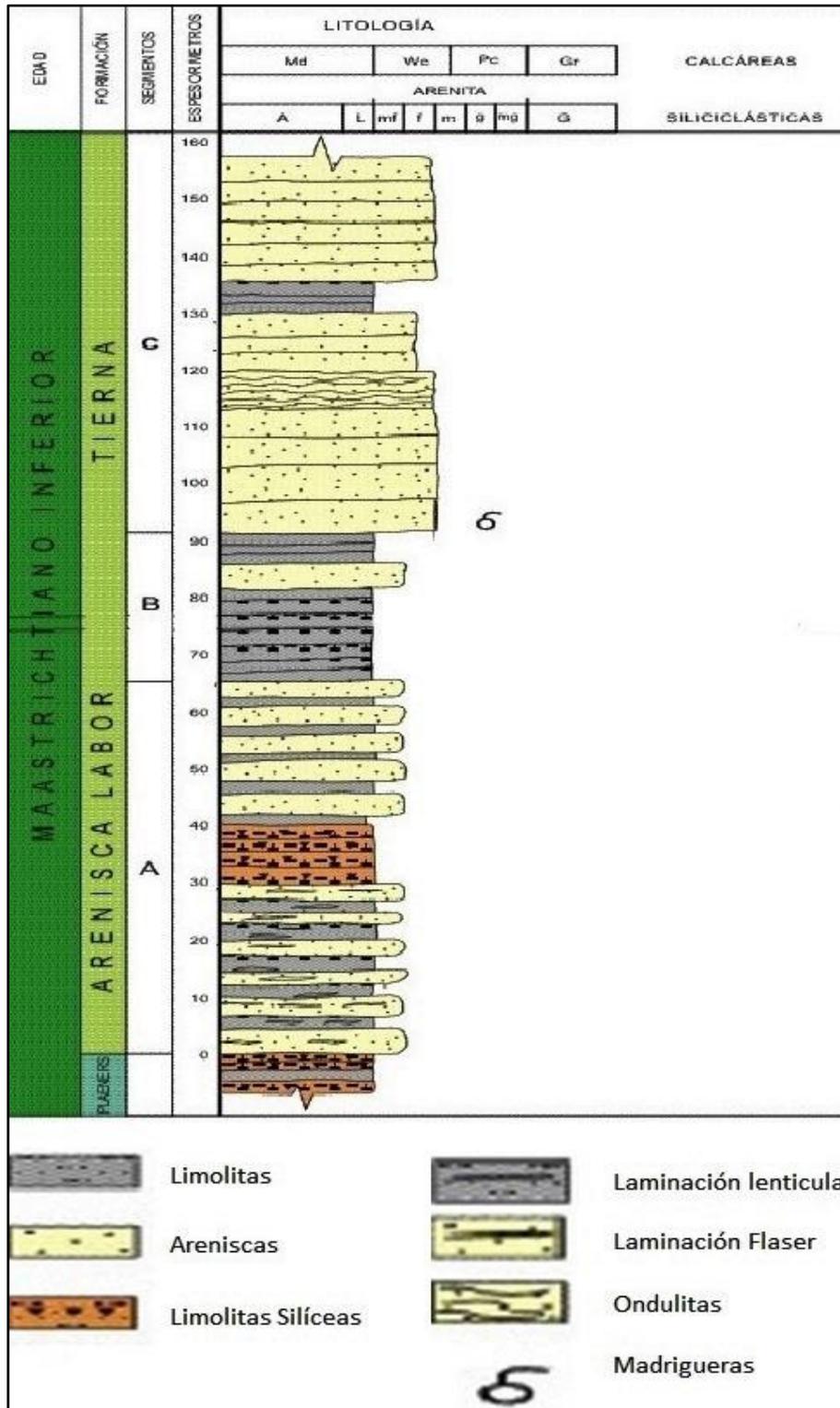


Figura 5. Columna estratigráfica de la Formación Arenisca Labor y Tierna. Sección Tausa – Boquerón.

(Levantó: Germán Reyes – Diana Montoya).

Fuente: Tomado de INGEOMINAS (2003, pág. 86).

3.1.2.4 Formación Guaduas (K2E1g).

Descrita originalmente por Hettner (1892), y De Porta, (1974), para referirse a todos los materiales que afloran en la región de Bogotá y que están por encima del Grupo Guadalupe. Hubach (1931), denomina piso Guaduas a la secuencia que suprayace al Grupo Guadalupe y es infrayacida por el Piso de Bogotá, estos dos pisos son separados por el Horizonte del Cacho que es la parte más baja del piso de Bogotá. El contacto inferior de la Formación Guaduas con la Formación Arenisca Labor-Tierna, y estratigráficamente se divide en cinco segmentos (INGEOMINAS, 2003), (Ver Figura 6). Sarmiento (1994) le asigna edad del Maastrichtiano superior — Paleoceno inferior.

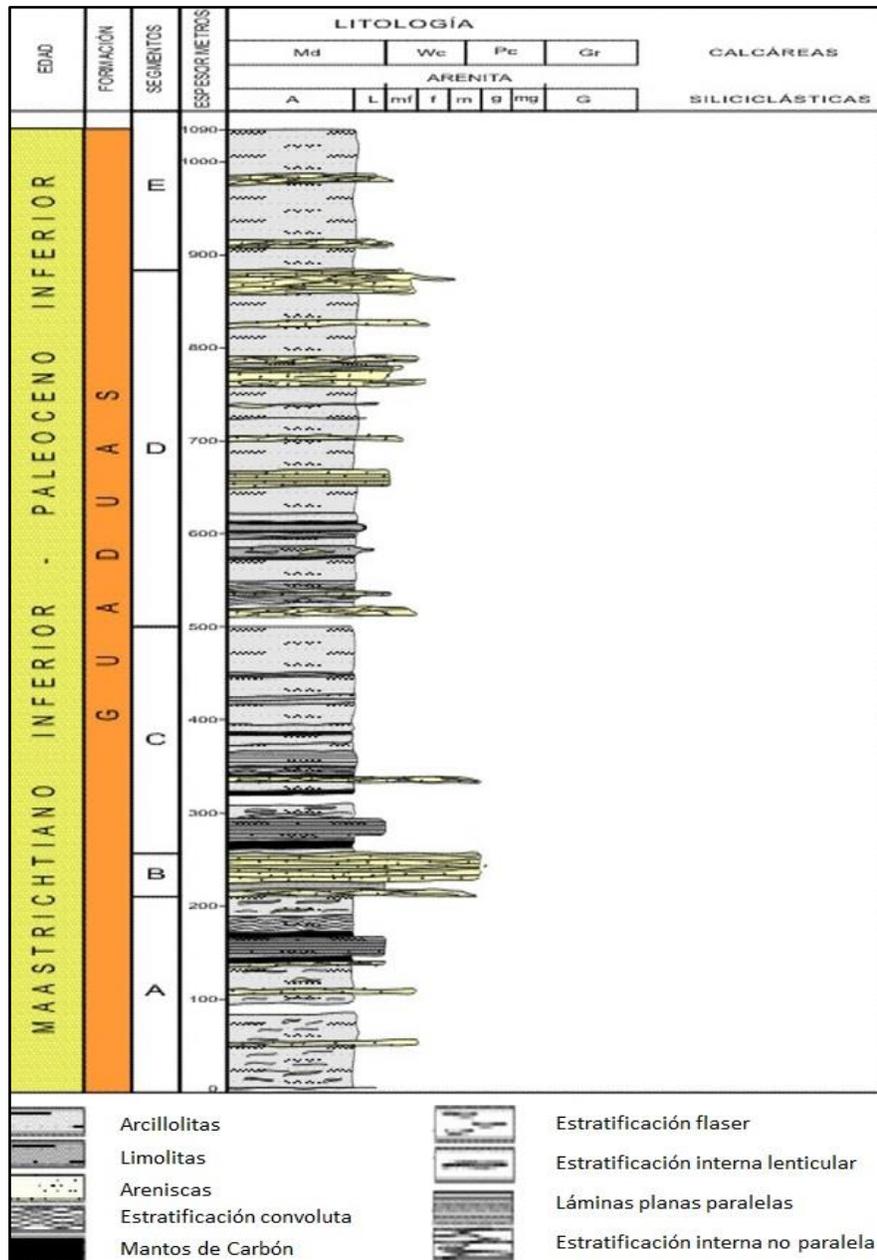


Figura 6. Columna estratigráfica generalizada de la Formación Guaduas. Sección de Sutatausa. Levantó Gustavo Sarmiento, 1994.

Fuente: Tomado de INGEOMINAS (2007, pág. 51).

3.1.2.5 Formación Cacho (E1c).

Hubach (1931), denomina Horizonte del Cacho, al conjunto inferior que aflora en el Piso de Bogotá, el cual tiene una naturaleza arenoso-riposo y está constituido por areniscas granulosas, tiernas, de colores amarillos hasta ocre o rosado, con algunos bancos de arcillas abigarradas (Ver Figura 7). La Formación Cacho aflora a lo largo de los sinclinales de Río Frío, Zipaquirá, Checua Suesca-Teusacá y anticlinal de Sopó-Sesquilé. Esta unidad forma un relieve pronunciado por lo cual es fácilmente cartografiable; es infrayacida por la Formación Guaduas y suprayacida por la Formación Bogotá. Sarmiento (1994) le asigna una edad de Paleoceno superior.

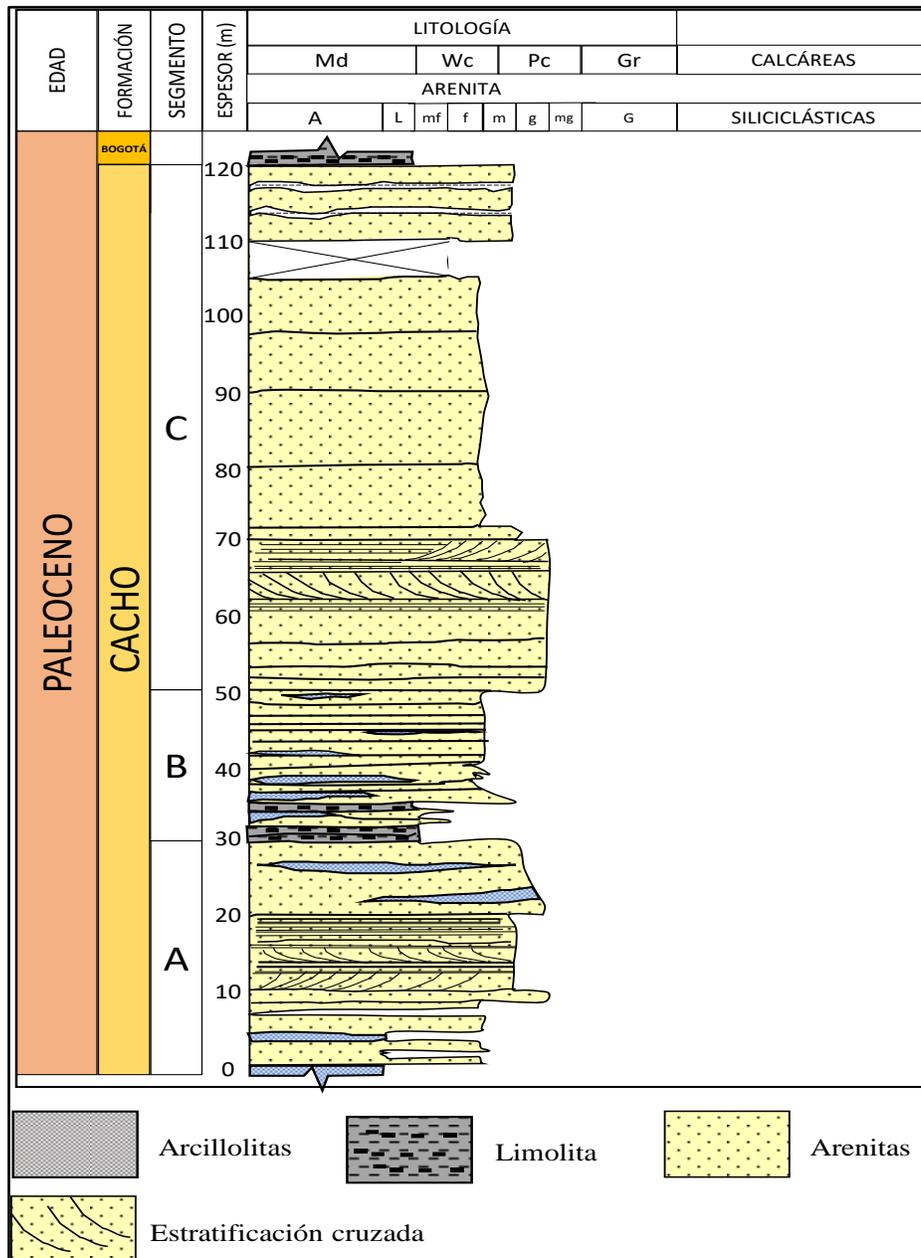


Figura 7. Columna estratigráfica de la Formación Cacho. Sección vereda Soatama – Machetá.
(Levantó: Diana Montoya).

Fuente: Tomado de INGEOMINAS (2003, pág. 96).

3.1.2.6 Formación Bogotá (E1b).

Hettner y Hubach (1931) describieron la Formación Bogotá como una sucesión conformada por grandes espesores de sublitoarenitas intercaladas con lodos y arcillolitas varicoloreadas a la base la cual gradualmente se vuelve más arcillosa hacia el techo (Ver Figura 8). Con base en la composición litológica y las estructuras sedimentarias encontradas los autores sugirieron un ambiente fluvial meandriforme como ambiente de depositación para la formación que yace concordante sobre la Formación Cacho y discordante bajo depósitos recientes.

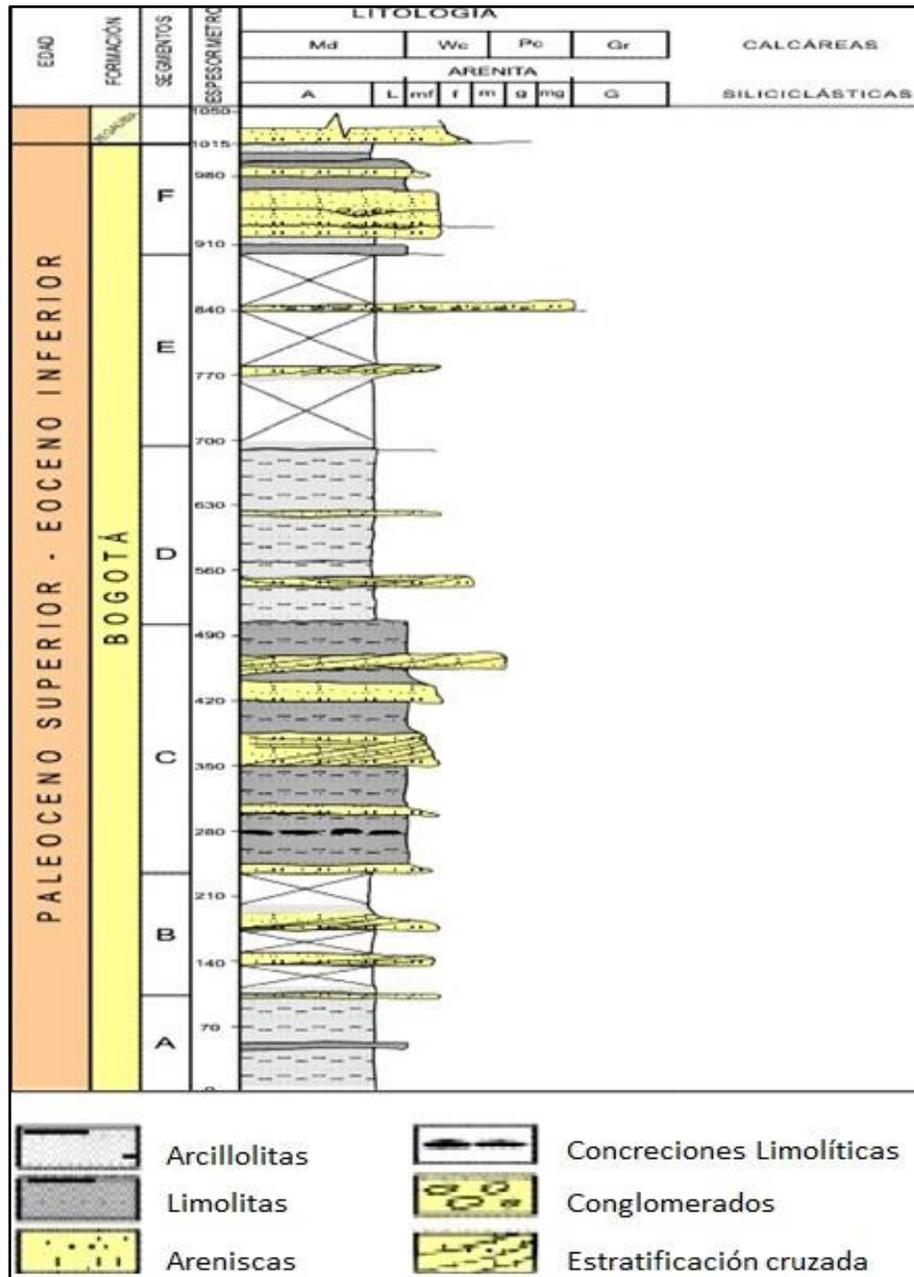


Figura 8. Columna estratigráfica de la Formación Bogotá. Sección Quebrada El Mochuelo (Zo Grande) Usme.

(Adaptada de Hoorn, 1988).

Fuente: Tomado de INGEOMINAS (2005, pág. 59)

3.1.2.7 Formación Sabana (Q1sa).

Corresponden a los depósitos lacustres que afloran en toda la zona plana de la sabana de Bogotá. Según Helmens & Van der Hammen (1995) está constituida principalmente por sedimentos finos con aporte de cenizas volcánicas, en general son arcillolitas grises con intercalaciones locales de arenas finas y niveles delgados de gravas y turbas. Además, Carvajal et al. (2005), describen estos depósitos como el resultado de un antiguo lago que dejó extensas planicies y deltas lacustres, dispuestos a manera de terrazas ligeramente onduladas, con inclinaciones de terreno suaves y limitadas hacia los cauces por los escarpes de estos. (INGEOMINAS, 2005).

3.1.2.8 Formación Chía (Q2ch).

Helmes y Van der Hammen (1995) describen esta Formación como depósitos constituidos por sedimentos fluviales de grano fino que afloran a lo largo de los ríos principales que generalmente están por debajo de las llanuras de inundación de los ríos, por lo tanto, suprayace localmente sedimentos de la Formación río Tunjuelito o Formación Sabana. Acorde con Van der Hammen (2005) por la posición estratigráfica y “datos de ^{14}C , arrojan edades del holoceno y hasta de 16.000 años” (INGEOMINAS, 2005, pág. 73).

La unidad la compone un suelo transportado por el río Bogotá, con matriz limo – arcillosa de color grises y marrón, estos suelos generan terrazas aluviales por erosión, de suave pendiente, planas y son moldeados por la corriente actual del río Bogotá con espesor máximo de 5 m.

3.1.2.9 Depósitos Coluviales (Q2c).

Son materiales erodados y redepositados en la base de los taludes, se caracterizan por una textura con pobre calibrado y por no tener estructuras sedimentarias. En general estos materiales están compuestos por gravas polimícticas de bloques angulares clasto o matriz soportadas según el tipo de aporte presentado y tipo de material de la fuente.

3.1.2.10 Depósitos Aluviales recientes (Q2da).

Representan la sedimentación actual de los ríos y quebradas. Su composición está determinada por las rocas existentes en el área y el tamaño del grano en general es de granulometría y son producto del transporte generado por las diferentes quebradas que corren en dirección hacia el efluente principal.

3.1.3 Estudios geofísicos

A nivel regional, la cuenca del río Bogotá ha sido estudiada empleando métodos geofísicos, con énfasis en resistividad eléctrica, MT y refracción sísmica. Esta información ha hecho evidentes los datos característicos correlacionables con las diferentes formaciones geológicas presentes en el área de estudio, y determinando rangos de valores de las propiedades físicas del subsuelo tal como se detalla en el trabajo (SDA, 2013).

A nivel local, Pulido & Oyola (1996) interpretaron 14 SEV, distribuidos para cubrir la mayor extensión del municipio de Tocancipá, con el fin de obtener una disposición de las unidades geológicas y determinar la profundidad y espesor de las capas permeables e impermeables. No obstante, el espesor de algunas Formaciones se estableció a partir de los datos reportados en la Memoria de la Plancha 209 Zipaquirá en el año 2003 y de la Memoria de la Sabana de Bogotá realizados por INGEOMINAS (2005), información que se puede complementar mediante la correlación geológica y estratigráfica obtenida en registros de perforaciones realizados en trabajos posteriores.

Acorde con CAR (2018), se realizaron estudios para la adquisición, procesamiento e interpretación de 160 SEV por el método Schlumberger, 280 sondeos MT y 12800 m de líneas de refracción sísmica para identificar las formaciones acuíferas de interés en profundidad y determinar espesor, techo y base de formaciones geológicas en la cuenca del río Bogotá. A partir de estos trabajos se elaboró un modelo geológico – geofísico, siendo hasta el momento el estudio más completo adelantado por la entidad, con el cual se puede reinterpretar la información de los expedientes de pozos perforados que reposan en la CAR y mejorar la comprensión de la geología (estructural y estratigráfica) del SS-Tsc.

3.2 MODELO HIDROLÓGICO

Respecto a la caracterización hidrológica, la recarga es un importante componente del ciclo hidrológico, pues de ella depende el volumen de recursos hídricos subterráneos renovables, en este sentido Zhou (2009), resalta la importancia de considerar la captación mediante el bombeo de aguas subterránea en el balance. Por otra parte, Delin y Risser (2007) reconocen la dificultad para obtener datos de buena calidad que permitan aplicar más de dos métodos en estos cálculos, por tanto, se puede concluir que un estudio hidrológico se debe entender como una aproximación en la estimación de la recarga hídrica y que puede realizarse aplicando diferentes metodología y técnicas.

En CAR (2006) dentro del programa de investigación del recurso hídrico subterráneo se realiza el ingreso de información, inclusión del balance hídrico, implementación del modelo hidrogeológico en el área de la Sabana de Bogotá. En este contexto, Fragala y Obregón (2011) consideran que “la estimación de la recarga natural a los acuíferos resulta un tema de suma prioridad en hidrogeología, bien sea por sus implicaciones socioeconómicas o por su inherente incertidumbre científica” (p.148).

Varias entidades como JICA-EAAB (2003), INGEOMINAS (2002), CAR, Castro et al. (2003) y DAMA (2000) han realizado estudios sobre la recarga en los acuíferos de la sabana de Bogotá que alimentan los debates sobre el modelo hidrogeológico conceptual de la región y la disponibilidad de recursos hídricos subterráneos renovables (Fragala y Obregón, 2011), cabe resaltar que estos estudios tienen ligados los aspectos climáticos con la carga y descarga del sistema de acuífero, cuyos parámetros se establecen y calculan a partir de datos históricos tomados de estaciones meteorológicas operadas por CAR e IDEAM, en este sentido IDEAM (2013) señala que en Colombia el método de balance hídrico es el más utilizado, donde se asume que en el sistema las entradas son iguales a la salida, aunque en algunos casos se realizan grandes simplificaciones a la ecuación de balance con el propósito de utilizar menos variables pero corriendo el riesgo de añadir mayores incertidumbres al resultado final (Freeze y Cherry, 1979).

3.3 MODELO HIDRODINÁMICO

Para la caracterización hidrodinámica Custodio & Llamas (1983), compara la superficie piezométrica con las curvas de nivel generadas en un plano topográfico, en el cual se unen puntos que presentan el mismo valor por lo general referidos como una cota respecto al nivel del mar. A partir de ellas se puede obtener datos básicos sobre el movimiento del agua subterránea, ser complementadas con el trazado líneas de flujo subterráneo y junto con el análisis de parámetros hidráulicos como conductividad (K), Caudales, Capacidad específica (CE), Transmisividad (T) elaborar la caracterización hidráulica del acuífero en el SS-Tsc.

Según Álvarez (1997), las autoridades ambientales y corporaciones regionales, han realizado importantes esfuerzos, para la cuantificación de todas las captaciones de agua a nivel local y

regional, así como el desarrollo bases de datos de usuarios para consolidar la información. Por tanto, se entiende la toma de la información como un objetivo de cumplimiento de las funciones de seguimiento y control mediante campañas de monitoreo sobre la red dispuesta a lo largo de la Sabana de Bogotá, aunque en algunas áreas se presente de manera intermitente. El seguimiento generalmente se realiza sobre los niveles de agua, los caudales de explotación y la calidad del agua.

Mejía y Ramírez (2016) recopilan y organizan los resultados obtenidos en campañas de monitoreo realizadas entre 1998 y 2007 logrando establecer las variaciones anuales en los niveles piezométricos de la Sabana de Bogotá del orden de una o dos decenas de metros por año, y una gran variación acumulada mayor a la citada en estudios anteriores; esta investigación permitió a la CAR declarar legalmente algunas zonas críticas en la cuenca del río Bogotá en agosto de 2016 y que para el desarrollo del presente estudio representa una base para el manejo de la información.

La caracterización hidrodinámica se concibe a partir de los parámetros hidráulicos asociados a las diferentes unidades geológicas. Bermoudes y Quiroz (2000) plantean los aspectos hidrodinámicos del modelo hidrogeológico conceptual de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá. De igual manera INGEOMINAS (1991) y CAR (2008) reportan valores de permeabilidad para rocas de las Formaciones del Grupo Guadalupe, Guaduas, Cacho, Bogotá y para depósitos recientes, en tanto que los valores de porosidad para la Formación Arenisca Tierna y demás acuíferos fueron referenciados de estudios de Álvarez (1997). Recientemente SDA (2013) asignó valores de porosidad para el Grupo Guadalupe y depósitos no consolidados con los cuales llevó a cabo el cálculo de reservas de agua subterránea en el Distrito Capital.

3.4 HIDROGEOQUÍMICA

La hidrogeoquímica trata del origen, los procesos, la evolución y la composición del agua natural almacenada en las unidades hidrogeológicas, que mediante análisis fisicoquímicos permite identificar la dinámica de los flujos subterráneos desde las zonas de recarga, su paso a lo largo de las zonas de tránsito y finalmente su sitio de descarga. Además, se puede establecer la existencia de mezclas e interconexiones con aguas superficiales o de otro origen, determinar la calidad para su aprovechamiento y estimar el tiempo de residencia por lo que se considera una herramienta para desarrollar los diferentes análisis en la caracterización de un acuífero (Gómez Rave, 2009). En otras palabras, el agua subterránea adquiere una huella hidrogeoquímica particular a su paso y al contacto con la litológica de los materiales en profundidad que aporta la información necesaria para la elaboración del modelo Hidrogeoquímico del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.

3.4.1 Hidroquímica

La variada composición físico – química del agua, se debe a su elevado momento dipolar del agua y su facilidad para formar puentes de hidrógeno lo cual hacen que esta sea un excelente disolvente (Corzo, 2007), y por ello la variación composicional de las aguas subterráneas es favorecida entre otras por la naturaleza y disposición de materiales con los que entra en contacto, tiempo de contacto, y otros factores como presión, temperatura y grados de saturación.

Para el análisis estadístico generalmente se utilizan 12 parámetros activos: el valor del pH, los contenidos de Ca^{2+} , Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , NH_4^+ , Fe^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , PO_4^{3-} y NO_3^- , y 2 parámetros complementarios como la conductividad eléctrica (CE) y los sólidos disueltos totales (SDT). Se toman en consideración estos factores dado que su análisis provee información útil acerca de los procesos que controlan el agua subterránea en el área de estudio, cuya presencia en el agua se

debe a la alta movilidad química, es decir presentan alta solubilidad, tendencia a la adsorción, capacidad de intercambio iónico y abundancia relativa (Güller, Thyne y McCray, 2002).

Se han aplicado diversos métodos estadísticos multivariantes para el análisis de datos con el fin de entender los procesos hidroquímicos que gobiernan la composición del agua subterránea (Yidana, et al, 2010). Uno de estos análisis es el de componentes principales/análisis de factores (ACP/AF), que permiten comparar muestras mediante el uso de gráficas convencionales, establecer indicadores hidroquímicos para la identificación de las zonas de recarga-tránsito-descarga en el área de estudio y finalmente establecer su uso potencial según las normas de la legislación colombiana (López, C. 2018).

3.4.2 Calidad del agua

Considerando que la composición química del agua subterránea refleja la composición mineralógica de las rocas en el acuífero, se establecen en los artículos transitorios 2.2.3.3.9.3 a 2.2.3.3.9.6 del Decreto 1076 de 2015 (MinAmbiente, 2015), indicados en la Tabla 2, los valores establecidos en la destinación del recurso para consumo humano y doméstico, para uso agrícola y pecuario.

Tabla 2. Criterios de la calidad del agua para consumo humano y doméstico, uso agrícola y pecuario establecidos en el Decreto Único Reglamentario 1076 de 2015 MADS.

ARTÍCULOS DEL DECRETO 1076 DE 2015		2.2.3.3.9.3	2.2.3.3.9.4	2.2.3.3.9.5	2.2.3.3.9.6
PARAMETRO	Unidad de medida	Tratamiento convencional para consumo humano y doméstico	Desinfección para consumo humano y doméstico	Criterios de calidad para uso agrícola	Criterios de calidad para uso pecuario
POTENCIAL DE HIDRÓGENO	pH	5,0 - 9,0	6,5 - 8,5	4,5 - 9,0	N.E.
TURBIEDAD	UJT	N.E.	10	N.E.	
COLOR REAL	UPC	75	20	N.E.	
AMONIACO	mg NH ₃ l ⁻¹	1		N.E.	
ALUMINIO	mg AL l ⁻¹	N.E.		5	
ARSÉNICO	mg As l ⁻¹	0,05		0,1	0,2
BARIO	mg Ba l ⁻¹	1		N.E.	
BERILIO	mg Be l ⁻¹	N.E.		0,1	N.E.
BORO	mg B l ⁻¹	N.E.		0,3 a 4	5
CADMIO	mg Cd l ⁻¹	0,01		0,01	0,05
CIANURO	mg CN ⁻ l ⁻¹	0,2		N.E.	
CLORUROS	mg Cl ⁻ l ⁻¹	250		N.E.	
COBALTO	mg Co l ⁻¹	N.E.		0,05	N.E.
COBRE	mg Cu l ⁻¹	1		0,2	0,5
CROMO	mg Cr ⁶⁺ l ⁻¹	0,05		0,1	1
FENOLES	mg l ⁻¹	0,002		N.E.	
FLÚOR	mg F l ⁻¹	N.E.		1	N.E.
HIERRO	mg Fe l ⁻¹	N.E.		5	N.E.
LITIO	mg Li l ⁻¹	N.E.		2,5	N.E.
MANGANESO	mg Mn l ⁻¹	N.E.		0,2	N.E.
MOLIBDENO	mg Mo l ⁻¹	N.E.		0,01	N.E.
NÍQUEL	mg Ni l ⁻¹	N.E.		0,2	N.E.

ARTÍCULOS DEL DECRETO 1076 DE 2015		2.2.3.3.9.3	2.2.3.3.9.4	2.2.3.3.9.5	2.2.3.3.9.6
PARAMETRO	Unidad de medida	Tratamiento convencional para consumo humano y doméstico	Desinfección para consumo humano y doméstico	Criterios de calidad para uso agrícola	Criterios de calidad para uso pecuario
MERCURIO	mg Hg l ⁻¹	0,002		N.E.	0,01
NITRATOS	mg NO ₃ ⁻ l ⁻¹	10		N.E.	
NITRITOS	mg NO ₂ ⁻ l ⁻¹	1		N.E.	10
NITRATOS + NITRITOS	mg l ⁻¹	N.E.			100
PLATA	mg Ag l ⁻¹	0,05		N.E.	
PLOMO	mg Pb l ⁻¹	0,05		5	0,1
SELENIO	mg Se l ⁻¹	0,01		0,02	N.E.
SULFATOS	mg SO ₄ ²⁻ l ⁻¹	400		N.E.	
VANADIO	mg V l ⁻¹	N.E.		0,1	N.E.
ZINC	mg Zn l ⁻¹	15		2	25
TENSOACTIVOS	SAAM	0,5		N.E.	
COLIFORMES TOTALES	NMP / 100 ml	20000	1000	5000	N.E.
COLIFORMES FECALES	NMP / 100 ml	2000	N.E.	1000	N.E.
DIFENIL POLICLORADOS	mg l ⁻¹	No Detectable		N.E.	
GRASAS Y ACEITES	mg l ⁻¹				
CONTENIDO DE SALES	mg l ⁻¹	N.E.			3000
CONDUCTIVIDAD A 25°C	μS cm ⁻¹	100		N.E.	
RELACIÓN ABSORCIÓN DE SODIO (RAS)	meq-g l ⁻¹	N.E.		Se calcula	N.E.
PORCENTAJE DE SODIO POSIBLE (PSP)	%				
SALINIDAD EFECTIVA (SE)	meq-g l ⁻¹				
CARBONATO DE SODIO RESIDUAL (CSR)	meq-g l ⁻¹				

N.E: No Especificado

SAAM: Sustancia activa al azul de metileno

UJT: Unidades Jackson de turbiedad

NMP: microorganismos / 100 ml

UPT: Unidades Platino-Cobalto

μS/cm: microsiemens por centímetro

3.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Anderson, et al (2015), definen un MHC como la representación cualitativa del sistema de aguas subterráneas que se ajusta a los principios hidrogeológicos basados en información geológica, geofísica, hidrológica, hidrogeoquímica e hidráulica, cuyo fin es conocer los parámetros y características regionales y locales, que definen el comportamiento del agua subsuperficial en una determinada zona. Esta representación, en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos (IDEAM, 2013), permite inferir la geometría de una cuenca hidrogeológica, la forma de recarga y la relación con los cuerpos superficiales adyacentes, la dirección y magnitud de flujos de agua subterránea, los tipos de acuíferos existentes, su composición química.

Desde el punto de vista hidrogeológico, Gutiérrez y Camargo (1992), en su estudio cuantitativo de la Sabana de Bogotá, identifican tres acuíferos con buenas posibilidades de explotación asociados a las rocas del Grupo Guadalupe, las areniscas de la Formación Cacho y Cuaternarios de la Formación Tilatá. Del mismo modo, Pulido y Oyola (1996) aportan de manera sistemática resultados que permiten definir áreas potencialmente importantes para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo en el municipio de Tocancipá aun cuando existen limitaciones en los datos disponibles para la completa interpretación de la geología.

INGEOMINAS (1997) realiza trabajos que evalúan características y se establecen criterios para para la explotación de aguas subterráneas en Colombia. El Acuífero de la Sabana de Bogotá reviste un análisis especial por constituir una fuente potencial de abastecimiento para el desarrollo económico y social de la región. Además, estos trabajos se constituyen en la base para adelantar la exploración de aguas subterráneas en el marco del Programa de Exploración de Aguas Subterráneas PEXAS liderado por INGEOMINAS (2004). Este programa aporta nueva información que amplía el conocimiento geológico de los acuíferos y a la vez permite actualizar el Mapa Hidrogeológico de INGEOMINAS (2007). Es importante mencionar que el SGC desde el año 2015 incorpora nuevas áreas de exploración a nivel departamental con el fin de completar y mejorar el mapa hidrogeológico de Colombia, a escala 1:500.000.

IDEAM (2013) establece los lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua (ERA). Esta metodología se convierte en el referente técnico para evaluar el estado del agua subterránea en un área determinada a partir de la caracterización de componentes geológico-geofísico, hidrológicos, hidrodinámicos, hidrogeoquímicos e isotópica que al ser integrados generan un MHC.

CAM (2016) formula el plan de manejo ambiental de acuíferos (PMAA) en el sector centro, noroccidental y nororiental de la cuenca del río Magdalena en el departamento del Huila con base a lo establecido en la Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos (MinAmbiente, 2014). Este trabajo enfoca el MHC mediante la representación descriptiva y gráfica de los sistemas acuíferos en la zona, que facilita a las entidades competentes tomar decisiones para dar viabilidad a los proyectos que pretenden la explotación del recurso hídrico subterráneo.

4. MARCO METODOLÓGICO

La metodología utilizada en la ejecución de este trabajo contempló tres fases mencionadas en la Figura 9. Tomando como referencia estas fases se enfocó el análisis, descripción y representación integrada de las caracterizaciones de los modelos Geológico, Hidrológico, Hidrodinámico e Hidrogeoquímico para determinar las unidades hidrogeológicas de potencial interés en el SS-Tsc y la viabilidad del recurso hídrico para su aprovechamiento como fuente alterna de abastecimiento en el municipio de Tocancipá.

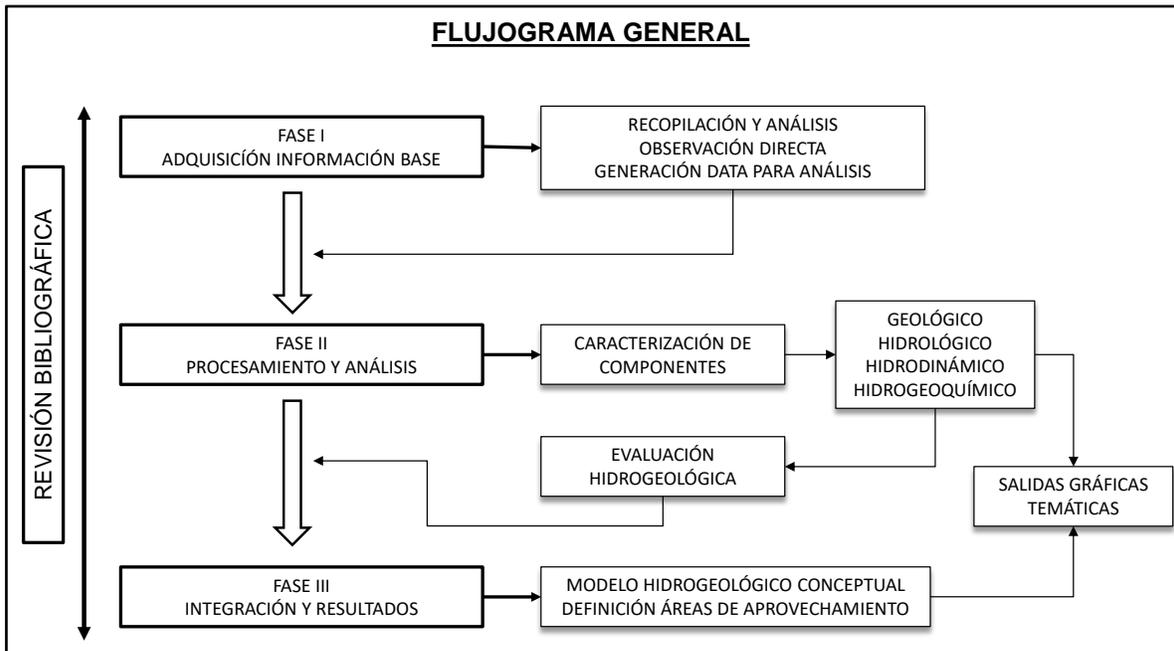


Figura 9. Flujograma general de la metodología.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.1 ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN BASE

La adquisición de la información base consistió en la recopilación de la literatura de artículos técnicos y científicos, de información pública de entidades estatales como el SGC, CAR, IGAC, IDEAM, documentos de la alcaldía de Tocancipá, así como información de páginas web y de estudios de consultoría de empresas privadas como Geocing S.A.S. y Consorcio Magneto 2018, entre otros.

Con la información geofísica de estudios de CAR (2018), y la Consultora Geocing S.A.S., se revisaron los diferentes ensayos SEV, LRS y MT, lo que permitió identificar características geoelectricas de las formaciones geológicas en profundidad. Posteriormente se realizó una correlación o amarre SEV-Columna estratigráfica, se compararon los resultados con datos de resistividades teóricas para diferentes unidades reportadas por Pulido y Oyola (1996), y se pudo definir un modelo geológico – geofísico base como insumo en la definición de las unidades hidrogeológicas de interés en el área de estudio.

La adquisición de la información base se complementó con visitas de campo, donde se verificó y actualizó la Geología local (cartografía y secciones geológicas), se identificaron los mecanismos que determinan las geoformas del relieve, se validó el inventario de puntos de agua subterránea de manantiales y aljibes suministrado por la Alcaldía, se tomaron lecturas de niveles piezométricos en pozos distribuidos en el área de estudio, así como de muestras in situ en pozos para análisis físicoquímicos, todos siguiendo el protocolo de monitoreo de aguas subterráneas (IDEAM, e INVEMAR, 2017).

Las muestras de agua se analizaron en laboratorios especializados cuyos datos se validaron mediante el cálculo del error del balance de carga considerando un error analítico menor a 10%, acorde con (Custodio y Llamas, 1983), y se elaboró una base actualizada con los diferentes parámetros físico químicos.

4.2 MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO

Una amplia gama de servicios vitales depende de la geología, entre otros la protección del agua potable y de los distintos ecosistemas está avalada por un conocimiento de la geología y sus interacciones con los procesos superficiales. Los niveles del agua subterránea varían dependiendo de la precipitación local, de la tasa de infiltración (la velocidad a la que la tierra es capaz de absorberla) y de la cantidad de extracciones para el uso. En algunos puntos el agua subterránea es efectivamente un bien renovable, aunque el aporte de agua dulce que requiere mucho tiempo para la reposición de los acuíferos. La recarga de los acuíferos puede tardar del orden de cientos o miles de años (Sociedad geológica de Londres, 2015).

En la Figura 10, se aprecia la metodología desarrollada para alcanzar el conocimiento de los diferentes componentes a partir de los cuales se elaboró Modelo Geológico – Geofísico del SS-Tsc.

4.2.1 Procesamiento y análisis

Con base a las descripciones geológicas de perforaciones de pozos existente, de la revisión de los diferentes sondeos geofísicos SEV, LRS y MT y de los datos geológicos tomados en campo, se procesó la información empleando los patrones de correlación geológica-geofísica propuestos Pulido y Oyola (1996), y se generaron los mapas y perfiles de las estructuras geológicas que sirvieron en la determinación de espesores (delimitación de la base y el tope) de las diferentes formaciones geológicas y visualizar su distribución espacial.

4.2.2 Integración y resultados

La información geológica - geofísica se integró a un Modelo de Elevación Digital del Terreno empleando la herramienta SIG Height Above Nearest Drainage (HAND) y se realizó un ajuste a la continuidad de los contactos, estructuras y nomenclaturas entre las unidades estratigráficas.

Con base a las características litológicas de las Formaciones presentes en el área de estudio se realizó la clasificación de unidades hidrogeológicas según Gutiérrez y Camargo (1992), que las agrupa en 3 tipos:

- A. Sedimentos no consolidados y Rocas porosas con poca a moderada importancia hidrogeológica
- B. Rocas fracturadas / porosas de gran a moderada importancia hidrogeológica
- C. Sedimentos y rocas porosas / fracturadas sin importancia hidrogeológica.

Con la elaboración de perfiles o cortes geológicos-geofísicos fue posible representar la disposición en profundidad de las unidades y estructuras geológicas logrando así la interpretación de lo representado en los mapas.

El siguiente paso fue la integración de la información obtenida en mapas y perfiles mediante la representación 3D en la cual expresa gráficamente la caracterización del modelo geológico-geofísico.

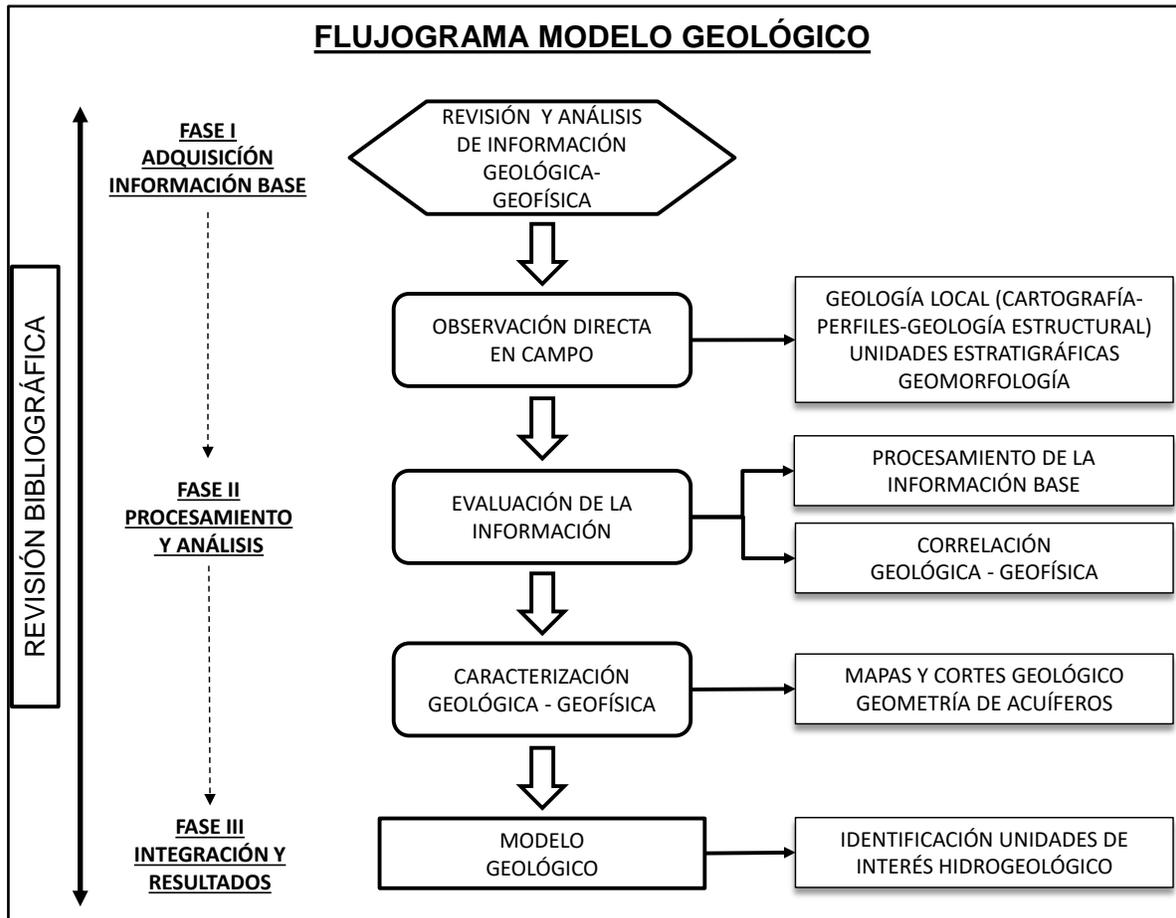


Figura 10. Flujoograma detallado de la metodología del Modelo Geológico - Geofísico.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.3 MODELO HIDROLÓGICO

El ciclo hidrológico se concibe como el movimiento de masas de agua a través de la atmósfera, que alcanza la tierra y retorna nuevamente a la atmósfera. En el análisis del ciclo hidrológico se deben considerar variables como la precipitación, infiltración, escorrentía, evaporación y transpiración, siendo la precipitación el único componente de entrada al ciclo hidrológico, mientras que las salidas están representadas por la evaporación, la transpiración, la infiltración y la escorrentía (INGEOMINAS, 2007).

La recarga en los acuíferos ocurre por la infiltración directa de las precipitaciones, corrientes superficiales y la condensación del vapor de agua contenido en los poros y fisuras de las rocas. En este sentido INGEOMINAS (2002), señala que “en las vertientes se generan flujos subsuperficiales

temporales los cuales al llegar a las partes más bajas pueden ser absorbidos por los depósitos de mayor permeabilidad” (pág.46).

El estudio de los procesos hidro geomorfológicos tiene como objeto relacionar los procesos hidrológicos y su interacción con los rasgos del relieve Goerl, et al (2012). En este sentido las variables climáticas juegan un papel fundamental en la determinación de las zonas de recarga hídrica las cuales son definidas, en términos generales, como aquellas áreas que permiten o facilitan la incorporación de agua a los acuíferos.

En la Figura 11, se aprecia el flujograma de la metodología desarrollada a partir de la cual se elaboró Modelo Hidrológico.

4.3.1 Adquisición de información base

A partir de los datos recopilados de las estaciones climatológicas administradas y operadas por el IDEAM y la CAR se definieron los parámetros de precipitación total mensual (mm) y temperatura (°C) con los cuales se desarrolló el análisis del capítulo de Hidrología.

Previo al procesamiento de datos se realizó un análisis exploratorio de datos de la precipitación con métodos gráficos, (series de tiempo, diagrama de caja, gráfica de doble masa y gráfica de normalidad), que permitieron identificar tendencias, cambios en tiempo y homogeneidad de las series pluviométricas, lo que condujo a la selección y agrupación de las estaciones a trabajar.

4.3.2 Procesamiento y análisis

4.3.2.1 Homogeneización y complementación de datos

Para determinar los valores mensuales faltantes en el análisis pluviométrico en las estaciones seleccionadas, se aplicó el criterio de porcentaje de datos faltantes menor al 10% del total de datos, e igualmente se comprobó mediante el Coeficiente de Pearson la asociación lineal para correlaciones fuertes ($r \geq 0,7$) de las series de pares de estaciones según la escala propuesta por (Martínez et al, 2014).

Se usó el método Racional Deductivo propuesto por Guevara, D (2003), para completar las series de datos que presentaron menor error típico y menor porcentaje de datos faltantes en cada grupo definido y se tomó como estación de referencia. Este método consiste en calcular el promedio aritmético de los valores contenidos en el registro conforme a la siguiente ecuación:

$$P_i = \left\{ \frac{\sum P}{12 * 100 - \sum S_i} \right\} S_i$$

$$P_i = \left\{ \frac{\sum P}{12 * 100 - \sum S_i} \right\} S_i$$

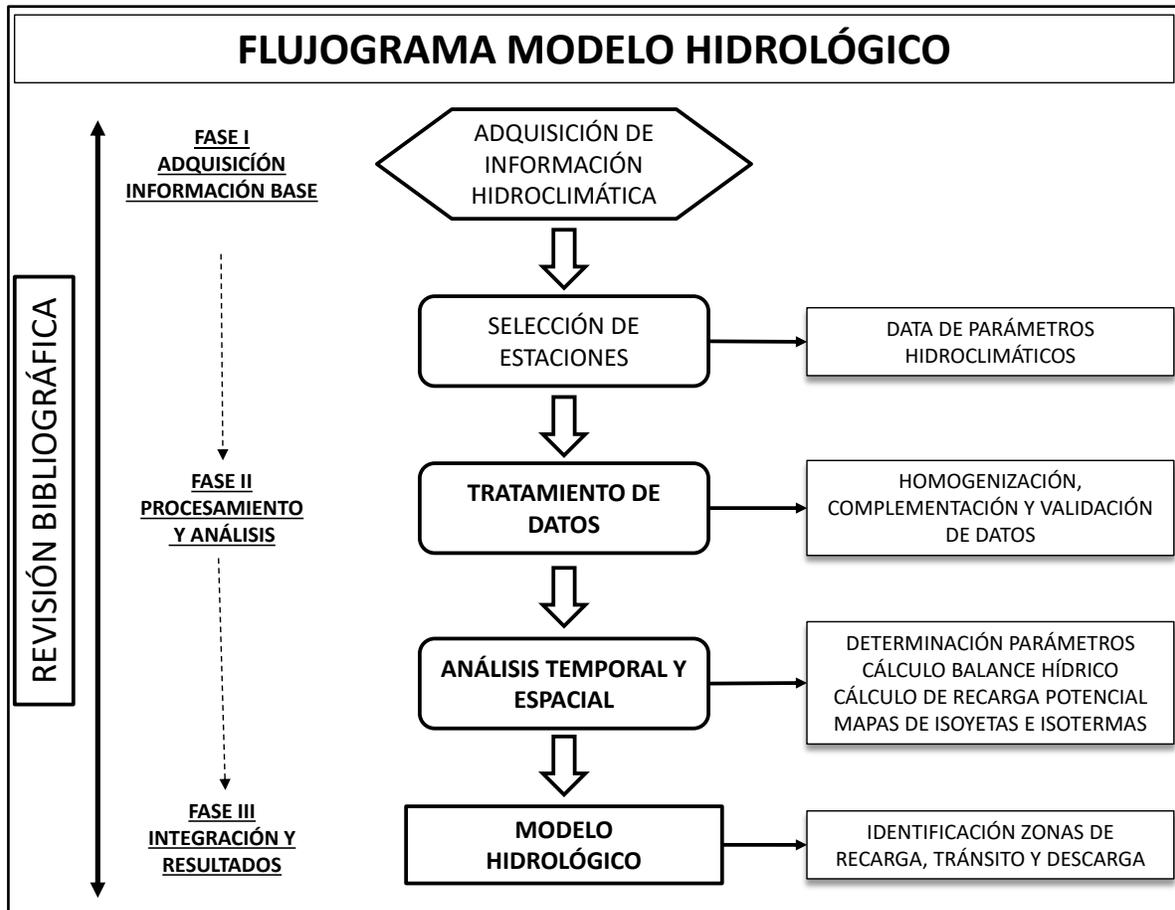


Figura 11. Flujoograma detallado de la metodología del Modelo Hidrológico.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La expresión entre paréntesis es una cantidad constante para cada año incompleto, por lo que finalmente se tiene:

$$P_i = K * S_i$$

Donde:

i Cada uno de los meses desconocidos (máximo 11)

P_i Precipitación mensual desconocida en cada año incompleto [mm].

$\sum S_i$ Suma de porcentajes promedio de los meses cuya precipitación se desconoce [%].

$\sum P$ Suma de las precipitaciones mensuales conocidas en los años incompletos [mm].

S_i Porcentaje promedio asignado a cada uno de los meses desconocidos o faltantes

El método de Regresión Lineal Simple, tomado de Guevara, D (2003), se usó como criterio de complementación de datos el cálculo del coeficiente de correlación, varianzas en X e Y, también la covarianza, el promedio de la serie X (serie 1) y el promedio de la serie Y (serie 2) para las demás series seleccionadas empleando las siguientes ecuaciones:

Coeficiente de Correlación
$$r = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}$$

Desviación estándar $\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n}}$

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{\sum(Y-\bar{Y})^2}{n}}$$

Varianza $\sigma_x^2 = \frac{\sum(X-\bar{X})^2}{n}$

$$\sigma_y^2 = \frac{\sum(Y-\bar{Y})^2}{n}$$

Covarianza $\sigma_{xy} = \frac{\sum(X * Y)}{n} - \bar{X} * \bar{Y}$

Posteriormente se calcularon los parámetros definen la ecuación de la recta $Y = mx + b$, representadas por la pendiente (m) y la distancia positiva sobre el eje Y (b), según las expresiones:

$$b = \bar{Y} - \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2} \bar{X}$$

$$m = \frac{\sigma_{xy}}{\sigma_x^2}$$

Ya definidos los coeficientes, se procede a llenar los datos faltantes de la serie 2, que es la incompleta, utilizando la ecuación de la recta, $Y = mx + b$, donde el valor x es el valor de la serie 1 y Y, es el valor obtenido para la serie 2.

4.3.2.2 Validación de datos

La validación de datos se realizó siguiendo los lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua del (IDEAM, 2013).

Para la comprobación del carácter estacionario de la serie se usó el método de Coeficiente de correlación ($r > 0,70$) que evalúa la tendencia, y la prueba de Shapiro Wilks que evalúa la Normalidad descritas por Walpole et al (1999), entre otros.

4.3.2.3 Análisis temporal de registros históricos

Empleando series completas de la misma longitud, se determinaron las precipitaciones multianuales de todas las estaciones, y además se efectuó un análisis de la distribución temporal para los parámetros de precipitación total (mm) y temperatura (°C).

La clasificación del clima se hizo de acuerdo a los lineamientos de la metodología estándar para Colombia de Caldas-Lang, la cual clasifica el clima de las cuencas dependiendo de la temperatura media anual (°C) y de la precipitación anual (mm), dicha clasificación abarca diferentes pisos térmicos, dependiendo de la altura y la temperatura media del Municipio o cuenca de estudio.

Para cada estación hidrometeorológica se calcularon diversos parámetros estadísticos, entre ellos valores mínimos, medios y máximos, la desviación estándar y el coeficiente de variación anual, que amplían la información sobre las características de las precipitaciones en el área de estudio. Las medidas de tendencia central y de dispersión permiten un mayor conocimiento de la variabilidad de los datos estadísticos y su distribución temporal (Puebla Gutiérrez, et al, 1995).

4.3.2.4 Distribución espacial (Mapa de isolíneas)

Con la información recopilada de las diferentes estaciones meteorológicas que reúnen características topográficas, altitudinales se pudo representar la distribución continua de diferentes parámetros mediante la construcción de mapas de isolíneas (Isoyetas e Isotermas) e interpretar su distribución estadística espacial en el área de estudio lo que permitió conocer los parámetros del Balance Hídrico.

La metodología empleada para la construcción de los diferentes mapas cumplió los siguientes pasos y para graficarlas se utilizó el software ArcGIS 10.

- Observación del dato en una serie suficiente de puntos
- Interpolación (Inferencia de valores al resto de la zona)
- Selección de intervalos
- Diseño del mapa

4.3.2.5 Parámetros del balance hídrico

El cálculo de los parámetros del balance hídrico se realizó según la metodología propuesta por Schosinsky, N (2006), y adoptada por SGC (2015), la cual parte de las consideraciones de la lluvia mensual interceptada por el follaje (Ret) en los siguientes rangos:

$Ret = P$ Si P es menor o igual a 5 mm/mes

$Ret = P * C_{fo}$ Si el producto de $P * C_{fo}$ es mayor o igual a 5 mm/mes

$Ret = 5$ Si P es mayor o igual a 5 mm/mes

Donde:

P Precipitación mensual del mes [mm/mes]

Ret Retención de lluvia en el follaje [mm/mes]

C_{fo} Coeficiente de retención del follaje (0,20 para bosques muy densos y 0,12 para bosques densos) [adimensional]

Para determinar el balance del suelo, en primera instancia se requirió conocer la infiltración mensual al suelo, generada por la lluvia. Dicho cálculo se obtuvo de los registros de las estaciones de la CAR e IDEAM, y posteriormente, se establecieron las variables de la capacidad de campo y punto de marchitez del suelo. (Ver Tabla 3).

Como la forma natural de extracción del agua del suelo es mediante la evapotranspiración de las plantas fue necesario conocer la profundidad aproximada de las raíces extractoras de agua, por lo tanto, la extracción de agua se realizará en una franja de suelo que tiene una profundidad igual a la mostrada en la Tabla 4.

.

.

Tabla 3. Punto de marchitez permanente y capacidad de campo en porcentaje por peso de suelo seco de diferentes texturas de suelos.

TEXTURA DEL SUELO	Porcentaje de peso de suelo seco		
	PMP%	CC%	Densidad Aparente (g/cm ³)
Arenoso	2 – 6	6 – 12	1,55 – 1,80
Franco - Arenoso	4 – 8	10 – 18	1,40 – 1,60
Franco	8 – 12	18 – 26	1,35 – 1,50
Franco - Arcilloso	11 – 15	23 – 31	1,30 – 1,40
Arcilloso - Arenoso	13 – 17	27 – 31	1,25 – 1,35
Arcilloso	15 – 19	31 – 39	1,20 – 1,30

Fuente: Grassi, 1976.

Tabla 4. Profundidad de las raíces para diferentes cultivos.

Cultivo	Profundidad (metros)
Pastos	1,00 – 2,00
Fríjol	0,50 – 0,70
Bosques	2,00 – 3,00

Fuente: Tomado y modificado de Grassi, 1976.

Infiltración

La metodología propuesta por Schosinsky sugiere inicialmente el análisis espacial y temporal de las variables precipitación y temperatura con el objetivo de determinar la evapotranspiración potencial y real de manera distribuida. Una vez calculada esta información se procede a determinar la fracción de lluvia interceptada por la cobertura vegetal y la infiltración con ayuda de las capas temáticas de suelos, pendientes y coberturas de la tierra, insumos necesarios para estimar la recarga potencial del acuífero a nivel mensual de manera distribuida.

Para obtener el coeficiente de infiltración se aplicó la siguiente ecuación:

$$C_i = K_p + K_v + K_{fc}$$

Donde:

C_i Coeficiente de infiltración [adimensional].

K_p Fracción que infiltra por efecto de pendiente [adimensional]

K_v Fracción que infiltra por efecto de cobertura vegetal [adimensional]

K_{fc} Fracción que infiltra por textura del suelo [adimensional]

K_p y K_v Se obtuvieron de la Tabla 5 y 6.

Tabla 5. Componentes del coeficiente de infiltración por pendiente.

Pendiente	Rango (%)	k_p
Muy plana	0,02 – 0,06	0,30
Plana	0,30 – 1,00	0,30
Algo plana	1,00 – 2,00	0,15
Promedio	2,00 – 7,00	0,10
Fuerte	> a 7,00	0,06

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000.

Tabla 6. Componentes del coeficiente de infiltración por cobertura vegetal.

Cobertura	k_v
Con pastos menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Con pastos más del 75%	0,21

Fuente: Schosinsky & Losilla, 2000.

La Fracción que infiltra por textura del suelo se obtuvo de la siguiente ecuación:

$$K_{fc} = 0,267 \ln Fc - 0,000154 Fc - 0,723$$

Donde:

K_{fc} Coeficiente de infiltración (fracción que infiltra por textura del suelo) [adimensional]
 Fc Infiltración básica del suelo [mm/día]

El coeficiente de infiltración es el factor por el que se multiplicó la precipitación mensual para obtener el agua que se infiltra mensualmente hacia el suelo según la ecuación:

$$P_i = (C_i)(P - Ret)$$

Donde:

P_i Precipitación que infiltra mensualmente al suelo en [mm/mes]
 C_i Coeficiente de infiltración [adimensional]
 Ret Retención de lluvia mensual por follaje [mm/mes]

Escorrentía superficial (ESC)

La Escorrentía se calculó a partir de la ecuación:

$$ESC = P - Ret - P_i$$

Donde:

ESC Escorrentía superficial [mm/mes]
 P Precipitación en mm/mes (dato meteorológico).
 Ret Retención de lluvia mensual por follaje [mm/mes]
 P_i Precipitación que infiltra mensualmente al suelo [mm/mes]

Evapotranspiración Potencial Real (ETPR)

La Evapotranspiración Potencial (ETP) se calculó a partir de la ecuación propuesta por Thornthwaite (1948), cuyas variables están en función de la temperatura promedio a la que se le aplicó una corrección de duración astronómica del día, y del número de días del mes, siendo un método que se considera normalmente aplicable en hidrogeología y ofrece buenos resultados en regiones húmedas (Ereño, 2012). A partir de las temperaturas medias mensuales se obtuvo el índice de calor (i) mensual según la ecuación:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1,514}$$

Donde:

i Índice de calor mensual
 T Temperatura media mensual en °C (dato meteorológico)

Una vez obtenido el Índice de calor mensual (*i*) se calculó el Índice de calor anual (*I*), que es la suma de los índices de calor mensual para meses teóricos de 30 días y 12 horas diarias de sol que fueron corregidos en función de la duración en días de cada mes y del número de horas de insolación teórica, variables en relación a la latitud en que se encuentra la estación meteorológica que suministró los datos a partir de la cual se usó la expresión matemática de la siguiente ecuación para calcular la ETP.

$$ETP = 16 * \left(10 * \frac{T}{I}\right)^a * \frac{N}{12} * \frac{d}{30}$$

Donde:

- ETP* Evapotranspiración Potencial [mm/mes]
- T* Temperatura media mensual en °C (dato meteorológico).
- I* Índice de calor anual
- N* Número máximo de horas de sol (Ver Tabla 7)
- d* Número de días del mes
- a* Función compleja de *I* igual a:

$$(675 * 10^{-9})I^3 - (771 * 10^{-7})I^2 + (1792 * 10^{-5})I + 0,49239$$

Tabla 7. Número de horas máximo de sol mensual para latitud 5° Norte.

ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
11,8	11,9	12,0	12,2	12,3	12,0	12,0	12,3	12,1	12,2	11,9	12,0

Fuente: Tomado y modificado de (IDEAM, 2017).

En tanto que la Evapotranspiración Potencial Real (ETPR) se obtuvo por método de Schosinsky de acuerdo a la ecuación:

$$ETPR = \frac{(HS - PM)}{(CC - PM)} (ET)$$

Donde:

- ETPR* Evapotranspiración potencial real [mm/día]
- HS* Humedad del suelo [%]
- ET* Evapotranspiración de la planta a capacidad de campo [mm/día]
- CC* Capacidad de campo [%]
- PM* Punto de marchitez permanente [%]

4.3.3 Integración y resultados

Los cálculos realizados sobre las variables de precipitación mensual, temperatura, capacidad de campo y punto de marchitez del suelo según la textura, capacidad de infiltración de los suelos, pendiente del terreno, cobertura vegetal, escorrentía y evapotranspiración real, fueron integrados para estimar el agua que drena desde el suelo hacia el acuífero, (Schosinsky N, 2006). El cálculo del balance hídrico fue el insumo base para la identificación de las zonas de recarga potencial de los acuíferos, dicho proceso se realizó siguiendo los lineamientos del IDEAM en la Evaluación del Regional del Agua – ERA 2013.

4.3.3.1 Cálculo del balance hídrico

En la ecuación del balance hídrico la variable de entrada es la Precipitación, mientras que las variables de salida son la Escorrentía, y la evapotranspiración que corresponde al componente natural de pérdida por evaporación directa y por transpiración (IDEAM, 2013). Con base en los resultados de los cálculos de los parámetros de Precipitación y la Evapotranspiración media mensual se realizaron los análisis estacionario y espacial que permitió determinar el agua disponible en el suelo mes a mes, y el potencial de la recarga al acuífero.

4.3.3.2 Recarga potencial

El balance de suelos permitió estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero ubicado debajo del suelo y que se mide según la recarga media anual o por el llenado natural o artificial proveniente de ríos, lagos, fugas de redes de abastecimiento, etc. conectados a un acuífero. Una vez el suelo supera la capacidad de campo y la evapotranspiración de las plantas está cubierta sobreviene la recarga del acuífero (infiltración), la cual se calculó empleando la siguiente ecuación de (Schosinsky N, 2006). El cálculo se realizó empleando un modelo en una hoja electrónica de Excel el cual fue alimentado con datos procesados provenientes de las estaciones hidrometeorológicas de la CAR y del IDEAM.

$$R_p = P_i + HS_i - HS_f - ETR$$

Donde:

- R_p Recarga potencial mensual [mm/mes]
- P_i Precipitación que infiltra [mm/mes]
- HS_f Humedad del suelo al final del mes [mm]
- ETR Evapotranspiración real [mm/mes]

4.3.3.3 Zona de recarga y descarga

Las zonas de recarga hídrica en términos generales se refieren a aquellas áreas que permiten o facilitan la incorporación de agua a los acuíferos. Para una correcta identificación de estas áreas, se seleccionó la metodología sugerida por el IDEAM (2019).

$$ZPRAS = f \sum i * K(a)$$

Donde:

- K Factor de calificación del atributo
- a Atributo para cada variable
- i Ponderación del atributo

Esta metodología se basa en la ponderación de atributos y el análisis multicriterio lo que permitió efectuar desde diferentes puntos de vista con relación a la importancia cuantitativa de cada criterio, en función de su influencia en la infiltración mediante un proceso de modelamiento espacial en SIG llamado calculadora raster, según el software, el procesamiento se conoce como álgebra de mapas. Para determinar las zonas de recarga potencial en el área de influencia se empleó el método de evaluación potencial de zonas de recarga por Matus (2009), que está soportado en ponderaciones de 1 a 5 para los siguientes parámetros: Pendiente (Pend), Tipo de suelo (Ts), tipo de roca (Tr), cobertura vegetal permanente (Cve) y se evaluó la precipitación (P). Posteriormente se usó la siguiente calificación y ponderación para cada una de los atributos y establecer la Zona de Recarga (ZR) (Ver

Tabla 8).

Tabla 8. Atributos, Ponderación y Calificación de Zonas Recarga.

Pendiente (Pend)			
Descripción	%	Ponderación	Posibilidad de recarga
Planos a casi planos	0-6	5	Muy Alta
Moderadamente ondulados	6-15.	4	Alta
Ondulados/cóncavos	15-45	3	Moderada
Escarpados	45-65	2	Baja
Fuertemente escarpados	>65	1	Muy Baja
Tipo de Suelo (Ts)			
Textura		Ponderación	Posibilidad de recarga
Suelos franco-arenosos a arenosos.		5	Muy Alta
Suelos francos		4	Alta
Suelos franco-limosos		3	Moderada
Suelos Franco arcillosos		2	Baja
Suelos arcillosos		1	Muy Baja
Tipo de roca (Tr)			
Textura		Ponderación	Posibilidad de recarga
Rocas muy permeables, muy suaves constituidas por agregados gruesos, con macro poros interconectados.		5	Muy Alta
Rocas permeables constituidas por agregados medianos con poros conectados entre sí.		4	Alta
Rocas moderadamente permeables, con regular conexión de poros entre sí.		3	Moderada
Rocas poco permeables, moderadamente compactas, constituidas por partículas finas, una combinación de gravas con arcillas, con presencia de fracturas conectadas entre sí.		2	Baja
Rocas impermeables		1	Muy Baja
Cobertura vegetal permanente (Cve)			
Porcentaje		Ponderación	Posibilidad de recarga
>80%		5	Muy Alta
70-80%		4	Alta
50-70%		3	Moderada
30-50%		2	Baja
<30%		1	Muy Baja
Uso del Suelo (Us)			
Uso de Suelo		Ponderación	Posibilidad de recarga
Bosque que presentan los tres estratos con árboles, arbustos y hierbas		5	Muy Alta
Sistemas agroforestales o silvopastoriles		4	Alta
Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo		3	Moderada
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua		2	Baja
Terrenos agropecuarios, con manejo intensivo		1	Muy Baja

Fuente: Adaptado de Matus, 2009.

Luego de realizar la calificación y la ponderación a cada una de estos atributos se aplicó la siguiente ecuación para obtener la zona potencial de recarga (ZR):

$$ZR = 0.27(Pend) + 0.23(Ts) + 0.12(Tr) + 0.25(Cve) + 0.13(Us)$$

Basada en la ponderación de atributos y el análisis multicriterio con relación a la importancia cuantitativa y en función de su influencia en la infiltración, mediante un proceso de modelamiento espacial en SIG llamado álgebra de mapas, se identificó la zona potencial de recarga. A partir de la sumatoria de las ponderaciones alcanzadas se definió un rango de las posibilidades para que ocurra la recarga hídrica en el área de estudio indicados en la Tabla 9 y se elaboró el mapa que indica las zonas de recarga hídrica (ZR)

Tabla 9. Matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica.

Posibilidad de recarga	Valor resultante
Muy alta	4.10 - 5.00
Alta	3.50 – 4.09
Moderada	2.60 – 3.49
Baja	2.00 – 2.59
Muy Baja	1.00 – 1.99

Fuente: Matus, 2009.

Finalmente se planteó el concepto de Zona de Recarga Hídrica Efectiva (ZRHE) al involucrar la variable de precipitación promedio multianual obtenida del mapa de Isoyetas y sus valores fueron ponderados como se indica en la Tabla 10.

Tabla 10. Ponderación de la recarga potencial por precipitación.

Recarga por Precipitación (mm)	Valor
< 880	1
880 -902	2
902 - 924	3
924 – 946	4
> 946	5

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para el procesamiento en SIG se recurrió al modelamiento por álgebra de mapas empleando la siguiente ecuación.

$$ZRHE = K(ZR) + K(ZRP)$$

Dónde:

- ZRHE Zona potencial de recarga hídrica efectiva
- ZR Zona potencial de recarga hídrica
- ZRP Zona de recarga potencial por precipitación
- K Factor multiplicador con valor 0.5

Se consideró el factor multiplicador (K=0,5) para valorar cada atributo con el mismo nivel de importancia al momento de determinar la ZRHE. Posteriormente los valores resultantes fueron categorizados para significar la posibilidad de recarga efectiva en la zona adoptando la misma matriz señalada en la Tabla 9 y representados en el respectivo mapa de ZRHE.

4.4 MODELO HIDRODINÁMICO

Con base en la información de parámetros hidráulicos obtenidos de la literatura y estudios previos, y considerando conceptos unificados se pudo establecer el potencial de las diferentes unidades hidrogeológicas respecto a su permeabilidad y porosidad.

La investigación en campo se centró en la toma de 30 registros de niveles piezométricos del nivel estático mediante el uso de una sonda eléctrica previa sellamiento del pozo para evitar el bombeo por mínimo 24 horas. Igualmente se registraron registros de caudales en los pozos tomados directamente del macromedidor instalado controlando la conversión a las unidades correspondientes, y, en los casos donde no se contó con el macromedidor se tomó el registro por el método volumétrico.

En la Figura 12, se aprecia el flujograma de la metodología desarrollada a partir de la cual se elaboró Modelo Hidrodinámico.

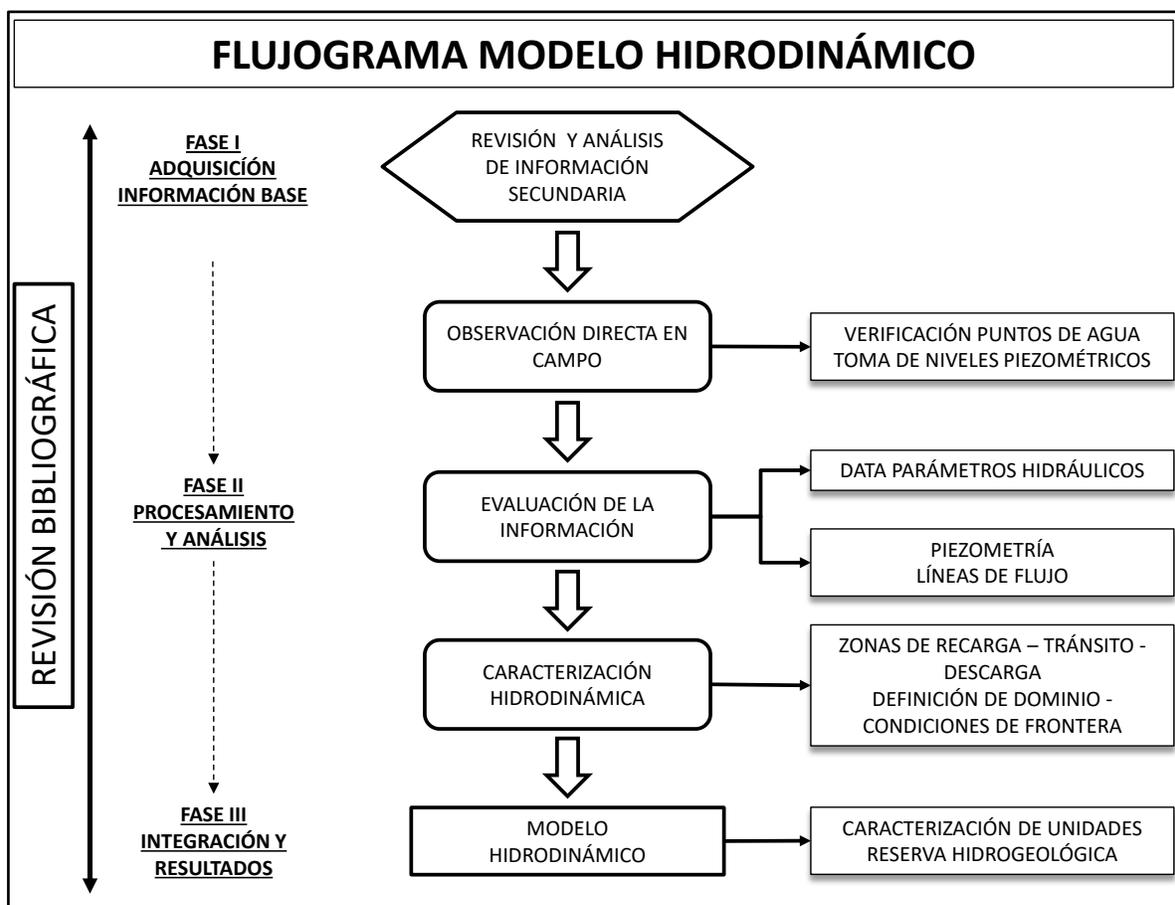


Figura 12. Flujograma detallado de la metodología del Modelo Hidrodinámico.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

4.4.1 Procesamiento y análisis

Una vez establecidos los parámetros hidráulicos y luego de haber obtenido los registros de campo, se creó una data que fue procesada empleando la técnica de interpolación kriging con el software ArcGis el cual minimiza el error en la estimación basado en la calidad de las mediciones. Este método

permitió la evaluación de la variabilidad espacial del nivel estático mediante interpolaciones confiables y la representación gráfica de isolíneas con las cuales se determinan líneas de flujo, zonas de recarga, tránsito y descarga del agua subterránea dentro del acuífero.

4.4.2 Integración y resultados

Con la integración de la información plasmada en los diferentes mapas temáticos se realizó la caracterización de las unidades hidrogeológicas de interés, en acuíferos, acuitardos, acuícludos y acuífugos, conforme a su capacidad para almacenar, ceder o retener agua en relación con la porosidad y permeabilidad según su litología y sus características hidráulicas según la clasificación dada por (INGEOMINAS, 2002).

4.4.2.1 Zona de interés hidrogeológico

Basados en los mapas de Isopiezas elaboradas a partir de los niveles estáticos registrados en los puntos de agua de tipo pozo profundo se definió el régimen de dirección de flujo regional del agua subterránea (líneas de dirección de flujo), las cuales indican el vector de movimiento que se presenta en los sistemas de acuíferos de la zona. La tendencia de la dirección del flujo se estableció manualmente a criterio del experto, y la identificación de zonas de Recarga – Descarga se obtuvo de la superposición de mapas temáticos mediante el empleo del software ArcGis 10.

4.4.2.2 Reservas hidrogeológicas

El cálculo de las reservas máximas o de almacenamiento se hizo siguiendo la metodología de Custodio y Llamas (1983), como el producto del volumen geométrico de cada unidad hidrogeológica presentes en la zona por la porosidad media. De igual manera las reservas mínimas se calcularon descontando el volumen de agua existente en el medio no saturado. Entre tanto, las reservas explotables fueron calculadas sólo para los niveles hidrogeológicos de interés según su porosidad y las características litológicas del acuífero y por las variaciones del nivel freático en un año hidrológico, niveles mínimos y máximos, que permitió establecer la Reserva Reguladora según criterios de (IDEAM, 2013).

Las ecuaciones empleadas en la determinación de las reservas Estáticas ($Q_{estáticas}$), Dinámicas ($Q_{dinámicas}$) y Explotables ($Q_{explotables}$) fueron:

$$Q_{Estática} = A * E_{Saturado} * \eta_{Eficaz}$$

$$Q_{Dinámica} = R * A$$

$$Q_{Explotable} = (K_1 * Q_{Dinámica})(K_2 * Q_{Estática})$$

Donde:

A	Área de superficie del acuífero [m ²]
$E_{Saturado}$	Espesor saturado promedio [m]
η_{Eficaz}	Porosidad efectiva [Adimensional]
R	Recarga anual [m/año]
K_1 y K_2	Porcentaje de uso

4.5 MODELO HIDROGEOQUÍMICO

La química del agua subterránea está asociada directamente a condiciones geológicas de las rocas o depósitos por la que está atravesada, por tanto, determinar su variación espacial resulta complejo. Es así que algunas características como el pH, la temperatura y la conductividad eléctrica son indicadores de condiciones particulares de un determinado sitio, pues dependen de la profundidad o de posibles mezclas de aguas de diferente origen. En la Figura 13, se aprecia el flujograma de la metodología desarrollada a partir de la cual se elaboró Modelo Hidrogeoquímico.

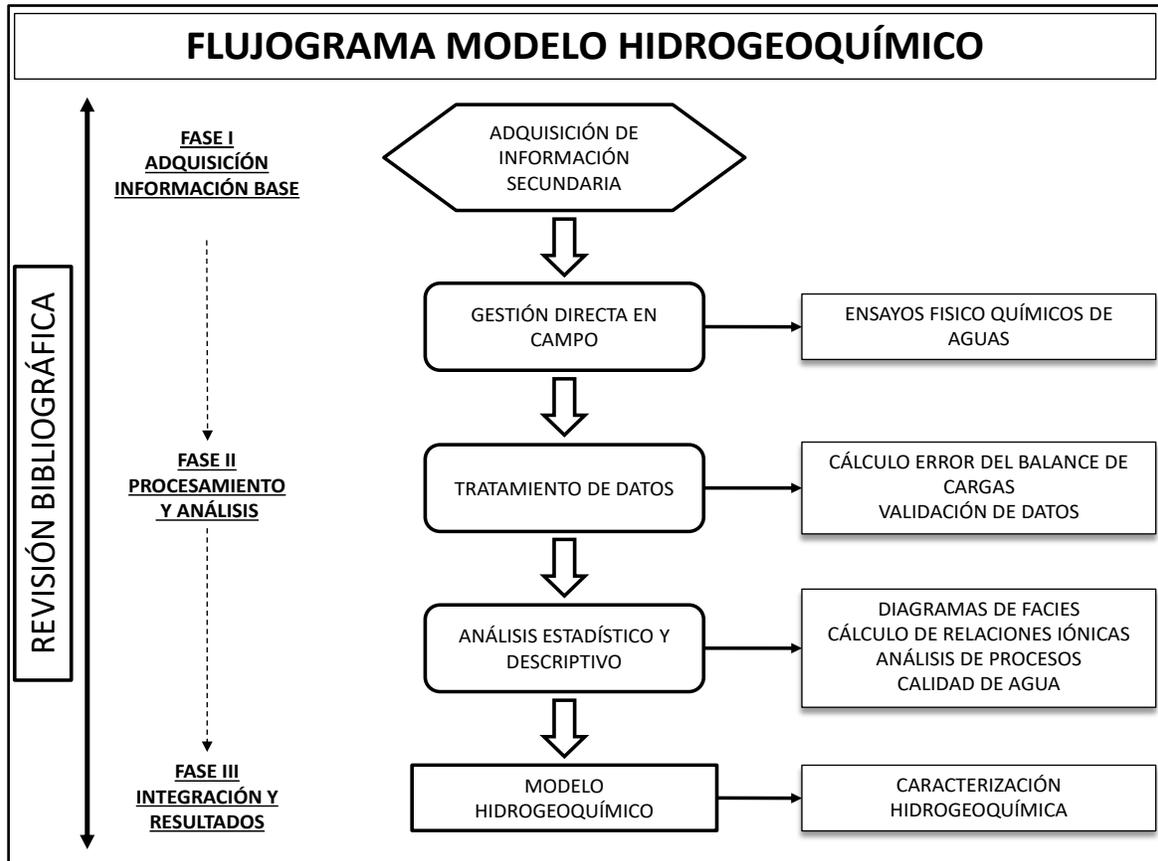


Figura 13. Flujograma detallado de la metodología del Modelo Hidrogeoquímico.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El análisis físico-químico se realizó sobre los iones de Potasio (K^+), Calcio (Ca^{2+}), Magnesio (Mg^{2+}), Sodio (Na^+), Nitrato (NH_4^+), Hierro (Fe^{2+}), Bicarbonatos (HCO_3^-), Cloro (Cl^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Fosfatos (PO_4^{3-}) y Nitratos (NO_3^-), también de otros parámetros como sólidos disueltos totales (TDS), pH, Conductividad Eléctrica (CE) obtenidos de 11 muestras de agua subterránea tomados en pozos de bombeo instalados en el área.

4.5.1 Procesamiento y análisis

4.5.1.1 Análisis de datos

El análisis de los datos se realizó utilizando métodos estadísticos descriptivos. Los métodos gráficos empleados fueron el de Piper (1944), para interpretar o identificar grupos de facies químicas, el de

Stiff (1951) para identificar patrones de composición química similar, y el de Gibbs (1970), para identificar el dominio del proceso por precipitación atmosférica, por la geología o por el proceso de evaporación. Dichos diagramas fueron graficados empleando el software libre Diagrammes.

4.5.1.2 Relaciones iónicas

Para determinar los procesos hidrogeoquímicos se siguió la metodología del análisis de las relaciones iónicas (López C. , 2018) así:

Relación entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + SO_4^{2-})$ y $(Na^+ + K^+) - Cl^-$, para buscar la existencia del posible proceso de intercambio catiónico en el sistema agua-sedimento.

Análisis de índices cloro alcalinos CAI_1 y CAI_2 para establecer posibles relaciones de intercambio iónico.

$$CAI_1 = \frac{[Cl^- - (Na^+ + k^+)]}{Cl^-}$$

$$CAI_2 = \frac{[Cl^- - (Na^+ + k^+)]}{(SO_4^{2-} + HCO_3^- + CO_3^{2-} + NO_3^-)}$$

Análisis de procesos de meteorización presentes en la matriz arcillosa del acuífero a partir de la relación de los cationes con el ión bicarbonato

$$HCO_3^- \text{ vs } (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) - Cl^-, \text{ y,}$$

$$(HCO_3^- + SO_4^{2-}) \text{ vs } (Ca^{2+} + Mg^{2+} + Na^+ + K^+) - Cl^-$$

Análisis para establecer procesos de disolución de minerales de carbonato y sulfato en el sistema.

$$(Ca^{2+} + Mg^{2+}) \text{ vs } (HCO_3^- + SO_4^{2-}).$$

4.5.2 Integración y resultados

Teniendo en cuenta lo establecido en el Decreto único reglamentario del sector Ambiente y Desarrollo Sostenible 1076 de 2015 de MinAmbiente (2015) y 3930 de 2010 de MinAmbiente (2010), por el cual se señalan disposiciones referentes a la calidad y usos del agua y se dictan otras disposiciones, se realizó el análisis comparativo para determinar la calidad de agua subterránea presente en los niveles acuíferos de interés hidrogeológico y su uso potencial para consumo humano, agricultura o industrial.

4.5.2.1 Distribución espacial

Los diagramas de Stiff fueron sobrepuestos sobre el área de estudio y se identificó la formación geológica a la que pertenece cada muestra, así como la dirección de flujo predominante de cada acuífero. Esta distribución se realizó bajo la consideración que las muestras fueron tomadas en la misma temporalidad.

Esta distribución permitió validar que el área del municipio de Tocancipá corresponde a una zona de tránsito de aguas subterráneas con tipos de flujo intermedio que se integran a flujos regionales.

4.5.2.2 Calidad del agua

Existe multiplicidad de actividades que se desarrollan y demandan del recurso hídrico en el municipio de Tocancipá, tanto en el área urbana como rural, representadas principalmente en el abastecimiento humano y doméstico, para uso agrícola y pecuario, uso recreativo e industrial.

Con base en los criterios de calidad del agua establecidos en el Decreto único Reglamentario del Sector Ambiente y Desarrollo Sostenible 1076 de 2015 se determinó el posible uso del recurso hídrico a partir de la comparación con los resultados de los ensayos fisicoquímicos tomados en diferentes puntos de muestreo, y acorde con López, C (2018) se realizó el cálculo de los indicadores para uso agrícola: Relación de Absorción de Sodio (RAS), Carbonato Sódico Residual (RSC), Porcentaje de Sodio Posible (PSP) y la Salinidad Efectiva (SE), cuyas concentraciones están expresadas en meq-g l⁻¹. según las ecuaciones:

$$RAS = \frac{[Na^+]}{\sqrt{\frac{([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])}{2}}}$$

$$RSC = ([CO_3^{2-}] + [HCO_3^-]) - ([Ca^{2+}] + [Mg^{2+}])$$

$$PSP = \frac{Na^+}{SE} * 100\%$$

4.6 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

A partir de las características geológicas, hidrológicas, hidráulicas e hidrogeoquímicas se definen las unidades hidrogeológicas de los diferentes acuíferos los cuales fueron clasificados siguiendo la nomenclatura propuesta por Vargas (2001), considerando su porosidad, la susceptibilidad de transmitir y almacenar el agua, y según sus circunstancias hidráulicas y estructurales.

Posteriormente los mapas fueron superpuestos y se graficó espacialmente en mapas y secciones hidrogeológicas y en un bloque diagrama empleando software de diseño gráfico.

4.7 POTENCIAL DEL RECURSO HÍDRICO

Como resultado de la evaluación de la información geológica y geofísica se estimó la geometría de las unidades hidroestratigráficas de interés en el municipio de Tocancipá, tanto planimétrica como en profundidad mediante perfiles o secciones.

A partir de resultados provenientes de los análisis hidrológicos se logró definir las zonas de recarga potencial y además se obtuvo el volumen de agua que se infiltra al suelo proveniente de los excedentes calculados en el balance hídrico.

Por otra parte, con la verificación en campo de los puntos de agua, y de los análisis realizados a los niveles piezométricos se establecieron las direcciones de flujo y las variaciones del nivel del agua subterránea. Los parámetros hidráulicos determinaron los tipos de acuíferos por cada unidad hidrogeológica presente en el área y la identificación de zonas potenciales de interés hidrogeológico.

Finalmente, los análisis físico químicos sirvieron para la validación del modelo y fueron la base para la determinación de la calidad del agua subterránea diferenciada por unidad hidroestratigráfica.

La integración de los resultados de los anteriores componentes permitió la generación del modelo hidrogeológico conceptual, y con ello se identificaron cinco (5) áreas de interés hidrogeológico de acuerdo a las características hidroestratigráficas planteada por Pulido y Oyola (1996), en función de la profundidad como se indica en la Tabla 11.

Tabla 11. Áreas de potencial interés hidrogeológico.

Caudal Vs Profundidad	De 0 a 100 m	De 100 a 250 m	Mayor a 250 m
Mayor a 12 l/seg	Alto	Moderado	Bajo
De 2 a 12 l/seg	Moderado	Bajo	-
Menor a 2 l/seg	Bajo	-	-

Fuente: Tomado y modificado de Pulido y Olaya, 1996.

5. ANÁLISIS, INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS Y CONCLUSIONES

5.1 MODELO GEOLÓGICO - GEOFÍSICO

A partir de la recopilación de información geológica, de artículos especializados afines, de observaciones directas en campo y del análisis visual de muestras se logró identificar los tipos de rocas y depósitos presentes en el municipio de Tocancipá. La integración de las características estructurales y la distribución litoestratigráfica superficial dieron origen al mapa geológico local, que junto con la elaboración de 4 perfiles geológicos permitieron establecer el marco de geológico 2D y 3D, empleando métodos de diagramación convencional, lo cual facilitó la comprensión de las características de la cuenca en cuanto a su geometría, límites horizontales y verticales, localización de unidades de interés hidrogeológico e identificación de zonas de recarga y descarga hídrica potencial de acuíferos

5.1.1 Estratigrafía

La geología presente en Tocancipá está constituida por rocas con edades desde el Cretácico superior del Grupo Guadalupe hasta el Cuaternario con rasgos geomorfológicos relacionados con procesos denudativos y agradacionales. Con base al análisis de la información existente de SGC, CAR, IDEAM, IGAC, y de estudios recientes de la empresa consultora Geocing SAS, se realizó la verificación en campo mediante puntos de control en afloramientos georreferenciados donde se tomaron muestras frescas de mano para la descripción macroscópica de las estructuras sedimentarias, interestratificaciones, tamaño de grano, redondez, color, así como la toma de 26 datos estructurales, medición de espesor, la realización de 1 sección delgada, entre otras, cuyos datos al ser integrados permitieron elaborar el mapa geológico de la Figura 14.

Se tomó la cartografía base del IGAC correspondiente a las planchas 228-I-A-2, 228-I-B-1, 229-III-C-2, 209-III-C-4, 229-III-D-1 y 229-III-D-3, y se elaboró el mapa geológico a escala 1:25.000 de las rocas sedimentarias de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t), Formación Guaduas (K2E1g), Formación Cacho (E1c), Formación Bogotá (E1b), del cuaternario las Formaciones Sabana (Q1sa) y Chía (Q2ch), así como depósitos recientes de Coluvión (Q2c), aluviales (Q2da) y rellenos antrópicos (Q1ra).

En la Figura 15 y 16, se aprecian algunas de las unidades geológicas que se encuentran en el área señaladas sobre vistas panorámicas tomadas desde la parte alta de la vereda La Esmeralda, y desde la parte alta en la vereda La Fuente respectivamente. El área presenta inclinaciones de terreno que varían desde suavemente inclinada hasta muy escarpada (1° hasta $> 45^\circ$). En los sectores donde se desarrollan actividades de minería de canteras la intervención antrópica y la meteorización del macizo rocoso ha modificado las condiciones naturales de recarga de los acuíferos. Las unidades geológicas se describen a continuación.

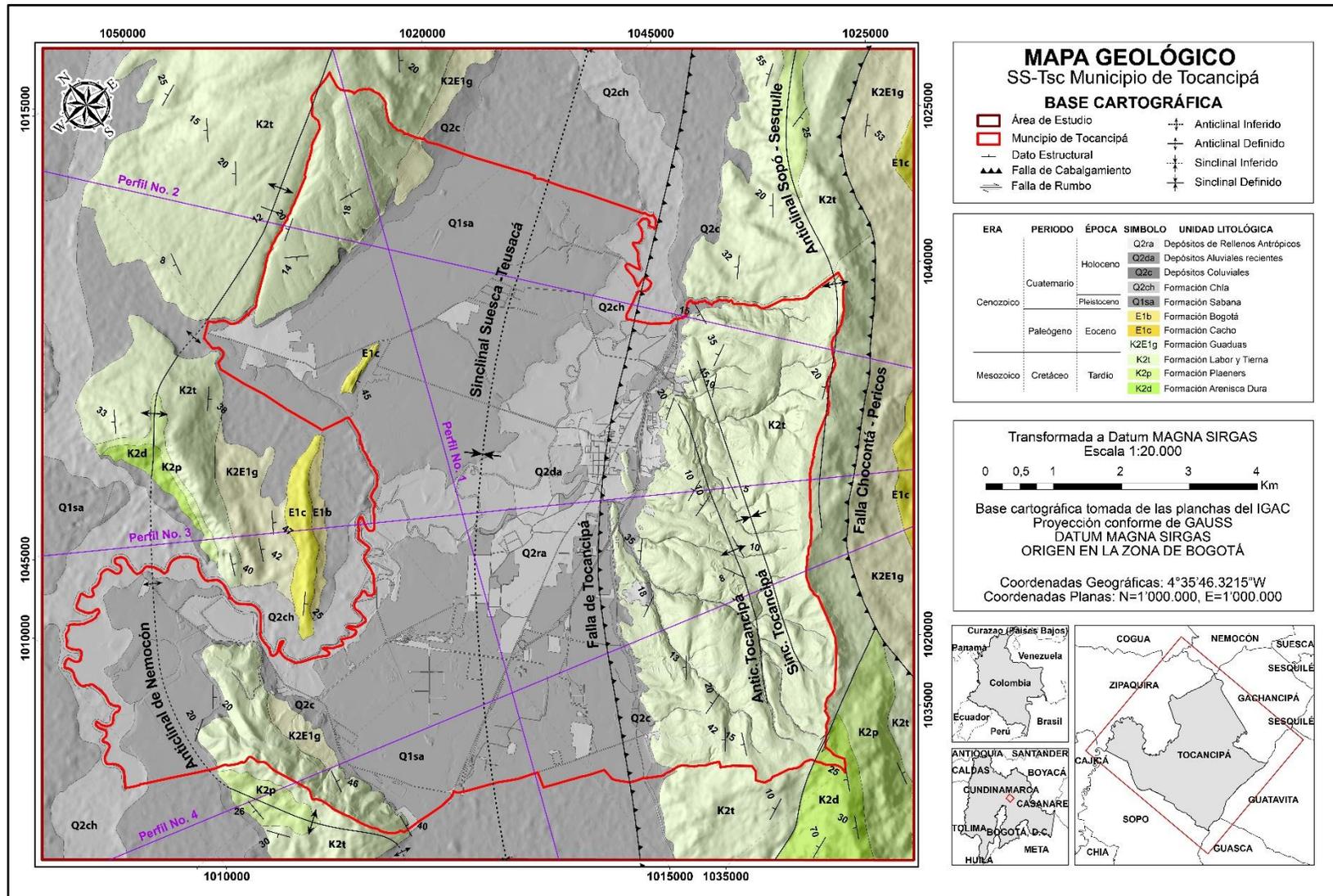


Figura 14. Mapa geológico de Tocancipá.
Fuente: Tomado y actualizado de INGEOMINAS, 2003.



Figura 15. Panorámica de Unidades Estratigráficas en desde La vereda La Esmeralda, Tocancipá.
(E: 1020354 N: 1040742).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

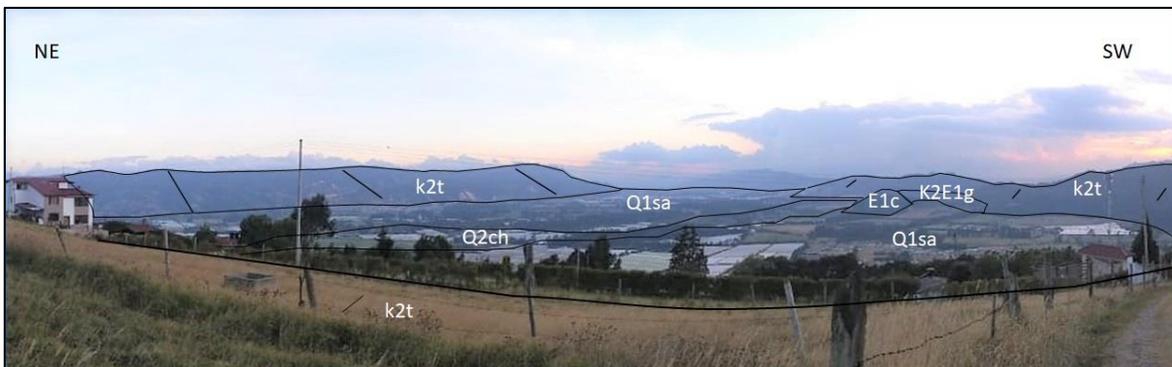


Figura 16. Panorámica de Unidades Estratigráficas en desde la vereda La Fuente, Tocancipá.
(E: 1016716 N: 1046364).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.1.1 Grupo Guadalupe

En el área de estudio la presencia del Grupo Guadalupe está limitada en su totalidad a la exposición de rocas de la Formación Arenisca Labor y Tierna, y un afloramiento de la Formación Arenisca Dura, las dos son consideradas unidades de interés hidrogeológico.

Formación Arenisca Dura (K2d)

Esta Formación aflora al sur de Tocancipá, en límites con el municipio de Sopó, haciendo parte del núcleo del anticlinal de Sopó - Sesquilé. En el área de estudio esta unidad presenta intercalaciones de areniscas en capas medianas a gruesas, tamaño de grano muy fino, de color blanco, los clastos son subangulares y esféricos. Texturalmente son areniscas maduras, bien seleccionadas con matriz arcillosa.

Formación Plaeners (K2p)

En la secuencia estratigráfica esta Formación reposa de forma neta y concordante sobre la Formación Arenisca Dura haciendo parte del anticlinal Sopó Sesquilé sin aflorar en el municipio de Tocancipá. Litológicamente se caracteriza por presentar limolitas silíceas, en capas delgadas intercaladas con lodolitas grises. Presenta una morfología suave que genera una hondonada debido a su litología fina, contrastando con las pendientes abruptas de la Formación Arenisca Dura.

Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t)

En el municipio de Tocancipá esta Formación reposa en contacto neto y concordante sobre la Formación Plaeners y se localiza en los sectores topográficamente más altos que circundan la planicie central por donde fluye el río Bogotá. En el área existen numerosos afloramientos que exponen diferentes niveles estratigráficos, principalmente en el sector oriental. Su expresión morfológica está definida por la tendencia y variación en la resistencia a procesos erosivos de cada unidad.

En la quebrada Quindingua, en el límite con el municipio de Gachancipá, el afloramiento corresponde al flanco occidental de un pliegue de la Formación Arenisca Labor y Tierna donde se presenta una intercalación de capas medianas de arenisca con espesor hasta de 7 cm y capas delgadas de arcillolitas con espesor hasta de 1 cm. Se evidencia la presencia de bivalvos en las capas de arenisca y algunas escamas de peces, moldes de bivalvos y tenazas de cangrejos en las capas de las arcillolitas. La roca está intensamente fracturada lo que favorece la recarga de los niveles acuíferos en profundidad. Ver Figura 17.

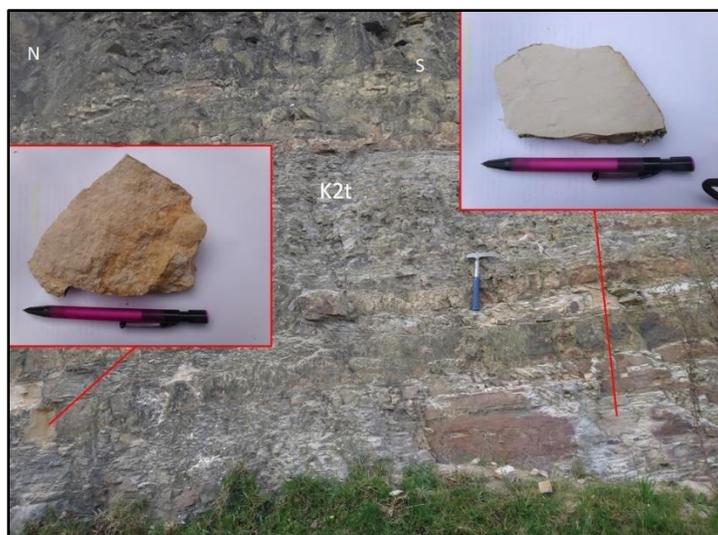


Figura 17. Afloramiento de intercalación de capas de areniscas y arcillolitas de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda Quindingua. (E: 1020550 N: 1041477).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la vereda Canavita, sector Tablón Alto, se presenta un afloramiento de una capa media de limolitas de color amarillo y blanco con estratificación laminar y espesor hasta de 1,50 m que supra yacen un nivel de areniscas color gris de grano fino. La roca está intensamente fracturada. Ver Figura 18.

En la vereda La Esmeralda, sector Cuchilla Peña Blanca, aparece un nivel de areniscas cuarzosas muy competentes en capas con espesor de hasta 40 cm, color crema-blanco o amarillo-crema; el tamaño de grano varía de medio a fino interestratificados con delgadas de capas de arcillolitas de color blanco –cremoso con espesor hasta de 2 cm y evidencia de disolución de minerales y organismos. Debido a que la roca está muy fracturada y el buzamiento se dispone en sentido contrario a la inclinación del terreno, que varía de muy inclinada a escarpada, con rangos entre 11° y a 45° se origina un relieve con morfología de regular a irregular denominado Ladera Contrapendiente, el cual se extiende por tramos que alcanzan longitudes de 500 m. Estas características de porosidad, primaria y secundaria, además del sentido del buzamiento de la roca favorecen la acumulación y tránsito del agua en profundidad. Ver Figura 19.

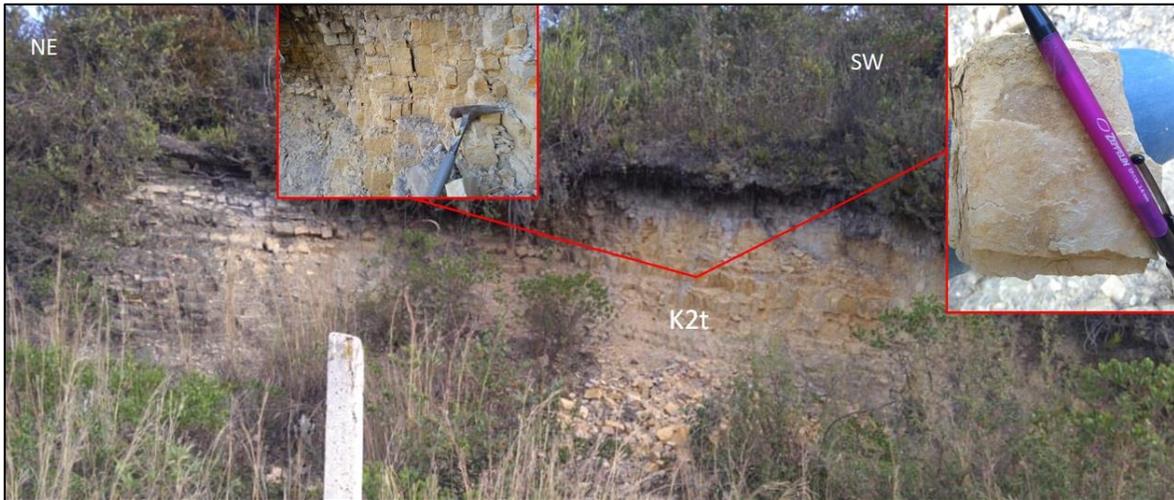


Figura 18. Afloramiento de limolitas de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda Canavita, sector Tablón Alto, sobre la vía que conduce a Guatavita. (E: 1020550 N: 1041477).
Fuente: Elaboración propia, 2021.



Figura 19. Afloramiento de areniscas de grano medio a fino de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda La Esmeralda, sector Chuchilla Peña Blanca. (E: 1021316 N: 1039449).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la misma vereda, cerca al pozo de agua subterránea del Municipio, se observa que el afloramiento donde se presenta una sucesión de capas gruesas a muy gruesas de arenisca cuarzosa, esta unidad posee una matriz de granulometría areno-gravosa intensamente fracturadas formando cuñas hasta de 5 cm de espesor. En este sector la geofoma es Ladera de Contrapendiente, por lo tanto, estas características favorecen la acumulación y tránsito del agua en profundidad, se considera una zona potencial de recarga. Ver Figura 20.



Figura 20. Afloramiento de capas de arenisca grano medio a grueso de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t). Vereda La Esmeralda. (E: 1019688 N: 1040776).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.1.2 Formación Guaduas (K2E1g)

Su exposición se aprecia en el flanco occidental del SS-Tsc hacia el piedemonte de los cerros. La Formación Guaduas reposa en contacto neto y concordante con la Formación Arenisca Labor y Tierna, al tope con la Formación Cacho, y puntualmente en contacto discordante con depósitos recientes. Por sus características litológicas se considera una unidad de poco interés hidrogeológico, sin embargo, dada su posición estratigráfica entre unidades acuíferas actúa como una capa sello que la confina en profundidad. Morfológicamente, la Formación Guaduas presenta un paisaje de colinas con pendientes muy suaves. Ver Figura 21.



Figura 21. Morfología de la Formación Guaduas (K2E1g). Vereda Banderillas, Finca El Camino, Zipaquirá. (E: 1014260 N: 1043960).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la vereda Banderillas de Zipaquirá, límite con la vereda La Fuente, se evidencia esta formación por la extracción de carbón que allí se realiza en una mina subterránea, en tanto, en las veredas Tibitoc y El Porvenir de Tocancipá afloran capas de lodolitas color blanco suprayaciendo la Formación Arenisca Labor y Tierna e infrayace la Formación Sabana. Ver Figura 22.



Figura 22. Formación Guaduas (K2E1g). Vereda El Porvenir. (E: 1018588 N: 1044629).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.1.3 Formación Cacho (E1c)

En la zona aflora de manera local e interrumpida en el flanco occidental del SS-Tsc. El tope inferior de esta Formación se encuentra en contacto neto y concordante con la Formación Guaduas, (Ver Figura 21 y 23), y en el tope superior con la Formación Bogotá. La morfología que presenta corresponde a un conjunto de cerros alineados y elongados definidos por la intercalación de estratos de unidades con diferente resistencia, dispuestos en ladera estructural afectados por erosión diferencial y disección acentuada que dejan en la parte más elevada una cresta aguda denominada Espinazo.



Figura 23. Contacto Formación Cacho (E1c) y Formación Guaduas (K2E1g). Vereda La Fuente. Tocancipá (E: 1016252 N: 1045093).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la vereda La Fuente, se aprecia un afloramiento de 44 m de alto y 304 m de ancho, en el cual se observan areniscas cuarzosas en capas de medianas a gruesas con espesor hasta de 14 cm. La muestra de mano refleja el predominio de granos de tamaño de medio y algunos niveles de arena gruesa de color amarillo crema como se indica en la Figura 24, en tanto, hacia el sector de la Finca El Triángulo se expone una secuencia de capas gruesas de arenisca cuarzosa fracturadas con espesores entre 10 y 20 m, intercaladas con capas gruesas de arcillolita con espesor hasta de 12 m. Por las características litológicas y por su disposición estructural, la Formación Cacho ofrece condiciones propicias para ser considerada una unidad de interés hidrogeológico.



Figura 24. Arenisca de la Formación Cacho (E1c). Vereda La Fuente. (E: 1016252 N: 1045093).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

A la muestra tomada en la vereda Banderillas del municipio de Zipaquirá se le realizó una sección delgada. En el laboratorio fue impregnada con resina epoxi azul para resaltar su porosidad. El análisis petrográfico permitió clasificarla como una lito arenita compuesta por granos de cuarzo mono cristalino (Qm) y policristalino (Qp) en proporción superior al 75%, fragmentos de roca (FR) del 25% y escaso contenido de feldspatos (F) asociados a la matriz arcillosa como se aprecia en la Figura 25.

La roca corresponde a una arenisca con tamaño de grano fino a medio, de textura subangular a angular, moderadamente seleccionado. La cementación es de tipo silíceo, y se presentan algunas pátinas de hierro en microfracturas interconectadas que originan porosidad primaria y secundaria al 10%.

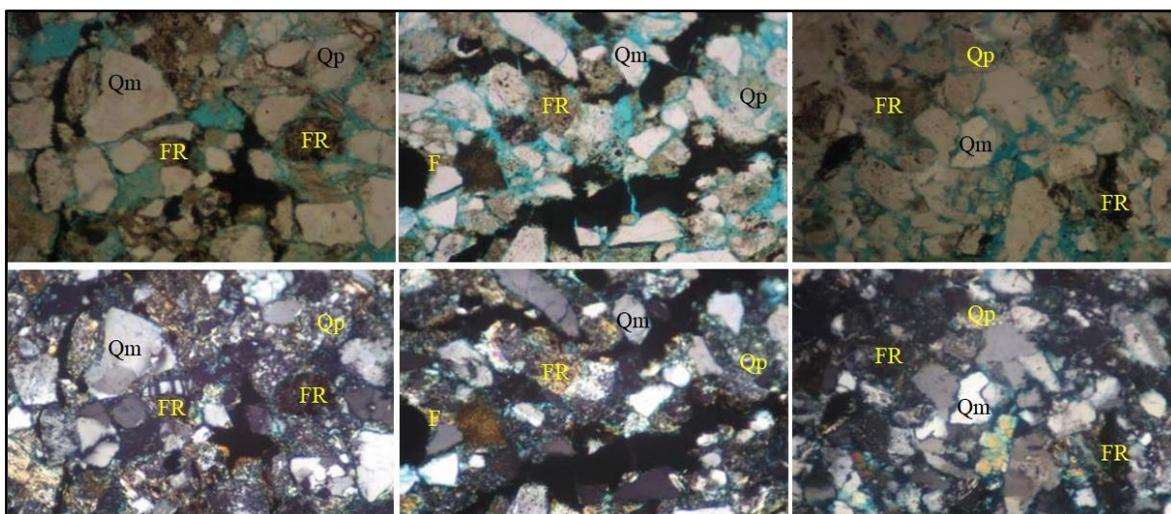


Figura 25. Sección delgada tomada con objetivo 100 X sobre muestra de la Formación Cacho (E1c). Vereda Banderillas, Zipaquirá. (E: 1014260 N: 1043960).
Arriba Nicoles paralelos, abajo Nicoles cruzados.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.1.4 Formación Bogotá (E1b)

Definida como una sucesión conformada por grandes espesores de sublitoarenitas intercaladas con lodos y arcillolitas a la base la cual gradualmente se vuelve más arcillosa hacia el techo. En la zona de estudio la base está en contacto concordante con la Formación Cacho y en el tope en contacto discordante con depósitos cuaternarios de la Formación Sabana en forma de excedentes de erosión que pueden ser interpretados en registros geoelectricos en profundidad.

5.1.1.5 Formación Sabana (Q1sa)

Esta Formación aflora en la zona plana del municipio de Tocancipá; reposa en contacto discordante con las Formaciones Arenisca Labor y Tierna, Guaduas y Bogotá. Corresponde a depósitos de origen lacustre con un relieve irregular y contornos redondeados que en superficie presentan un aspecto aterrazado y morfología ondulada suavemente inclinada ($<5^{\circ}$ - 10°), y limitada hacia los cauces por escarpes de varios metros de altura y de extensión y continuidad moderada (Ver Figura 26). Su origen está relacionado con el desplazamiento lateral del cauce del Río Bogotá dentro de la llanura aluvial.



Figura 26. Morfología Formación Sabana (Q1sa). Vereda La Fuente. (E: 1015501 N: 1043935).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la vereda La Fuente, se observa un suelo matriz limo arenoso, matriz soportada, de color grisáceo, con presencia de clastos de arenisca fina, subredondeados que alcanzan hasta 0.4 cm de espesor, con aporte de ceniza volcánica lo que posiblemente le da más consistencia. Ver Figura 27.

En la vereda La Esmeralda, sector La Aurora, se presenta un depósito constituido por arcillas color café grisáceo con intercalaciones locales de arenas finas con niveles delgados de gravas producto de la acumulación de materiales transportados por corrientes. Ver Figura 28.

Dado que la litología de la Formación Sabana tiene un predominio de tipo arcilloso con niveles arenosos saturados localmente, no consolidados se considera como una unidad de moderada importancia hidrogeológica de extensión local, cuya recarga se da a partir de la infiltración por precipitación.



Figura 27. Formación Sabana (Q1sa). Vereda La Fuente. (E: 1015481 N: 1044146).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

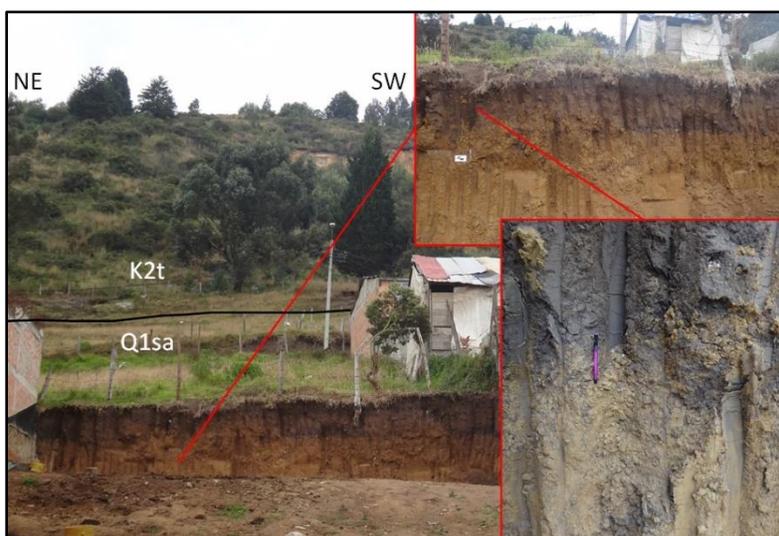


Figura 28. Formación Sabana (Q1sa). Vereda La Esmeralda. (E: 1018773 N: 1040408).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.1.6 Formación Chía (Q2ch)

La Formación Chía está constituida por sedimentos fluviales de inundación del río Bogotá, reposando sobre la Formación Sabana. Presenta una morfología de terrazas aluviales por erosión, con pendiente de suave a inclinada ($<5^\circ - 10^\circ$) resultado del moldeamiento de la corriente actual del río Bogotá. Ver Figura 29.

La muestra de mano tomada en un brazo abandonado del río Bogotá en la vereda El Porvenir corresponde a una arcilla gris orgánica, con matriz limo – arcillosa. El espesor medido en el afloramiento es 53 cm, cuyo material no está consolidado y de características impermeables. La Formación presenta relevancia en la zona de tránsito de los cauces superficiales y se considera de bajo interés hidrogeológico. Ver Figura 30.



Figura 29. Morfología Formación Chía (Q2ch). Vereda El Porvenir. (E: 1020180 N: 1042626).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

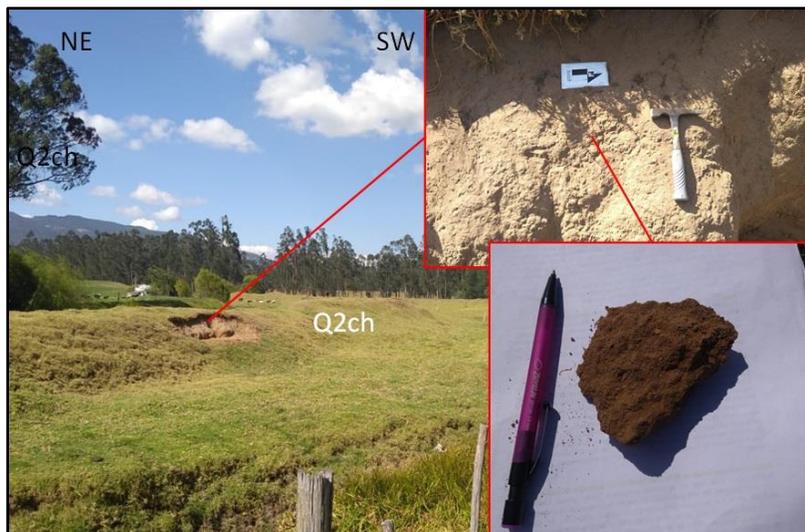


Figura 30. Formación Chía (Q2ch). Vereda El Porvenir. (E: 1020195 N: 1042379).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.1.7 Depósitos Recientes

Depósitos Coluviales (Q2c)

Estos depósitos se pueden observar en una amplia extensión bordeando el flanco oriental del SS-Tsc desde la vereda Canavita, al sur del Municipio, hasta el límite con el municipio de Gachancipá reposan discordantemente sobre la Formación Arenisca Labor y Tierna. Son materiales erodados y redepositados en la base de los taludes, se caracterizan por una textura con pobre calibrado y por no tener estructuras sedimentarias. Las geoformas corresponden a conos o lóbulos con morfología baja de relieve irregular y contornos ondulados con pendiente inclinada a abrupta (6° - 20°).

En la vereda La Esmeralda se aprecia un depósito de 35 m de altura por 150 de largo con sentido NE-SW (Figura 31), compuesto por bloques angulares de arenisca cuarzosa de tamaños desde 20 cm a 2 m de diámetro, embebidos en una matriz areno-arcillosa de color amarillo-crema, con mala selección, lo que permite considerarlos como una unidad de bajo interés hidrogeológico.



Figura 31. Morfología Depósito Coluvial (Q2c). Vereda La Esmeralda. (E: 1019712 N: 1040447).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Depósitos Aluviales Recientes (Q2da)

Representan la sedimentación actual en los lechos de los ríos y quebradas producto del transporte generado en dirección hacia el noroccidente como afluentes del río Bogotá. En las partes altas ocupan áreas sobre rocas de la Formación Arenisca Labor y Tierna donde hacen parte de zonas potenciales de recarga, mientras que en la zona baja reposan sobre materiales de textura limo color marrón y grisáceo, con presencia de clastos muy finos de arenisca, subangulares de la Formación Sabana.

La composición de los sedimentos de estos depósitos está determinada por las características de las rocas existentes en el área y de manera general presentan tamaño de grano de fino a muy fino. Representan zonas de tránsito y descarga, y se les considera de poco interés hidrogeológico.

Depósitos Rellenos Antrópicos (Q2ra)

Las áreas donde aparecen estos depósitos corresponden a aquellos sitios destinados por la actividad antrópica para la disposición de escombros y materiales de rellenos utilizados en obras de ingeniería.

Los escombros no guardan espesor ni litología constante, y la morfología varía según su ubicación. Se componen principalmente de residuos de construcción, materiales de descapote y basuras, embebidos en matriz de diferentes texturas, sin consolidación; en tanto, la morfología de los rellenos ingenieriles suele ser de planos artificiales (terraplenes y rellenos de mejoramiento de base para edificar), de litología conformada generalmente por mezclas proporcionadas de materiales granulares y cohesivos con coloraciones marrón - rojiza compactados, y su distribución espacial obedece al desarrollo del Municipio y su población. En la zona de estudio los depósitos de escombros y rellenos ingenieriles supra yacen indistintamente rocas de la Formación Labor y Tierna, de la Formación Sabana y depósitos coluviales.

La actividad antrópica, donde se desarrolla actividad minera de cantera, ha generado escarpes con pendientes que llegan a ser $> 45^\circ$, con formas irregulares o en terrazas de contornos quebrados o angulares.

En las áreas destinadas como depósitos de escombros, de rellenos ingenieriles o de actividades mineras, se presenta disminución del potencial de recarga de acuíferos, pues se han modificado las características de porosidad y permeabilidad de los materiales superficialmente.

5.1.2 Geología estructural

El municipio de Tocancipá está ubicado sobre la Cordillera Oriental de Colombia, compuesta principalmente por rocas del Paleógeno y del Cretácico, donde se observan estructuras plegadas, sinclinales y anticlinales, deformadas a causa de las fallas influenciadas por los diferentes movimientos tectónicos de compresión que han afectado la cordillera, sin embargo, pueden estar cubiertas por los depósitos cuaternarios en la Sabana debido a los procesos de denudación y acumulación.

5.1.2.1 Falla de Chocontá - Pericos

Es una falla regional, de tipo inversa, con dirección N45°E que se encuentra al suroccidente del Municipio, y aunque está fuera del área de estudio es relevante dado que elevó el bloque de las Formaciones del Grupo Guadalupe marcando el dominio sobre las estructuras plegadas que se ubican al oriente de Tocancipá.

5.1.2.2 Falla de Tocancipá

A partir del análisis de resistividades de ensayos geofísicos consultados, de la correlación litológica de pozos perforados y de las observaciones en campo se plantea en este trabajo una falla al oriente de Tocancipá, bordeando el piedemonte de los cerros orientales, de extensión local y tipo inversa, con vergencia hacia el este, guardando paralelismo con la Falla Chocontá – Pericos.

Esta falla explica la presencia de rocas de las Formación Bogotá y Cacho que se enfrentan a rocas de las Formación Arenisca Labor y Tierna bajo los depósitos de la Formación Sabana. La estructura toma relevancia al ubicarse en un sector considerado con alto potencial para la recarga hídrica de las unidades acuíferas en profundidad.

5.1.2.3 Anticlinal de Sopó - Sesquilé

Localizado al oriente de Tocancipá, es una estructura asimétrica con el flanco occidental menos inclinado que el oriental y limitado por la Falla de Chocontá – Pericos al occidente. En Tocancipá el anticlinal expone rocas de la Formación Arenisca Labor y Tierna, tanto en el núcleo como en el flanco occidental, con dirección predominante N25°E, donde además se presenta un pliegue que fue denominado en este trabajo como Anticlinal de Tocancipá, el cual una sección se puede apreciar en límites con el municipio de Gachancipá. Ver Figura 32 y 33.



Figura 32. Pliegue Anticlinal de Tocancipá, flanco Occidental del Anticlinal de Sopó - Sesquilé. Vereda La Esmeralda. (E: 1019688 N: 1040776).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

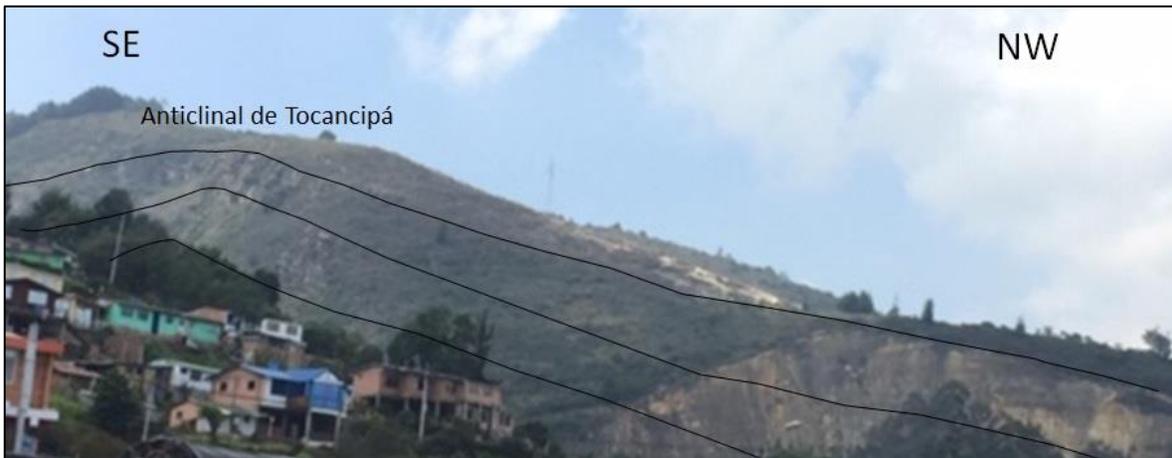


Figura 33. Pliegues Anticlinal de Tocancipá, flanco occidental del Anticlinal de Sopó – Sesquilé. Vereda Quindingua. (E: 1020488 N: 1041934).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.2.4 Anticlinal de Nemocón

Localizado al occidente de Tocancipá. Es una estructura asimétrica, segmentada e interrumpida por los cauces de la Quebrada La Fuente y el río Bogotá. En el sector La Fuente, en límite con el municipio de Zipaquirá, presenta una orientación $N50^{\circ}E$, que varía su dirección paulatinamente en la vereda Tibitoc en dirección NS y finalmente alcanzar en límites con Briceño una orientación al NW evidenciando la deformación y la fractura de la estructura. En el núcleo aflora la Formación Arenisca Labor y Tierna; el flanco oriental corresponde al flanco occidental del Sinclinal de Suesca – Teusacá, por lo cual se considera una zona potencial de recarga. Ver Figura 34.

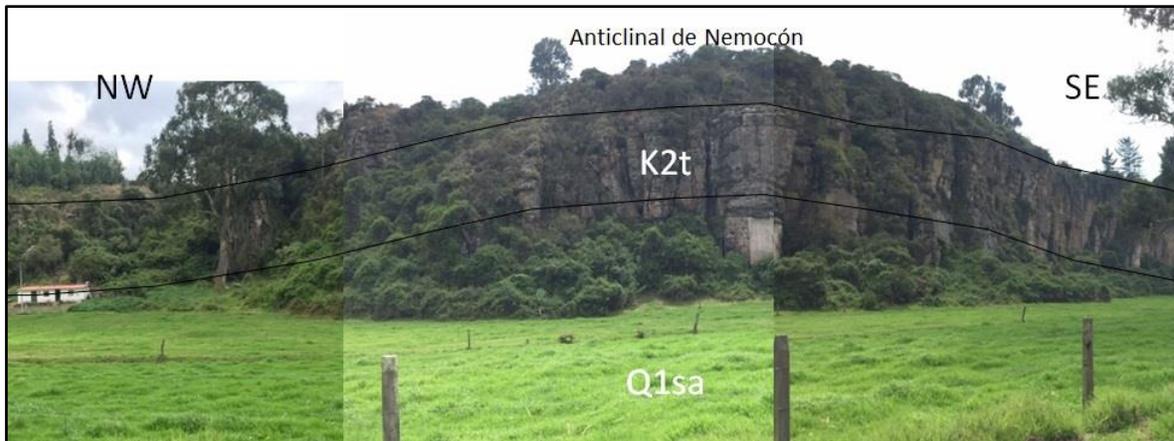


Figura 34. Anticlinical de Nemocón. Vereda La Fuente. (E: 1014719 N: 1046207).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.2.5 Sinclinal Suesca – Teusacá

Corresponde a la principal estructura geológica que ocupa el sector central de la planicie en el municipio de Tocancipá (Ver Figura 14). Es una estructura asimétrica que se extiende por el valle del río Bogotá, entre las localidades de Suesca y Tocancipá con rumbo N40°E y hacia el sur en límites con el municipio de Sopó presenta una orientación N10°S. El núcleo está conformado por las Formaciones Cacho y Bogotá, y sobre ellas reposan depósitos de la Formación Sabana y Chía; mientras que en sus flancos afloran rocas de las Formaciones Guaduas y Arenisca Labor y Tierna.

Debido al cambio de dirección del flanco occidental la amplitud del sinclinal alcanza 4 km hacia el norte, en límites con el municipio de Gachancipá, de 6 km en el sector central donde alcanza su mayor amplitud, y de 3 km hacia el sur, en límites con el municipio de Sopó. Dada la naturaleza de los depósitos que cubren la planicie de Tocancipá la recarga de sus niveles acuíferos superficiales se da por la infiltración de aguas lluvias.

5.1.3 Análisis de la información geológica - geofísica

A partir de la información geofísica aportada de dos estudios realizados por las empresas Geocing SAS y el Consorcio Magneto 2018, del análisis de columnas litológicas de perforaciones de pozos de agua profunda y de la integración con los resultados de las observaciones de campo se plantea el modelo geológico-geofísico para el SS-Tsc.

En total se revisaron los resultados de seis tomografías (análisis Multiespectral de onda superficial MASW 2D), 26 SEV, nueve ensayos de Magneto telúrica y 29 registros de perforación, lo que permitió inferir la geometría de las unidades geológicas en el subsuelo, incluyendo su profundidad, espesor, tipo de contacto entre capas y continuidad o discontinuidad. En la Figura 35, se indica la ubicación de los diferentes puntos de análisis y el Anexo A su localización.

Las Tomografías se analizaron para determinar la geometría de los depósitos coluviales de los cerros orientales; los SEV para determinar las estructuras geológicas en las veredas Canavita, Verganzo y Tibitoc, y con los MT la de los sectores de La Fuente y El Porvenir. La interpretación fue complementada al correlacionar los resultados de litologías reportadas en perforaciones de pozos de agua.

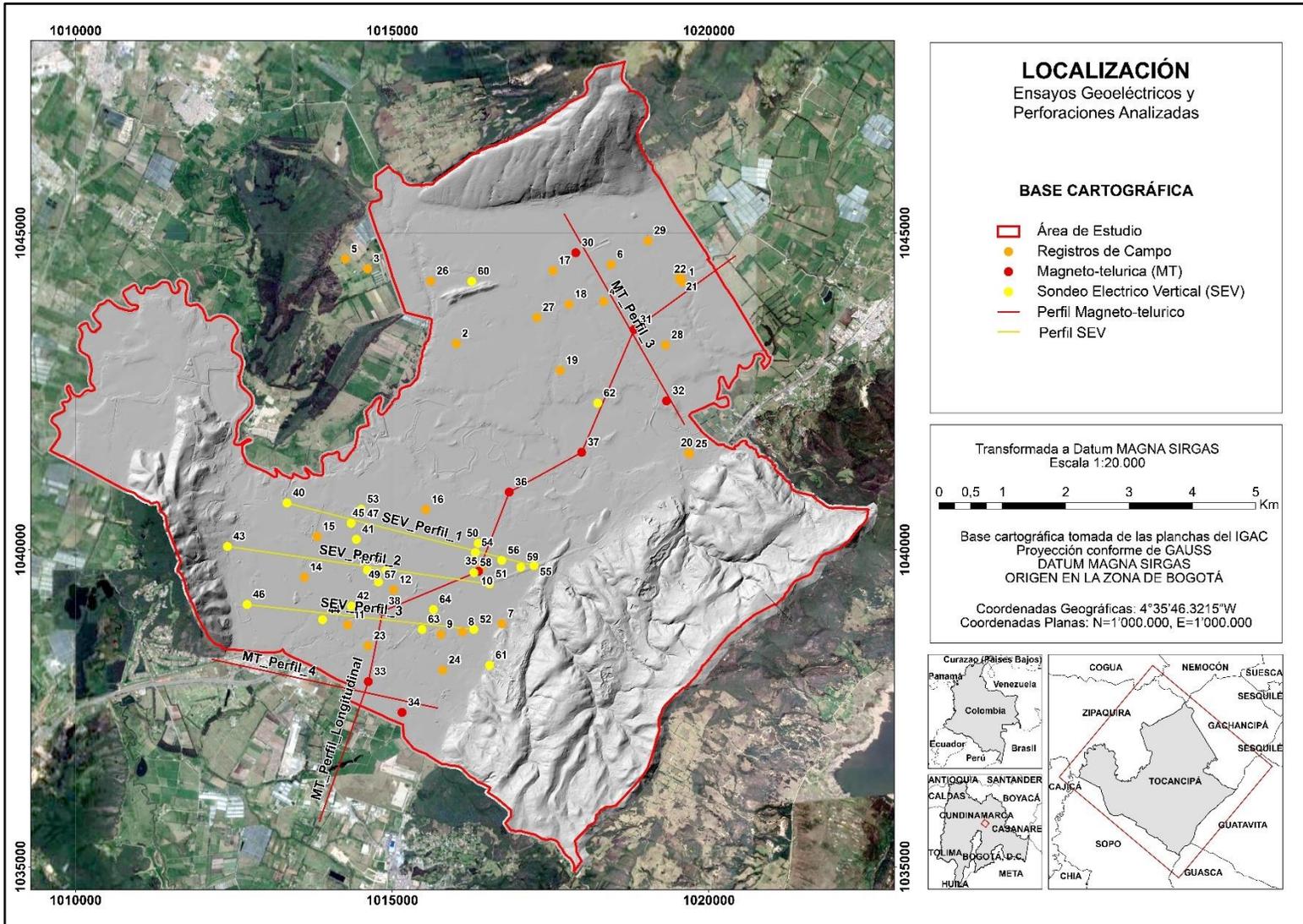


Figura 35. Localización de ensayos de geo eléctrica y de perforaciones analizadas.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.3.1 Perforaciones

Con el fin de conocer la litología en profundidad se recopiló la información de 29 perforaciones realizadas en pozos de agua profunda. Se tomó como referencia la litología de la perforación AP-O-01 que alcanzó una profundidad de 930 m atravesando completamente las Formaciones Sabana, Bogotá, Cacho y gran parte de Formación Guaduas. Ocho pozos reportaron litologías entre 150 y 270 m, (AP-C0-15, AP-O-08, AP-O-09, AP-O-13, AP-O-14, AP-O-15, AP-O-28, AP-O-51), y los 20 restantes brindaron información entre 55 y 150 m. En la Figura 36, se hace una comparación gráfica de las profundidades alcanzadas por registros SEV y perforaciones.

A partir de las descripciones litológicas de estas perforaciones se realizó la correlación de los registros consultados con información geoelectrónica de SEV y MT. Este análisis condujo a la conceptualización del modelo geológico – geofísico.

5.1.3.2 Tomografías

A partir de la interpretación de las tomografías se evidenció que los depósitos coluviales, ubicados en estribaciones de los cerros orientales, presentan rangos de velocidades (V_s) entre 328 y 573 ms^{-1} y espesores hasta 12 m, que por su composición litológica no permiten la acumulación o tránsito de agua subsuperficial hacia los estratos rocosos más profundos, los cuales presentan velocidades (V_s) entre 465 y 795 ms^{-1} , es decir son más competentes. Estos depósitos coluviales se consideran como zona de potencial bajo de recarga.

5.1.3.3 SEV

Los 26 SEV fueron realizados en el sector sur de la planicie de Tocancipá. Para la revisión se tomó como base de análisis las resistividades indicadas en la Tabla 12 y sus resultados se adjuntan en el Anexo B. Con base a ellos se elaboró 1 perfil 2D que evidencia las variaciones de las unidades geológicas en profundidad y la disposición lateral tal como se relacionan en el Anexo C.

Tabla 12. Correlación entre tipo de material y la resistividad.

Tipo de material - litología	Velocidad de resistividad ($\Omega\text{-m}$)
Niveles arcillosos y arcillolítico	5 a 20
Arcilla arenosa	20 a 45
Arena arcillosa	45 a 80
Arenas saturadas	80 a 180
Arenas y gravas saturadas	180 a 1000
Arenas y gravas baja saturación	> 1000

Fuente: Veloza, 2013.

La Formación Plaeners se detectó en los sondeos 4 y 7, ubicados al occidente del Municipio, a profundidades de 282 y 410 m respectivamente, mientras que en el sondeo 22, ubicado al occidente, alcanzó 174 m de profundidad. En ningún sondeo se registró la Formación Arenisca Dura, por tanto, el espesor de la Formación Plaeners no se pudo determinar.

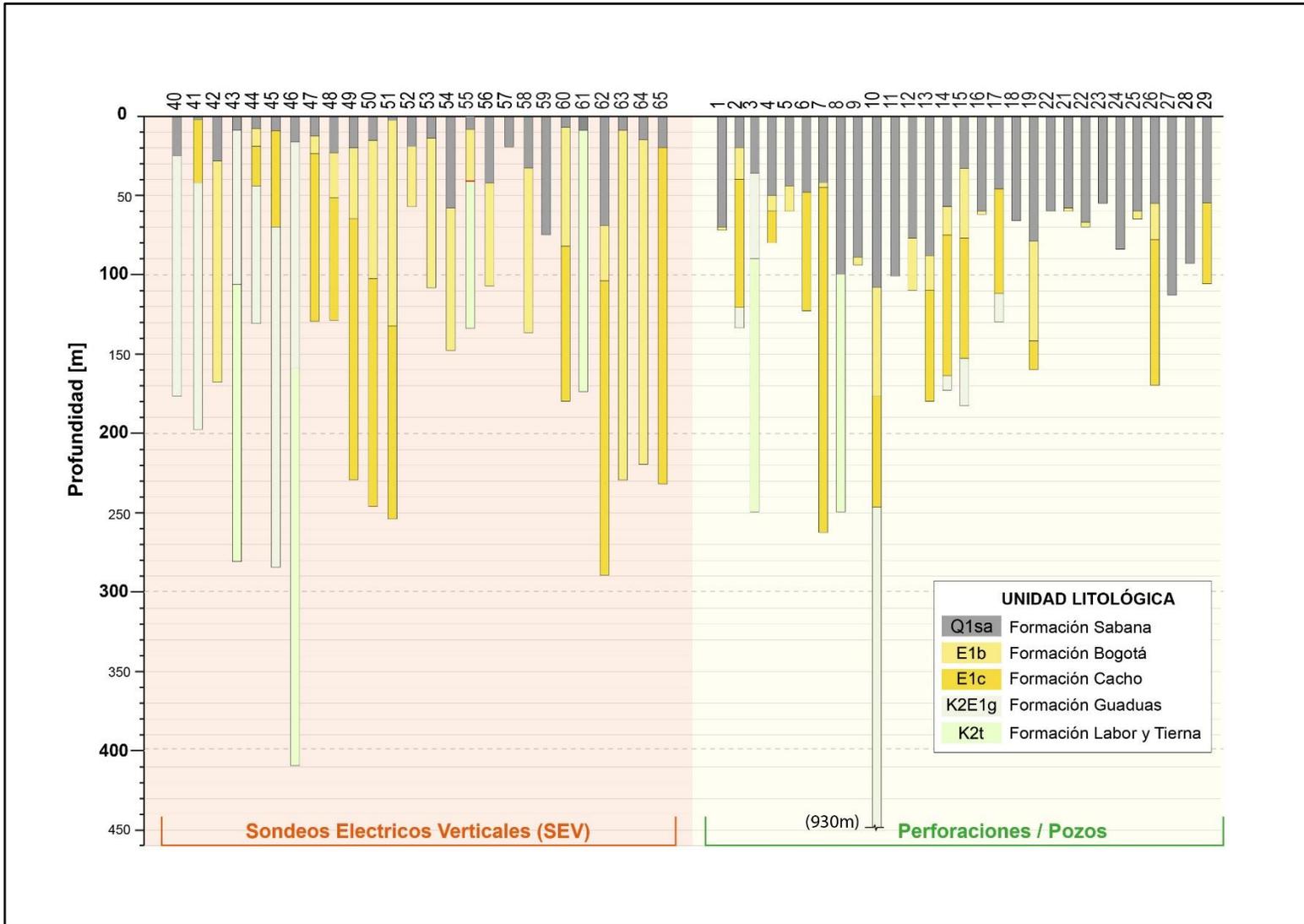


Figura 36. Perfil de SEVs y perforaciones consultadas.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

La Formación Plaeners es una unidad con baja importancia hidrogeológica que depende del grado de fracturamiento de la roca para que aumente la porosidad secundaria y concuerda con las resistividades encontradas en el flanco oriental del SS-Tsc, que presentan valores promedio de 9,59 Ω -m, mientras que el promedio en el flanco occidental es de 53,45 Ω -m lo cual se interpreta como una zona con niveles arcillosos saturados. En el piedemonte del flanco oriental del SS-Tsc el sondeo 16 muestra que la Formación Arenisca Labor y Tierna aparece a partir de 134 m de profundidad bajo los depósitos cuaternarios, mientras que en el sondeo 6 en el otro flanco del sinclinal aparece a 285 m. Esto evidencia un levantamiento del bloque de rocas mayor en el anticlinal de Sopó – Sesquilé respecto al Anticlinal de Nemocón. La resistividad del flanco oriental en promedio es de 308,62 Ω -m, y la del flanco occidental es de 176,8 Ω -m. El promedio de resistividad para esta unidad es de 257,87 Ω -m. Estos valores de resistividad permiten correlacionar las rocas con areniscas saturadas.

La Formación Guaduas se identifica en los SEV 12, 17 y 19 en sector oriental del SS-Tsc sin que llegue a aflorar, mientras que en el flanco occidental del sinclinal aflora de manera interrumpida en áreas próximas al piedemonte. El carácter plástico de esta unidad sugiere variaciones de espesor producto de deformaciones, principalmente hacia oriente al contacto con la Falla de Tocancipá. Esta unidad se considera una capa sello que separa y confina las unidades geológicas de las Formaciones Arenisca Labor y Tierna y Cacho. La resistividad promedio de la Formación Guaduas es de 19 Ω -m.

Los perfiles geoelectrónicos confirman el contacto neto y concordante de la Formación Cacho reposando sobre la Formación Guaduas e infra yaciendo a la Formación Bogotá. Las resistividades del flanco oriental del sinclinal presentan registros promedio de 231,7 Ω -m, ligeramente superior a los hallados en el flanco occidental que tienen un valor promedio de 157,84 Ω -m. Puntualmente el sondeo 23 presenta una resistividad muy superior al promedio de toda el área con un registro de 790 Ω -m. Este pico de resistividad se explica por el alto grado de fracturamiento que posee la roca hacia el eje del sinclinal producto de la deformación por fuerzas compresivas. El promedio general de la resistividad para la Formación Cacho es de 139,98 Ω -m.

Los resultados de resistividad en el flanco oriental indican que los niveles de arenisca se encuentran saturados, tanto en la Formación Arenisca Labor y Tierna como en la Formación Cacho, y por tanto se identifica este sector como el de mayor potencial de recarga efectiva de la estructura sinclinal.

La Formación Bogotá alcanza la mayor deformación en el sector donde el eje de la estructura cambia de dirección de N40°E a NS. Las resistividades observadas alcanzan valores entre 48 y 90 Ω -m producto de la saturación de niveles arcillo arenosos en profundidad. La Formación Bogotá presenta un valor promedio de resistividad en la zona de 24,75 Ω -m.

Superficialmente la Formación Sabana es la unidad más extensa y aparece en todos los sondeos realizados en la planicie, con espesores que varían desde 7 m, cerca al piedemonte, hasta 150 m en la proximidad al eje del SS-Tsc. Reposo de manera discordante sobre las formaciones que suprayace y está compuesta por niveles de arenas y gravas saturadas intercalados con arcillas arenosas y limosas discontinuas lateralmente, por lo que la recarga de los niveles acuíferos se da principalmente por infiltración de aguas lluvia. Esta condición se evidencia en la gran variabilidad de las resistividades con un máximo de 1100 Ω -m para suelos granulares secos, asociados a los niveles superiores de la terraza aluvial, y un mínimo de 3,16 Ω -m correlacionable con arcillas, mientras que los niveles arenosos saturados registran un promedio de 146,5 Ω -m.

5.1.3.4 MT

Los resultados de ensayos MT realizados en el sector norte sobre la planicie de Tocancipá fueron analizados según la escala de rangos de resistividad definidos para la interpretación de los SEV de la Tabla 12.

En el Anexo D, se presentan los perfiles transversales que correlacionan la información de los MT6, MT7 y MT8, ubicados al norte del área, de los MT9, MT10 y MT11, ubicada al sur, y, un perfil longitudinal con los MT7, MT24, MT23, MT22, MT87, MT10 y MT27 que los conecta en el sentido del eje del sinclinal, se estableció el espesor de los estratos para cada unidad geológica y posteriormente comparados con los valores de referencia que se reportan en las planchas geológicas 209 y 228 y los SEV de esta investigación que arrojó los valores que se indican en la Tabla 13.

Estas secciones permitieron visualizar la secuencia estratigráfica completa, desde la Formación Chipaque hasta los depósitos de la Formación Sabana, marcando el eje del SS-Tsc, así como ligeras deformaciones de los diferentes niveles con tendencia a ser acuñados en los flancos.

A lo largo del perfil la Formación Sabana presenta intercalaciones de suelos arcillosos, de textura franco arenosa que en estado seco presenta resistividades que varían de 20 Ω -m y llegan cuando están saturados a 160 Ω -m, siendo estos últimos los niveles que representan el mayor potencial para la recarga de los niveles acuíferos subsuperficiales.

Tabla 13. Espesor promedio por unidad geológica de referencia INGEOMINAS vs SEVs y MT.

Unidad geológica		Espesor Plancha 209 (INGEOMINAS, 2003)	Espesor Plancha 228 (INGEOMINAS, 2008)	Espesor SEV (m)	Espesor MT (m)
Formación Sabana		-	168 – 320	7 - 75	35 – 167
Formación Bogotá		570	900 – 1015	11 - 221	55 – 123
Formación Cacho		120	72	25 - 212	90 – 281
Formación Guaduas		1100	700 – 1034	87 - 215	389 – 808
Grupo Guadalupe	Arenisca Labor y Tierna	100 - 123	177 - 300	93 - 194	530 - 861
	Plaeners	190	73 – 100	-	
	Arenisca Dura	230	450 - 500	-	
Formación Chipaque		1020	1000 - 1027	-	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los valores de las resistividades que se presentan en las Formaciones Bogotá, Guaduas y Plaeners están en el rango de 5 y 20 Ω -m, característico de materiales impermeables asociados a arcillolitas que por su posición estratigráfica pueden actuar como un sello confinante de las capas adyacentes.

La Formación Cacho presentan rangos del orden de 20 a 50 Ω -m en los niveles arcilloso arenosos y de limolitas arcillosas saturadas, y, el rango de valores con resistividades entre 50 y 210 Ω -m se interpretó como niveles areníticos saturados asociados a porosidad secundaria, generado por el intenso fracturamiento de la roca.

El conjunto de formaciones del Grupo Guadalupe presenta resistividades con valores superiores a 60 Ω -m y máximos de 200 Ω -m sin llegar a diferenciar las unidades. La interpretación de los registros de los ensayos MT sugiere que las zonas de recarga potencial se localizan hacia los flancos del sinclinal y zonas con alto interés hidrogeológico hacia el eje del sinclinal.

5.1.4 Modelo geológico geofísico

La Tabla 14, resume las características geológicas geofísicas de las unidades presentes en el municipio de Tocancipá como resultado de la revisión bibliográfica de la información técnica, las observaciones de campo y el análisis detallado de cada una.

La información adquirida de las perforaciones consultadas fue tabulada y procesada mediante la herramienta computacional Surfer y con ayuda del programa gráficos de Adobe Illustrator se interpoló las diferentes capas litológicas para obtener su disposición espacial y generar el modelo geológico geofísico 3D que se presenta en la Figura 37.

El modelo representa visualmente la interpretación de la geometría del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá, donde se identifican las formaciones geológicas, junto con sus características estructurales (pliegues y fallas), litológicas y rangos de resistividades encontrados de diferentes estudios geoelectrónicos, el cual sirve como base en la elaboración del MHC.

Tabla 14. Resumen de caracterización Geológica Geofísica de las Unidades Geológicas en Tocancipá.

Unidad Geológica	Símbolo	Espesor (m)	Descripción	Morfología	Resistividad (Ω -m)	Potencial hidrogeológico
Depósitos rellenos antrópicos	Q2ra	0-5	Mezclas proporcionadas de materiales granulares y cohesivos con tonos marrón y rojizas, compactados, con materia orgánica ocasional. Contienen principalmente gravas, bloques y arena bien escogidos, separados y compactados.	La morfología de rellenos ingenieriles suele ser de planos artificiales. En canteras se presentan escarpes con formas irregulares o en terrazas de contornos quebrados o angulares, con pendientes que llegan a ser $> 45^\circ$	-	Bajo
Depósitos aluviales recientes	Q2da	0 - 10	Su composición está determinada por las rocas existentes en el área y el tamaño del grano en general es de fino a muy fino.	Según la unidad por la que atraviesan, de escarpados en las zonas altas, a pendientes muy suaves en la planicie aluvial	-	Bajo
Depósitos coluviales	Q2c	8 - 12	Se compone por bloques angulares de arenisca cuarzosa de color amarillo-crema, con una mala selección, teniendo bloques hasta 2m de diámetro embebidos en una matriz areno - arcillosa o limo - arenosa	Geoformas corresponden a conos o lóbulos de relieve irregular y contornos ondulados con pendiente inclinada a abrupta ($6^\circ - 20^\circ$)	< 35	Bajo
Formación Chía	Q2ch	0-5	Depósitos constituidos por sedimentos fluviales de grano fino que afloran a lo largo de los ríos. Está constituido por arcillas, que pueden ser moteadas (grises y naranja), pueden contener limos y en áreas fangosas, arcillas orgánicas diatomíticas.	Morfología de terrazas aluviales por erosión, con pendiente de suave a inclinada ($<5^\circ - 10^\circ$)	-	Bajo
Formación Sabana	Q1sa	10-170	Arcillolitas grises con locales intercalaciones de arenas finas y niveles delgados de gravas y turbas, que varían desde subredondeados a redondeados, en una matriz limo-arcillosa, color grisáceo, suprayacidas por suelos volcánicos.	relieve irregular y contornos redondeados que en superficie presentan un aspecto aterrazado y morfología ondulada suavemente inclinada ($<5^\circ - 10^\circ$)	3,7 - 1100	Moderado en niveles arenosos con conexión intergranular
Formación Bogotá	E1b	50 - 120	Sublitoarenitas intercaladas con lodos y arcillolitas a la base la cual gradualmente se vuelve más arcillosa hacia el techo	Morfología de pendiente suave producto de excedentes de erosión	4,8 - 608	Bajo

Formación Cacho	E1c	70 - 110	Capas medianas a gruesas arenisca cuarzosa con tamaño de grano de medio a fino y grueso, pero con predominio de tamaño medio, friable y muy fracturada, de color amarillo crema intercalada con arcillolitas.	Cerros alineados y elongados definidos por la intercalación de estratos de unidades con diferente resistencia. Pendiente variable hasta 45°	20,8 - 215. Hasta 790 (Ω -m) en zonas muy Fracturadas	Moderado a Alto, por fracturamiento que produce porosidad secundaria
Formación Guaduas	K2E1g	380-810	Secuencia de arcillolitas, limolitas, lodolitas y esporádicas capas de areniscas de grano muy fino con varios mantos de carbón intercalados. Dentro de la secuencia arcillosa se presentan dos segmentos predominantemente arenosos, conformados por capas delgadas a medias, de areniscas de grano fino y medio.	Colinas y valles con pendientes muy suaves	3.3 - 43,6	Bajo
Formación Arenisca Labor y Tierna	K2t	90 - 190	En la base, capas de areniscas de grano muy fino, dispuestas de coloración blanca - ocre, con intercalaciones de lodolitas arenosas en capas muy delgadas y planas. Hacia el techo, secuencia monótona de areniscas de cuarzo, de grano fino a medio, en capas muy gruesas. Posee una matriz de granulometría areno-gravosa.	Definida por la tendencia y variación en la resistencia a procesos erosivos de cada unidad, llegando a presentar pendientes de terreno de muy inclinada a escarpada con rangos entre 11° y a 45°	13,5 - 366,1	Alto, por porosidad primaria y secundaria
Formación Plaeners	K2p	-	limolitas silíceas, en capas delgadas intercaladas con lodolitas grises	Suave que genera una hondonada debido a su litología fina	9,3 - 66,7	Bajo a Moderado
Formación Arenisca Dura	K2d	-	Intercalaciones de areniscas en capas medianas a gruesas, tamaño de grano muy fino, de color blanco, los clastos son subangulares y esféricos. Texturalmente son areniscas maduras, bien seleccionadas con matriz arcillosa.	Morfología de pendientes abruptas	Mayor de 257,87	Alto, por porosidad primaria y secundaria

Fuente: Elaboración propia, 2021.

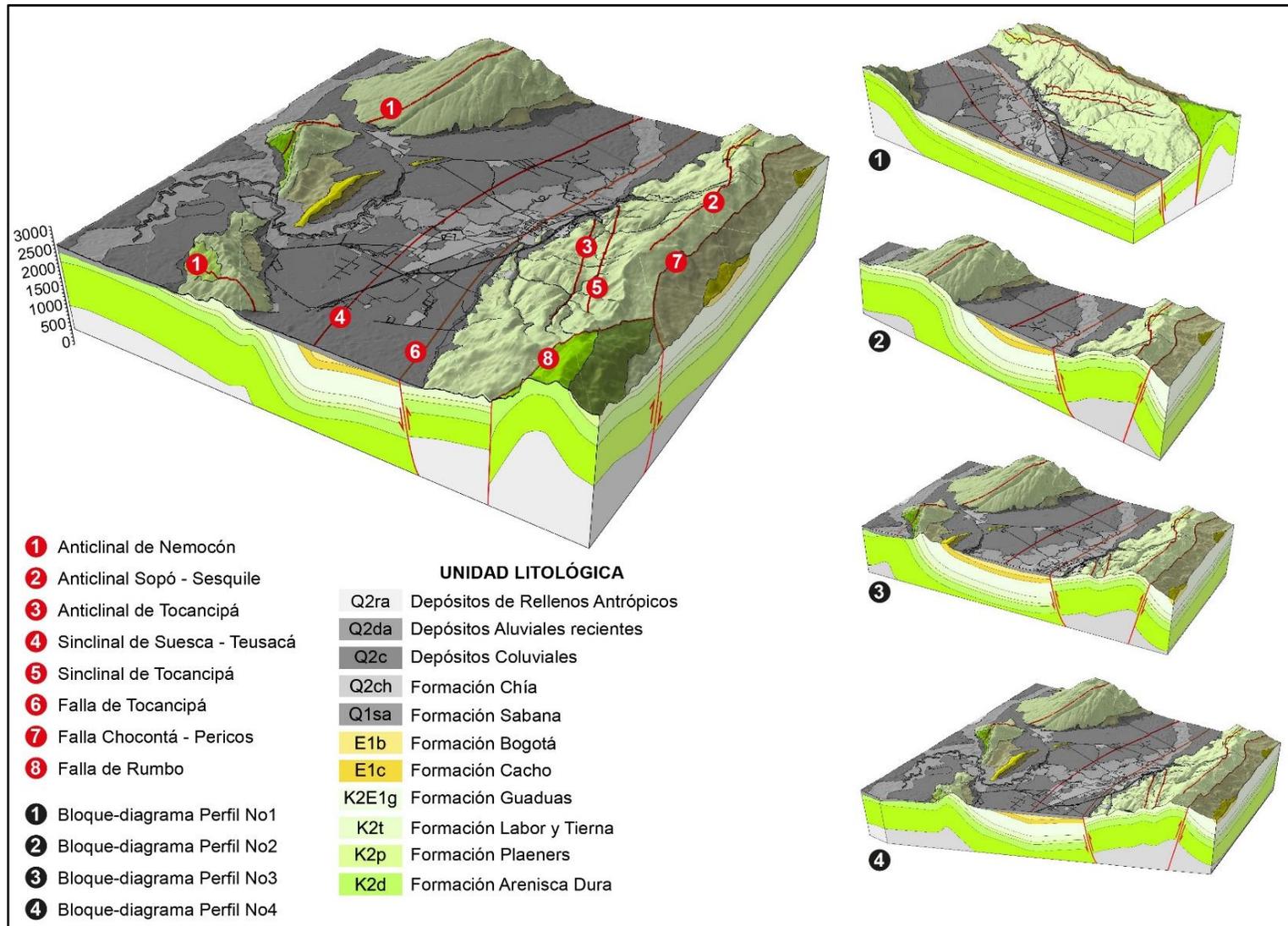


Figura 37. Modelo 3D geológico geofísico del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.1.5 Síntesis de conclusiones

En el área de estudio afloran rocas de la secuencia sedimentaria desde el Cretácico superior de la Formación Arenisca Labor y Tierna y arcillolitas de la Formación Guaduas, seguidas por niveles de Areniscas y Arcillolitas del Eoceno de las Formaciones Cacho y Bogotá, las cuales se encuentran cubiertas en la planicie del municipio de Tocancipá por materiales del Cuaternario de las Formaciones Sabana y Chía. También se encuentran depósitos coluviales que se localizan en el piedemonte de los cerros circundantes, depósitos aluviales recientes que corresponden a cursos de quebradas y canales que fluyen desde las partes topográficamente más elevadas para desembocar en la planicie al río Bogotá. Finalmente se identifican rellenos antrópicos distribuidos a lo largo del área suprayaciendo indistintamente cualquiera de las formaciones mencionadas.

En el modelo geológico se identifica la falla de Tocancipá bajo depósitos cuaternarios como una estructura de cabalgamiento localizada al oriente del SS-Tsc. Esta falla explica el ascenso de rocas Cretácicas del Grupo Guadalupe respecto a las rocas del Paleoceno de las Formaciones Cacho y Bogotá.

La correlación de los resultados geoeléctricos, que presentan valores superiores a los rangos de referencia, junto con el análisis de las descripciones litológicas obtenidas de perforaciones fueron determinantes para inferir la alta porosidad secundaria de la Formación Cacho, e identificarla como una unidad de alto interés hidrogeológico.

La zona con mayor potencial de recarga se localiza hacia el flanco oriental del SS-Tsc donde la resistividad promedio para la Formación Arenisca Labor y Tierna es de 257,87 Ω -m, y, para la Formación Cacho el promedio de resistividad es de 139,98 Ω -m. Este incremento en la saturación de los niveles arenosos de la Formación Cacho es debido a la recarga por infiltración proveniente de los cerros orientales a través de la Falla de Tocancipá.

Se identificaron las formaciones Sabana, Cacho y Arenisca Labor y Tierna como las unidades con mayor potencial hidrogeológico. Es la Formación Cacho la unidad que representa mayor interés en el SS-Tsc, tanto por sus características litológicas como por su ubicación espacial. La Formación Arenisca Labor y Tierna es una unidad de alto interés hidrogeológico con buena exposición hacia los flancos del sinclinal, aunque profunda hacia el eje de la estructura.

5.2 MODELO HIDROLÓGICO

5.2.1 Características físicas de la subcuenca

A nivel regional los municipios de Suesca, Sesquilé, Gachancipá, y Tocancipá, así como algunas áreas de los municipios de Chocontá, Guasca, Guatavita, Nemocón, Sopó y Zipaquirá pertenecen a la parte alta de la subcuenca del río Bogotá en el sector Sisga – Tibitoc. La altitud varía entre 2000 y 3000 msnm, con relieves de planos a ligeramente ondulados en la parte del altiplano, y, relieves ondulados y quebrados hacia las estribaciones de la cordillera Oriental. (CAR, et al 2018).

El Régimen pluviométrico de las lluvias en la zona es de tipo bimodal (Bm3), afectado por la variación de la Zona de Confluencia Intertropical que marca dos épocas húmedas (abril-mayo y octubre-noviembre), y dos épocas secas (diciembre-enero-febrero y julio-septiembre). La precipitación total promedio anual fluctúa entre 500 y 1000 mm año⁻¹ incrementándose hacia los flancos montañosos en proporción con la altura. (IDEAM, 2017).

A nivel local, el municipio de Tocancipá se encuentra en la jurisdicción de la Provincia Zona Centro del Departamento de Cundinamarca donde se registran valores de temperatura entre 6° C y 25 °C. Debido a esta variación en la genera un clima Frio a Semiárido en parte plana y un clima Muy Frío Semihúmedo en las partes altas, acorde con la zonificación climática establecida por el modelo Caldas Lang (MinAmbiente, 2012).

5.2.1.1 Vegetación

Respecto a la vegetación en el municipio de Tocancipá se presentan relictos de bosque andino que corresponde a la parte de la zona bioclimática del Bosque seco montano bajo, representados por especies del estrato arbustivo en su mayoría y unas pocas de estrato arbóreo cuya ubicación está en la franja de los 2550 y 2800 msnm, mientras que en la zona plana se encuentran áreas plantadas con especies exóticas como eucaliptos (*Eucaliptus globulus*), pino Patula (*Pinus patula*), acacia amarilla (*Acacia melanoxylum*), acacia negra (*Acacia decurrens*), sauce (*Salix humboltiana*), pino (*Cupressus lusitanica*), así como áreas plantadas con pastizales, cultivos agrícolas (papa, trigo y arveja, especialmente), cultivos frutales, cultivos de flores y sin cobertura vegetal correspondiente a canteras, zonas de explotación, zonas industriales, zonas recreativas y asentamientos urbanos, en tanto los reservorios de agua aparecen juncos (*Scirpus californicus*), enea (*Typha angustifolia*), helecho acuático (*Azolla filiculoides*), lenteja de agua (*Lemna sp*) y el sombrerillo (*Hydrocotyle ranunculoides*). (Monroy A y Jiménez O, 2016, p. 16-17).

5.2.1.2 Cobertura y uso del suelo

Se determinó la cobertura con base a la Metodología CORINE Land Cover, adaptada para Colombia por el IDEAM en el 2010, identificando 5 diferentes clases de Coberturas del suelo de primer nivel con ocupación del 18,86% de los Territorios Artificializados, 52,17% de Territorios Agrícolas, 27,19% de Bosques y Áreas Seminaturales, y, en menor proporción con 0,30% y 1,48% en Áreas Húmedas y Superficies de Agua respectivamente. (Ver Tabla 15).

Los Territorios Artificializados comprende las zonas urbanizadas, comerciales, industriales, redes de comunicación, zonas de extracción minera y escombreras y zonas verdes artificializadas no agrícolas. (IDEAM, 2010).

Tabla 15. Cobertura vegetal y % de ocupación del área en el municipio de Tocancipá.

Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	% de área	
1. TERRITORIO ARTIFICIALIZADOS	1.1. Zonas urbanizadas	1.1.2. Tejido urbano discontinuo	18,86 %	
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación	1.2.1. Zonas industriales o comerciales		
		1.2.2. Red vial, ferroviaria y terrenos asociados		
	1.3. Zonas de extracción mineras y escombreras	1.3.1. Zonas de extracción minera		
1.4. Zonas verdes artificializadas, no agrícolas		1.3.2. Zonas de disposición de residuos		
		1.4.2. Instalaciones recreativas		
2. TERRITORIO AGRÍCOLAS	2.2. Cultivos permanentes	2.2.1. Cultivos permanentes herbáceos	52,17 %	
		2.2.5. Cultivos confinados		
3. BOSQUES Y ÁREAS SEMINATURA	2.3 Pastos	2.3.1. Pastos limpios	27,19 %	
		3.1 Bosques		3.1.2. Bosque abierto
		3.2 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva		3.2.2. Arbustales
		3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación		3.3.2. Afloramiento rocoso
4. ÁREAS HÚMEDAS	4.1 Áreas húmedas continentales	3.3.3. Tierras desnudas y degradadas	0,30 %	
		4.1.1 Zonas pantanosas		
5. SUPERFICIE DE AGUA	5.1. Aguas continentales	5.1.1. Ríos	1,48 %	
		5.1.3. Canales		
				5.1.4. Cuerpos de agua artificiales

Fuente: Elaboración propia, 2019.

Los territorios agrícolas son los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, fibras y otras materias primas industriales, ya sea que se encuentren con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso o barbecho. Comprende las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, áreas de pastos y las zonas agrícolas heterogéneas (IDEAM, 2010).

Los bosques y áreas seminaturales comprenden los bosques naturales y las plantaciones. Para la interpretación de las coberturas de la tierra, los bosques se clasifican, entonces, a partir de la densidad de la cobertura arbórea, en densos y abiertos; de acuerdo con la altura del dosel, los bosques se clasifican en altos y bajos; y de acuerdo con la condición de inundabilidad del terreno donde se ubican los bosques, se clasifican en inundables y de tierra firme contemplados en la Leyenda CORINE Land Cover 2010 (IDEAM, 2010).

Las áreas húmedas comprenden aquellas coberturas constituidas por terrenos anegadizos localizados al interior del continente, que pueden ser temporalmente inundados y estar parcialmente cubiertos por

vegetación acuática. Se consideran los cuerpos y cauces de aguas como ríos, canales y cuerpos de agua superficiales. (IDEAM, 2010).

El modelo de gestión para el territorio municipal del PBOT clasifica y delimita los perímetros del suelo en el Municipio de acuerdo con lo señalado en la Ley 388/ 97 y los Decretos 948 de 1995, 879 de 1998 y 3600 de 2007 en Suelo Urbano, de Expansión y Suburbano y Rural. A nivel de paisaje se clasifican en naturales y construidos (culturales). A su vez el paisaje natural se divide en Colinado, De sabana y Ribereño, y los construidos en Rural, Suburbano e industrial y Urbano. (Alcaldía de Tocancipá, 2014).

5.2.1.3 Patrón de drenaje

El principal sistema hidrográfico lo compone el río Bogotá que ingresa por el oriente al área del Municipio hacia el límite con el municipio de Gachancipá, con un recorrido en dirección al occidente hasta su salida en límites con el municipio de Zipaquirá. En este sector el río Bogotá es alimentado por las microcuencas de las Quebradas Quindíngua, Zanjón, Manzanos, La Chucua, La Fuente, y, otras menores como Agua Nueva, El Manantial, Puente Aldana, El Roble y La Gruta. Estos drenajes se despliegan en sentido SE-NW como se aprecia en la Figura 38. El municipio de Tocancipá cuenta además con un sistema de 21 humedales distribuidos a lo largo de la jurisdicción. (Pinilla, et al 2014).

Los drenajes localizados al oriente, hacia las partes altas del Municipio, presentan un patrón de drenaje de tipo subdendrítico y medianamente espaciado, mientras que en la planicie los cursos se despliegan sobre los depósitos lacustrinos que presentan una morfología suavizada por acción del patrón de drenaje de tipo meándrico del río Bogotá.

5.2.2 Parámetros climatológicos

Son las condiciones climáticas asociadas a las características geológicas y litológicas las que hacen posible el aporte del ciclo hidrológico a la recarga de acuíferos en una determinada zona. En este sentido, determinar los parámetros climatológicos permite comprender el origen y comportamiento de los recursos hídricos en profundidad en el desarrollo de un MHC.

El análisis de los parámetros climatológicos se realizó a partir del inventario y recopilación de la información disponible de las estaciones meteorológicas ubicadas en el entorno del municipio de Tocancipá operadas por IDEAM y CAR de categorías Climática Principal, Climática Ordinaria, Pluviométricas y Pluviográficas.

En la selección de las estaciones se tuvo en cuenta aquellas que no fueran de la categoría de limnigráficas y limnimétricas, que estuviera a una menor distancia del centro del área de estudio en un radio de 15 km y que presentaran vacíos de información a nivel mensual menor al 10%. Bajo estos criterios de selección fueron escogidas 7 estaciones que aportaron información de la distribución espacio temporal de las variables de Precipitación, Temperatura y Evaporación para un periodo de 26 años comprendidos entre los años 1994 y 2019.

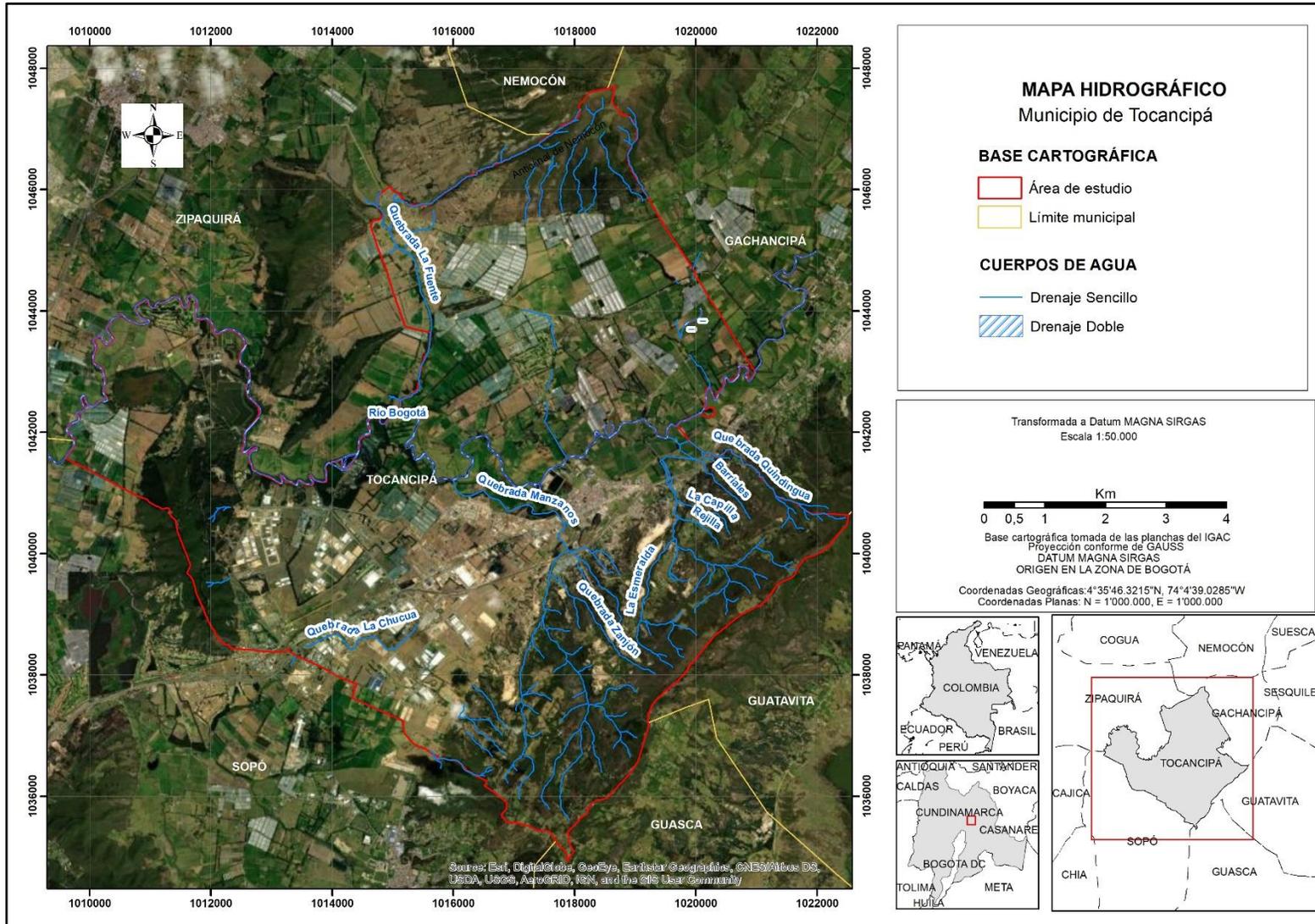


Figura 38. Patrón de drenaje en el municipio de Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Posteriormente estas fueron asociadas según su ubicación geográfica en 3 grupos de análisis, tomando como estaciones de referencia Checua, San Isidro y Zipaquirá por presentar menor error típico en cada grupo y el menor número de datos por completar. Los datos generales de las estaciones se indican en la Tabla 16.

Tabla 16. Estaciones seleccionadas hidroclimáticas seleccionadas.

GRUPO Estación	1		2		3		
	Acandy	Checua	Pantano Redondo	Zipaquirá	Lourdes	Guasca	San isidro
Categoría	PM	CP	PG	PG	PM	CO	PM
Operador	CAR	CAR	IDEAM	CAR	IDEAM	IDEAM	IDEAM
Código	21201410	21205400	21201060	21200740	21201050	21205700	21201610
Latitud	5,05	5,12	5,04	5,02	4,98	4,88	4,85
Longitud	-73,88	-73,87	-74,03	-74,00	-73,86	-73,87	-73,89
Elevación (msnm)	2600	2580	3160	2655	2750	2750	2698
Periodo de Registro	1977-2019	1953-2019	1985-2019	1960-2019	1985-2018	1974-2019	1987-2019
% Faltantes	5,8%	2,2%	5,1%	0,3%	9,0%	6,7%	2,9%

Fuente: Tomado y modificado de CAR - IDEAM, 2021.

5.2.2.1 Validación y tratamiento de datos

La validación para el tratamiento de datos inició con un análisis exploratorio gráfico y un análisis de dispersión intercuartílica. Con el fin de comprobar la normalidad de los datos y continuar con la complementación de datos faltantes se realizó análisis de doble masa. Finalmente, se evaluó el comportamiento de los registros desde el punto de vista estacional y espacial mediante un análisis cuantitativo o confirmatorio.

Análisis exploratorio gráfico

Previo a la complementación de datos se realizó un análisis exploratorio a las estaciones seleccionadas que permitió identificar por medio visual a lo largo del tiempo tendencias, cambios, irreversibilidad, intermitencia, variabilidad y simetría en cada una de las Gráficas de serie de tiempo. La Figura 39, 40 y 41, muestran las gráficas exploratorias de las estaciones de referencia de Checua, Zipaquirá y San Isidro en las cuales se evidencia la continuidad histórica de los registros en un periodo de 26 años.

Los Diagramas de cajas indican baja dispersión intercuartílica de los datos lo que puede reflejar estabilidad en la varianza en cada una de las series (Figura 42). Las estaciones del grupo 1 (Acandy-Checua) presentan un promedio de precipitación intermensual de $63,02 \pm 5,47$ mm mes⁻¹; en las estaciones del grupo 2 (Pantano Redondo 1-Zipaquirá) el promedio intermensual es de $88,03 \pm 5,91$ mm mes⁻¹, y, en las estaciones del grupo 3 (Lourdes-Guasca-San Isidro) el promedio de precipitación es de $72,34 \pm 4,54$ mm mes⁻¹. El general promedio del área es de $74,16 \pm 5,2$ mm mes⁻¹.

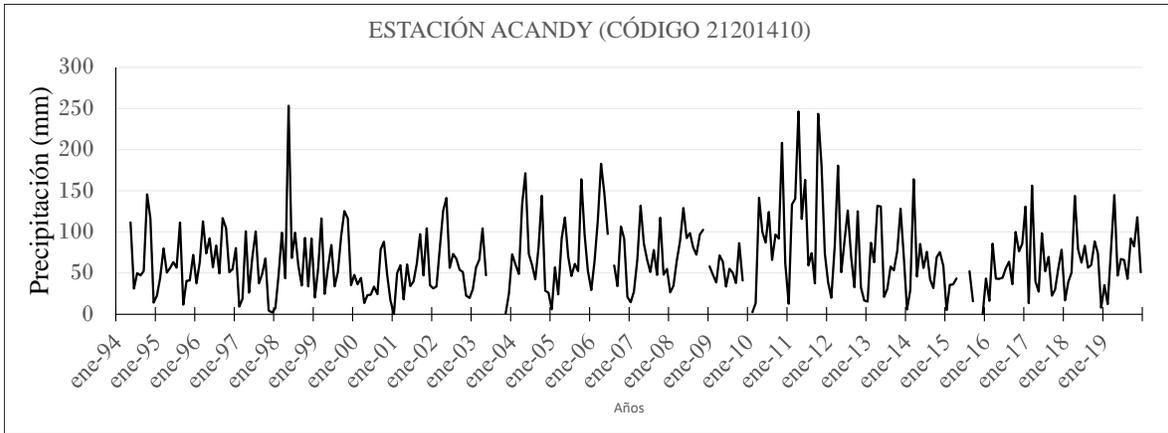


Figura 39. Gráficas de series de tiempo de la precipitación de la Estación Checua.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

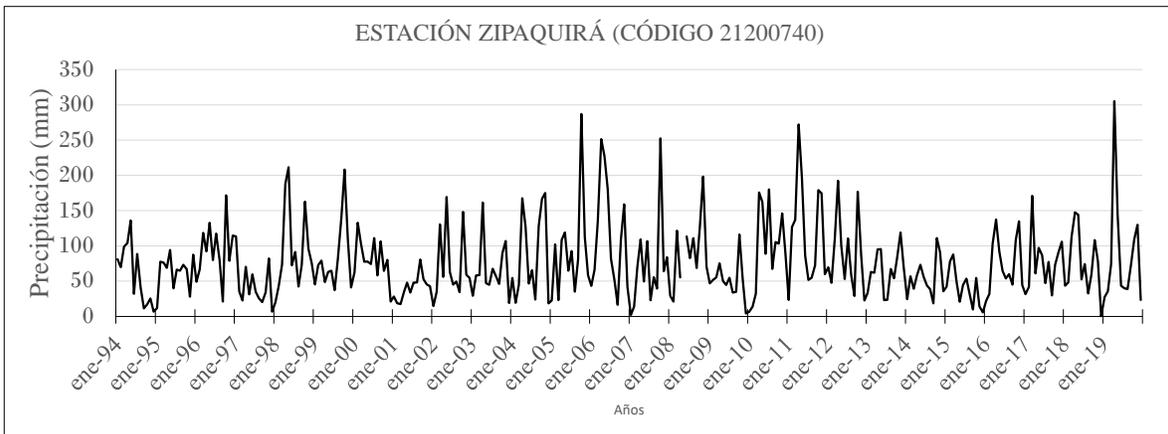


Figura 40. Gráficas de series de tiempo de la Precipitación de la estación Zipaquirá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

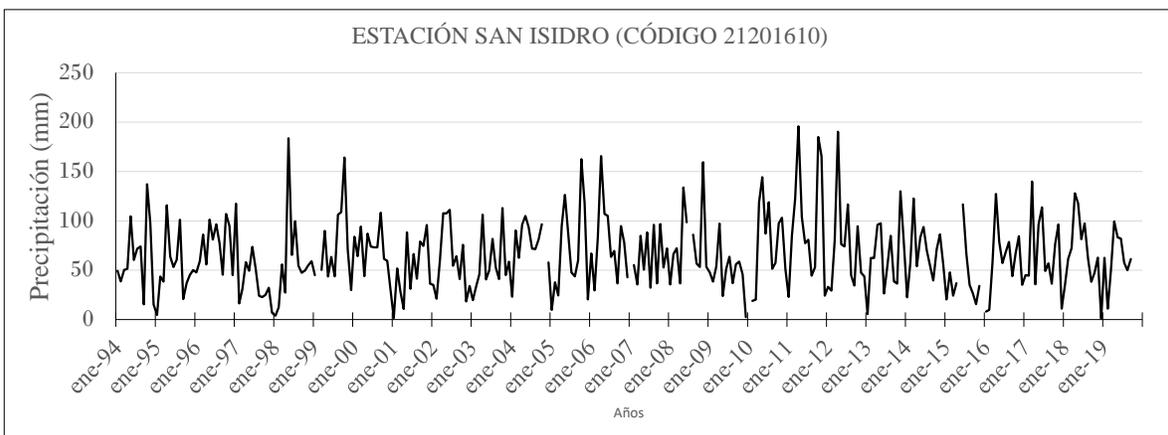


Figura 41. Gráficas de series de tiempo de la Precipitación de la estación San Isidro.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

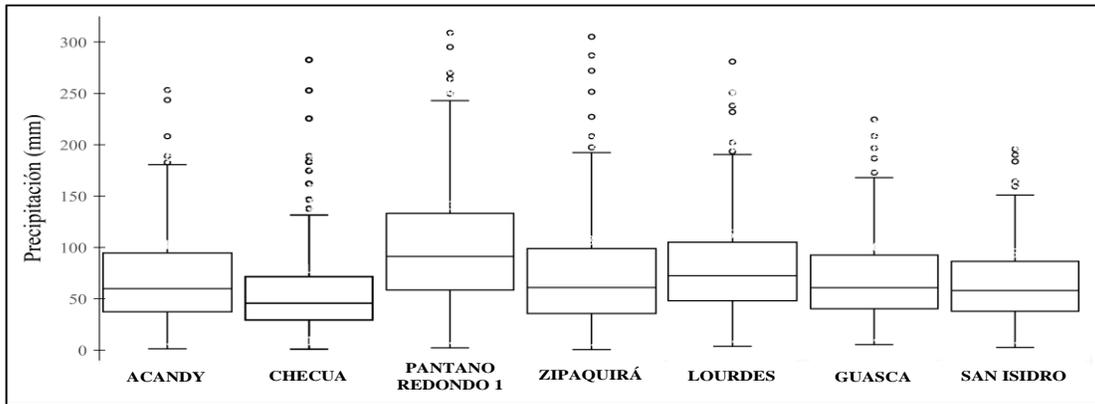


Figura 42. Diagrama de cajas Estaciones seleccionadas.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

También se realizó el análisis de la gráfica de doble masa con 392 datos para la estación Acandy vs Checua; 354 datos para la estación Pantano Redondo 1 vs Zipaquirá y 331 datos para la estación Guasca vs San Isidro. Todas presentaron coeficientes de determinación $R^2 > 0,99$ indicando homogeneidad en los datos descartando posibles errores sistemáticos asociados a toma, al uso de diferentes instrumentos y/o técnicas de medición durante el período considerado. La estación Lourdes presentó saltos con la estación Checua, por lo que se comparó con la estación San Isidro y con esta obtuvo un coeficiente $R^2 = 0,9995$ (Ver Figura 43).

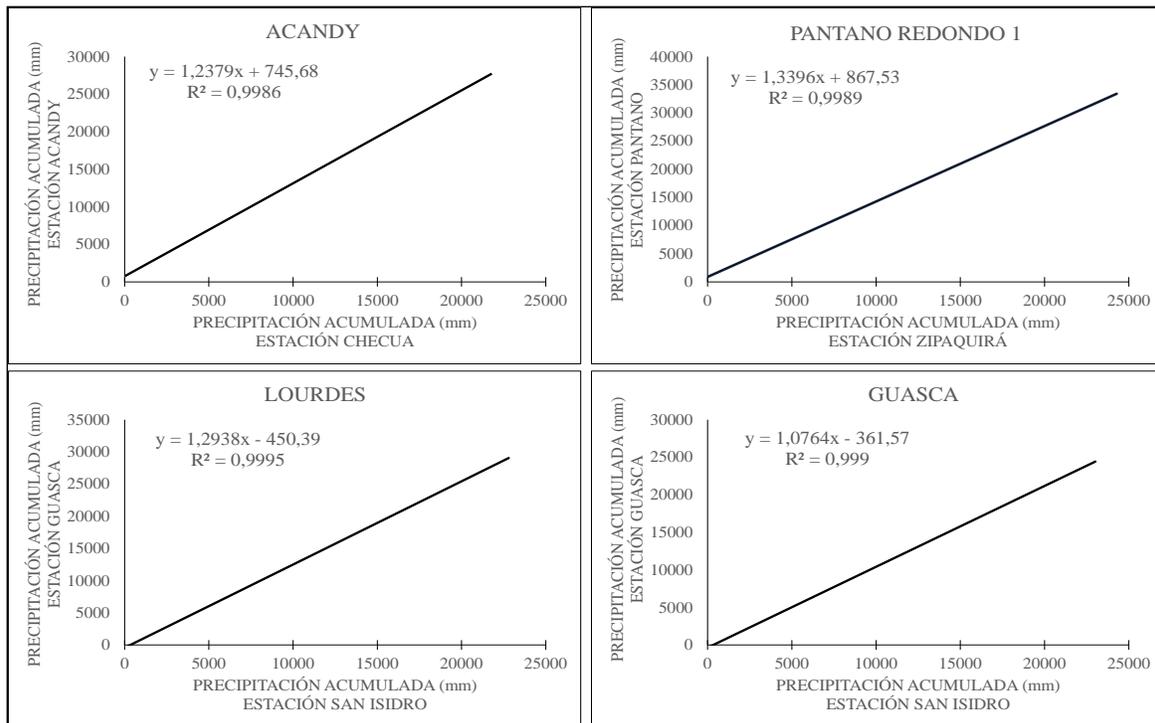


Figura 43. Gráfica de doble masa para estaciones seleccionadas.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los datos de precipitación fueron graficados para conocer el comportamiento de la distribución en cada estación. Estas gráficas presentaron una distribución normal, y, por tanto, se procedió a realizar las pruebas paramétricas de carácter comprobatorio.

Complementación de datos

Las estaciones Checua, San Isidro y Zipaquirá fueron completadas usando el método Racional Deductivo. Para las estaciones de Acandy, Guasca y Pantano Redondo 1 se usó el método de regresión lineal simple con lo cual se calcularon los valores de precipitación faltantes empleando las ecuaciones que se indican en la Tabla 17.

Tabla 17. Ecuaciones para complementación de datos y cantidad de datos faltantes.

Grupo	Estación de Referencia	Estación a Complementar	Ecuación	Cantidad de datos faltantes
1	Checua	Acandy	$Y_i = 0,8158 X_i + 21,9771$	18
2	Zipaquirá	Pantano Redondo 1	$Y_i = 0,9322 X_i + 31,6112$	16
3	San Isidro	Lourdes	$Y_i = 1,0789 X_i + 13,7722$	28
		Guasca	$Y_i = 0,9688 X_i + 7,11150$	21

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Análisis cuantitativo o confirmatorio

Posterior a la estimación de datos faltantes se realizó el análisis cuantitativo o confirmatorio para validar que el modelo fuera estadísticamente significativo. Se evaluó la tendencia mediante el coeficiente de correlación ($r > 0,99$) y la Normalidad mediante la prueba de la prueba de Shapiro Wilks, calculado para un nivel de significancia de 0,5. (Ver Tabla 18).

Tabla 18. Pruebas estadísticas para el análisis confirmatorio.

Prueba Estadística	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		
	Acandy	Checua	Pantano Redondo 1	Zipaquirá	Lourdes	Guasca	San Isidro
Tendencia							
Coefficiente de correlación	0,9993	NR	0,9988	NR	0,9981	0,9996	NR
Normalidad							
*Shapiro Wilks p-value=0,964	0,971	0,970	0,966	0,976	0,974	0,976	0,969

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.2.2.2 Precipitación

Una vez las series de datos fueron completadas y validadas se pudo establecer la precipitación en las diferentes estaciones para el periodo definido. Los valores de la precipitación media mensual multianual se encuentran en un rango entre 664 y 1234,5 mm año⁻¹ como se aprecia en la Tabla 19.

Tabla 19. Precipitación promedio anual de las estaciones seleccionadas.

Estación	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		
	Acandy	Checua	Pantano Redondo 1	Zipaquirá	Lourdes	Guasca	San Isidro
Categoría	PM	CP	PG	PG	PM	CO	PM
Elevación (msnm)	2600	2580	3160	2655	2750	2750	2698
Precipitación (mm/año)	802,8	664,0	1234,5	917,7	1009,2	837,4	781,8
PM: Pluviométrica	CP: Climática principal		CO: Climática Ordinaria		PG: Pluviográfica		

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Comportamiento estacional de la Precipitación

La distribución temporal en todas las estaciones presenta un comportamiento bimodal con periodos marcados de lluvia en los meses de abril – mayo y octubre – noviembre; mientras que los dos periodos secos se registran en los meses de diciembre – febrero y julio – septiembre. (Ver Figura 44).

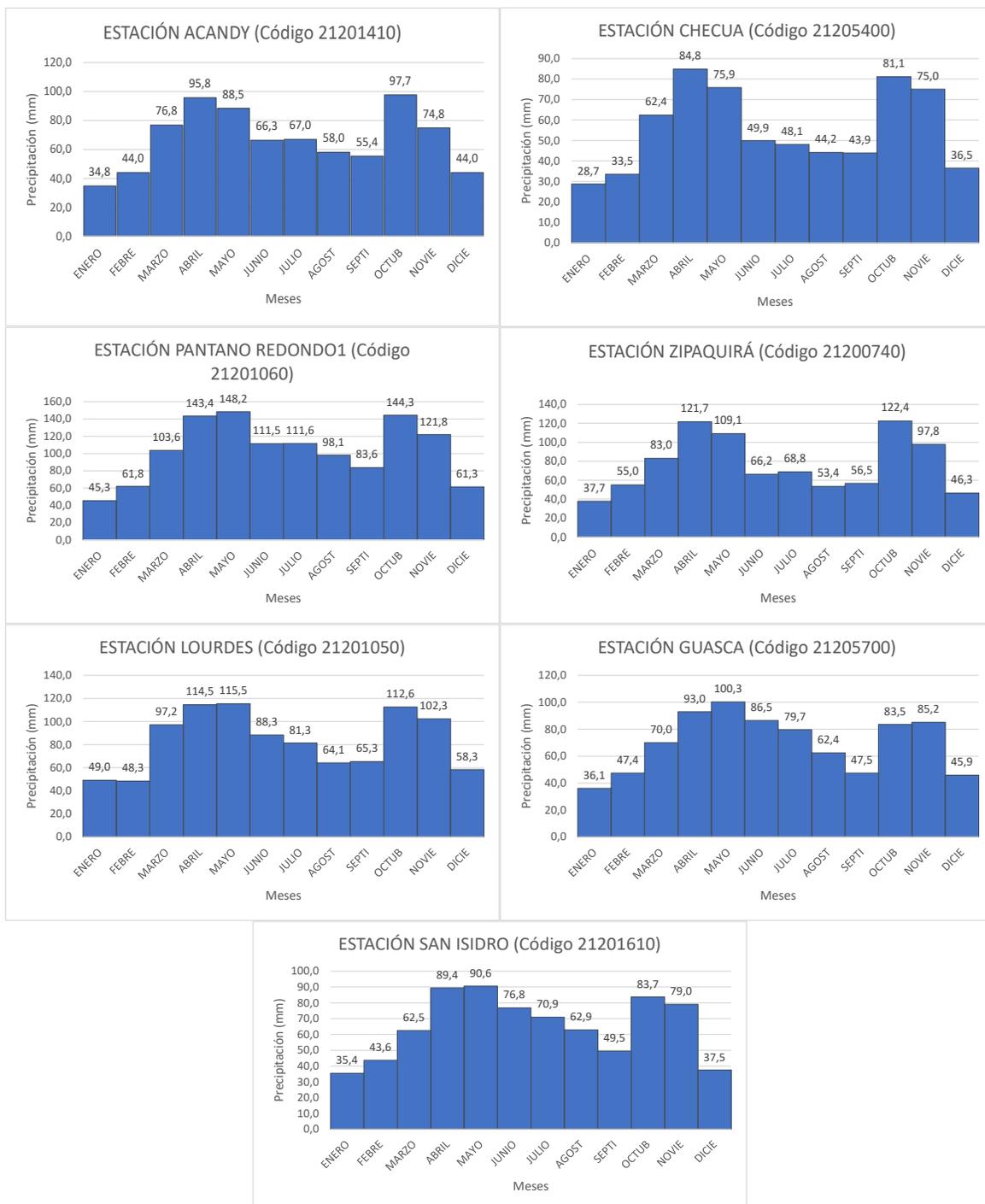


Figura 44. Hietogramas de las estaciones seleccionadas.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

El promedio de precipitación ocurrido en el periodo de lluvia de abril – mayo es mayor a los registrados en el periodo de lluvia de octubre – noviembre, alcanzando en abril un valor de $145,8 \pm 25,1$ mm mes⁻¹ registrado en la estación Pantano Redondo 1, lo que resulta congruente con la altitud de 3150 msnm a la que se encuentra ubicada. Los registros de las demás estaciones, cuyas altitudes están entre 2580 y 2750 msnm, varían desde $80,4 \pm 20,8$ mm mes⁻¹ en la estación Checua, hasta $115,4 \pm 24,9$ mm mes⁻¹ en la estación Zipaquirá.

El promedio de precipitación en el periodo seco es menor entre diciembre – febrero que el presentado entre julio – septiembre, con un registro de precipitación de $32,9 \pm 9$, mm mes⁻¹ en la estación Checua, y los registros de las demás estaciones están entre $38,8 \pm 8,9$ mm mes⁻¹ de la estación San Isidro y $56,1 \pm 11,4$ mm mes⁻¹ de estación Pantano Redondo 1. Los resultados se indican en la Tabla 20.

Tabla 20. Distribución temporal de la precipitación (mm año⁻¹).

Periodo	Grupo 1		Grupo 2		Grupo 3		
	Acandy	Checua	Pantano Redondo 1	Zipaquirá	Lourdes	Guasca	San Isidro
abr - may	92,1 ±21,4	80,4 ±20,8	145,8 ±25,1	115,4 ±24,9	115,0 ±21,1	96,7 ±8,1	90,0 ±16,1
oct - nov	86,2 ±18,2	78,1 ±17,4	133,1 ±23,6	110,1 ±21,7	107,5 ±21,9	84,4 ±9,4	81,4 ±15,3
dic - feb	40,9 ±10,7	32,9 ±9,1	56,1 ±11,4	46,3 ±11,4	51,9 ±12,5	43,1 ±11,2	38,8 ±8,9
jul - sept	60,1 ±9,1	45,4 ±7,7	97,8 ±17,8	59,6 ±11,6	70,2 ±10,3	63,2 ±10,4	61,1 ±8,5

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Mapas de Isoyetas

La distribución de la precipitación presenta un comportamiento de tipo bimodal originado por la influencia de la Zona de Confluencia Intertropical (IDIGER, 2020). La interpolación espacial realizada sobre la precipitación promedio mensual multianual, expresada en mm, evidenció que las precipitaciones más altas se presentan en el oriente y occidente del Municipio donde alcanzan valores hasta de 960 mm, debido al efecto orográfico que generan los cerros; mientras que, en el sector norte, en límites con el municipio de Nemocón, y, al sur con el municipio de Guasca los volúmenes de precipitación registran los menores valores con 870 mm. Esta distribución indica que la planicie tiene condiciones favorables para la recarga por precipitación como se aprecia en la Figura 45.

5.2.2.3 Temperatura

Para establecer el parámetro de la temperatura se trabajó con los registros obtenidos en las estaciones climatológicas Checua y Guasca por presentar series homogéneas y ser las únicas que contaban con registros para períodos superiores a 10 años, con un número de datos faltantes menor al 10% los cuales fueron complementados por el método Racional Deductivo y finalmente tratados estadísticamente para garantizar la confiabilidad de la información.

Comportamiento estacional

El régimen termal del municipio de Tocancipá fue caracterizado a partir de las series consistentes, completas y homogéneas provenientes de las estaciones climatológicas Checua y Guasca para el periodo comprendido entre 1991 y 2016 – (26 años), donde su comportamiento resultó muy estable sugiriendo pocos cambios en el proceso de evapotranspiración a lo largo del año guardando relación directa con la precipitación.

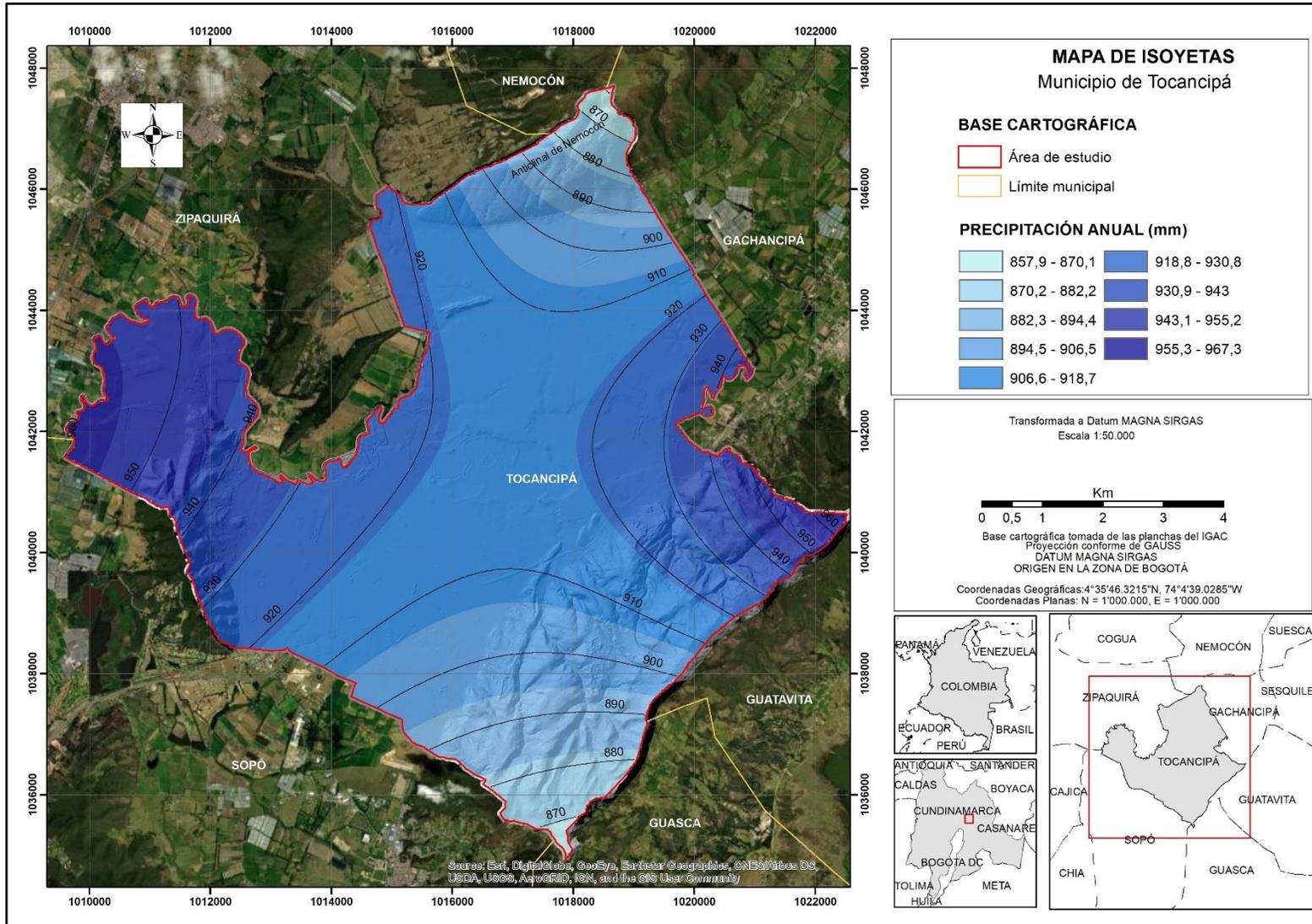


Figura 45. Mapa de Isoyetas.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

La estación Checua presenta una temperatura promedio anual de $14,1 \pm 0,4$ °C, siendo el periodo de marzo-abril el de mayor registro con $14,8 \pm 0,5$ °C y el periodo julio-agosto el menor con $13,6 \pm 0,4$ °C. Por otra parte, la estación Guasca presenta una temperatura promedio anual de $12,8 \pm 0,6$ °C, siendo diciembre con $13,2 \pm 0,3$ °C el mes con el registro mayor, y junio con $12,3 \pm 0,7$ °C el más bajo. Ver Figura 46.

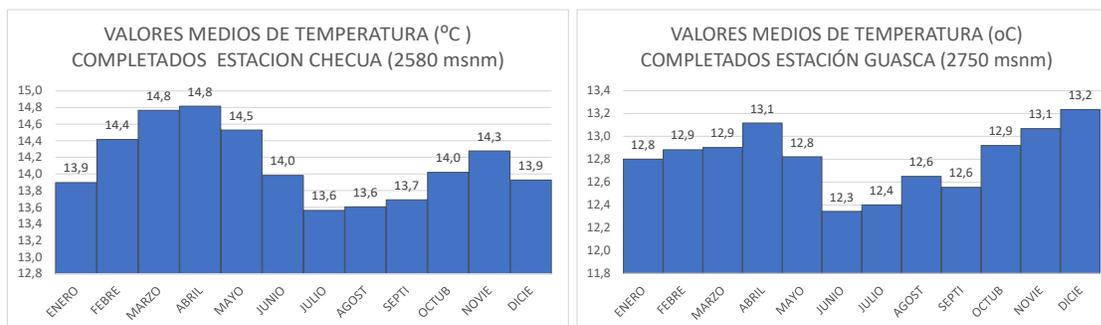


Figura 46. Valores medios de Temperatura para la estación Checua y Zipaquirá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Mapas de Isothermas

Regionalizada la variable temperatura los valores correspondientes al valor promedio mensual multianual del área se aprecian en la Figura 47. En general la variable de temperatura presenta tendencia de carácter creciente, de mayor magnitud por el efecto de la urbanización, la industria y otras actividades del hombre hacia el sector urbano; adicionalmente, los valores de temperatura más bajos se presentan en la parte alta de la cuenca en los cerros aledaños pues a medida que aumenta la altitud disminuye la temperatura.

5.2.2.4 Evapotranspiración Potencial (ETP)

A partir de los registros de temperatura de las estaciones Checua y Guasca se realizó la complementación de datos faltantes y tratamiento estadístico, considerando un rango de 26 años comprendido entre 1991 y 2016. El cálculo de la ETP se hizo por el método de Thornthwaite (1948) y se obtuvieron los resultados indicados en la Tabla 21.

Tabla 21. Evapotranspiración Potencial por el método de Thornthwaite.

Estación	Checua			Guasca		
	T (°C)	I	ETP (mm/mes)	T (°C)	I	ETP (mm/mes)
Enero	13,9	4,7	55,6	12,8	4,2	54,4
Febrero	14,4	5,0	53,4	12,9	4,2	50,0
Marzo	14,8	5,2	61,6	12,9	4,2	55,9
Abril	14,8	5,2	60,9	13,1	4,3	56,1
Mayo	14,5	5,0	61,7	12,8	4,2	56,8
Junio	14,0	4,7	55,2	12,3	3,9	51,1
Julio	13,6	4,5	54,7	12,4	4,0	53,0
Agosto	13,6	4,6	56,3	12,6	4,1	55,7
Septiembre	13,7	4,6	54,0	12,6	4,0	52,6
Octubre	14,0	4,8	58,2	12,9	4,2	56,8
Noviembre	14,3	4,9	56,4	13,1	4,3	54,4
Diciembre	13,9	4,7	56,7	13,2	4,4	57,6
a		1,4			1,3	

Fuente: Elaboración propia, 2021.

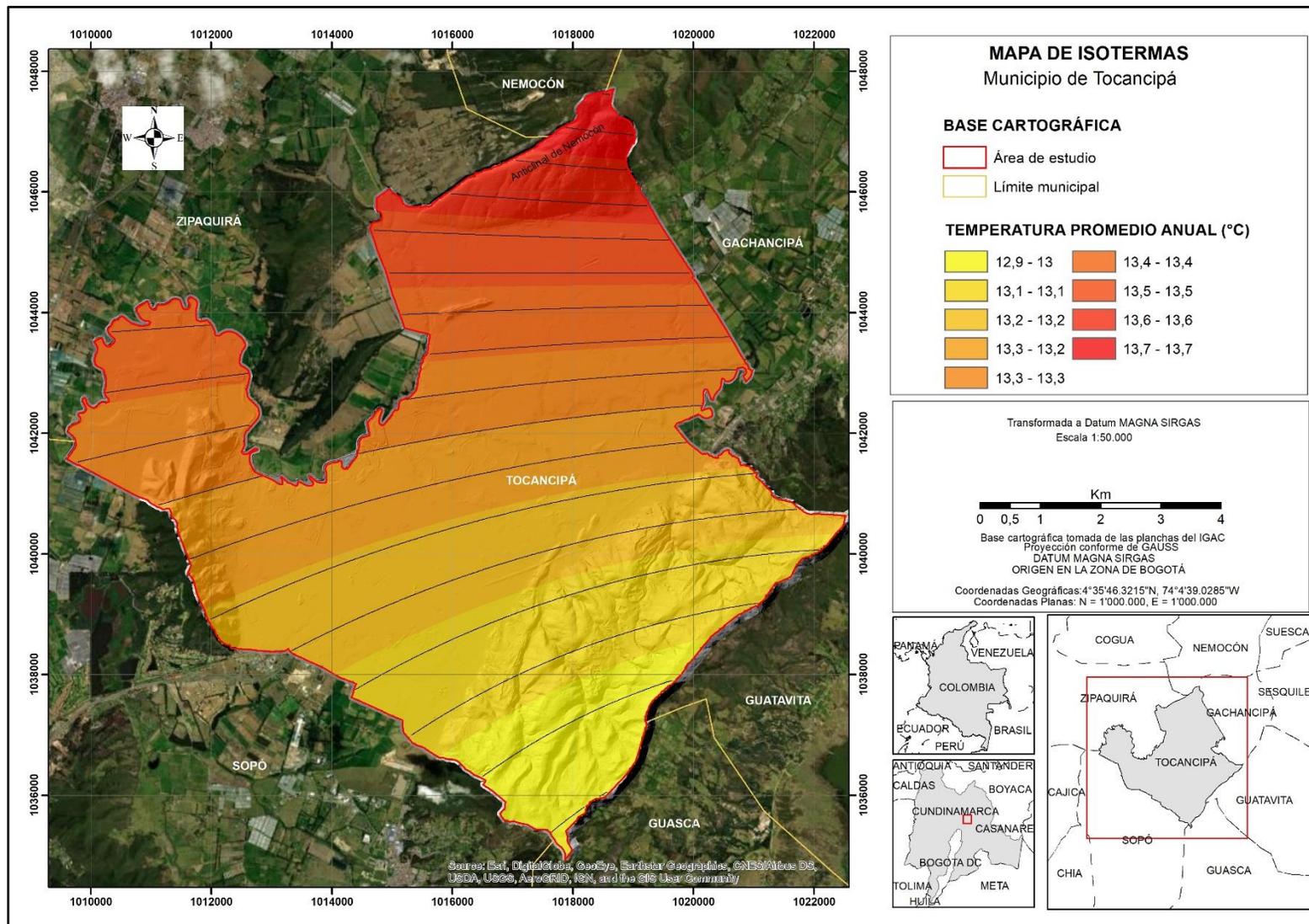


Figura 47. Mapa de Isothermas.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Los valores presentados de ETP indican un comportamiento estable a lo largo del año, siendo ligeramente mayor en la estación Checua con un promedio de $57,1 \pm 1,7$ mm mes⁻¹ mientras que en la estación Guasca el promedio anual es de $54,5 \pm 1,5$ mm mes⁻¹. Los valores máximo y mínimo se presentan respectivamente en el mes de mayo y febrero en la estación Checua con registros de $61,7 \pm 1,8$ y $53,4 \pm 2,2$ mm mes⁻¹, y en los meses de diciembre y febrero para la estación Guasca con valores de $57,6 \pm 1,3$ y $50,0 \pm 1,9$ mm mes⁻¹. Ver Figura 48.

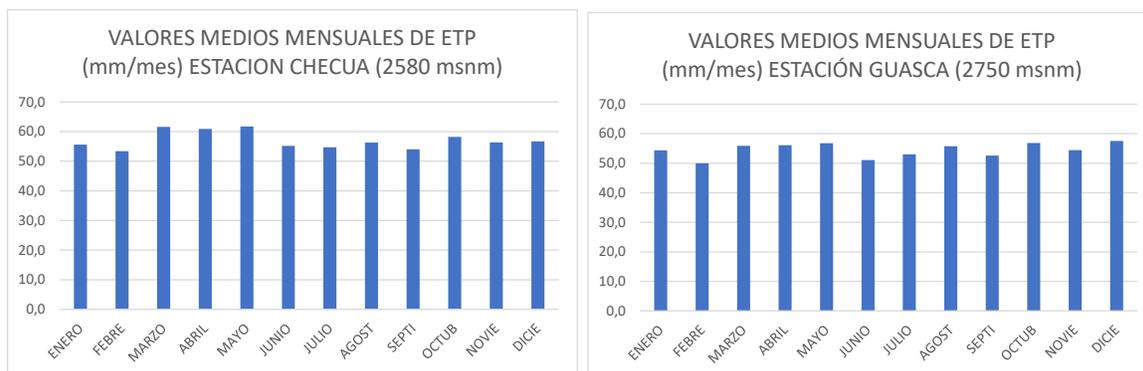


Figura 48. Valores medios mensuales de ETP para las estaciones Checua y Guasca.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El análisis de Precipitación (P) – Evapotranspiración Potencial (ETP) permitió establecer que el déficit anual ocurre en los meses de diciembre, enero y febrero alcanzando un valor de $37,2$ mm mes⁻¹, mientras que en los meses húmedos de abril, mayo, octubre y noviembre hay exceso de precipitación con un valor de $134,7$ mm mes⁻¹. En el total anual es de $197,8$ mm.

5.2.3 Balance hídrico

Teniendo en cuenta las correcciones por mes y latitud de la ETP se calculó la ETPR y el balance hídrico por el método de Schosinsky, empleando una hoja de cálculo en Excel detallado en el Anexo E. La Figura 49, presenta los parámetros de Evapotranspiración Real (ETPR), Escorrentía Superficial (ESC), Precipitación (P) e Infiltración (I).

Esta metodología analiza espacial y temporalmente las variables de precipitación y temperatura para llegar a determinar la distribución de la evapotranspiración potencial (ETP) y real (ETPR). Una vez cuantificados estos parámetros se puede determinar la fracción de lluvia interceptada por la cobertura vegetal y un coeficiente de infiltración según las litologías presentes en el área, en función de las variables de pendiente y coberturas de la tierra con los cuales se establece la recarga potencial mensual distribuida. Las ecuaciones utilizadas fueron las presentadas en la metodología de este trabajo.

Los parámetros del balance hídrico presentan un comportamiento bimodal con periodos que coinciden con los periodos de mayor precipitación en los meses de abril-mayo y octubre-noviembre, y dos periodos de menor precipitación en enero-febrero y agosto-septiembre.

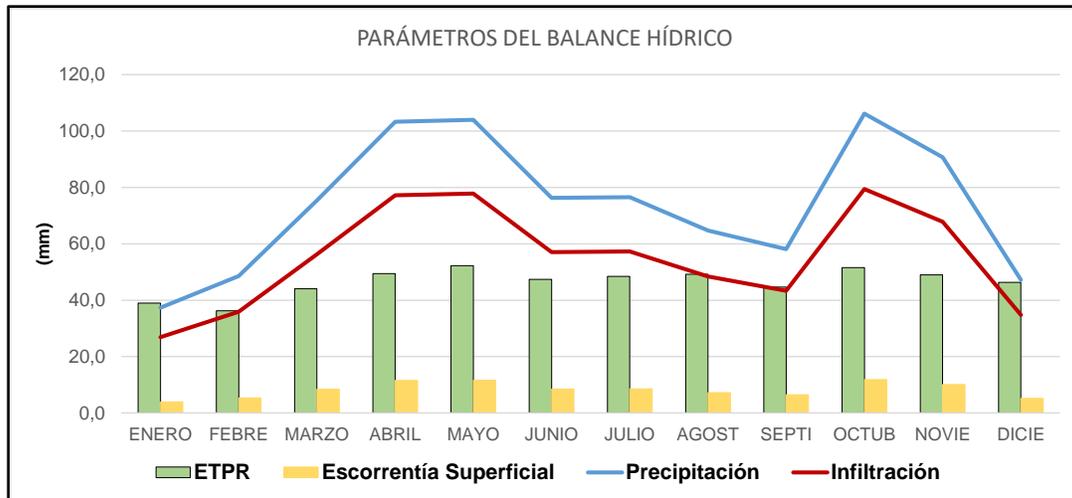


Figura 49. Parámetros del balance hídrico.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.2.3.1 Parámetros del balance hídrico

En el análisis del ciclo hidrológico se consideran la Precipitación como único componente de entrada al ciclo hidrológico, mientras que las salidas están representadas por la infiltración, evapotranspiración, y escorrentía.

Precipitación (P)

Este parámetro fue calculado a partir de las series de datos obtenidas de los registros de las estaciones meteorológicas de IDEAM y CAR, con un valor de $72,2 \pm 12,0$ mm mes⁻¹ promedio mensual acumulado ($866,4$ mm mes⁻¹).

Precipitación que infiltra (Pi)

Este dato se refiere a la precipitación que infiltra mensualmente y se obtuvo a partir de los datos de precipitación obtenidos de los registros meteorológicos, la retención de agua por el follaje y coeficiente de infiltración explicados en la metodología de este trabajo.

Los resultados indican que el área de estudio presenta un valor promedio de $55,2 \pm 9,2$ mm año⁻¹, presentando el mayor registro en el mes de octubre con $79,5 \pm 12,8$ mm y el menor en enero con $26,9 \pm 7,1$ mm.

Evapotranspiración Real (ETPR)

En el área de estudio se obtuvo un valor promedio de $46,5 \pm 2,8$ mm año⁻¹, presentando el mayor registro en el mes de mayo con $52,3 \pm 2,9$ mm y el menor en febrero con $36,3 \pm 3,3$ mm.

El comportamiento de la ETPR en la zona es de tipo bimodal, y las variaciones del balance hídrico coinciden con los periodos de lluvia y estiaje. Es así que existen dos periodos de ETR alto en los meses de abril-mayo y otro en octubre-noviembre con un valor promedio de $50,8 \pm 2,8$ y $50,3 \pm 2,8$ mm mes⁻¹ respectivamente. En consecuencia, se presentan dos periodos de menor ETR entre enero-febrero y otro en agosto-septiembre con valor promedio de $37,6 \pm 3,4$ y de $46,9 \pm 1,9$ mm mes⁻¹ respectivamente lo cual coincide con los valores de déficit de capacidad de campo.

Escorrentía Superficial (ESC)

En el área de estudio se obtuvo un valor promedio de $8,2 \pm 1,4 \text{ mm año}^{-1}$ presentando el mayor registro en el mes de octubre con $11,9 \pm 1,9 \text{ mm}$ y el menor en enero con $4,0 \pm 1,1 \text{ mm}$.

5.2.3.2 Recarga potencial (Rp)

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra (I) es suficiente para llevar al suelo a Capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la Capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero (infiltración), (Schosinsky N, 2006).

La Capacidad de Campo se define como la cantidad relativamente constante de agua que contiene un suelo saturado después de 48 horas de drenaje. El concepto se aplica a suelos bien estructurados donde el drenaje del exceso de agua es relativamente rápido. Si el drenaje ocurre en suelos pobremente estructurados, por lo general continuará durante varias semanas. En consecuencia, el déficit de capacidad de campo (DCC) es la humedad que falta para que la humedad del suelo alcance la capacidad de campo, expresada en mm.

El análisis permitió evidenciar que el Déficit de Capacidad de Campo (DCC) presenta un comportamiento con influencia de régimen monomodal, siendo el periodo entre diciembre-marzo el que registra mayor déficit de humedad para alcanzar la capacidad de campo al final de mes con un valor promedio para este periodo de $36,0 \pm 9,4 \text{ mm mes}^{-1}$, mientras que entre abril y noviembre el déficit disminuye con un valor promedio para este periodo de $16,0 \pm 9,4 \text{ mm mes}^{-1}$, en tanto la Recarga al acuífero (Rp) se genera en los meses de mayo, octubre y noviembre con valores de $18,2 \pm 8,6 \text{ mm mes}^{-1}$, $20,2 \pm 10,2 \text{ mm mes}^{-1}$ y $19,8 \pm 11,0 \text{ mm mes}^{-1}$ respectivamente, lo cual indica que la cantidad de agua que se infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y satisfacer al mismo tiempo los procesos de evapotranspiración real. Ver Figura 50.

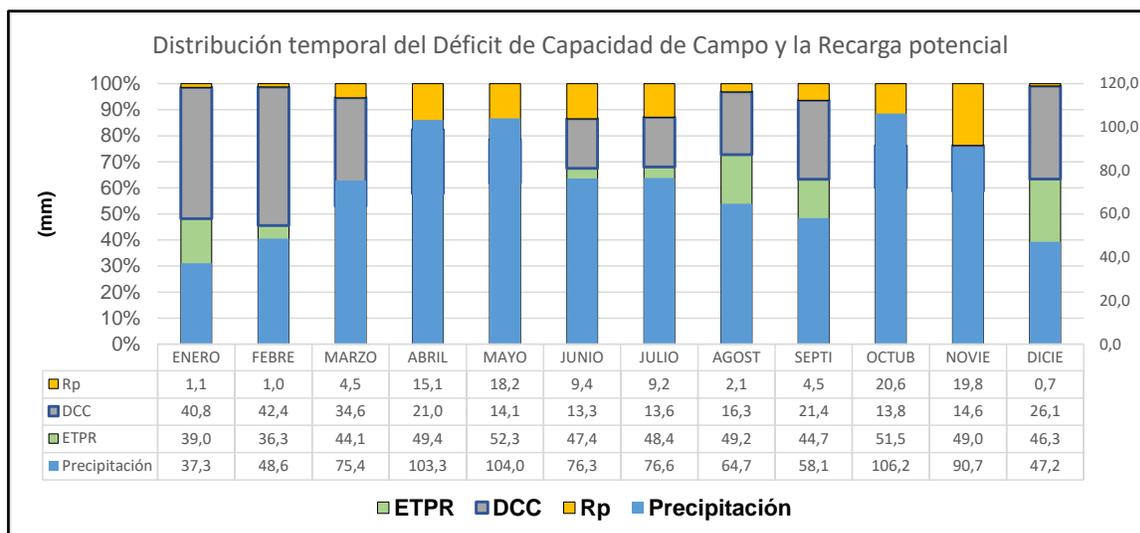


Figura 50. Déficit de capacidad de campo (DCC) y Recarga potencial (Rp).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Con base a la clasificación de cobertura Corine Land Cover presentes en el Municipio se realizó el análisis para los siguientes Territorios. Territorios Artificializados, que se dividieron en Centros Urbanos (TARCU) y de Polígono Minero (TARPM), Territorios Agrícolas (TAg) y los de Bosques y Áreas Seminaturales (BASN). (Ver Figura 51).

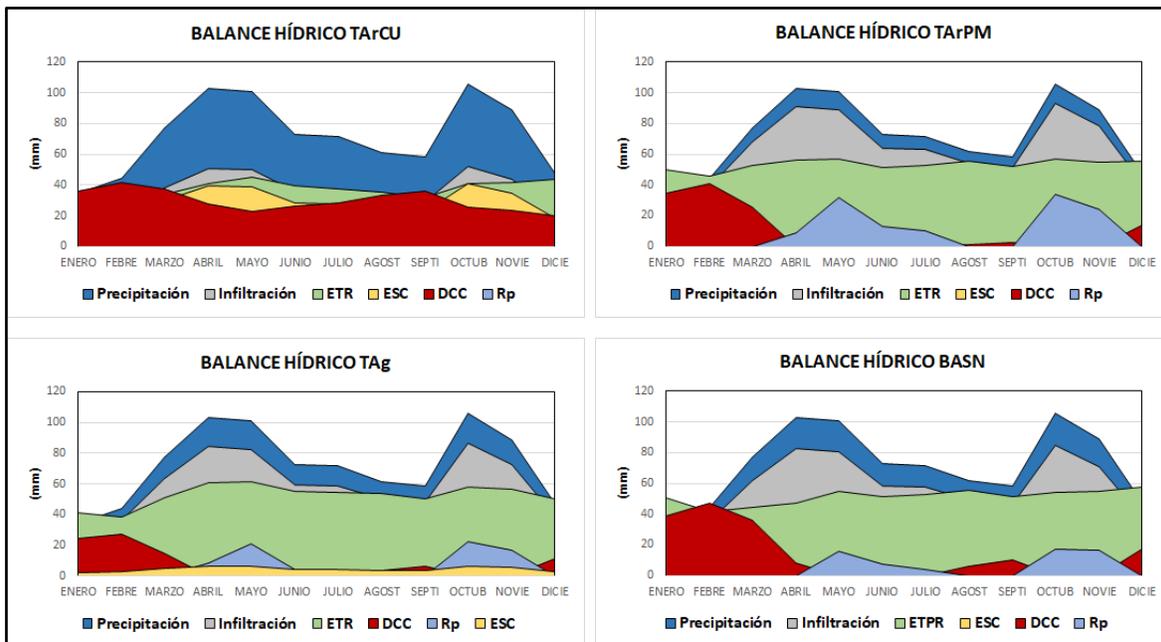


Figura 51. Balance hídrico para las diferentes coberturas en el Territorio. (TArCU), (TArPM), (TAg) y (BASN)
Fuente: Elaboración propia 2021.

Se evidencia que independientemente de la cobertura del suelo, los periodos de lluvia coinciden con los de mayor recarga potencial (infiltración), y sólo en las zonas con inclinación menor al 7% (TArCU y TAg) la escorrentía superficial se da cuando el suelo está saturado y una parte del excedente del agua no alcanza a ser evapotranspirada.

Un caso particular se presenta en los Terrenos Artificializados de Centros Urbanos (TArCU) donde la R_p promedio anual es mínimo con un valor de $12,0 \pm 0,9 \text{ mm año}^{-1}$. Esto se debe en gran medida a las construcciones antrópicas que ocasionan que las variables presenten valores promedio anual muy similares de ETR con $35,5 \pm 2,3 \text{ mm año}^{-1}$; ESC $28,5 \pm 2,5 \text{ mm año}^{-1}$, DDC a $31,3 \pm 3,3 \text{ mm año}^{-1}$.

En los demás terrenos localizados en zonas de sabana o ribereñas (TAg) la R_p , cuyos suelos presentan textura que varían de Franco a Franco Arcillosos, los valores de ETR y el DCC se mantienen de manera constante a lo largo del año con valores promedio de $49,2 \pm 1,6$ y $12,0 \pm 2,6 \text{ mm año}^{-1}$ respectivamente, lo que a su vez favorece la R_p principalmente en los periodos de lluvia alcanzando un promedio anual es de $11,3 \pm 4,1 \text{ mm año}^{-1}$ y una ESC de $4,5 \pm 0,4 \text{ mm año}^{-1}$ que se incrementa con los flujos subsuperficiales temporales que llegan de las partes más altas.

En los terrenos de paisaje colinado (TArPM y BASN), bien sea de ladera o montaña localizados al oriente y occidente del Municipio, donde las rocas aflorantes se encuentran prácticamente desprovista de cobertura vegetal con suelos de textura Arenosa y Franco Arenosa se presenta un comportamiento similar de las variables del balance hídrico. La R_p promedio anual en estos terrenos es de $11,5 \pm 4,3 \text{ mm año}^{-1}$ y se generan a través de pliegues y fracturas que permiten la acumulación y recarga lateral y vertical a otras unidades geológicas. En cuanto a la ETR el valor alcanza un promedio de $50,6 \pm 1,4 \text{ mm año}^{-1}$ y DCC de $23,8 \pm 6,6 \text{ mm año}^{-1}$. La ESC que se produce en el área se dirige hacia las zonas bajas o hacia aquellos sectores en que las condiciones de los suelos y las rocas tienen menor capacidad de infiltración.

5.2.4 Zonas de recarga

La identificación de zonas de recarga en el municipio de Tocancipá permitió ampliar la comprensión del modelo hidrogeológico de la zona, para ello se utilizó la metodología propuesta por CATIE (2010) la cual se basa en la ponderación de indicadores y análisis multicriterio. Con la aplicación de este método se hizo el análisis del área de los atributos definidos en función de su influencia con la infiltración.

Una vez conocidas las zonas potenciales de recarga se integró la variable de precipitación, siguiendo la misma metodología de ponderación, lo que permitió identificar las zonas donde las condiciones para la recarga efectiva de acuíferos por infiltración son ideales.

5.2.4.1 Zonas de recarga potencial

Los atributos considerados en la metodología de Matus (2009) son el de Pendiente (Pend), Tipo de suelo (Ts), tipo de roca (Tr), cobertura vegetal permanente (Cve) y uso del suelo (Us), los cuales mediante un proceso de modelamiento espacial en SIG llamado álgebra de mapas se identificó las zonas con potencial de recarga.

La ponderación usada en la evaluación de cada atributo se calificó de 1 a 5, según las características de cada uno de ellos en función de la probabilidad de recarga, donde la puntuación con valor 1 es la más baja y la puntuación con valor 5 es la mayor por presentar características favorables para la recarga hídrica. La Tabla 22 indica la ponderación de los atributos ajustados a las condiciones presentes en el municipio de Tocancipá.

Las siguientes coberturas vegetales según la Clasificación Corine Land Cover Nivel C3 fueron incluidas con valor de ponderación 1:

- 1.1.1 Tejido Urbano Continuo
- 1.2.1. Zonas Industriales Comerciales
- 1.2.2 Red Vial, Ferroviaria y Terrenos Asociados
- 1.2.5 Obras Hidráulicas
- 2.2.5 Cultivos Confinados
- 3.3.2 Afloramientos Rocosos
- 4.1.1. Zonas Pantanosas
- 5.1.1. Ríos
- 5.1.2. Lagunas, Lagos y Ciénagas Naturales
- 5.1.4 Cuerpos de Agua Artificial

Posteriormente se aplicó la ecuación que multiplica el valor de cada atributo por el respectivo factor de peso definido con relación a su importancia o influencia en la infiltración. La sumatoria de las ponderaciones arrojó un valor con el cual se identificó las zonas potenciales de recarga hídrica según los rangos presentados en la matriz para la determinación del potencial de recarga hídrica en la metodología de este trabajo. Finalmente, se elaboró el mapa que evidencian las zonas de recarga potencial indicadas en la Figura 52, en el cual se puede observar que la zona de mayor recarga se presenta hacia los cerros circundantes y gradualmente varían de manera decreciente hacia la planicie hasta el río Bogotá siendo la zona urbana, asociada a la unidad geológica rellenos antrópicos, la que representa menor probabilidad de recarga.

Tabla 22. Ponderación de atributos para cálculo de zonas de recarga potencial.

Atributo	Probabilidad de recarga	Muy alta	Alta	Moderada	Baja	Muy baja
	Ponderación	5	4	3	2	1
Pendiente	Pend	Planos a casi planos	Moderadamente ondulados	Ondulados/cóncavos	Escarpados	Fuertemente escarpados
	(%)	0-6	6-15.	15-45	45-65	>65
Tipo de Suelo	Ts	Suelos franco-arenosos a arenosos.	Suelos francos	Suelos franco-limosos	Suelos Franco arcillosos	Suelos arcillosos
Tipo de roca	Tr	Rocas muy permeables, muy suaves constituidas por agregados gruesos, con macro poros interconectados	Rocas permeables constituidas por agregados medianos con poros conectados entre sí, ej arenas finas	Rocas moderadamente permeables, con regular conexión de poros entre si	Rocas poco permeables un poco duras, moderadamente compactas, constituidas por partículas finas, una combinación de gravas con arcillas, con presencia de fracturas conectadas entre si	Rocas impermeables
	Unidad Geológica	K2t - E1c	K2d	Q1sa - Q2c - Q2da	K2p - K2E1g - E1b	Q2ra
Cobertura vegetal permanente	Cve (%)	>80%	70-80%	50-70%	30-50%	<30%
Uso de suelo	Us	Bosque que presentan los tres estratos con árboles, arbustos y hierbas	Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo	Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	Terrenos agropecuarios, con manejo intensivo
	Clasificación Corine Land Cover Nivel C3	3.1.1 Bosque Denso 3.1.4 Bosque Ripario	3.2.1 Herbazal 3.2.2 Arbustal	2.3.1 Pastos Limpios 2.4.1 Mosaico de Cultivos 2.4.2 Mosaico de Pastos y Cultivos	1.4.2 Instalaciones Recreativas 2.1.5 Tubérculos	1.1.2 Tejido Urbano Discontinuo 1.3.1 Zonas de Extracción Minera 3.3.3. Tierras Desnudas y Degradadas

Fuente: Tomado de Matus 2009 y adaptado por Elaboración propia, 2021.

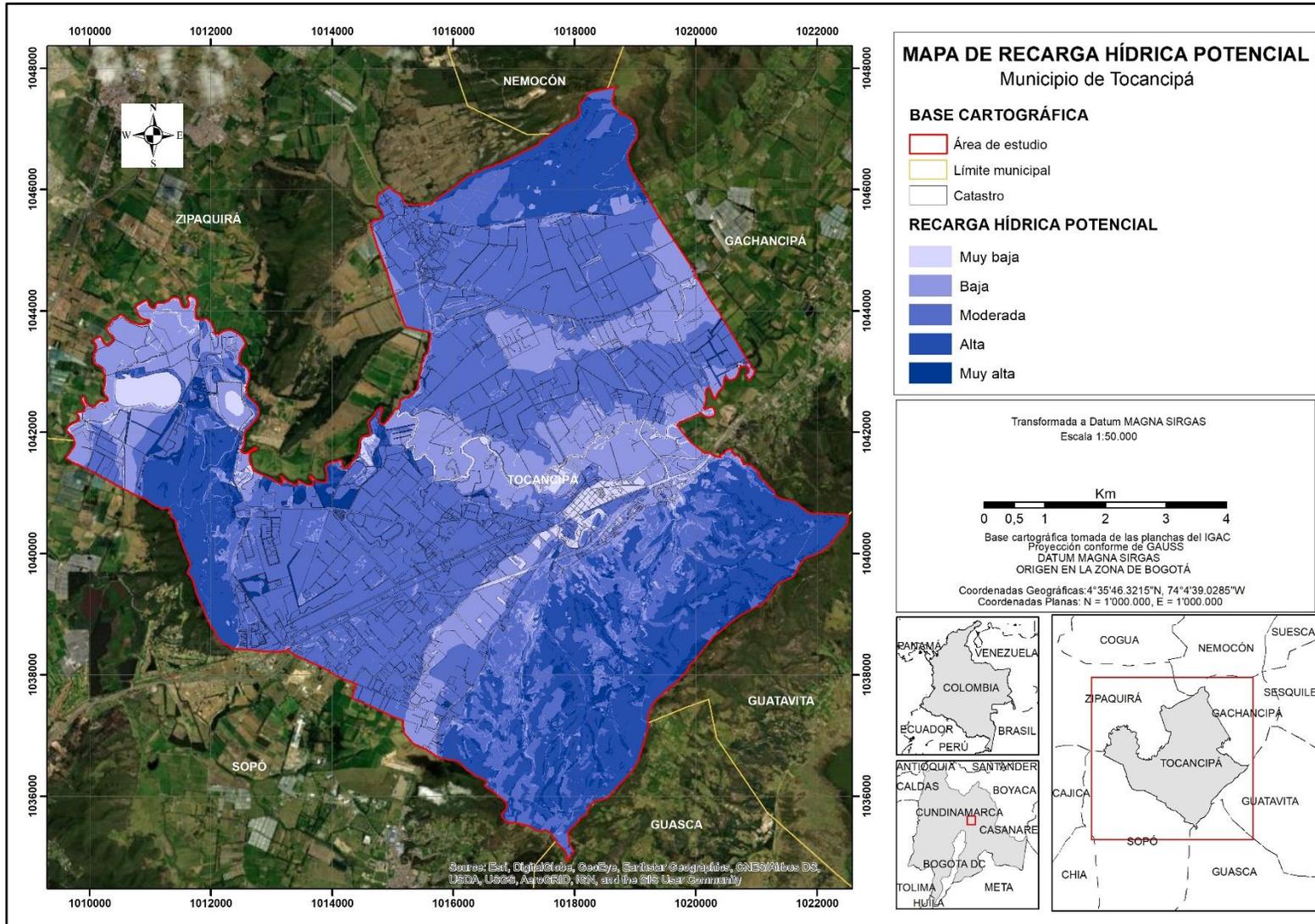


Figura 52. Zonas de recarga hídrica potencial.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Se evidencia una clara relación entre los atributos con respecto a la probabilidad de recarga, siendo los de mayor peso la pendiente, el tipo de suelo y la cobertura vegetal permanente, y con menor incidencia el tipo de roca y el uso del suelo. Respecto a la pendiente se presenta una relación inversa, pues a mayor pendiente disminuye la probabilidad de recarga, sin embargo, en los cerros es donde existe mayor probabilidad de recarga; allí los suelos son de textura Arenosa a Franco Arenosa, en tanto, hacia la planicie los suelos presentan texturas más finas de tipo arcilloso y franco arcilloso.

El tipo de roca es otro atributo que incide en la determinación de las zonas de recarga pues hacia las partes topográficamente más elevadas las rocas presentan características de permeabilidad y porosidad (primaria o secundaria) que propician la infiltración hacia niveles más profundos. Por otra parte, el atributo de cobertura vegetal permanente tiene una relación directa con la probabilidad de recarga, pues a menor cobertura esta probabilidad se reduce, tal como sucede en gran parte de la planicie que se encuentra influenciada por actividad antrópica.

5.2.4.2 Zonas de recarga efectiva

El análisis de la precipitación es parte fundamental para establecer la recarga efectiva en un área en función de su interacción con los atributos evaluados de zonas de recarga potencial descritos anteriormente. La zona de recarga efectiva se obtuvo al integrar las zonas de recarga potencial con el parámetro de precipitación (mapa de Isoyetas), empleando la herramienta para el modelamiento espacial en SIG. Como resultado se generó una zonificación acorde a la integralidad de parámetros que rigen el comportamiento hidrogeológico del área de estudio como se aprecia en la Figura 53.

La zona identificada como de probabilidad muy alta de recarga efectiva se localiza en los sectores cuya pendiente es ondulada y hacia las partes topográficamente más altas de las veredas Canavita, La Esmeralda y El Porvenir hacia los límites del Municipio. Allí la vegetación permanente de tipo bosque denso y arbustal favorece la retención y filtración del agua meteórica en los suelos de texturas medias, y poco profundos hacia los lechos rocosos permeables con poros interconectados.

Las zonas con alta probabilidad de recarga efectiva se localizan hacia la parte media de las laderas en las mismas veredas de Canavita, La Esmeralda y El Porvenir, donde las pendientes son onduladas, la vegetación es de tipo herbazal, bosque Ripario, y donde las rocas están asociadas a litologías granulares con poros interconectados que favorecen la infiltración del agua hacia niveles más profundos.

Las zonas con moderada probabilidad de recarga efectiva se localizan en sectores con pendientes que van de inclinadas a planas, desde las laderas y el piedemonte de los cerros hacia la planicie central. Aunque en los sectores topográficamente más elevados existe vegetación de tipo arbustal, herbazal y de bosque Ripario la zona se ve afectada principalmente por actividades asociadas a la minería de canteras. Estas zonas presentan alto potencial de recarga, pero son reclasificadas como de zona de moderada recarga efectiva pues se ha modificado las condiciones naturales del suelo y del macizo rocoso. Igualmente, son zonas moderadas los sectores donde se encuentran depósitos coluviales que limitan la infiltración del agua hacia los niveles con rocas porosas permeables.

Las zonas con baja o muy baja probabilidad de recarga se localizan en los extremos norte y sur del Municipio donde la influencia de la precipitación es menor. Igualmente, en algunos sectores de la planicie y en los cerros donde la actividad antrópica hace presencia, reduciendo la capacidad de infiltración y drenaje. Estas áreas están destinadas principalmente a uso de suelo urbano, agropecuario e industrial, condiciones que desfavorecen la recarga de acuíferos en profundidad.

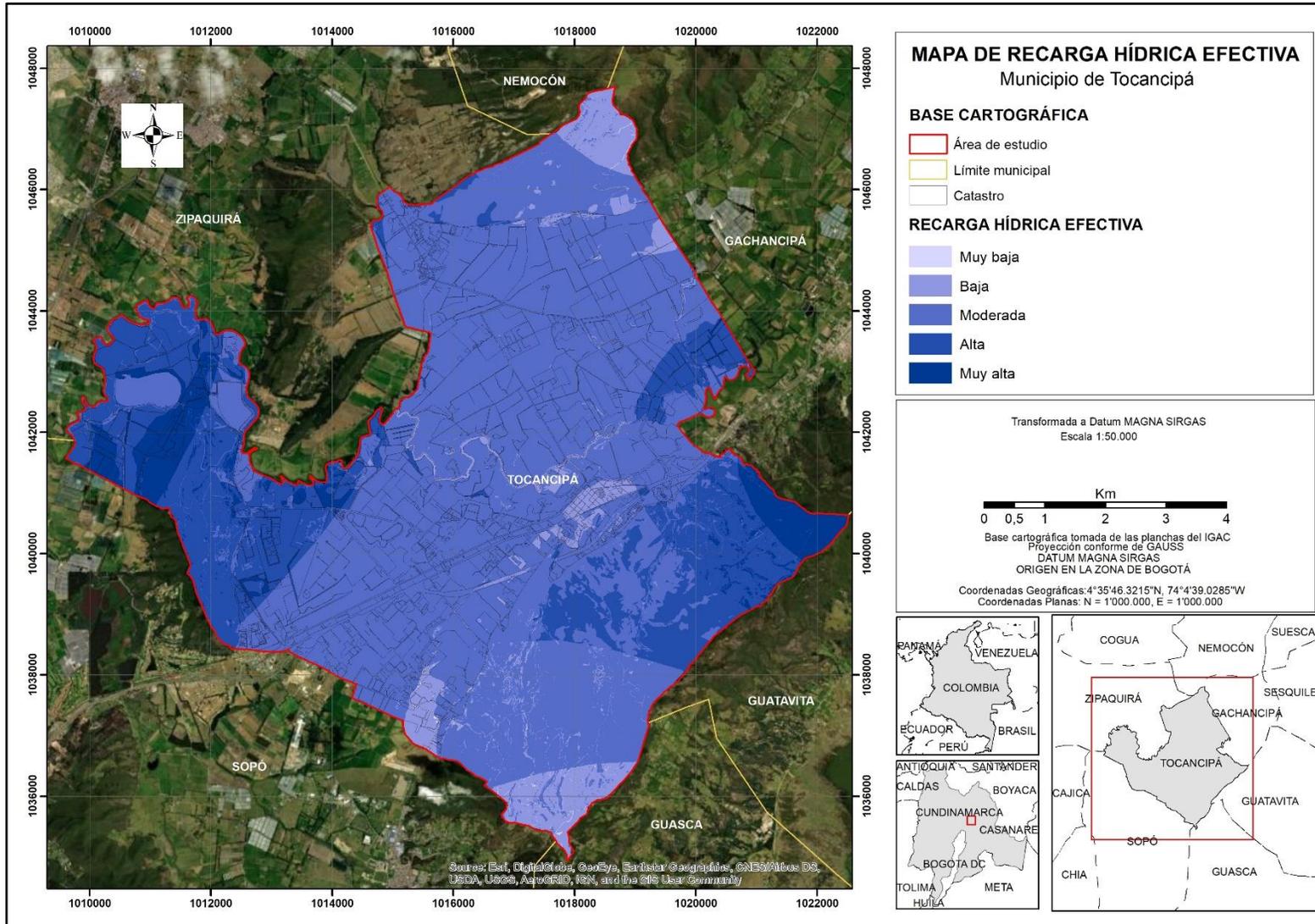


Figura 53. Zonas de recarga hídrica efectiva.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.2.4.3 Zonas de tránsito y descarga

El tránsito del agua superficial está supeditado por la red de drenaje compuesta por quebradas y canales provenientes de los flancos de los cerros que convergen hacia el área de la planicie. Es importante resaltar que en las áreas donde los suelos presentan texturas finas estas actúan como zonas de almacenamiento o retención en épocas de altas precipitaciones haciendo que el suelo alcance la capacidad de campo reteniendo la humedad por periodos prolongados de tiempo. Este comportamiento sugiere la desconexión con acuíferos profundos. En la Figura 54, se aprecia una barrera construida al margen del río Bogotá para evitar la inundación en territorios agrícolas (TAg).

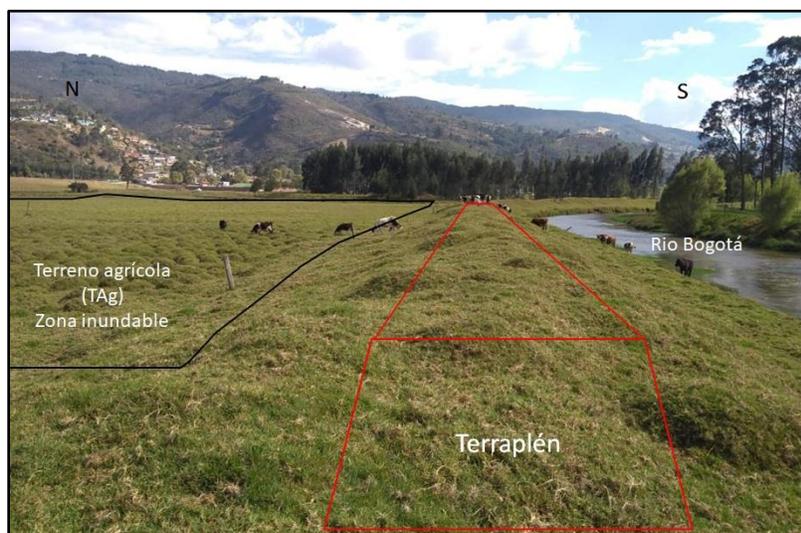


Figura 54. Zonas de inundación en suelos de textura arcillosa.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

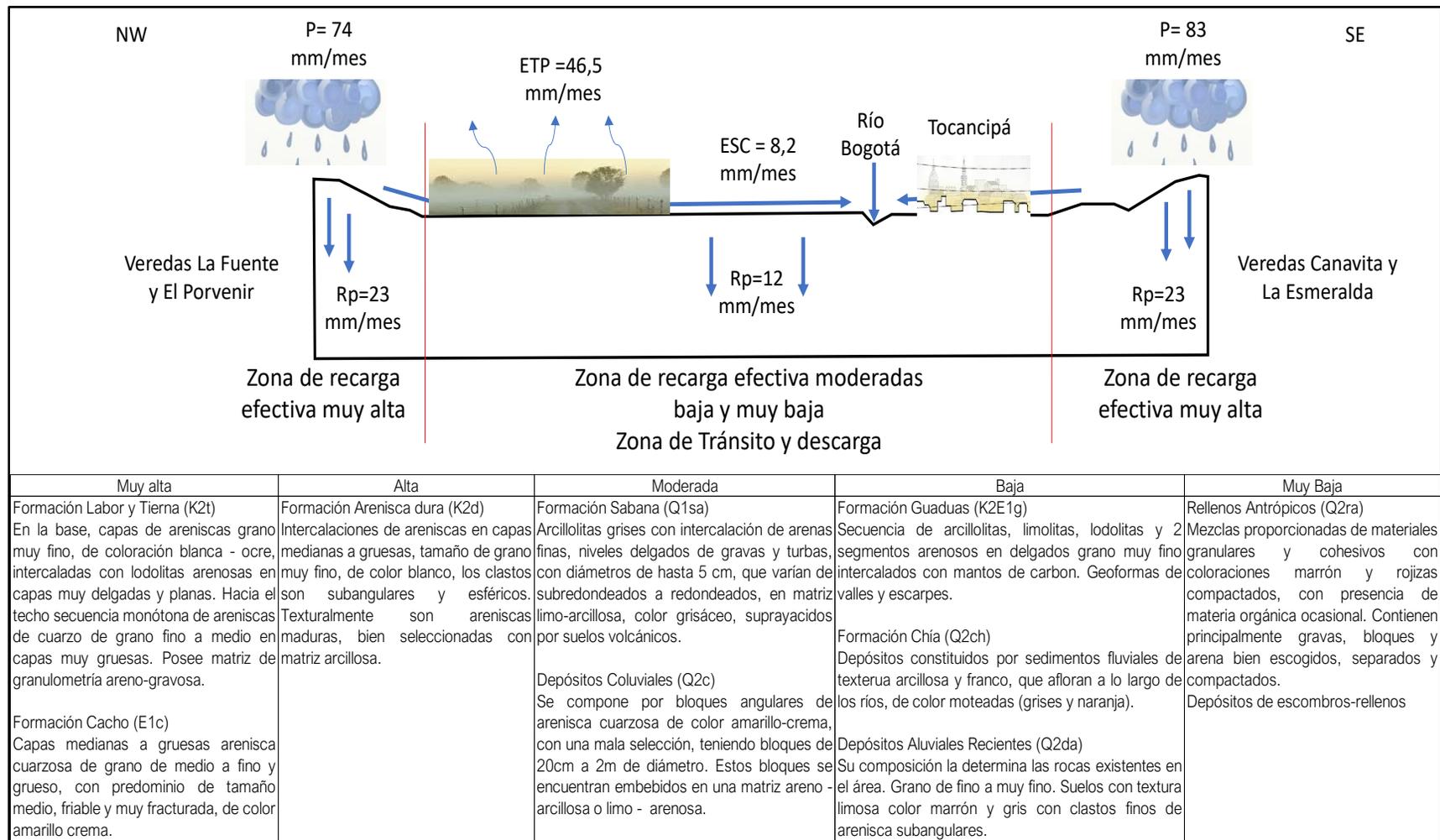
El análisis hidrológico identifica la zona de descarga de los flujos de quebradas y canales como afluentes que corren desde los cerros circundantes hacia el río Bogotá, sin que representen interés desde el punto de vista hidrogeológico. Los bajos valores de recarga potencial en la zona de la planicie de Tocancipá no evidencian conexión hidráulica entre las aguas superficiales y las subterráneas.

Es posible que en sectores urbanos o centros poblados exista algún aporte de aguas proveniente de roturas de las redes de acueducto y/o alcantarillado; sin embargo, estos flujos no fueron considerados por no hacer parte del alcance del estudio.

5.2.5 Modelo hidrológico

El modelo hidrológico identifica las zonas de recarga, tránsito y descarga efectiva a partir de la integración de los resultados obtenidos de parámetros hidroclimáticos y del análisis de las características geológicas y litológicas que favorecen la infiltración de agua superficial en profundidad.

A partir del balance hídrico se establecieron los valores de precipitación en las diferentes zonas. Las de mayor potencial son aquellas ubicadas hacia los cerros, mientras que hacia la planicie se presentan áreas con pendientes que favorecen la recarga los suelos son de textura fina, y se convierten en una especie de barrera natural para la infiltración en profundidad. La Figura 55, resume los valores calculados para el balance hídrico e insinúa el movimiento del agua superficial e insinúa las subterráneas. Igualmente se aprecian los valores de R_p que serán insumo en la elaboración del MHC.



P: Precipitación ETP: Evapotranspiración ESC: Escorrentía Rp: Recarga potencial

Figura 55. Esquema del modelo hidrológico.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.2.6 Síntesis de conclusiones

Los valores calculados de recarga potencial de acuíferos para Terrenos Artificializados de Centros Urbanos (TArCU) y Terrenos Agrícolas (TAg) presentan valores de $12,0\pm 0,9$ y $11,3\pm 4,1$ mm año⁻¹ respectivamente, y los Terrenos Artificializados del Polígono Minero (TArPM) y Bosques y Áreas Semi Naturales (BASN) alcanzan en conjunto una recarga potencial de $23,0\pm 8,6$ mm mes⁻¹.

Es en las áreas ubicadas hacia las partes altas, en los límites del Municipio, donde se registra la mayor precipitación, asociadas a los territorios artificializados de polígono minero (TArPM) y Bosques y áreas semi naturales (BASN) donde se localizan las rocas con granos tamaño arena o grava con buena porosidad primaria y secundaria, y además presentan condiciones de relieve, vegetación y uso de suelo propicios para para determinarlas como las zonas de mayor recarga efectiva de acuíferos.

Por las características litológicas y texturales de los suelos de Terrenos Agrícolas (TAg), sumado al pobre drenaje que éstos presentan, los valores de R_p sugieren que la ETPR que no existe conexión hidráulica de estos terrenos con acuíferos profundos, pues los cauces hacen parte de la zona de tránsito de las aguas superficiales desde el piedemonte hacia su efluente natural que es el río Bogotá. Situación que es más evidente en los Terrenos Artificializados de Centros Urbanos (TArCU) donde los suelos han sido compactados y/o cubiertos por infraestructura que actúan a manera de capas impermeables.

5.3 MODELO HIDRODINÁMICO

En el municipio de Tocancipá se diferencian dos rasgos morfológicos dominantes. El primero corresponde a un área de planicie compuesta por materiales no consolidados que configuran el valle aluvial del río Bogotá. El segundo es la región montañosa, constituida principalmente por rocas de edad cretácica y paleógena, que conforman los cerros circundantes a la planicie. Estos rasgos marcan de alguna manera la distribución de los puntos de captación de aguas subterráneas a través de pozos profundos.

Las unidades geológicas fueron evaluadas de acuerdo a sus parámetros hidráulicos y clasificadas con base a los lineamientos de nomenclatura propuestos por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos–IAH - (1983). Esta clasificación considera los parámetros de Transmisividad (T) y capacidad específica (CE) como factores determinantes en el comportamiento hidráulico de las rocas para almacenar y transmitir el agua subterránea.

El análisis de la evolución de niveles estáticos se llevó a cabo con base al registro histórico disponible de la red de monitoreo de CAR para el periodo comprendido entre los años 1998 y 2017. A partir del análisis de lecturas de nivel piezométrico tomadas en campo se determinó la superficie freática, el tipo de flujo, las zonas de recarga y tránsito de los acuíferos.

La caracterización hidrodinámica permitió evaluar el potencial para almacenar y transmitir agua de los sedimentos que constituyen los depósitos recientes, y de las rocas presentes en el área de estudio. Igualmente se pudo determinar el funcionamiento del sistema hidrogeológico respecto a las zonas de recarga, tránsito y descarga, y la productividad de los acuíferos en el municipio de Tocancipá.

Una vez realizada la caracterización hidrodinámica de los acuíferos se integró esta información con los resultados obtenidos en los componentes de geología e hidrología para generar el modelo 3D del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.

5.3.1 Inventario de puntos de agua

El inventario de pozos de CAR se reporta en la zona 219 pozos, de los cuales 95 están activos, 17 en reserva, 62 en abandono, obstruido o secos, 40 inexistentes o sellados y 5 sin categoría. Por otra parte, la alcaldía registra 22 manantiales, todos asociados a rocas de la Formación Arenisca Labor y Tierna que se ubican en la parte alta de los cerros orientales; sin embargo, estos cuerpos actualmente se encuentran abatidos.

Para esta investigación se tomó una muestra representativa de 42 puntos, de los cuales 29 hacen parte de la red de monitoreo de niveles piezométricos de CAR. La selección de los pozos restantes se realizó previa evaluación de la localización, de aspectos topográficos, geológicos y geomorfológicos de tal forma que se tuvo cubierta la mayor extensión del Municipio. El pozo AP-O-01 a pesar de no ser monitoreado se incluyó por la relevancia de la información que brindó en 930 m de perforación.

La ubicación de los pozos seleccionados se aprecia en la Figura 56 y en el Anexo F, se indica la localización junto con la respectiva unidad geológica de captación, aforo y nivel estático de pozos de agua subterránea en Tocancipá.

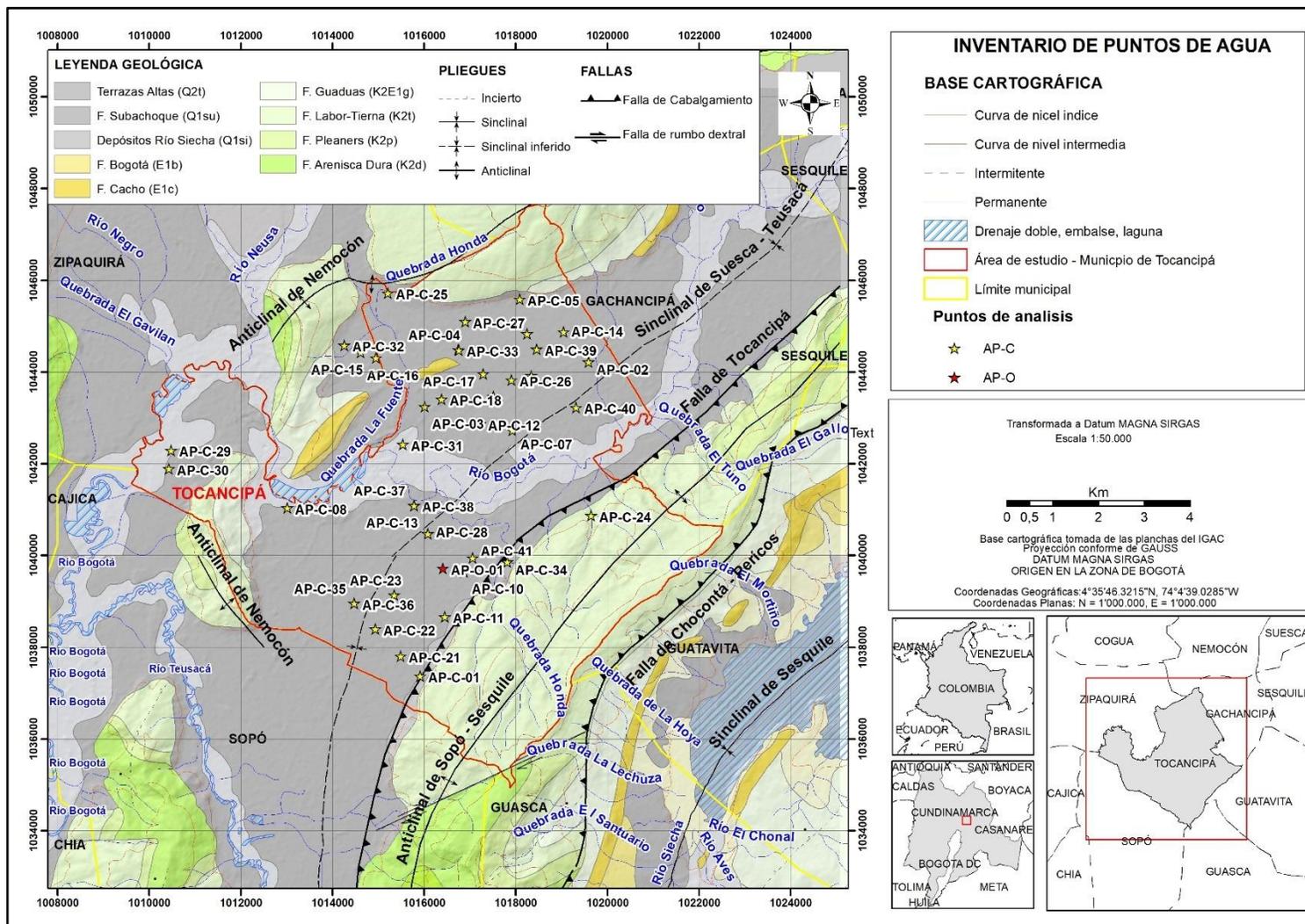


Figura 56. Localización de inventario de puntos de agua.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

El resultado obtenido sobre esta base indica que los pozos que captan agua de la Formación Sabana representan el 42,9% de los puntos y fueron perforados a una profundidad entre 30 m y 115 m. Los pozos perforados que captan agua de la Formación Cacho representan el 35,7% con profundidades entre 72 m y 270 m, y en la Formación Arenisca Labor y Tierna se registró el 16,7% de los pozos con profundidad de perforación entre de 81 m y 160 m. Finalmente, el 2,4% de los pozos fue perforado hasta alcanzar rocas de la Formación Arenisca Dura a una profundidad de 320 m.

La profundidad de perforación de los pozos representa una variable determinante para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

5.3.2 Parámetros hidráulicos

En la caracterización hidráulica de los acuíferos se recurre al análisis de parámetros como la Transmisividad (T), Capacidad específica (Ce) y Coeficiente de almacenamiento (S) por medio de los cuales se evalúa la facilidad con la que se mueve el agua dentro de la roca, la capacidad para descargar un caudal por unidad de abatimiento, y por la cantidad de agua que la roca puede liberar.

Los valores de referencia de los diferentes parámetros fueron tomados de la literatura técnica disponible y comparados con los obtenidos de pruebas de bombeo realizadas en pozos profundos. Esta información permitió clasificar las diferentes unidades hidrogeológicas presentes en el municipio de Tocancipá.

5.3.2.1 Transmisividad (T)

La Tabla 23, indica los rangos de este parámetro, los cuales fueron empleados para clasificar las unidades hidrogeológicas según su capacidad para transmitir y almacenar agua dentro de ella acorde con (Custodio y Llamas, 1983).

Tabla 23. Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Transmisividad.

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

Fuente: Tomado y modificado de Custodio y Llamas, 1983.

5.3.2.2 Capacidad Específica (CE)

Desde el punto de vista de la capacidad específica y de acuerdo a los lineamientos del Atlas hidrogeológico de Colombia de se clasifican en 3 tipos como se aprecia en la Tabla 24.

Tabla 24. Clasificación de unidades hidrogeológicas por su Capacidad Específica (CE).

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

Fuente: Tomado y modificado de SGC, 2016.

5.3.2.3 Comportamiento hidráulico

Según la clasificación de Asociación Internacional de Hidrogeólogos – IAH - (1983), se clasifican en acuíferos libres, semiconfinados y confinados en función de la presión ejercida al armazón del acuífero, al igual que a la expansión - compresibilidad del agua.

En un acuífero libre el coeficiente de almacenamiento coincide con la porosidad eficaz y alcanza valores entre 2,00E-02 y 6,00E-02, mientras que en los acuíferos semiconfinados y confinados el coeficiente de almacenamiento indica el volumen de agua liberada al disminuir la presión. El rango de valores en acuíferos semiconfinados es del orden entre 1,00E-03 y 5,00E-04, y en acuíferos confinados el coeficiente presenta valores entre 1,00E-04 y 5,00E-05.

5.3.3 Clasificación de acuíferos

De acuerdo a las características que presente una roca, esta puede ser clasificada hidrogeológicamente por la capacidad de transmitir y retener agua, por la interconexión de sus poros y por el comportamiento hidráulico según su posición estratigráfica.

Para establecer los parámetros hidráulicos de las diferentes unidades geológicas se recopiló información de 33 pruebas de bombeo realizadas dentro de cada pozo, lo que genera un alto grado de incertidumbre debido a que los pozos pueden captar aguas de diferentes acuíferos. De estas pruebas se obtuvo 33 registros de Capacidad Específica (CE), 30 de Transmisividad (T), 7 de Conductividad hidráulica (K) y 17 de Coeficiente de almacenamiento (S). En el Anexo G, se presentan los valores de los parámetros hidráulicos que registraron las unidades hidrogeológicas explotadas en los acuíferos del municipio de Tocancipá.

Los valores de CE, T y K de las Formaciones Plaeners y Dura fueron tomados de INGEOMINAS (1991). Los datos de K para la Formación Bogotá y Arenisca Labor y Tierna fueron tomados de Veloza (2004) y Bermoudes y Quiroz (2000) respectivamente. En cuanto a los valores de Porosidad efectiva (Pe) de las Formaciones Sabana y Cacho y se asumió el mismo valor de 9% reportado para la Formación Arenisca Labor y Tierna por Álvarez (1997). Para las demás Formaciones Bogotá y Guaduas se tomó el 5% como se indica en la Tabla 25.

Tabla 25. Parámetros Hidráulicos de las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.

Unidad geológica	CE ($l\ s^{-1}m^{-1}$)	T ($m^2\ día^{-1}$)	K ($m\ día^{-1}$)	S	Pe**** (%)
Q1sa	3,73E-01	3,04E+01	1,13E+00	2,97E-02	9,0
E1b	-	< 3,00E+00*	< 1,00E-03**	-	5,0
E1c	2,53E+00	4,72E+02	9,80E-01	5,05E-03	9,0
K2E1g	1,83E+00	2,76E+02	3,92E-04		5,0
K2t	7,70E+00	2,76E+01	3,00E-01 a 2,00E+00*	5,90E-03 a 2,50E-04***	9,0
K2p	5,00E-02 a 7,00E-02***	9,60E+00***	3,20E-01 ***	-	-
K2d	8,00E-02***	2,20E+01 a 3,560E+01***	8,00E-01***	-	-

*Dato tomado de Bermoudes y Quiroz, 2000 ** Dato tomado de Veloza, 2004

Dato tomado de INGEOMINAS-CAR, 1991 *Dato de Álvarez, 1997

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En la Tabla 26 se presenta la caracterización hidráulica de las diferentes unidades según su clase e interés hidrogeológico, definidas a partir de su capacidad para transmitir, almacenar y descargar el agua subterránea. La Formación Chía se considera un acuitardo por sus características litológicas conformado por arcillas de inundación, limos fluviales que conforman una cobertera delgada de limos fluviales. No se encontró registro de parámetros hidráulicos.

Los resultados de la Formación Sabana indican que es un acuitardo de libre a semiconfinado, de tipo local asociado a un depósito cuaternario constituido por niveles de arenas, gravas y bloques subredondeados a redondeados de arenisca, en matriz de textura franco arcillosa. La productividad varía de media a baja asociadas a porosidad y permeabilidad primarias, que permiten la interconexión hidráulica y el flujo de agua. Por su variabilidad, tanto lateral, en espesor y composición, es considerada de moderada importancia hidrogeológica.

La Formación Bogotá se clasifica como un acuitardo de extensión regional, con predominio de niveles arcillosos y arcillo limosos no aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, aunque bajo condiciones especiales pueden permitir la recarga vertical hacia acuíferos más profundos. Por otra parte, la Formación Cacho presenta valores que sugieren un acuífero semiconfinado a confinado de extensión local, compuesto principalmente por arenisca cuarzosa. La productividad de este acuífero se considera de media a alta debido a que presenta porosidad secundaria producto del fracturamiento intenso llegando a aportar caudales hasta de $20\ l\ s^{-1}$.

La Formación Guaduas es un acuitardo continuo de extensión regional y discontinuo, conformado por niveles de arcillolitas con intercalaciones de areniscas y mantos de carbón. Los niveles arenosos corresponden a un acuífero confinado de bajo rendimiento. Los registros de los parámetros indicados en la Tabla 25 corresponden al pozo AP-O-01 y sugieren aportes de agua provenientes de niveles arenosos de la Formación Cacho.

La Formación Arenisca Labor y Tierna se considera un acuífero confinado de flujo regional que se localiza bajo los depósitos de la Formación Guaduas. En los cerros circundantes donde aflora se comporta como acuífero libre. La alta productividad se debe a que está compuesto por areniscas con porosidad primaria y secundaria, producto del fracturamiento. Se considera de alta importancia hidrogeológica.

Tabla 26. Caracterización de unidades hidrogeológicas en el municipio de Tocancipá.

Unidad Hidrogeológica		Unidad Geológica		Por su Trasmisividad		Por su capacidad de almacenamiento		Por su Capacidad Específica		
Clase	Interés	Nombre	Símbolo	Tipo	T (m ² día ⁻¹)	Tipo	S	Descripción	CE (l s ⁻¹ m ⁻¹)	
A3	Moderado a bajo, de extensión local a regional	Formación Sabana	Q1sa	Libre a semiconfinado	3,04E+01	Acuitardo	2,97E-02	Niveles de arcillas lacustres, intercalaciones de niveles arenosos saturados, sin continuidad lateral.	3,73E-01	
A4	Bajo, de extensión local a regional	Rellenos Antrópicos	Q2ra	No aplica			Sin Registro	Sin Registro	Generalmente son materiales de excavación, escombros, materiales de relleno ingenieriles, sin continuidad lateral ni espesor definido.	Sin Registro
		Coluviones	Q2c	Libre	Sin registro				Conglomerados mal seleccionados y bloques de rocas redondeadas a subredondeadas hasta 2 m de diámetro. Son depósitos discontinuos.	
		Formación Chía	Q2ch				Acuitardo a Acuicludo		Conformado por arcillas de inundación, limos fluviales, con espesores delgados.	
		Formación Bogotá	E1b	semiconfinado	< 3,00E+00	Acuitardo	Arcillolitas abigarradas, primordialmente color rojizas, intercalaciones de areniscas color verdosas friables de grano fino que gradan a limolitas y arcillolitas limosas.			

Unidad Hidrogeológica		Unidad Geológica		Por su Trasmisividad		Por su capacidad de almacenamiento		Por su Capacidad Específica	
Clase	Interés	Nombre	Símbolo	Tipo	T (m ² día ⁻¹)	Tipo	S	Descripción	CE (l s ⁻¹ m ⁻¹)
B1	Moderado a alto, de extensión regional	Formación Cacho	E1c	Confinado a semiconfinado	4,72E+02	Acuífero con porosidad secundaria	5,05E-03	Conformado por areniscas grano fino a grueso. Color pardo, blanco y rosado, friables. Estratificación cruzada hacia la base de la unidad. Presentan intercalaciones delgadas a medias de arcillas abigarradas.	2,53E+00
	Alto, de extensión regional	Formación Labor y Tierna	K2t	Libre y Confinado	2,76E+01	Acuífero con porosidad primaria y secundaria	5,90E-03 a 2,50E-04	Conformado por areniscas blancas y pardo amarillentas, cuarzosas, friables, intercalaciones de capas delgadas de arcillolitas y limolitas.	7,70E+00
		Formación Arenisca Dura	K2d		2,20E+01 a 3,560E+01		Restringido a zonas fracturadas. Sucesión de de areniscas grises, lutitas y arcillolitas.	8,00E-02	
B2	Bajo, de extensión regional	Formación Guaduas	K2p1g	Confinado	2,76E+02	Acuífero en niveles arenosos con porosidad primaria	-	Discontinuo, conformado por niveles de arcillolitas con intercalaciones de areniscas y mantos de carbón.	1,83E+00
		Formación Plaeners	K2p	Confinado a semiconfinado	9,60E+00	Acuífero por porosidad secundaria		Sucesión de arcillolitas, limolitas silíceas y liditas, con fracturamiento.	5,00E-02 a 7,00E-02

Nomenclatura propuesta por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos-IAH - (1983)

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La Formación Plaeners es considerada un acuífero confinado a semiconfinado, de extensión local, conformado por la sucesión de arcillolitas limolitas silíceas y liditas supeditado a la densidad del fracturamiento, de baja productividad. Finalmente, la Formación Arenisca Dura, es un acuífero libre, confinado o semiconfinado según su localización, discontinuo de extensión regional. Está compuesto por una sucesión de bancos gruesos de areniscas grises, lutitas y limolitas. De moderada a alta productividad debido a que está restringido a zonas donde se encuentre fracturado.

5.3.4 Piezometría

La toma de niveles piezométricos se realizó mediante el método directo de campo con sonda eléctrica, entre diciembre de 2020 y marzo de 2021. En total se monitorearon 30 pozos, de los cuales 13 captan agua de la Formación Sabana, 13 de la Formación Cacho y 4 de la Formación Arenisca Labor y Tierna como se indica en el Anexo F.

La lectura se llevó a cabo previo sellamiento del pozo por 24 horas con el fin de tomar lecturas de nivel estático de los acuíferos. Las cotas de referencia fueron tomadas al borde de pozo sobre placa de concreto o terreno natural, con GPS marca Garmin e-Trex-10. A la lectura de la sonda se descontó la altura del tubo piezométrico para calcular la cota del agua referida al nivel del mar. Ver Figura 57.



Figura 57. Monitoreo de nivel piezométrico. (E:1018340 N:1043930).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

El nivel estático promedio medido en la Formación Sabana fue de 21,79 m. Para los pozos monitoreados de la Formación Cacho el nivel promedio fue 29,93 m, y en los pozos perforados que captan agua de la Formación Arenisca Labor y Tierna se presenta el promedio más bajo con 16,1 m lo que se explica por la cercanía a las zonas de recarga.

Para el análisis de la evolución del nivel piezométrico de los diferentes acuíferos monitoreados se acudió a la base de registros históricos disponibles entre los años 1998 y 2017, como se muestra en la Figura 58, 59 y 60. El comportamiento del nivel piezométrico hasta el 2017 en las unidades de las Formaciones Sabana y Cacho refleja cierta estabilidad con variaciones inferiores a 10 m, aunque los registros de los pozos AP-C-18 y AP-C-08 se apartan respecto a la tendencia general. El estado de equilibrio se interpreta como la capacidad que tienen los acuíferos para recuperar su nivel durante los periodos de lluvias o por recargas provenientes de flujos profundos.

Las lecturas de nivel tomadas al final de 2020 y comienzo de 2021 sugieren un descenso piezométrico en todos los acuíferos respecto al promedio histórico. En la Figura 58, los registros de pozos que

presentan mayor variación en la Formación Sabana son el AP-C-02 y AP-C-09 con valores de -9,10 m y -10,71 m respectivamente. El descenso general de la unidad se calculó en -5,55 m. En la Formación Cacho es mayor la tendencia al descenso del nivel piezométrico. Los pozos AP-C-06, AP-C-14 y AP-C-19 registran diferencias de -13,37 m, -18,36 m y -20,13 m respectivamente, comparadas con el promedio histórico tal como se aprecia en la Figura 59.

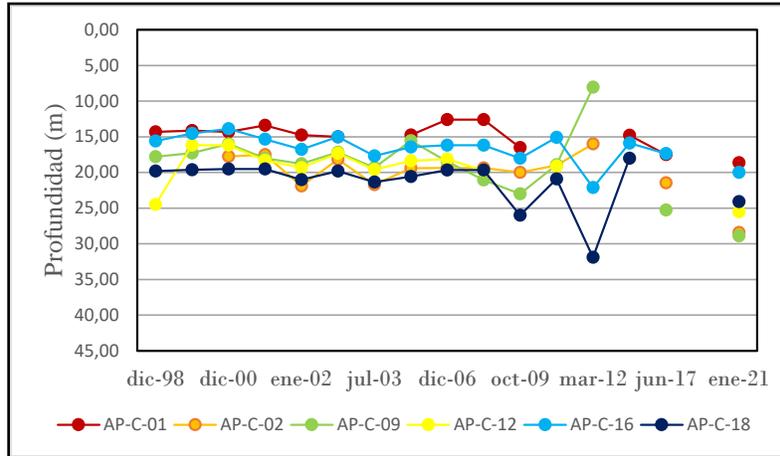


Figura 58. Evolución de nivel piezométrico de la Formación Sabana.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

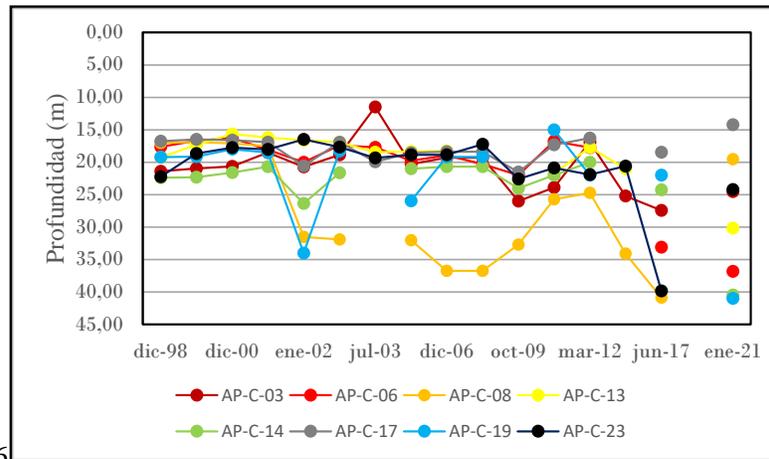


Figura 59. Evolución de nivel piezométrico de la Formación Cacho.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

De la Formación Arenisca Labor y Tierna se obtuvo información en 3 pozos de los años 2017 y 2021, y sólo el pozo AP-C-05 cuenta con registros históricos que indican una evolución del nivel piezométrico similar a la presentada en los otros acuíferos. (Ver Figura 60). La tendencia del nivel de este pozo es descendente, y la variación se estima en -6,29 m respecto al promedio histórico a pesar de que se localiza en el piedemonte donde la recarga es inmediata. Para los pozos AP-C-27 y AP-C-29 la variación puntual es de -3,45 m debido a que están más retirados del piedemonte. En puntos el nivel se recupera con mayor rapidez por recargas de flujos regionales provenientes desde fuera del área de estudio.

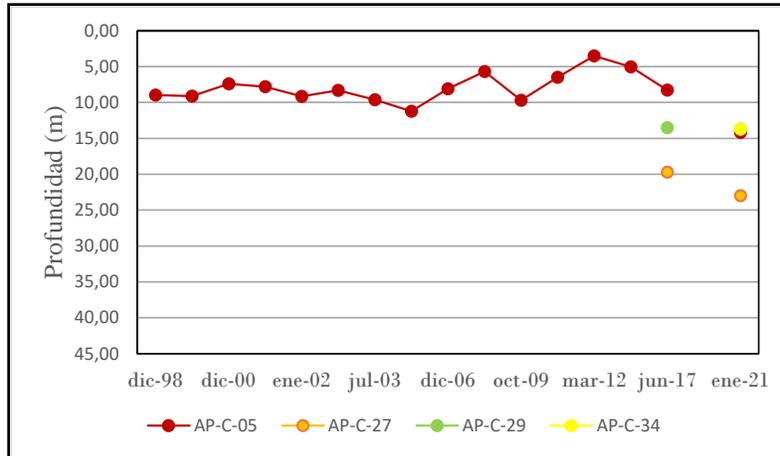


Figura 60. Evolución de nivel piezométrico de la Formación Arenisca Labor y Tierna.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

El abatimiento de los manantiales localizados en las partes altas de la Formación está asociado directamente con la actividad extractiva de materiales de construcción que modifica las características de la roca, del suelo, pendiente y cobertura vegetal que conforman la zona de recarga.

5.3.5 Líneas de flujo

De manera general, el origen de una línea de flujo se tiene en los sectores topográficamente más altos donde se localizan zonas de recarga, y se dirigen a sectores más bajos donde se localizan zonas de descarga. Estas líneas no dependen de la topografía, por tanto, la variación lateral puede generar sistemas locales que de alcanzar el límite basal entran a formar parte de un sistema regional como se muestra en la Figura 61, (Tóth, 1963).

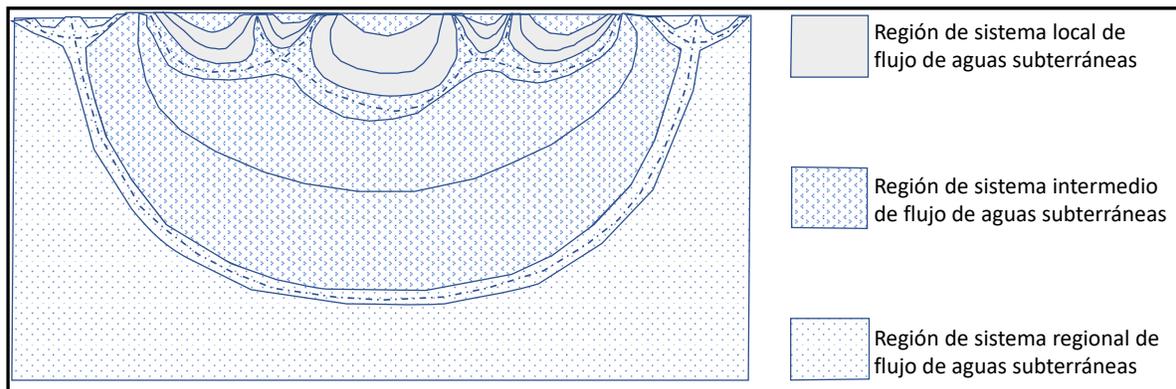


Figura 61. Sistema local, intermedio y regional de flujo de agua subterránea.
Fuente: Tóth, 1963.

Se considera un flujo de tipo local si el agua que entra en el sistema puede ser descargada en una parte topográficamente más baja y muy cerca, en tanto si la línea de flujo es transmitida fuera del área se considera un flujo regional. En este trabajo se consideró como líneas de flujo intermedio aquellas que presentan un corto recorrido cuya descargar se lleva a cabo fuera del área de estudio.

Los datos obtenidos de los niveles piezométricos para cada unidad geológica fueron procesados empleando la herramienta de interpolación Kriging del software ArcGis e integrado al programa especializado Surfer. Como resultado se obtuvo un mapa donde se aprecian curvas con el mismo nivel

de presión del agua subterránea, denominadas Isopiezas. Con esta distribución espacial se determinó la dirección del agua e identificó un sistema de flujo intermedio que converge desde los flancos del SS-Tsc hacia su eje para integrarse a un sistema de flujo regional.

5.3.5.1 Acuífero Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t)

La Figura 62, sugiere una estructura definida, sin embargo, la interpretación obedece a la escasa información obtenida para esta unidad geológica, por tanto, sujeta a discusión. Las Isopiezas marcan una zona con flujo regional insinuando el mismo sentido del eje del sinclinal de Suesca -Teusacá con dirección NE-SW y flujo regional con un gradiente inferior al 10%.

Los valores más altos de las líneas equipotenciales de la Formación se encuentran por encima de los niveles estáticos de los acuíferos más superficiales. Hacia los flancos del sinclinal superan la línea 2570 msnm lo que ratifica el carácter confinado de alto interés hidrogeológico de esta unidad. Hacia el sur del Municipio, en límites con Sopó, donde el sinclinal se estrecha, se aprecia una tendencia a la concentración próxima a la línea 2566 msnm que se asocia a una zona de tránsito afectada por la convergencia de la falla de rumbo perpendicular al eje de la estructura y la falla de Tocancipá, para finalmente integrarse a un flujo regional fuera del área de estudio.

Al evaluar los datos potenciométricos de los pozos AP-C-05 y AP-C-34 ubicados en los flancos del sinclinal se prevé que los pozos perforados en la planicie de Tocancipá serán de tipo saltante con un nivel de surgencia aproximado de 10,0 m producido por la descompresión del acuífero.

5.3.5.2 Acuífero Formación Cacho (E1c)

La distribución espacial de las isolíneas de la Figura 63, señalan flujos de tipo intermedio, originados en el flanco occidental del sinclinal y en el sector de la falla de Tocancipá. También se aprecian flujos de tipo regional provenientes del NE que confluyen próximos al centroide del área del Municipio, donde se encuentran los pozos el AP-C-13 y AP-C38, para continuar con dirección al municipio de Sopó.

Al tomar como referencia la línea potenciométrica más baja en esta Formación, 2546,3 msnm, se evidencia el carácter confinado a semiconfinado de esta unidad dado que este valor está ligeramente por debajo de la cota promedio del terreno en ese sector que es 2557 msnm.

Las isolíneas dibujan de cierta manera la geometría espacial de la estructura en profundidad, con una estructura menos deformada hacia el norte, y una artesa más cerrada al sur deformada por fuerzas compresivas. El gradiente de la unidad hidrogeológica es 0,21% con dirección NE-SW que ocasiona flujos de tránsito lento que favorece las condiciones para la captación de agua subterránea.

5.3.5.3 Acuífero Formación Sabana (Q1sa)

La Figura 64, indica el movimiento general del agua desde los flancos del SS-Tsc hacia su eje para confluir al norte del Municipio próximo al pozo AP-C-40. A partir de allí toma una dirección regional con sentido SW-NE. Esta situación permitió clasificar el flujo como local debido a que los recorridos de las líneas son relativamente cortos y sin evidencia de conexión hidráulica entre los sistemas río - acuífero, por lo que se infiere que la zona de descarga se encuentra fuera del área de estudio.

El gradiente calculado es de 0,19%, obtenido de la relación de diferencia de nivel de 18 m en 9 km de longitud dentro del área del municipio de Tocancipá marcando una zona de flujos lentos que favorece el almacenamiento del agua subterránea en los materiales del depósito no consolidado.

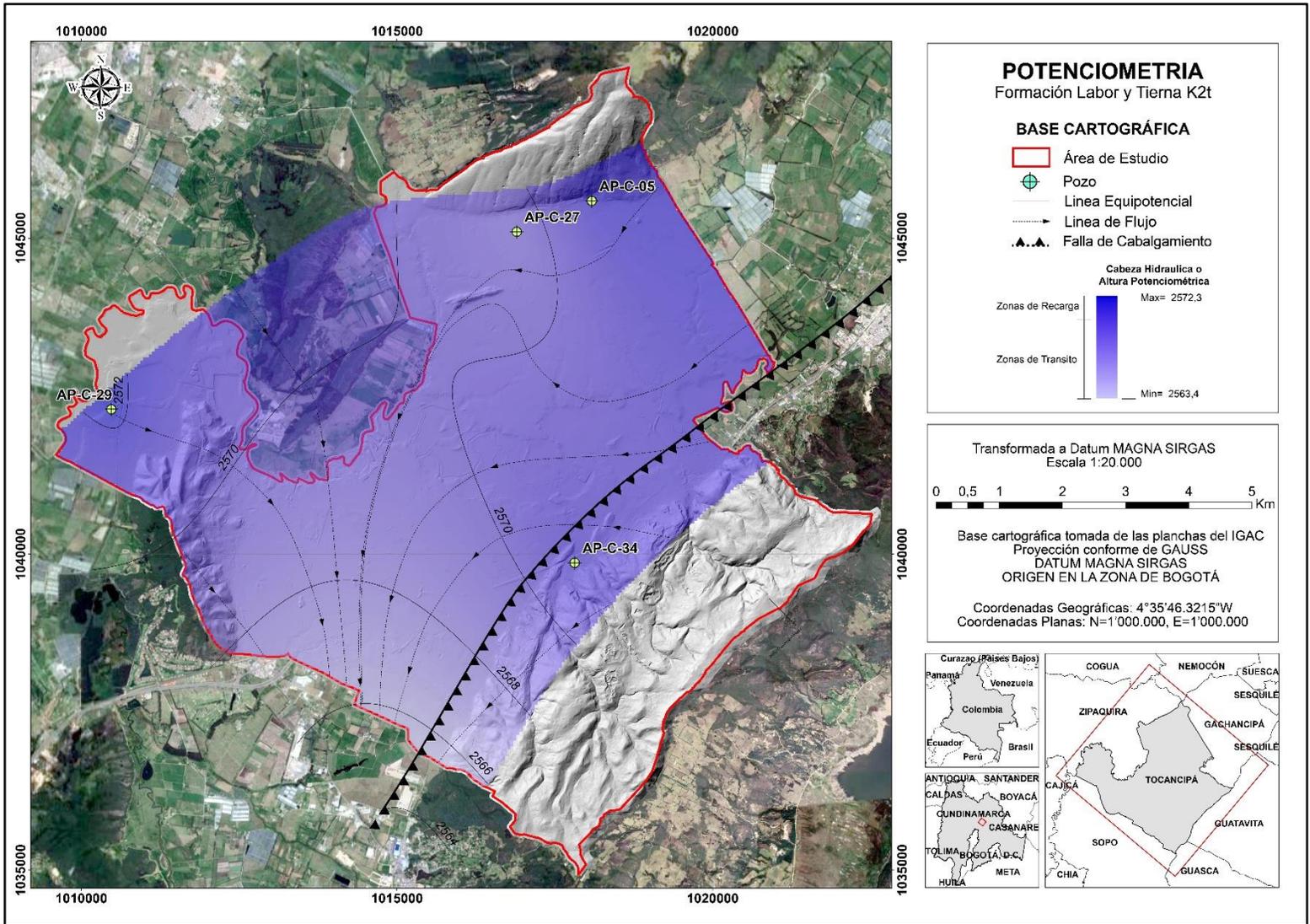


Figura 62. Mapa de Isopiezas Acuífero de la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

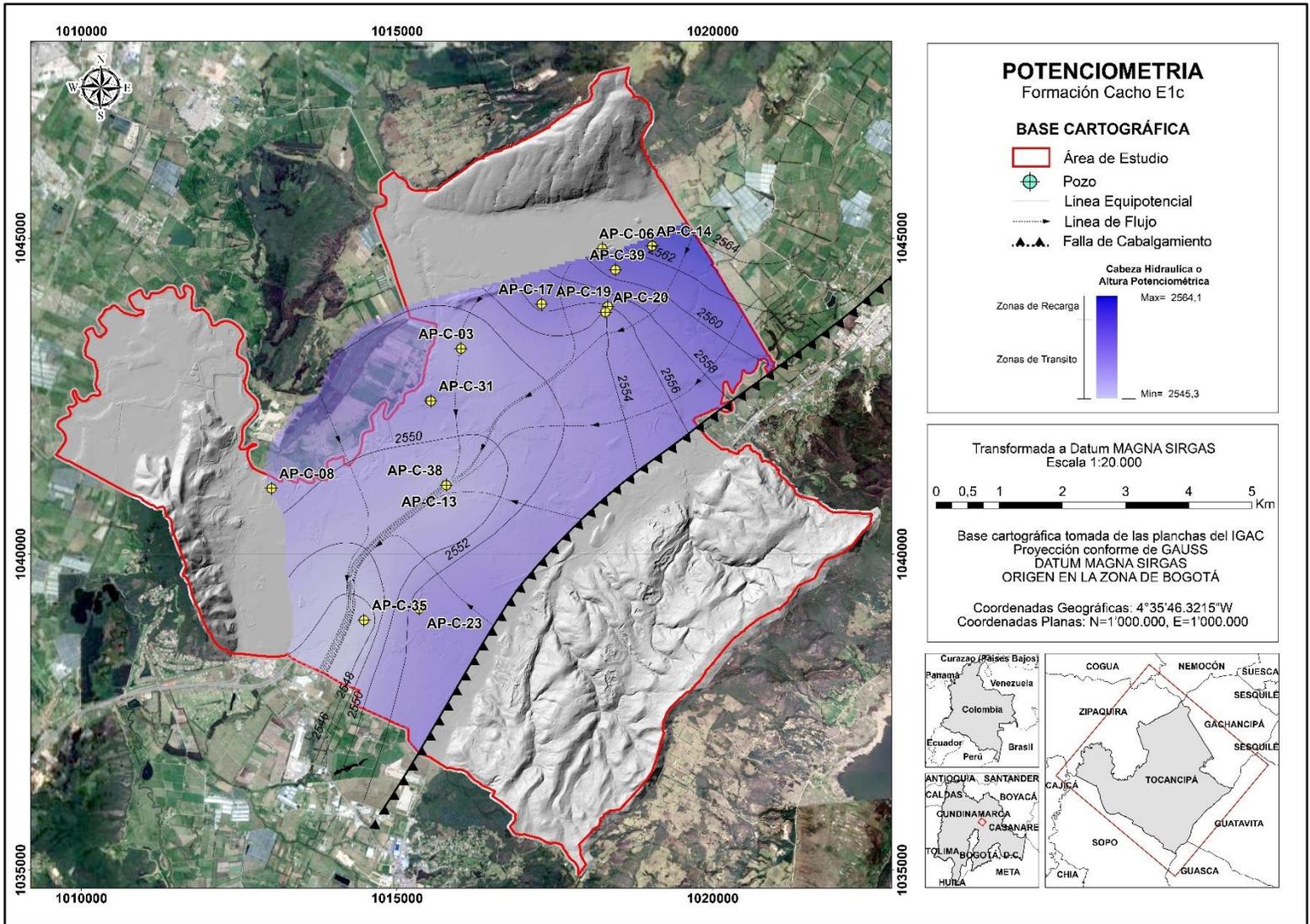


Figura 63. Mapa de Isopiezias Acuífero de la Formación Cacho (E1c).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

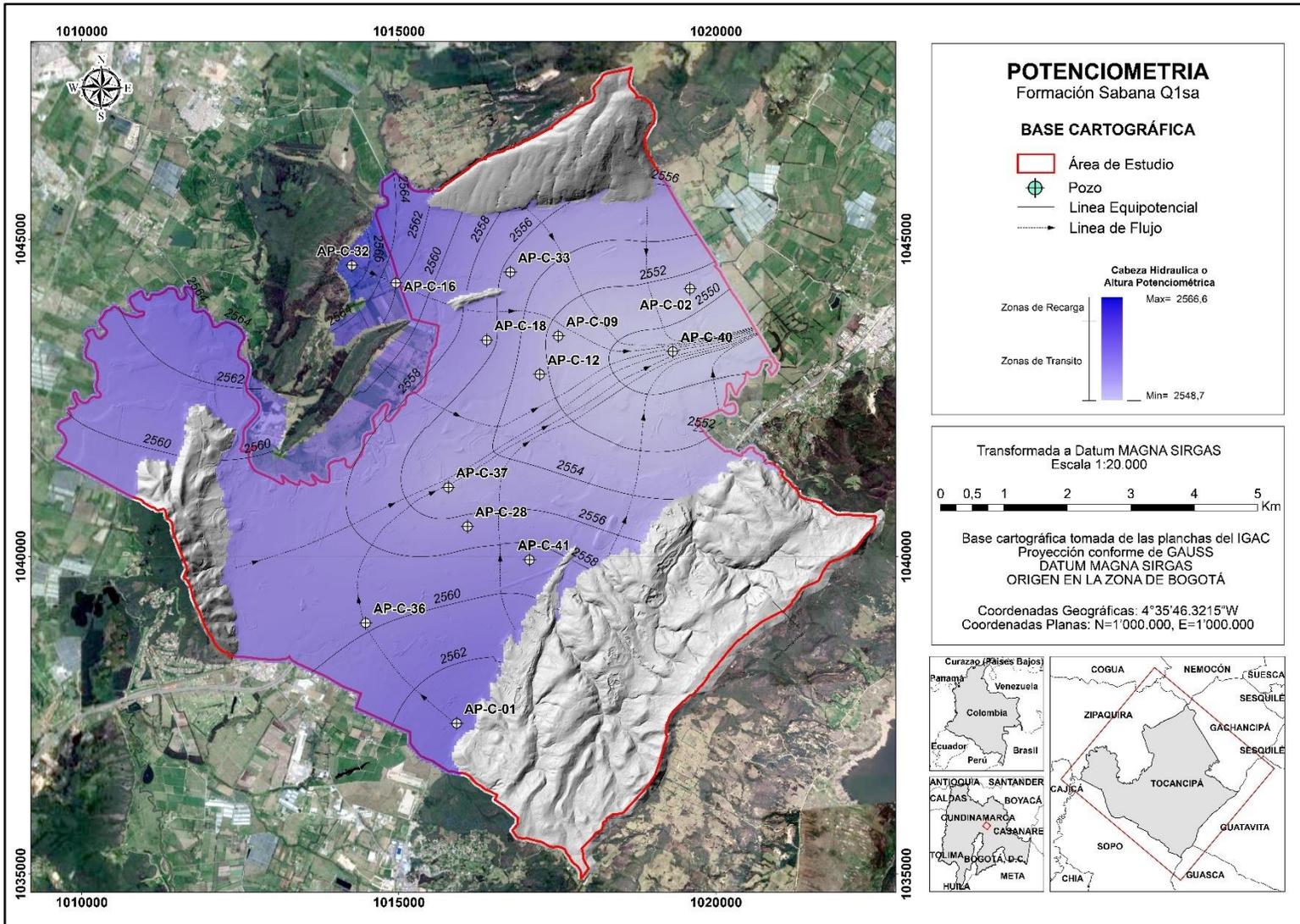


Figura 64. Mapa de Isopiezas Acuífero de la Formación Sabana (Q1sa).
Fuente: Elaboración propia, 2021. Zonas de recarga y tránsito

5.3.6 Zonas de recarga y tránsito

Las isolíneas definidas permitieron identificar las zonas de recarga y tránsito para cada unidad hidrogeológica, mientras que la zona de descarga evidentemente está fuera del área de estudio. En la Figura 62, 63 y 64 se diferencian estas zonas según la escala de colores, donde los tonos oscuros representan áreas de mayor potencial de recarga y áreas con tonos más claros las zonas de tránsito.

La planicie del municipio de Tocancipá reviste especial interés hidrogeológico debido a que allí se localizan acuíferos profundos con alto potencial hídrico aprovechable. De igual manera, en los cerros que rodean la planicie se encuentran zonas con excelentes condiciones geológicas y climáticas para la recarga de los acuíferos en profundidad. Estas zonas de recarga se extienden más allá de los límites del Municipio.

5.3.6.1 Zona de Recarga y tránsito del acuífero Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t).

La recarga del acuífero de la Formación Arenisca Labor y Tierna se origina por la percolación de agua lluvia sobre los cerros donde aflora esta unidad. Además, factores como el fracturamiento, la posición estructural de sus flancos y principalmente por las características hidráulicas de porosidad conductividad y transmisividad permiten que esta unidad sea de alto interés hidrogeológico. Al sur del Municipio se evidencia que la Falla de Tocancipá asociada a la convergencia con la falla de rumbo produce un efecto que reduce la recarga en este sector. Ver Figura 62.

Es importante resaltar que la actividad antrópica de explotación de canteras, realizada principalmente en el eje del anticlinal de Tocancipá, provoca una alteración de las características geo hidráulicas de esta unidad afectando la recarga del acuífero. Igualmente, en aquellos sectores donde la cobertura vegetal no existe, o se ha disminuido, se originan procesos químicos que transforman los feldespatos superficiales de la roca en arcillas formando costras que impiden la recarga hacia niveles más profundos.

5.3.6.2 Zona de Recarga y tránsito del acuífero Formación Cacho (E1c)

La Figura 63, muestra que en el sector donde aflora la Formación la recarga es menor debido a que la roca está poco fracturada y su porosidad primaria reduce la velocidad de infiltración por el grado de cementación intergranular propio de ella.

Al sur del afloramiento, próximos al AP-C-08, la recarga tiende a ser menor por el confinamiento que le provoca la Formación Bogotá. Esta situación contrasta con la registrada en los pozos AP-C-06, AP-C-14 y AP-C-39, ubicados en la vereda El Porvenir, donde la Formación Cacho posiblemente estableció conexión hidráulica con el acuífero de la Formación Sabana en contacto discordante debido a erosión de la capa impermeable de la Formación Sabana. Además, el grado de fracturamiento en profundidad puede ser mayor y por tanto la porosidad secundaria se ha incrementado.

El área contigua a la Falla de Tocancipá marca una zona de recarga del acuífero a través de ella con flujos provenientes de la Formación Arenisca Labor y Tierna. Finalmente se considera una recarga de flujos desde el sector NE que corren de manera más o menos paralela al eje de la estructura geológica, por lo que a nivel regional se puede considerar que el sector de Tocancipá es una zona de tránsito para flujos de agua subterránea con dirección hacia el SW.

5.3.6.3 Zona de Recarga y tránsito del acuífero Formación Sabana (Q1sa)

El acuífero de la Formación Sabana presenta una recarga asociada a la precipitación sobre la planicie del río Bogotá donde el agua se infiltra verticalmente a través de los sedimentos no consolidados

hasta los niveles de arenas y gravas con características hidráulicas propicias para el almacenamiento y tránsito del agua subterránea (Ver Figura 64). A pesar que la Formación presenta variación lateral en la litológica de los materiales se aprecia la tendencia del movimiento en sentido contrario al flujo del río Bogotá, como evidencia de la desconexión hidráulica entre estos dos sistemas a la altura de Tocancipá. El comportamiento dinámico indica que la descarga de este acuífero se presente en algún sector ubicado más al norte posiblemente con el río Bogotá como efluente.

5.3.7 Zonas y volumen de descarga

Por definición, las zonas de descarga naturales están asociadas a manantiales, corrientes de aguas superficiales y sistemas lénticos, mientras que las descargas artificiales están relacionadas con el corte de la superficie freática por intervención antrópica mediante el bombeo de pozos, aljibes o excavaciones. En el municipio de Tocancipá la descarga natural de las 3 unidades hidrogeológicas se encuentra fuera de sus límites administrativos, y la principal forma de descarga de acuíferos es de tipo artificial constituido por el bombeo de pozos profundos con fines de abastecimiento para consumo humano, doméstico, agrícola y pecuario. En el Anexo H, se relaciona el caudal concesionado a 45 usuarios en el municipio de Tocancipá, con un volumen total de agua subterránea de 366.867 m³ mes⁻¹.

La muestra aleatoria incluyó 20 pozos que captan agua de la Formación Sabana, 15 de la Formación Cacho, 1 de la Formación Guaduas y 9 de la Formación Arenisca Labor y Tierna. Al considerar que esta representa el 47% del total de pozos activos, y que sólo el pozo AP-O-01 capta de la Formación Guaduas, el volumen de descarga proyectado sobre el 100 % de los acuíferos del SS-Tsc estará del orden de 634.670 m³ mes⁻¹.

Si bien, la Tabla 27 indica que el acuífero de la Formación Cacho aporta el 50 % del volumen de agua explotada este registro es mayor debido a que el pozo AP-O-01 también capta agua de esta Formación. En el mismo sentido la descarga del acuífero de la Formación Sabana puede ser mayor si se considera que algunos pozos asignados a la Formación Cacho captan de esta unidad. Aún, ante la incertidumbre de los diseños reales de los pozos, la Formación Cacho se exhibe como el acuífero con mayor relevancia en la zona.

Tabla 27. Volumen estimado de descarga artificial en el municipio de Tocancipá.

Unidad geológica	Q1sa	E1c	K2E1g	K2t	Total
Caudal sobre muestra de 45 pozos (m ³ mes ⁻¹)	29.004	146.683	136.080	55.100	366.867
Proyección sobre el 100% de pozos (m ³ mes ⁻¹)	62.626	316.702	136.080	118.966	634.670
Aporte (%)	10	50	20	20	100

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.3.8 Dominio geológico y condiciones de frontera

5.3.8.1 Dominio de unidades geológicas

En el dominio del modelo se identificó las 8 unidades geológicas presentes en el área así: Depósitos del Cuaternario de la Formación Chía (Q2ch), Formación Sabana (Q1sa), Formación Bogotá (E1b), Formación Cacho (E1c), Formación Guaduas (K2e1g), Formación Arenisca Labor Tierna (K2t),

Formación Plaeners (K2p) y Formación Arenisca Dura (K2d). La Formación Chía carece de información de parámetros hidráulicos, por lo que en este trabajo se sugieren los valores de Transmisividad reportados para la Formación Bogotá.

5.3.8.2 Condiciones de frontera del modelo

Las condiciones de frontera fueron definidas para un estado estacionario de los acuíferos con las cuales se plantea el modelo hidrodinámico del SS-Tsc. Se proponen 3 condiciones que corresponden a flujos de recarga, de nivel fijo y condiciones de no flujo, como se aprecian en la Tabla 28.

La condición de Flujo de Recarga está asociada a las zonas de pendiente, donde afloran rocas de la Formación Arenisca Labor y Tierna y Formación Cacho. Esta condición está determinada por la recarga natural proveniente de la precipitación de agua lluvia obtenida en el modelo hidrológico. De manera similar, la condición de frontera de Nivel Fijo está relacionada con los niveles piezométricos obtenidos del monitoreo de pozos de agua profunda. Considerando que el menor valor observado en las 3 unidades geológicas corresponde a 2546,8 msnm se propone este valor para todo el modelo como carga hidráulica constante.

Finalmente, la condición de No Flujo corresponde al límite inferior del modelo. El basamento se puede asumir como el conjunto de rocas de las Formaciones Plaeners y Arenisca Dura cuya permeabilidad depende esencialmente del grado de fracturamiento.

Tabla 28. Condiciones de frontera SS-Tsc.

Condición de frontera	Dominio geológico	Ubicación	Unidad	Precipitación mínima	Precipitación máxima
Flujo Recarga	E1c – K2t	Flanco Oriental	mm año ⁻¹	43,1	96,7
		Flanco Occidental	mm año ⁻¹	40,9	92,1
Nivel Fijo	Todas las unidades geológicas	Planicie con carga hidráulica constante	msnm	2546.8	
No Flujo	K2p-K2d	Basamento		-	-

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Las fallas indicadas en el modelo geológico representan una condición especial de alta conductividad en la recarga de los acuíferos, sin embargo, al estar planteadas al interior de la estructura no es necesario considerarlas como una condición de frontera.

El modelo por ser de tipo analítico considera que las zonas de recarga se encuentran localizadas en los cerros circundantes y en la planicie aluvial, exceptuando las áreas de afloramiento de la Formación Guaduas en el piedemonte que actúan como capas impermeables superficialmente. Hacia el centro del área se propone como capas impermeables los depósitos de la Formación Chía y los Rellenos Antrópicos (cascos urbanos, vías, canales) que dirigen el agua captada hacia el sistema de alcantarillado. Es posible que exista algún tipo de infiltración por daños en esta infraestructura, pero dado el alcance de este trabajo no se consideró esta condición.

La descarga de flujos superficiales está asociada únicamente a los cursos de agua que a través de quebradas y canales fluyen hacia el río Bogotá, mientras que las descargas del agua subterránea sólo se evidencian en la extracción por bombeo de pozos profundos, pues los acuíferos presentes en el área hacen parte de la zona de tránsito a lo largo de la estructura sinclinal.

5.3.9 Reservas hidrogeológicas

La integración de los parámetros hidráulicos, establecidos en el numeral 5.3.2, con el dominio de las unidades hidrogeológicas y las condiciones de frontera permitió calcular las reservas del recurso hídrico subterráneo de los acuíferos explotados en el municipio de Tocancipá, siendo definidas como reservas Estáticas (Q estáticas), Dinámicas (Q dinámicas) y Explotables (Q T).

5.3.9.1 Consideraciones previas

Los cálculos fueron realizados teniendo en cuenta el carácter libre de la Formación Sabana, y se asumió como acuíferos confinados las Formaciones Cacho y Arenisca Labor y Tierna aplicando las ecuaciones de Custodio y Llamas (1983) para cada caso como se muestra en la Tabla 29.

Tabla 29. Cálculo de Reservas explotables por tipo de acuífero.

Acuífero Libre	Acuífero confinado
$Q_{Dinámicas} = R * A$	$Q_{Dinámicas} = A * S * H$
$Q_{Estáticas} = A * P_e * e_s$	$Q_{Estáticas} = A * P_e * e$
$Q_T = Q_{Dinámicas} * K_1 + Q_{Estáticas} * K_2$	
Donde: $R = \text{Recarga anual (ma}^{-1}\text{)}$ $A = \text{Area de la unidd (m}^2\text{)}$ $P_e = \text{Porosidad efectiva}$ $e_s = \text{Espesor saturado (m)}$ $Q_T = \text{Reserva Explotable (m}^3\text{a}^{-1}\text{)}$	Donde: $A = \text{Area superficial de la unidd (m}^2\text{)}$ $S = \text{Coeficiente de Almacenamiento}$ $H = \text{Diferencia de nivel piezométrico y el techo del acuífero (m)}$ $P_e = \text{Porosidad efectiva}$ $e = \text{Espesor geológico (m)}$ $Q_T = \text{Reserva Explotable (m}^3\text{)}$

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Del componente hidrológico se tomaron los registros de infiltración para estimar la recarga anual en el acuífero libre, y no se consideró recarga por infiltración vertical en los acuíferos confinados. El área de los acuíferos confinados se obtuvo de la representación espacial realizada en el componente geológico geofísico empleando la herramienta de cálculo de áreas del software ArcGis. Los acuitardos fueron excluidas del cálculo dado el bajo interés hidrogeológico.

Los valores de porosidad efectiva y coeficiente de almacenamiento fueron tomados para cada unidad geológica según lo indicado en la Tabla 25.

El espesor saturado del acuífero libre y el calculó como el diferencial de altura entre el nivel estático promedio de la Formación Sabana respecto a la profundidad promedio a la que se encuentra el tope superior de la Formación Bogotá. Para obtener el abatimiento disponible de los acuíferos confinados se calculó a partir de la diferencia entre el promedio del nivel estático y el techo de la unidad acuífera evaluada. El espesor geológico para los acuíferos confinados se estimó con base al promedio establecido en la caracterización geológica. Como consideración final se asumió el 100% de la utilización de los recursos dinámicos (K1=1.0), y el 10% como límite permisible o sustentable del aprovechamiento de las reservas estáticas (K2=0.1).

5.3.9.2 Reservas Dinámicas ($Q_{Dinámica}$)

A partir del balance hídrico se estableció que la recarga potencial en el acuífero libre tiene un registro de $1,56E-01 \text{ m año}^{-1}$ y se obtuvo una reserva dinámica de $8,34E+06 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$. Las reservas calculadas para los acuíferos de las Formaciones Cacho y Arenisca Labor y Tierna fueron $2,64E+07 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ y $3,94E+08 \text{ m}^3 \text{ año}^{-1}$ respectivamente.

Para el cálculo de la Formación Cacho y Arenisca Labor y Tierna no es relevante la exposición superficial de las rocas pues son acuíferos confinados, y por tanto las reservas dinámicas se calculan en función del área, la altura del nivel piezométrico y de la cantidad de agua que puede liberar al disminuir la presión. Las reservas calculadas en los acuíferos confinados arrojan un volumen conservador, pues no considera la filtración que se produce a través de la falla de Tocancipá. Tampoco se considera la posible recarga que pueda tener la Formación Cacho por conexión hidráulica con la Formación Sabana hacia el sector de la vereda El Porvenir.

La Formación Sabana presenta la mayor exposición superficial y como consecuencia los resultados del cálculo de las reservas dinámicas son mayores a pesar de que la recarga por infiltración es la mitad de los registros de las otras formaciones.

5.3.9.3 Reservas Estáticas ($Q_{Estática}$)

El espesor geológico de las Formaciones Cacho y Arenisca Labor y Tierna se asumió como el espesor promedio de cada unidad obtenido del modelo geológico geofísico. El límite superior de la Formación Sabana se definió como la superficie topográfica de la planicie aluvial, pero dada la geometría irregular en profundidad se genera incertidumbre al momento de establecer su límite inferior, por tanto, se tomó el promedio del límite superior de la Formación Bogotá obtenido del modelo geológico geofísico, y se estableció el espesor saturado de la Formación Sabana como la columna de agua calculada a partir de la lectura del nivel estático.

Los resultados obtenidos de reservas estáticas para la Formación Sabana fon de $1,01E+08 \text{ m}^3$, para la Formación Cacho de $2,47E+08 \text{ m}^3$ y para la Formación Arenisca Labor y Tierna de $8,60E+08 \text{ m}^3$.

5.3.9.4 Reservas Explotable (Q_T)

Una vez calculadas las reservas dinámicas y estáticas para cada acuífero se integraron los resultados y se calculó la reserva explotable de cada acuífero en función de las constantes de sustentabilidad con valores de $K1=1,0$ y $K2 =0,1$ como se indica en la Tabla 30.

Tabla 30. Reservas Explotables en unidades hidrogeológicas en el municipio de Tocancipá.

Unidad Geológica	Q Dinámica * K1	Q Estática * K2	Q_T (m ³)
Q1sa	8,34E+06	1,01E+07	1,84E+07
E1c	2,64E+07	2,47E+07	5,11E+07
K2t	3,94E+08	8,60E+07	4,80E+08
Total	4,29E+08	1,21E+09	5,49E+08

Fuente: Elaboración propia, 2021

5.3.10 Modelo hidrodinámico

El modelo 3D representado en la Figura 65 se obtuvo con base al modelo elaborado en el componente geológico y registra la caracterización hidráulica de las diferentes unidades hidrogeológicas. La representación mediante un modelo 2D que se aprecia en la Figura 66 señala en detalle los tipos de flujos obtenidos en esta caracterización, a la vez que facilita la comprensión del comportamiento del agua subterránea en el SS-Tsc. En él se visualiza la dinámica del agua en las zonas de recarga y tránsito, los tipos de acuíferos y su interés desde el punto de vista hidrogeológico.

5.3.11 Síntesis de conclusiones

La Formación Cacho corresponde a un acuífero semiconfinado a confinado, con un régimen de flujo de tipo intermedio en el área de Tocancipá que se integra a un sistema de flujo regional. Su productividad pasa de media a alta al variar los parámetros hidráulicos de Transmisividad y capacidad específica por efecto del fracturamiento de la roca. La recarga de este acuífero ocurre principalmente en el flanco oriental del SS-Tsc producto de la infiltración de agua a través de la falla de Tocancipá que la pone en contacto con niveles acuíferos de la Formación Arenisca Labor y Tierna.

La Formación Arenisca Labor y Tierna por sus características hidráulicas se clasifica como un acuífero confinado con alto interés hidrogeológico haciendo parte de un sistema de flujo regional que se puede extender más allá de los límites del Municipio si las estructuras geológicas tienen continuidad. Además, representa la unidad con mayor reserva explotable en la zona con un volumen de $4,80E+08 \text{ m}^3$, seguido de la Formación Cacho con reservas explotables de $5,11E+07 \text{ m}^3$. Estas dos unidades hidrogeológicas están confinadas por las Formaciones Plaeners, Guaduas y Bogotá que tienen características impermeables y son consideradas de baja importancia hidrogeológica.

Por otra parte, la Formación Sabana registra el menor volumen de reserva explotable con $1,84E+07 \text{ m}^3$, y se identifica como un acuífero libre, de extensión local de baja productividad conformado por niveles de arcillas y arenas saturadas que alcanza profundidades máximas hasta de 100 m. La recarga se da principalmente por la infiltración del agua lluvias, y las líneas de flujo reflejan un gradiente hidrodinámico que no coincide con el gradiente topográfico, lo que sugiere una relación de desconexión con el efluente principal del área que es el río Bogotá.

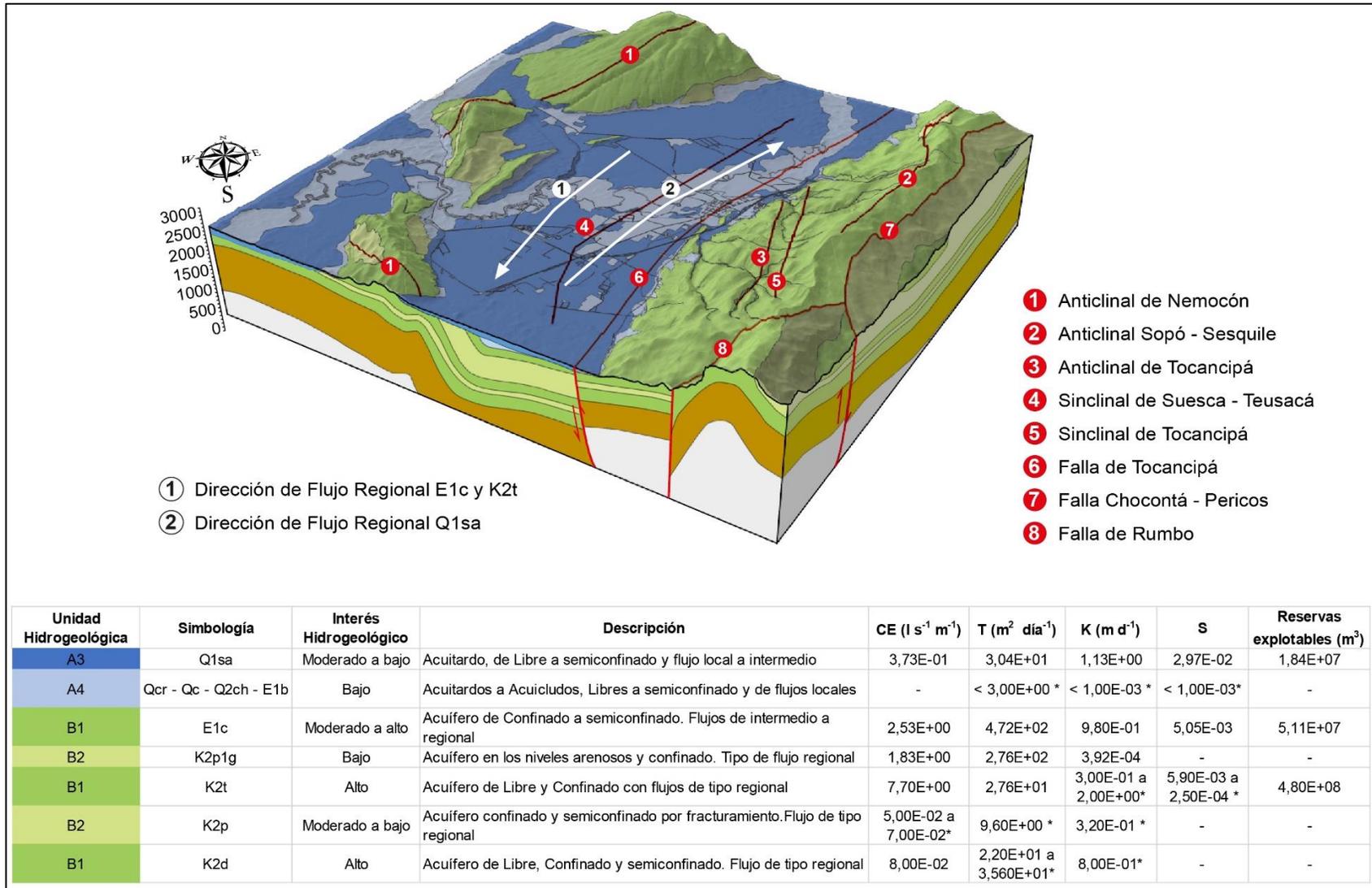


Figura 65. Modelo hidrodinámico 3D para unidades de interés hidrogeológico en el municipio de Tocancipá. Fuente: Elaboración propia, 2021.

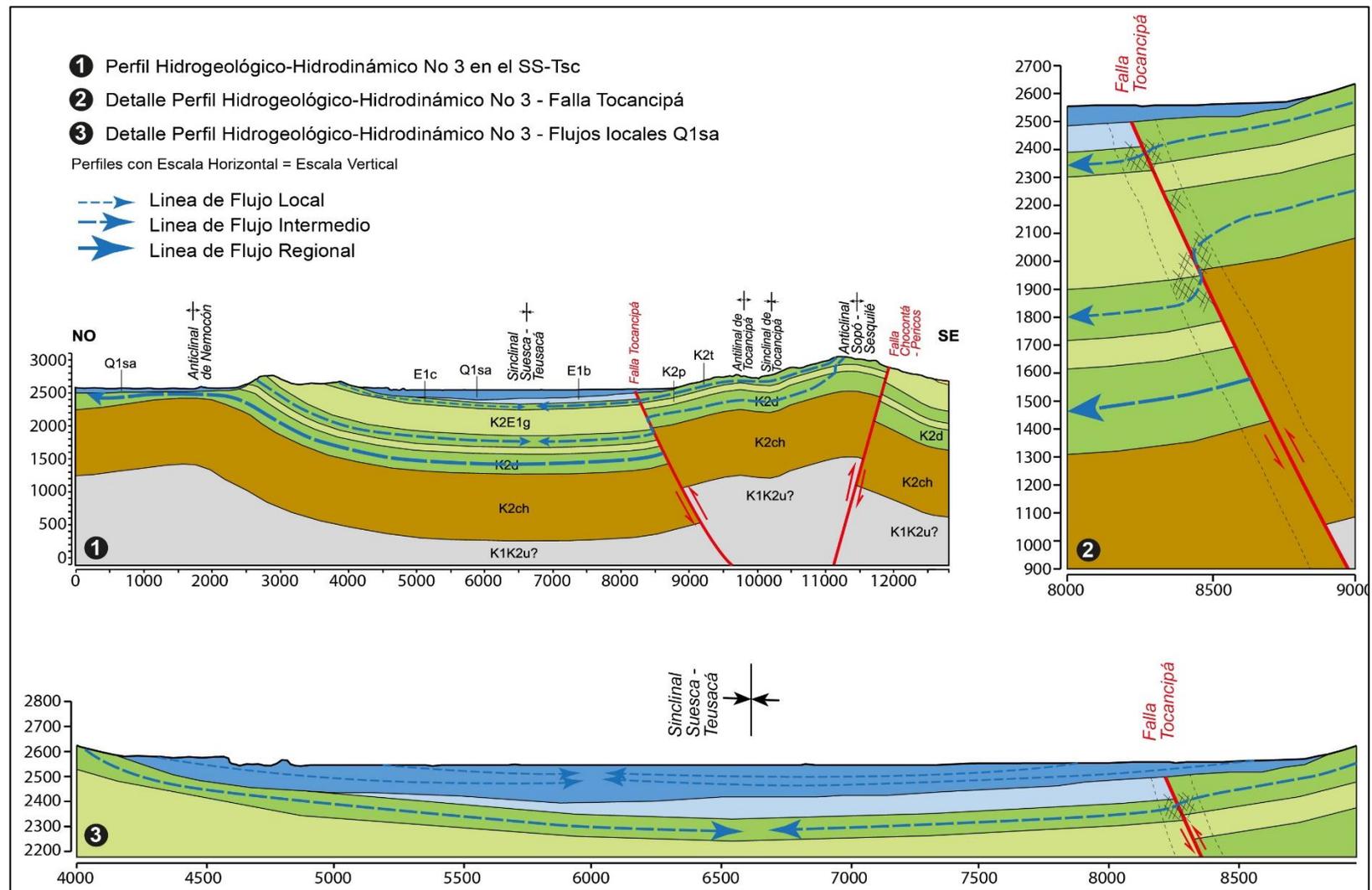


Figura 66. Modelo hidrodinámico 2D para unidades de interés hidrogeológico en el municipio de Tocancipá.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.4 MODELO HIDROGEOQUÍMICO

Diversos factores influyen en la composición química del agua como lo son la naturaleza, disposición espacial, tiempo y longitud del recorrido asociados a los materiales con los que entra en contacto (Castillo y Vence, 2009).

El agua superficial adquiere al inicio de su recorrido por el suelo un carácter ácido capaz de disolver carbonatos y alterar silicatos. El carácter básico lo adquiere una vez entra en contacto con el medio saturado, Sánchez (2012), y entonces se produce un cambio en la composición química del agua que está asociado al contacto con minerales que componen la roca. Además, en función del tiempo de residencia dentro del acuífero, estos flujos pueden definir su carácter local, intermedio o regional (Töth, 2000).

Los constituyentes químicos se encuentran en forma iónica disueltos en el agua subterránea, se agrupan en mayoritarios, minoritarios y traza con algunos ejemplos indicados en la Tabla 31.

Tabla 31. Constituyentes iónicos en aguas subterráneas.

Constituyente	Mayoritario	Minoritario	Traza
Anión	(HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻) Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , NO ₃ ⁻	F ⁻ , S ²⁻ , SH ⁻ , Br ⁻ , I ⁻ NO ₂ ⁻ , PO ₄ ³⁻ , BO ₃ ⁻	
Catión	Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ K ⁺ , NH ₄ ⁺	Mn ²⁺ , Fe ²⁺ , Li ⁺ Sr ²⁺ , Zn ²⁺	Al ³⁺ , Ti ⁴⁺ , Co ²⁺ , Cu ²⁺ Pb ²⁺ , Ni ²⁺ , Cr ³⁺ , entre otros
Otros	CO ₂ , O ₂ H ₄ SiO ₄ , SiO ₂		

Fuente: Elaboración propia, 2021.

En general las aguas pueden variar de facies bicarbonatadas, que reflejan flujos de corto recorrido dentro de un acuífero, a aguas de facies sulfatadas, que responden a un recorrido intermedio, y llegar a presentar facies cloruradas que son características de flujos regionales. A esta evolución de facies se le conoce como secuencia de Cheboratev. La Tabla 32, señala el recorrido que sufren los aniones y el análogo de los cationes en el incremento de la salinidad del agua, así como un resumen del origen y valores característicos del agua subterránea.

El desarrollo de esta investigación se llevó a cabo en puntos de muestreo seleccionados sobre la premisa de analizar las diferentes unidades de interés hidrogeológicas identificadas en el modelo hidrodinámico. En la Tabla 33 y Figura 67, se presentan la localización de cada punto y la formación geológica asociada. La determinación de la concentración de los elementos mayoritarios permitió identificar el origen, y, describir la evolución de la composición química del agua originada en la interacción con la roca.

El componente hidrogeoquímico se realizó a partir de la compilación de los resultados provenientes de 11 ensayos fisicoquímicos realizados por usuarios de pozos de agua subterránea en el periodo comprendido entre noviembre de 2020 y marzo de 2021, los cuales aportaron un total de 154 parámetros entre valores de pH, Conductividad eléctrica (CE), iones de Calcio (Ca²⁺), Magnesio (Mg²⁺), Sodio (Na⁺), Potasio (K⁺), Hierro (Fe²⁺), Nitrógeno amoniacal (NH₄⁺), Bicarbonatos (HCO₃⁻), Cloruros (Cl⁻), sulfatos (SO₄²⁻), Fosfatos (PO₄³⁻) y Nitratos (NO₃⁻). Ver Anexo I.

Tabla 32. Origen de principales iones disueltos en agua subterránea.

Aumento salinidad		Tipo	Ión	Origen	Valores en aguas subterráneas dulces
Secuencia de Cheboratev	↓	Anión	Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	Disolución de CO ₂ atmosférico o del suelo, disolución de calizas y dolomitas (ayudado por CO ₂ o por ácidos naturales), hidrólisis de silicatos.	Varía entre 50 y 400 mg l ⁻¹ y puede llegar a 800 mg l ⁻¹
			Sulfato (SO ₄ ²⁻)	Lavado de terrenos marinos, oxidación de sulfuros de todo tipo de rocas, concentración en el suelo de aguas de lluvia, disolución de yeso, anhidrita y terrenos yesíferos, actividades urbanas, industriales y agrícolas.	En agua dulce varía entre 2 mg l ⁻¹ y 150 mg l ⁻¹ .
			Cloruro (Cl ⁻)	Mezclas con agua marina, ataque de rocas y minerales (evaporitas, sodalita, apatito, etc.), de gases y líquidos de emanaciones volcánicas, vertidos urbanos e industriales.	Menor a 10 mg l ⁻¹ y hasta 3000 mg l ⁻¹ .
	↓	Cation	Calcio (Ca ²⁺)	Disolución de calizas, dolomitas, yeso y anhidrita, ataque de feldespatos y otros silicatos cálcicos, disolución de Cationes cemento calcáreo de muchas rocas, agua de lluvia	Varia 10mg l ⁻¹ a 250 mg l ⁻¹ según proceso hidroquímico asociado. Se incrementa con las arcillas.
			Magnesio (Mg ²⁺)	Disolución de dolomitas y calizas dolomíticas, ataque de silicatos magnésicos y ferro magnésicos, lavado de rocas evaporíticas magnésicas (carnalita), agua de mar, contaminación industrial y minera.	La concentración varia por intercambio iónico. Es retenido con mayor facilidad que el Ca ²⁺ .
			Sodio (Na ⁺)	Ataque de feldespatos y otros silicatos, lavado de sedimentos marinos, mezcla con agua de mar, disolución de sales evaporitas, contaminación urbana e industrial, concentración en agua de lluvia.	Máximo 150 mg l ⁻¹ . Muy soluble. Puede ser intercambiado por CA ²⁺ en arcillas.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

Tabla 33. Localización puntos de ensayos Físico Químicos asociados a la unidad geológica.

Item	Punto	Y(N-S)	X(E-W)	Unidad Geológica	Símbolo
1	AP-C-28	1040477	1016081	Formación Sabana	Q1sa
2	AP-C-29	1042292	1010476		
3	AP-C-30	1041891	1010428		
4	AP-C-40	1043232	1019318		
5	AP-C-41	1039952	1017060		
6	AP-C-03	1043252	1016021	Formación Cacho	E1c
7	AP-C-06	1044836	1018251		
8	AP-C-31	1042425	1015537		
9	AP-C-05	1045590	1018085	Formación Arenisca Labor y Tierna	K2t
10	AP-C-27	1045100	1016897		
11	AP-C-33	1044483	1016758		

Fuente: Elaboración propia, 2021.

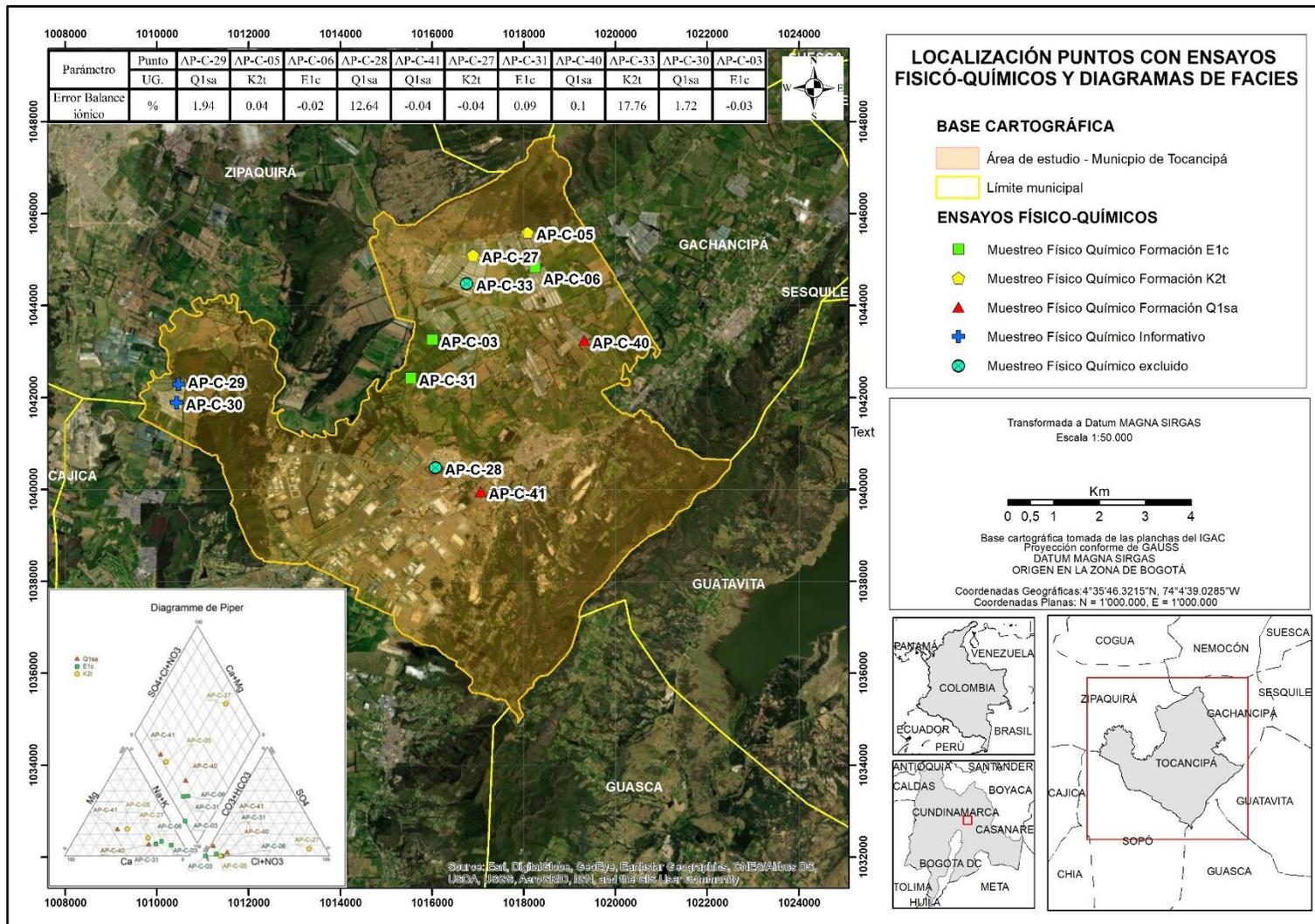


Figura 67. Localización puntos con información de ensayos físico químicos.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.4.1 Validación de datos

Los registros fueron tabulados e ingresados al software libre Diagrammes para su procesamiento. El primer paso fue validar la calidad de los datos, y se descartaron aquellos que presentaron un error analítico en el balance iónico % CBE (por sus siglas en inglés) superior al 10%. Bajo este criterio de aceptación fueron excluidas las muestras AP-C-28 y AP-C-33 por registrar errores en el balance de cargas próximas de 13% y 18% respectivamente. Por otra parte, las muestras de los puntos AP-C-29 y AP-C-30 corresponden a la estructura del sinclinal de Nemocón, por lo que fueron consideradas sólo con carácter informativo. Los datos omitidos o censurados cuyo resultado estuvo por debajo del límite de detección se asumieron con valor cero (0).

5.4.2 Análisis estadístico descriptivo

Los registros de las muestras aceptadas fueron organizados por unidad geológica y por componente iónico. Se calculó el parámetro de Sólidos Totales Disueltos TDS (por sus siglas en inglés) como la sumatoria de las concentraciones de iones analizados y expresados en mg l^{-1} , y se incluyeron los registros de pH y CE, este último expresado en $\mu\text{s/m}$. El análisis estadístico se realizó empleando una hoja de cálculo de Excel, con la cual se determinó la media, error típico, desviación estándar de cada parámetro hidroquímico y en cada unidad hidrogeológica como se aprecia en el Anexo J.

Los resultados de TDS en la Formación Sabana (Q1sa) y Cacho (E1c) presentan una media de $45,61 \pm 16,02$ y $81,52 \pm 28,36 \text{ mg l}^{-1}$ respectivamente y valores de CE similares con 50 ± 10 y $49,33 \pm 17,90 \mu\text{s/m}$ cada una.

En cuanto al pH, la Formación Arenisca Labor y Tierna (K2t) presenta el registro más bajo con $5,24 \pm 0,21$, y las Formaciones Sabana y Cacho registran valores similares de $6,10 \pm 0,70$ y $6,63 \pm 0,12$ respectivamente.

En cuanto a las concentraciones mayoritarias de cationes, el Na^+ presenta el mayor valor con $14,97 \pm 4,98 \text{ mg l}^{-1}$ en la Formación Cacho, de $3,76 \pm 0,06 \text{ mg l}^{-1}$ en la Formación Sabana y con $0,77 \pm 0,37 \text{ mg l}^{-1}$ el de la Formación Arenisca Labor y Tierna.

El HCO_3^- es el anión mayoritario en todas las unidades geológicas, con una concentración de $55,87 \pm 21,02 \text{ mg l}^{-1}$ en la Formación Cacho (E1c), con $30,15 \pm 12,65 \text{ mg l}^{-1}$ en la Formación Sabana y de $3,46 \pm 1,01 \text{ mg l}^{-1}$ en la Formación Arenisca Labor y Tierna.

El Fe^{2+} se constituye en un catión minoritario en todas las unidades geológicas, con un valor máximo promedio de $0,5 \pm 0,01 \text{ mg l}^{-1}$ registrado en la Formación Sabana.

Respecto a los aniones, en las Formaciones Sabana y Arenisca Labor y Tierna, el PO_4^{3-} alcanza un valor máximo promedio de $0,1 \pm 0,10 \text{ mg l}^{-1}$, en tanto para la Formación Cacho es el SO_4^{2-} con un valor de $0,1 \pm 0,070 \text{ mg l}^{-1}$.

Los iones NH_4^+ , Cl^- y NO_3^- tienden a aumentar la concentración con la profundidad. En la Tabla 34, se presentan los resultados indicados en mg l^{-1} de la media, error típico y desviación estándar calculadas para los componentes iónicos en las diferentes unidades de interés hidrogeológico.

Tabla 34. Resumen estadístico de las unidades hidrogeológicas.

Q1sa	TDS	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻
\bar{X}	45,6	6,1	50,0	4,0	1,2	3,8	1,3	0,5	1,0	30,2	0,8	1,8	0,1	0,9
E	16,0	0,7	10,0	2,4	0,8	0,1	0,4	0,0	0,9	12,7	0,7	1,5	0,1	0,4
σ	22,7	1,0	14,1	3,4	1,2	0,1	0,6	0,0	1,3	17,9	0,9	2,1	0,1	0,5
E1c	TDS	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻
\bar{X}	81,5	6,6	49,3	2,6	1,3	15,0	1,5	0,3	1,1	55,9	1,5	0,1	1,2	1,0
E	28,4	0,1	17,9	0,1	0,3	5,0	0,4	0,2	1,0	21,0	1,3	0,1	1,2	0,4
σ	49,1	0,2	31,0	0,2	0,4	8,6	0,8	0,4	1,7	36,4	2,3	0,1	2,0	0,7
K2t	TDS	pH	CE	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Fe ²⁺	NH ₄ ⁺	HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻
\bar{X}	13,6	5,2	15,5	0,6	0,2	0,8	0,6	0,0	1,4	3,5	2,3	0,5	0,0	3,70
E	6,8	0,2	5,5	0,0	0,0	0,4	0,2	0,0	1,3	1,0	2,0	0,5	0,0	3,50
σ	9,6	0,3	7,8	0,0	0,0	0,5	0,2	0,0	1,9	1,4	2,8	0,6	0,0	4,95

\bar{X} = Media E = Error típico σ = Desviación estándar

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.4.3 Diagramas de facies

Una vez verificada que la relación entre cargas positivas y negativas se encuentran dentro del criterio establecido, se agruparon los resultados de acuerdo a la unidad geológica. El análisis permitió determinar el origen, las facies hidroquímicas, la relación con los procesos que la afectan y se identificaron zonas recarga y tránsito. Para ello se graficaron los componentes iónicos empleando los diagramas de Piper-Hill, Schöeller-Berkaloff, Stiff y Gibbs.

5.4.3.1 Diagrama de Piper-Hill

La primera aproximación en el análisis gráfico se llevó a cabo mediante el uso del diagrama de Piper-Hill, (Ver Figura 68), con el cual se establecieron las facies hidrogeoquímicas predominantes para las 7 muestras de agua evaluadas. Excepto en la muestra AP-C-27 que evidencia una tendencia marcada hacia la facie clorurada en ese punto, asociado a la Formación Arenisca Labor y Tierna, las demás reflejan una facie bicarbonatada

Las muestras de agua de la Formación Sabana presentan un comportamiento diferente entre ellas. La muestra AP-C-40 fue tomada en periodo húmedo y se ubica en la zona Sódica-Potásica cuando la disolución de sales es mayor, en tanto, la muestra AP-C-41 se tomó en periodo seco por lo que se ve aumentada la concentración del ión Ca²⁺ debido a que disminuye la posibilidad de disolución de sales. Espacialmente los dos puntos se ubican en la zona de tránsito del acuífero, y los valores ligeramente altos de las concentraciones de Sulfato y Cloruros sugieren que se ha presentado interacción con los sedimentos cuaternarios siguiendo la secuencia de Cheboratev (HCO₃⁻ - SO₄²⁻ - Cl⁻).

La Formación Cacho con las muestras AP-C-06, AP-C-31 y AP-C-06 presenta un comportamiento definido de una facie Bicarbonatada Sódica y Potásica, posiblemente debido a que los pozos se localizan en una zona próxima a la de recarga proveniente de infiltración de aguas lluvias a través de grietas y fracturas de las rocas aflorantes o por contacto con la Formación Sabana, que mezclan aguas de edad reciente con aguas que tienen mayor tiempo de residencia dentro del acuífero.

Las dos muestras de agua correspondiente a la Formación Arenisca Labor y Tierna fueron tomadas en periodo húmedo, pero presentan diferentes facies debido a la ubicación de los pozos. La muestra AP-C-05 proviene de un pozo perforado en el piedemonte del flanco occidental del Sinclinal de

Suesca Teusacá, en la vereda El Porvenir, donde la recarga del acuífero sucede por infiltración inmediata del agua lluvia lo que explica las altas concentraciones del ión bicarbonato y la acidez. La muestra AP-C-27 se tomó de un pozo que está retirado del piedemonte y los resultados de las concentraciones de cloruros y sulfatos indican que estas aguas tienen mayor tiempo de residencia dentro del acuífero.

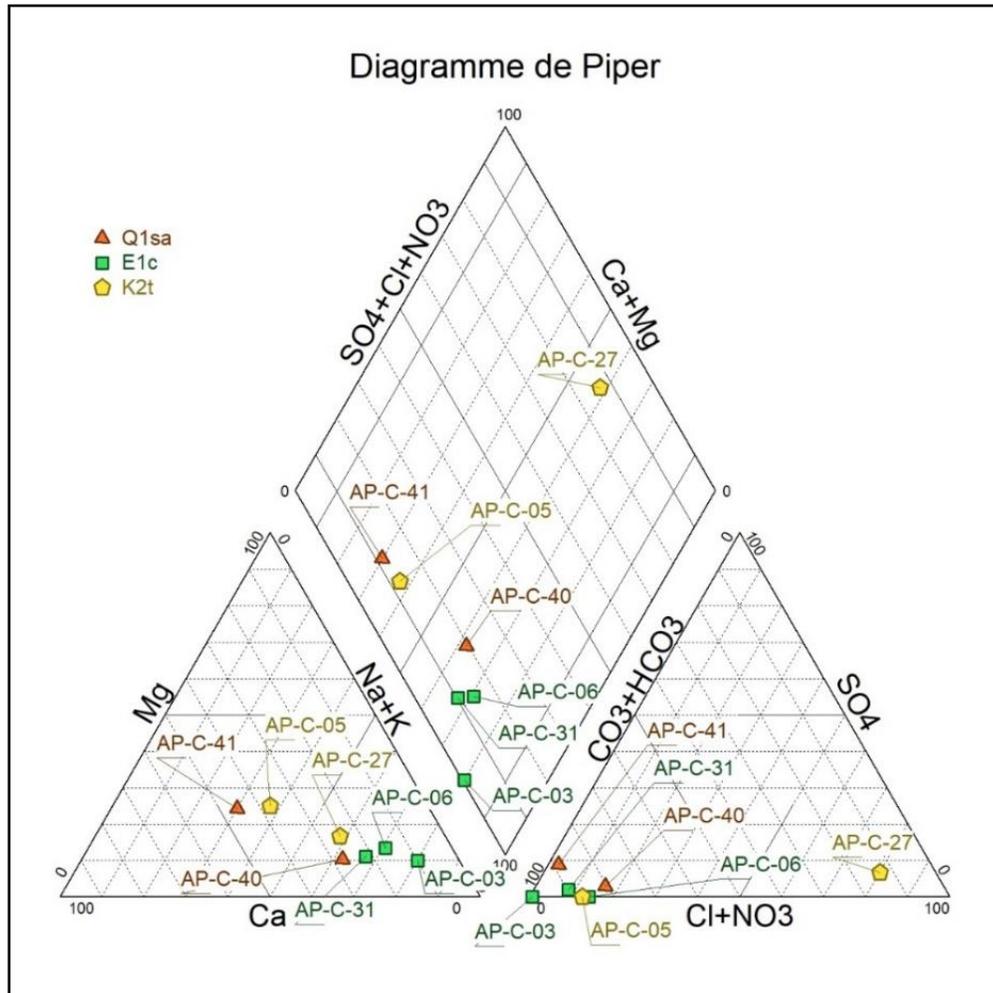


Figura 68. Diagrama de Piper para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.4.3.2 Diagrama de Schöeller - Berkaloff

El diagrama representa en un papel logarítmico las concentraciones de agua, permitiendo analizar varias muestras simultáneamente y así determinar la evolución que ha tenido el agua subterránea en cada acuífero. La Figura 69, representa el comportamiento de las diferentes muestras.

Dado el bajo grado de salinidad y alto contenido de ión Bicarbonato se identificó el agua de la Formación Sabana como un agua joven, mientras que las aguas de las Formaciones Cacho y Arenisca Labor y Tierna sugieren mayor tiempo de residencia dentro del acuífero y una fuerte incidencia por mezclas con aguas recientes.

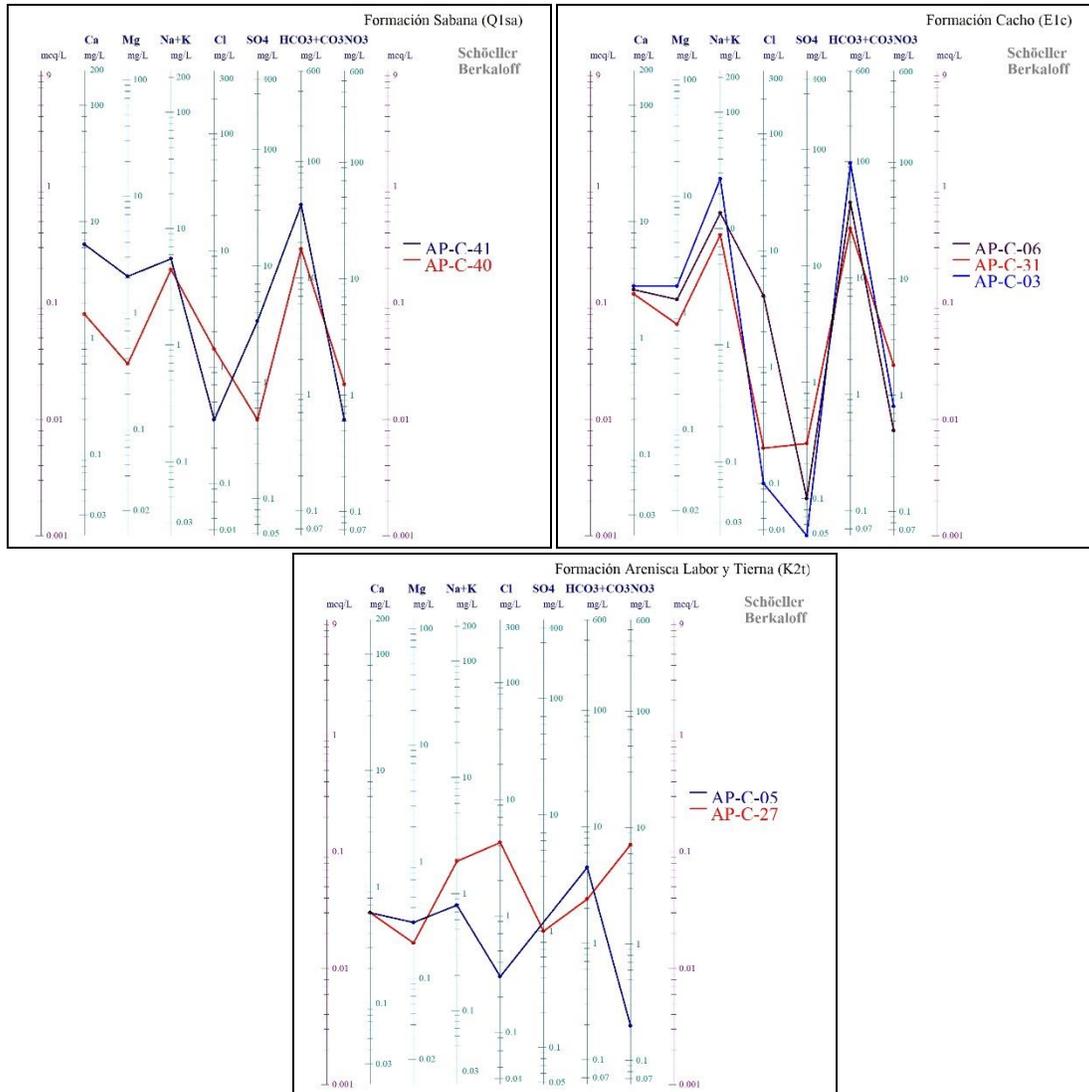


Figura 69. Diagrama de Schöeller – Berkaloff para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

La distribución del diagrama para la Formación Sabana indica que la edad del agua corresponde a un flujo de corto recorrido dentro del acuífero, además, el carácter ácido está asociado a las altas concentraciones de sulfatos como el producto de la reacción de carbonatos con las aguas lluvia que aún no han entrado en contacto con acuíferos más profundos. La recarga está relacionada directamente a la infiltración proveniente de la precipitación.

La distribución de las muestras de agua AP-C03, AP-C06 y AP-C31 de la Formación Cacho es uniforme, y aunque el valor de la concentración del bicarbonato es ligeramente mayor respecto al que presenta la Formación Sabana, se puede inferir que es debido a una mezcla de aguas meteóricas con aguas de niveles más profundos favorecida por condiciones hidráulicas de la roca. Además, en alguna medida puede obedecer a diseños de pozos de bombeo que captan de las dos unidades. Las altas concentraciones del ión Sodio y las bajas concentraciones de los Sulfatos y Cloruros sugieren que la recarga de los acuíferos es de tipo intermedio a regional.

El agua de la Formación Arenisca Labor y Tierna es la más antigua, se puede asegurar que el comportamiento del agua subterránea en esta unidad cumple con la secuencia expuesta por Cheboratev.

En esta Formación las elevadas concentraciones de cloruros y sulfatos y la concentración mayoritaria de sodio respecto al calcio y magnesio sugieren la existencia de procesos de transformación química dentro del acuífero ocurrido en prolongados periodos de tiempo. La distribución del diagrama indica que el punto AP-C-05 está cerca de la zona de recarga y puede clasificarse de tipo local, mientras que el punto AP-C-27, aunque también presenta una mezcla de agua, el aporte que recibe es de tipo regional asociado a recargas laterales profundas.

La muestra AP-C-27 registra una concentración atípica del ion Nitrato, muy superior al valor de las demás muestras, que puede estar asociado a contaminación originada en la actividad antrópica del cultivo de flores y por deficiencia en la construcción de los pozos de bombeo.

5.4.3.3 Diagrama de Gibbs

Estos diagramas permiten identificar el dominio del origen del agua los cuales pueden estar relacionados con la precipitación atmosférica, con procesos de interacción agua - roca, o con procesos de cristalización evaporación. El análisis se realizó al comparar los STD frente a la relación de iones $(Na^+ + K^+) / (Na^+ + K^+ + Ca^{2+})$, y $Cl^- / (Cl^- + HCO_3^-)$ como se aprecia en la Figura 70.

La distribución de la relación catiónica indica que la presencia de las concentraciones de sodio tiene su origen en el proceso de liberación de productos solubles durante la descomposición meteórica de los minerales del grupo de las arcillas liberando mayor cantidad de sodio intercambiable con relación al calcio, (Davis y De Wiest , 2009).

Las muestras AP-C41 y AP-C-05 tienden hacia la izquierda, evidencia de mineralización y competencia entre el ion sodio y el ión calcio, en periodo de estiaje cuando los procesos de intercambio iónico disminuyen.

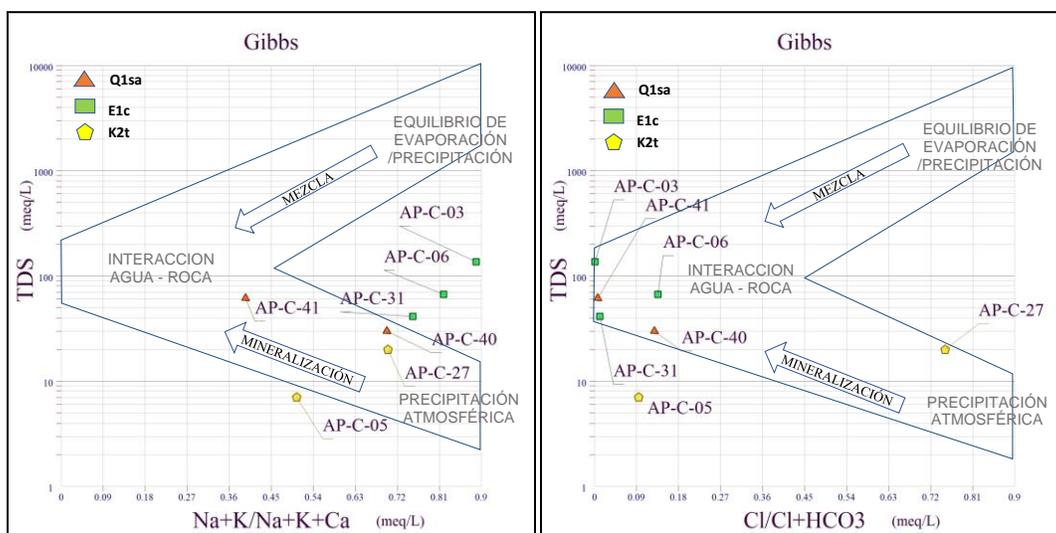


Figura 70. Diagrama de Gibbs para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Por su parte el grupo de muestras de la Formación Cacho, AP-C-03, AP-C-06 y AP-C31, tiende a la derecha debido al predominio del ión sodio sobre el ión calcio, con cierta influencia de procesos de intercambio iónico asociados en parte a mezcla con aguas provenientes de precipitación atmosférica.

El ion cloruro se considera de tipo conservativo, pues resulta indiferente a los efectos de intercambio iónicos, adsorción y actividad biológica, y por tanto extraerlos del agua por procesos naturales es muy difícil.

Excepto la muestra del pozo AP-C-27, los demás puntos se ubican en la región de dominio de interacciones roca-agua con proporciones de Cl^- relativamente bajas sin que se evidencie participación de reacciones fisicoquímicas que provoquen su disminución. Por otra parte, se debe considerar que la concentración disminuye sistemáticamente con el aumento de la distancia al mar, (Li & Zhang, 2008). La elevada concentración de Cl^- puede estar asociada a contaminación antrópica o procesos de diápirismo regional.

El movimiento de los iones desde la derecha del gráfico de los cationes hacia la izquierda en el gráfico de los aniones explica la existencia de características especiales en cada punto donde ocurre la interacción agua - roca debido a procesos de intercambio catiónico en las arcillas, al no darse este movimiento se asume relativa estabilidad en la composición química del agua tal como ocurre con el punto AP-C-27. En términos generales las altas concentración de HCO_3^- revelan que el mecanismo natural que controla la química del agua está asociado a su interacción con la composición mineralógica de las rocas.

5.4.3.4 Diagrama de Stiff

De manera sencilla esta representación gráfica enfrenta las concentraciones de iones mayoritarios en ejes horizontales, donde se ubican los cationes a la izquierda y los aniones a la derecha. Los pares establecidos y las muestras por unidad geológica se indica en la Figura 71.

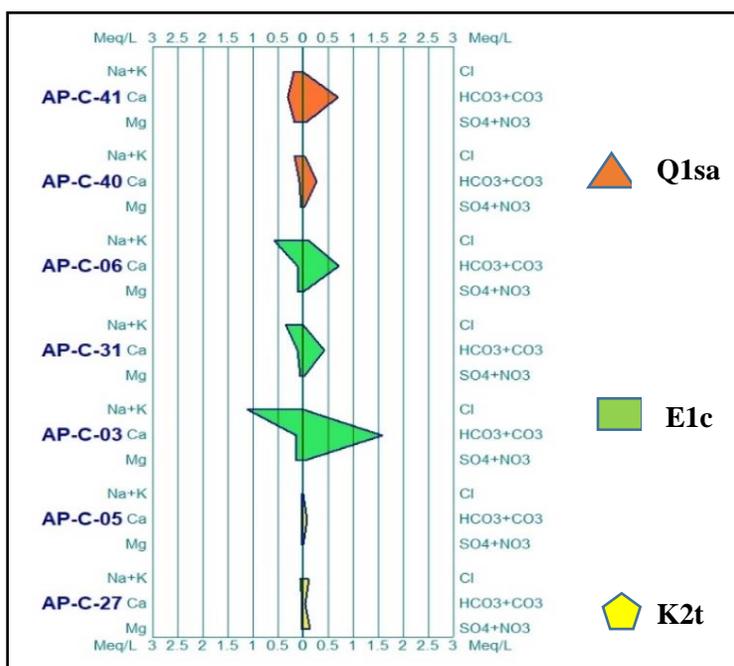


Figura 71. Diagrama de Stiff para las unidades hidrogeológicas en Tocancipá.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La tendencia de la geometría de la figura de la Formación Sabana es hacia el anión HCO_3^- , mientras que en los cationes es hacia el Ca^{2+} , y en menor proporción hacia el ión Na^+ . Este enriquecimiento catiónico es el resultado de la disolución de plagioclasas sódicas o silicatos cálcicos presentes en los sedimentos de las formaciones recientes. La figura evidencia que la composición iónica corresponde a aguas de origen meteórico.

El grupo de muestras la Formación Cacho tiende hacia el ión HCO_3^- , con marcada concentración en el AP-C-03 debido a que se monitoreó en época invernal. Las figuras se desplazan hacia el ión Na^+ como respuesta a la disolución de los componentes minerales de niveles arcillosos.

Finalmente, las figuras de la Formación Arenisca Labor y Tierna presentan una geometría muy apretada, con pequeñas concentraciones iónicas y diferente entre sí. La muestra AP-C-05 se comporta de tipo bicarbonatada cálcica y magnésica, sin intercambio iónico por estar próximo a la zona de recarga, mientras que la muestra AP-C-27 representa la geometría típica de una facie clorurada sulfatada sódica y potásica correspondiente a un agua con largo tiempo de residencia en el acuífero.

5.4.4 Relaciones iónicas

La cantidad de sales o minerales disueltos en el agua es proporcional al valor de la conductividad eléctrica. Esta relación establece que al subir la concentración de iones que permanecen disueltos en el agua su conductividad eléctrica se incrementa, o, por el contrario, aguas de alta pureza (sin sales o minerales) presentarán conductividad eléctrica muy baja. Valores inferiores a $100 \mu\text{S}/\text{cm}$ se consideran aceptables para el tratamiento convencional y desinfección para el consumo humano y doméstico (MinAmbiente, 2015).

La Figura 72, indica la distribución proporcional entre los parámetros de CE calculada a 25°C y TDS expresados en $\text{meq}\cdot\text{l}^{-1}$ para cada muestra por unidad geológica. En términos generales el conjunto de muestras se ubica por debajo de $90 \text{ meq}\cdot\text{l}^{-1}$, valores relativamente bajos que denotan la cercanía con zonas de recarga. Se aleja de este comportamiento la muestra AP-C-03 que alcanza valor ligeramente inferior $200 \text{ meq}\cdot\text{l}^{-1}$ producto de la interacción de flujos meteóricos y altas concentraciones del ión Na^+ .

La ausencia de un intercambio catiónico se puede interpretar a partir de la relación entre $(\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) - (\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-})$ y $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) - \text{Cl}^-$ expresada $\text{meq}\cdot\text{gl}^{-1}$ si en un gráfico de dispersión los puntos se encuentren cerca al origen. Si por el contrario para aguas subterráneas donde la composición química es controlada por intercambio catiónico el valor de la recta donde se alinean presenta una pendiente cercana a -1 (Jalali, 2007), (Yidana & Yidana, 2009).

La Figura 73, presenta el resultado para las muestras analizadas con una pendiente de -1,119, lo que permite inferir que el agua en la Formación Cacho es susceptible a reacciones de intercambio catiónico con el ión Na^+ . Los puntos de la Formación Arenisca Labor y Tierna se ubican cerca al origen sugiriendo escasas reacciones de intercambio catiónico, lo cual es congruente con la litología de estas rocas. Por su parte, la Formación Sabana evidencia cierta tendencia a generar reacciones de intercambio catiónico en los sedimentos sin llegar a ser determinantes comparadas como las de la Formación Cacho.

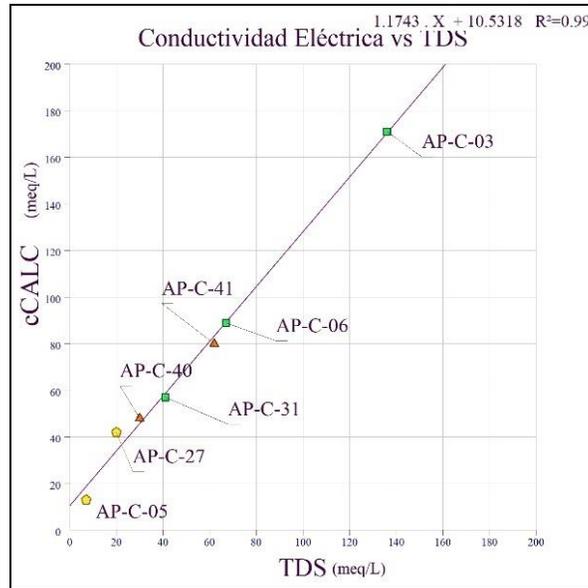


Figura 72. Conductividad Eléctrica vs TDS.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

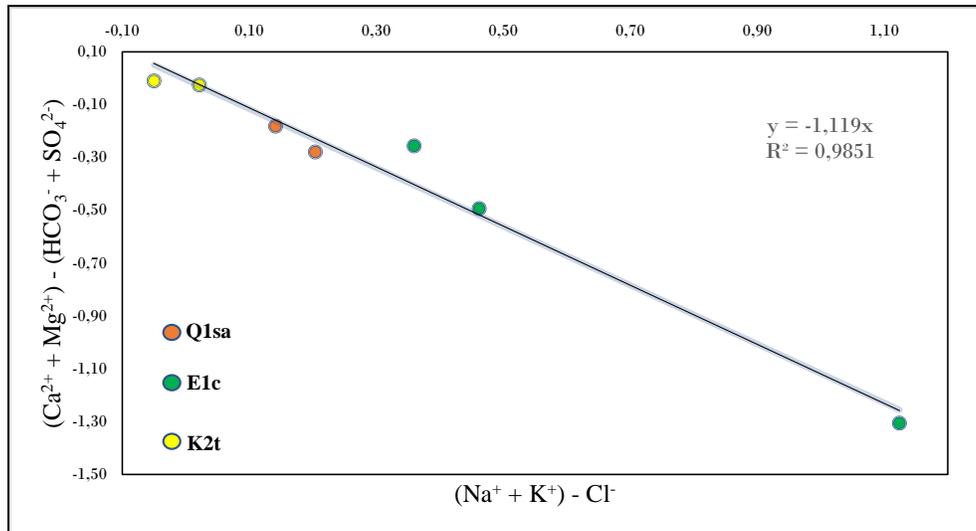


Figura 73. Relación iónica para evaluación de intercambio catiónico en el agua.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

Para sustentar el posible intercambio catiónico que se presente en el agua se acudió a los indicadores cloro alcalinos CAI 1 y CAI 2 representados en la Figura 74. El primer indicador relaciona la diferencia entre la concentración de Cl⁻ y los iones de Na⁺ y K⁺ respecto a la concentración de Cl⁻, mientras que segundo indicador lo hace respecto a la suma de los aniones SO₄²⁻, HCO₃⁻, CO₃²⁻ y NO₃⁻ (López C. , 2018).

Si el resultado en los dos indicadores es positivo se explica como un intercambio de los iones Ca²⁺ y Mg²⁺ en la roca huésped y de los iones Na⁺ y K⁺ en el agua, en cambio, un resultado negativo sugiere un intercambio catiónico reverso, (Kumar et al, 2007), (Yidana y Yidana, 2009).

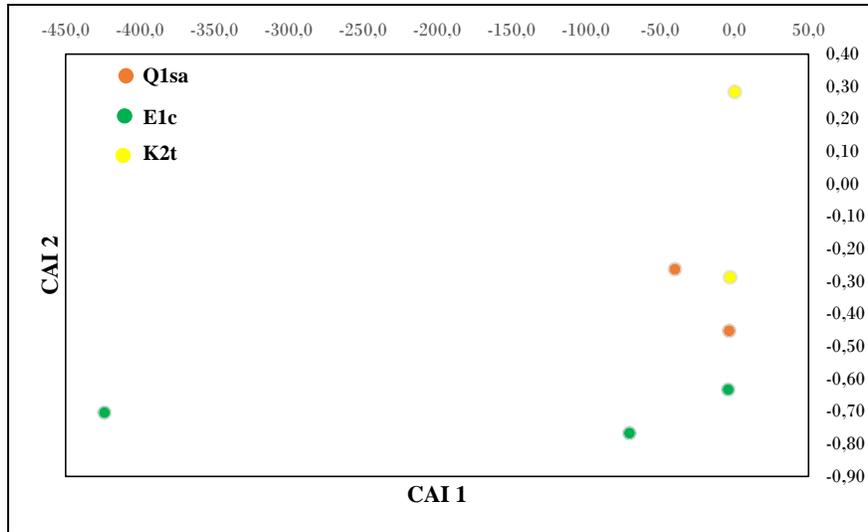


Figura 74. Relación de indicadores cloro alcalinos (CAI 1 y CAI 2).
Fuente: Elaboración propia, 2021.

La figura exhibe un comportamiento de intercambio catiónico reverso atribuible a la presencia relativamente proporcional de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} respecto al Na^+ en la Formación Cacho. En las Formaciones Sabana y Arenisca Labor y Tierna este comportamiento es menos intenso, en ellas los puntos se aproximan a cero debido a que son mayores las concentraciones de bicarbonatos y sulfatos y que pueden estar asociados a procesos de meteorización.

La relación existente entre la suma de los aniones $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$ y la suma de cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} indican el proceso químico asociado según la posición que adopte al trazar una línea con relación 1:1. Los puntos que caigan sobre la línea estarán asociados a procesos de meteorización, aquellos que se ubiquen debajo reflejan procesos de disolución de carbonatos y sulfatos. Las muestras que estén por encima se relacionan con intercambio catiónico y la meteorización de minerales de silicato. (Yidana y Yidana, 2009).

En la Figura 75, se aprecia que ninguna muestra presenta procesos de disolución debido a las bajas concentraciones de sulfatos. El agua de la Formación Arenisca Labor y Tierna presenta diferentes procesos químicos asociados a meteorización y cierto grado de disolución que puede llegar a generar porosidad secundaria. Esto se explica por la cercanía de los puntos muestreados a zonas de recarga.

La Formación Cacho refleja un comportamiento más definido hacia procesos de intercambio catiónico, como resultado de las concentraciones de iones Na^+ compitiendo con iones de Ca^{2+} y Mg^{2+} provenientes de niveles arcillosos.

En la Formación Sabana los puntos se ubican muy cerca de la línea y por encima de ella, evidencia que la hidroquímica está relacionada principalmente a procesos de intercambio catiónico influenciados por procesos de meteorización.

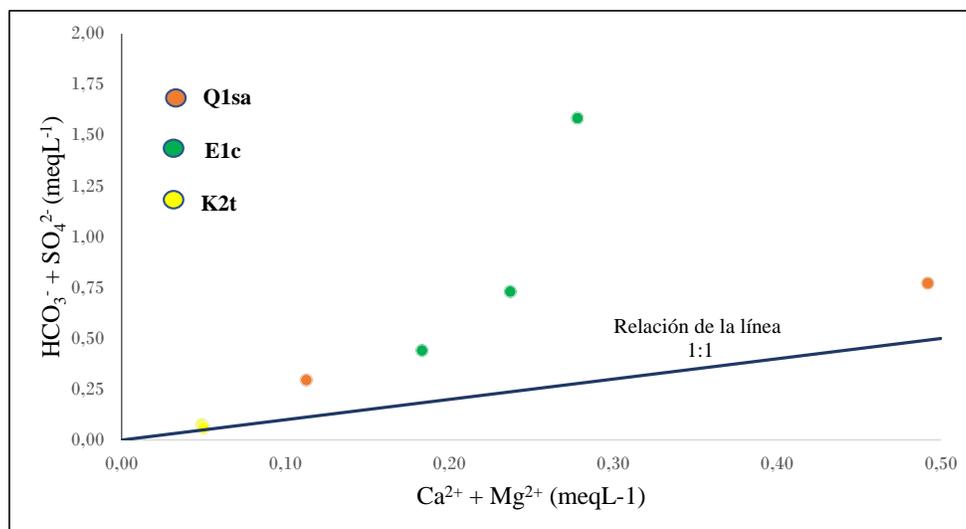


Figura 75. Relación ($\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$) vs ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$).

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.4.5 Evolución del flujo (Local – Intermedio – Regional)

La relación iónica $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. $\text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$, propuesta por Mifflin (1988), plantea la posibilidad de identificar el tipo de flujo y la caracterización de algunos procesos evolutivos asociados a actividad antrópica o a la geología.

El conjunto de muestras presenta una tendencia de desplazamiento del flujo hacia la zona marcada como intermedia, donde se evidencia aumento de las concentraciones de los iones de sodio y cloro como se aprecia en la Figura 76.

De manera general los flujos del agua subterránea de la Formación Arenisca Labor y Tierna son considerados de tipo regional, sin embargo, se explica la distribución de estos puntos en el sector de flujo local por la cercanía que tienen a la zona de recarga con bajas concentraciones de cloro y sodio.

Las muestras de agua de la Formación Cacho fueron tomadas próximas a la zona de recarga. En estos sectores se presenta una mezcla con aguas meteóricas, que de forma casi inmediata precipitan los carbonatos e incrementan las concentraciones de iones sodio por intercambio iónico. En la gráfica se evidencia cuando el sodio y el potasio se alejan del eje horizontal transitando de un flujo local a intermedio.

En la Formación Sabana se presenta el mismo proceso de intercambio iónico que el presentado en la Formación Cacho, aunque de manera más homogénea. Esto se debe a que la recarga del acuífero es mucho más rápida a través de los materiales no consolidados, y por tanto menor tiempo de contacto con los minerales de niveles arcillosos. Los flujos pasan rápidamente de tipo local a intermedio.

En síntesis, los flujos presentan una trayectoria de tipo intermedio en las Formaciones Sabana y Cacho desde los flancos del SS-Tsc hacia el eje de la estructura tal como se esquematiza en la Figura 77. Estos flujos luego se tornan de tipo regional como se señala en la Figura 78.

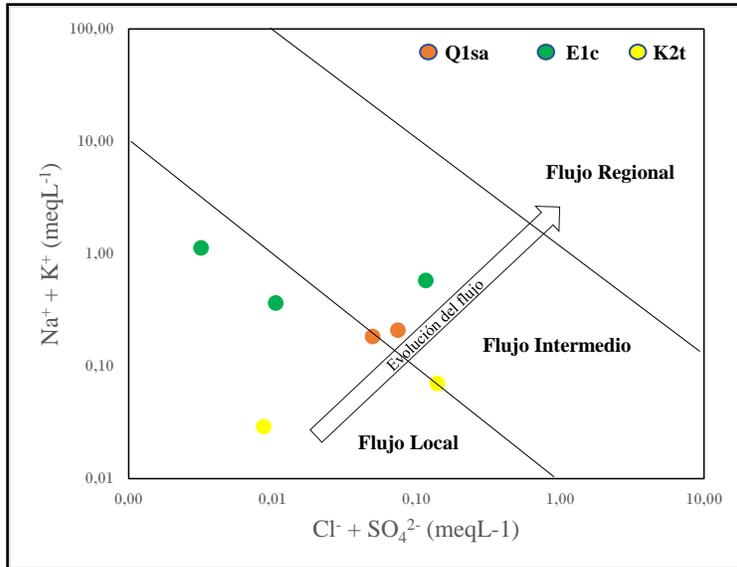


Figura 76. Evolución del flujo de agua subterránea.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

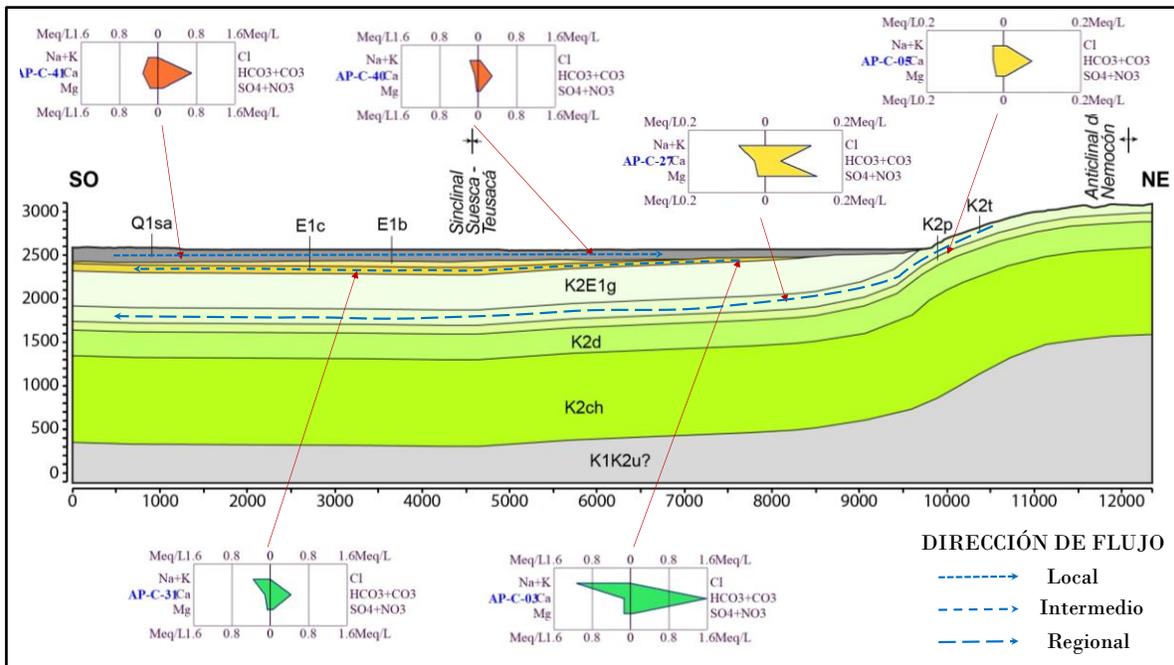


Figura 77. Esquema de la evolución del flujo local, intermedio y regional del agua subterránea.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

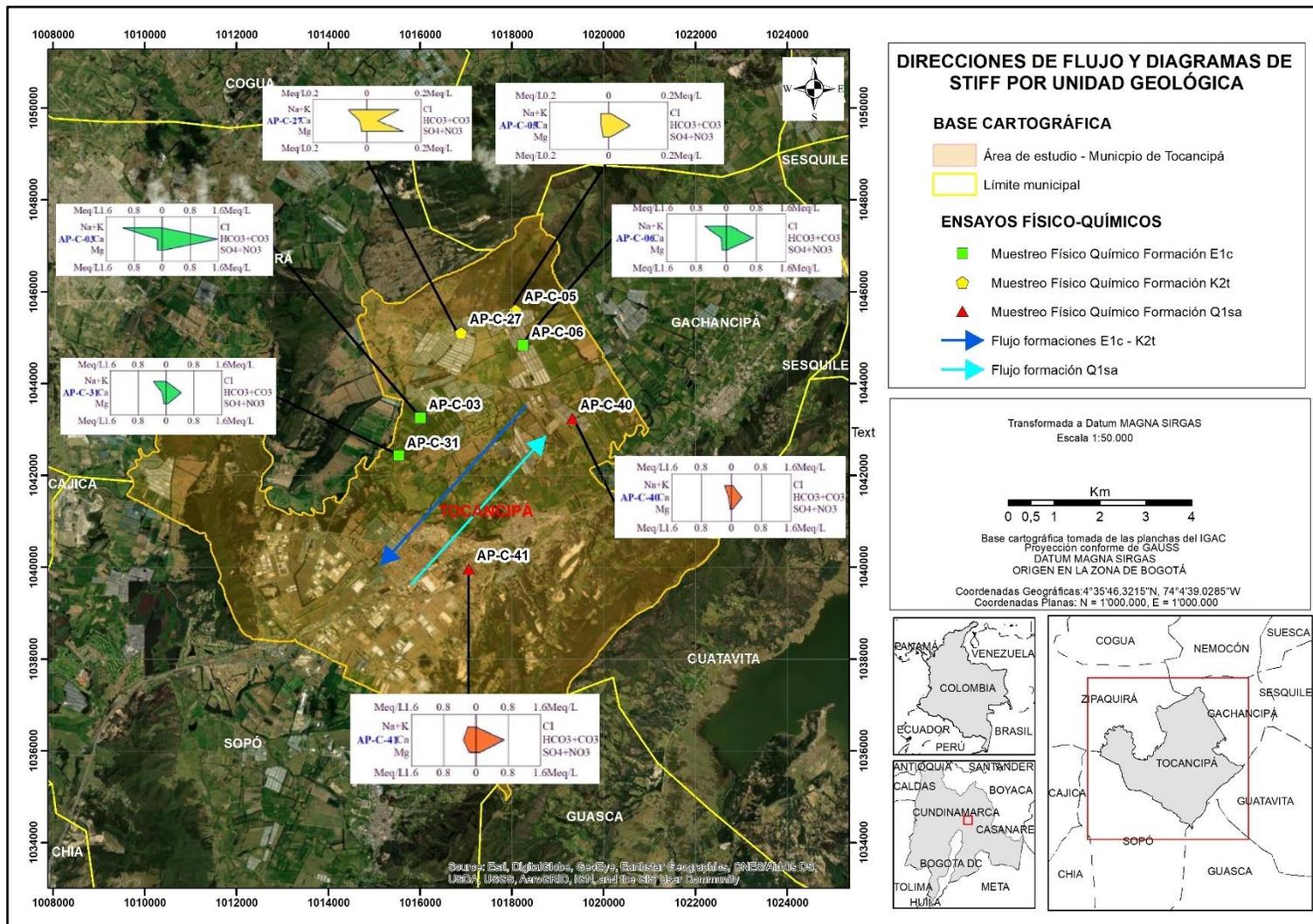


Figura 78. Dirección de flujo regional del agua subterránea.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.4.6 Parámetros e indicadores de Calidad del agua

Los valores de los parámetros que reglamentan la calidad del agua en Colombia según la destinación del recurso para consumo humano y doméstico, para uso agrícola y pecuario están definidos en los artículos transitorios 2.2.3.3.9.3 a 2.2.3.3.9.6 del Decreto 1076 de 2015 (MinAmbiente, 2015) y que fueron presentadas en la Tabla 2 del capítulo de metodología.

La calidad del agua se abordó con base a los valores de los parámetros de TDS, CE, pH, y de las concentraciones obtenidas de los ensayos físico químicos para usos de consumo humano y domésticos. La Relación de Absorción de Sodio (RAS), Porcentaje de Sodio Posible (PSP), Carbonato de Sodio Residual (CSR) y Salinidad Efectiva (SE) fueron considerados para establecer la calidad del agua con fines de riego. Debido a que el decreto no especifica los rangos para las relaciones RAS, PSP, SE y CSR, se acudió a valores de referencia obtenidos de la literatura técnica. En la Tabla 35 se presentan los registros obtenidos comparados con los valores de la norma que los regula.

5.4.6.1 Parámetros Físico químicos

Al comparar los valores de pH y las concentraciones de los componentes iónicos, de Cloruros, Hierro, Nitratos y sulfatos, con los señalados del decreto 1076 de 2015 se aprecia que las muestras AP-C-40, AP-C-05 y AP-C27 se alejan del valor neutro y por tanto no cumplen con el criterio de desinfección para consumo humano y doméstico por su tendencia ácida.

En cuanto a la CE el punto AP-C-03 es la única muestra que se encuentra fuera del rango máximo permitió para tratamiento convencional y desinfección para consumo humano y doméstico. Los demás parámetros se encuentran dentro de los límites establecidos en la resolución 1076 de 2015 para ser utilizados como agua para consumo humano, agrícola y pecuario.

5.4.6.2 Relación de Absorción de Sodio (RAS)

Cuando el sodio presenta altas concentraciones en un proceso de intercambio iónico con el Ca^{2+} o Mg^{2+} , puede reducir considerablemente el drenaje del suelo disminuyendo su fertilidad. El cálculo de esta relación matemática se realiza entre el sodio y la raíz cuadrada del promedio de las concentraciones de Calcio y Magnesio.

De acuerdo a los rangos propuestos por Ayres y Wescot (1985) los valores de RAS menores a 3,0 no tienen ningún grado de restricción para uso agrícola, valores entre 3,0 y 9,0 se consideran en grado moderado a leve y los mayores a 9,0 en grado de restricción severo.

Los resultados de los valores RAS en las muestras de agua de la Formación Cacho son los más elevados. Esto indica altas concentraciones de sodio originadas durante el intercambio iónico que ocurre con las arcillas y debe ser motivo de seguimiento sin que genere restricción en el uso. En ese sentido es importante mencionar que la totalidad de las muestras de agua cumplen con el criterio de calidad para uso agrícola en el área de Tocancipá.

5.4.6.3 Porcentaje de Sodio Posible (PSP)

Uno de los problemas más comunes derivados de la calidad de agua para riego es el cambio de las características físicas de los suelos. Acorde con Ayres y Wescot (1985), esto ocurre cuando el contenido de sodio en solución es mayor al 50% de los cationes disueltos, es decir se presenta una sustitución de calcio y magnesio por iones sodio.

Tabla 35. Comparación de parámetros físico químicos del agua vs Decreto 1076 (MinAmbiente, 2015).

ARTÍCULOS DEL DECRETO 1076 DE 2015		pH	Cl ⁻	Fe ²⁺	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	CE	RAS	PSP	SE	CSR
		pH	mg/l ⁻¹			μS/cm	-	%	meq-gl ⁻¹		
2.2.3.3.9.3. Tratamiento convencional para consumo humano y doméstico		5,0 – 9,0	250	N.E.	10,0	400,0	100,0	N.E.			
2.2.3.3.9.4. Desinfección para consumo humano y doméstico		6,5 – 8,5									
2.2.3.3.9.5. Criterios de calidad para uso agrícola		4,5 – 9,0	N.E.	5,0	N.E.			Se calcula			
2.2.3.3.9.6. Criterios de calidad para uso pecuario		N.E.		N.E.				N.E.			
Punto	Unidad Geológica	Resultados									
AP-C-41	Q1sa	6,80	0,18	0,54	0,50	3,33	80	0,34	68,51	0,24	0,21
AP-C-40		5,40	1,50	0,54	1,20	0,36	48	0,68	50,56	0,32	0,17
AP-C-06	E1c	6,47	4,09	0,02	0,53	0,05	89	1,60	95,35	0,58	0,49
AP-C-31		6,52	0,18	0,18	1,82	0,26	57	1,11	85,34	0,39	0,25
AP-C-03		6,89	0,09	0,77	0,79	0,03	171	2,86	79,57	1,34	1,30
AP-C-05	K2t	5,03	0,27	0,01	0,20	0,05	13	0,11	52,45	0,03	0,02
AP-C-27		5,45	4,25	0,00	7,20	0,96	42	0,32	21,74	0,23	-0,01

pH: potencial de hidrógeno Cl⁻: Cloruros Fe²⁺: Hierro NO₃⁻: Nitratos SO₄²⁻: Sulfatos CE: Conductividad eléctrica

RAS: Relación de absorción de Sodio PSP: Porcentaje de sodio posible SE: Salinidad Efectiva CSR: Carbonato de sodio residual

Fuente: Elaboración propia, 2021.

El indicador PSP establece una relación directa entre la concentración de sodio y la Salinidad Efectiva (SE). Para determinar la SE fue necesario realizar el análisis de las concentraciones de cationes de calcio y magnesio comparados con concentraciones de carbonatos, bicarbonatos y sulfatos como se indica a continuación.

Si, $Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-})$

$$SE = \sum \text{Cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

Si, $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^- + SO_4^{2-}) \wedge Ca^{2+} > (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \therefore$

$$SE = \sum \text{Cationes} - (Ca^{2+})$$

Si, $Ca^{2+} < (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \wedge (Ca^{2+} + Mg^{2+}) > (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \therefore$

$$SE = \sum \text{Cationes} - (CO_3^{2-} + HCO_3^-)$$

Si, $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) < (CO_3^{2-} + HCO_3^-) \therefore$

$$SE = \sum \text{Cationes} - (Ca^{2+} + Mg^{2+})$$

El resultado que se obtuvo indica que las muestras analizadas evidencian que el PSP aumenta de manera significativa en la media que la concentración de sodio es mayor y la SE es baja. El punto AP-C-27 es el único que no representa peligro en la sustitución de sodio por iones de calcio o magnesio. En las demás muestras el valor calculado de PSP está por encima del 50% y por tanto el agua puede ser utilizada para riego bajo monitoreo permanente de este parámetro, en especial las muestras de agua captadas de la Formación Cacho que registran valores entre el 80 % y 95%.

5.4.6.4 Carbonato de Sodio Residual (CSR)

De igual manera que los indicadores anteriores, este permite medir la concentración del sodio con relación al calcio y magnesio. El CSR se obtiene de la diferencia entre la suma aniones de carbonatos y bicarbonatos con respecto a la suma de los cationes de calcio y magnesio.

Valores inferiores a 1,25 meq-gl⁻¹ indican una buena condición de agua para riego, valores entre 1,25 y 2,5 meq-gl⁻¹ se usan de manera condicionada, y valores superiores a 2,5 meq-gl⁻¹ no son recomendables para riego. (López, C. 2018).

Los valores de CSR entre 0,17 meq-gl⁻¹ y 1,3 meq-gl⁻¹ que arrojan las Formaciones Sabana y Cacho son producto de la alcalinización que alcanza el agua cuando se incrementan los valores de pH, a la vez que incrementan las concentraciones de sodio y disminuyen las de calcio y magnesio.

El CSR de la muestra del punto AP-C-03 la clasifica de uso condicionado, y para el resto de conjunto de muestras se considera buena la calificación para riego.

5.4.7 Modelo hidrogeoquímico

El Modelo hidrogeoquímico fue realizado a partir de la recopilación de información y datos de siete muestras de agua de pozos obtenidas de las tres unidades de interés hidrogeológico, que fueron evaluados bajo criterios estadísticos y analíticos para establecer las relaciones y procesos hidrogeoquímicos que gobiernan las aguas subterráneas. Ver Tabla 36.

En términos generales los resultados de ensayos físico químicos obtenidos para las 3 unidades hidrogeológicas indican predominio de la facie bicarbonatada. Las altas concentraciones de HCO_3^- en los depósitos consolidados se ven favorecidas por el alto grado de fracturamiento de las rocas que originan porosidad secundaria, mientras que en los depósitos cuaternarios obedece a infiltración directa de aguas meteóricas sobre la planicie de Tocancipá.

En las unidades de interés hidrogeológico de edades cuaternaria y paleógena, donde existen intercalaciones de niveles arcillosos, se originan procesos de intercambio catiónico por la interacción agua – roca. En estas unidades se alcanza el reemplazo de iones sodio por iones de calcio y potasio. Este proceso es más intenso en la Formación Cacho que en la Formación Sabana.

En las rocas de edad Cretácica, cuya composición silíceas es predominante, los procesos de intercambio son menos relevantes y los procesos de disolución son casi nulos. En la muestra AP-C-27 se aprecia el cambio de facie de bicarbonatada cálcica y potásica a Clorurada y sulfatada cálcica y magnésica como posible respuesta a la contaminación antrópica desde superficie dentro del pozo o por procesos de diapirismo regional.

Bajo los criterios de clasificación de Tóth se identifican flujos de aguas subterráneas en el SS-Tsc con trayectorias que se originan en los flancos y se ajustan al tipo intermedio, las cuales se integran en el eje a flujos de tipo regional. El flujo regional de la Formación Sabana presenta una dirección con sentido SW-NE, contrario al sentido de flujo del río Bogotá con lo cual se puede inferir la inexistente conexión hidráulica entre estos dos sistemas hídricos.

La calidad del agua de las Formaciones Sabana y Cacho puede ser usada bajo los parámetros analizados de pH, cloruros, hierro, nitratos, sulfatos y sales disueltas para consumo humano y doméstico. El agua de la Formación Arenisca Labor y Tierna debe ser tratada por métodos convencionales para control de pH. Dadas las características por el alto contenido de hierro, es indispensable el tratamiento de las aguas subterráneas de estas unidades acuíferas con métodos tradicionales de aireación.

Los indicadores de salinidad indican que el agua de las tres formaciones puede ser usada en actividades agrícolas, aunque deben ser monitoreadas, en especial las aguas captadas de la Formación Cacho, para controlar la salinización provocado por intercambio de calcio y magnesio por sodio.

Tabla 36. Modelo hidrogeoquímico del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.

Análisis hidroquímico	Cuaternario	Paleógeno	Cretácico
	Formación Sabana	Formación Cacho	Formación Arenisca Labor y Tierna
Facie Hidroquímica	Bicarbonatada cálcica y magnésica con tendencia a bicarbonatada sódica y potásica.	Facie Bicarbonatada sódica potásica.	Facie Bicarbonatada cálcica y magnésica y clorurada sulfatada cálcica y magnésica.
Origen	Agua de edad reciente de origen meteórica con flujos de recorrido corto.	Agua con largo tiempo de residencia en el acuífero con incidencia de aguas de origen meteórica.	Aguas con largo tiempo de residencia en el acuífero. Hacia las zonas de recarga se dan mezclas con aguas meteóricas.
Procesos asociados	Principalmente meteorización con tendencia a la disolución de sales e intercambio catiónico.	Intercambio catiónico y mezcla con agua recientes.	Transformación química en prolongados periodos de tiempo. Puntualmente presencia de cloro y nitratos por contaminación antrópica.
Dominio	Asociado a precipitación de aguas meteóricas.	Principalmente por Interacción roca – agua.	Agua con estabilidad química.
Zona de recarga	Por infiltración sobre la planicie de Tocancipá.	De aguas meteóricas en afloramientos en el flanco occidental del SS-Tsc. Recarga por contacto discordante?? con la Formación Q1sa a través de grietas y fracturas (porosidad secundaria).	En los afloramientos rocosos en los flancos del SS-Tsc y por recarga lateral en profundidad.
Tipo de Flujo	Intermedio entre los flancos del sinclinal y regional a lo largo del eje de la estructura geológica		
Calidad de agua	Cumple con criterios para consumo humano y doméstico, uso pecuario. Tratamiento convencional de Fe ²⁺ Para uso agrícola evaluar PSP.	Tratamiento convencional de Fe ²⁺ . Para uso agrícola se debe evaluar regularmente indicador PSP	Tratamiento del pH ácido para consumo humano y doméstico

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.4.8 Síntesis de conclusiones

Los análisis efectuados sobre siete muestras aguas procedentes de pozos perforados permitieron plantear la caracterización del agua subterránea del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá como un aporte a la discusión para el entendimiento de los procesos y relaciones hidrogeoquímica que tienen lugar en los acuíferos de las Formaciones Sabana, Cacho y Arenisca Labor y Tierna.

Las concentraciones de TDS, las de iones mayoritarios y el valor de pH ligeramente ácido casi neutro del agua, exhibidas en las unidades hidrogeológicas de las Formaciones Sabana y Cacho es propia de una composición química variada con facies predominantemente bicarbonatadas sódicas asociadas a procesos de intercambio catiónico que permiten considerarlas como aguas relativamente jóvenes.

Los iones mayoritarios están representados en el sodio para la Formación Cacho, y de calcio y magnesio para las Formaciones Sabana y Arenisca Labor y Tierna, con algunos datos puntuales de concentraciones elevadas de cloruros, sulfatos y nitratos que denotan la complejidad de la hidroquímica que gobierna las aguas subterráneas.

Se evidenció que la zona de recarga del acuífero de la Formación Sabana corresponde a la planicie central del municipio de Tocancipá donde se encuentran sedimentos de edad cuaternaria que permiten la infiltración de aguas meteóricas ricas en bicarbonatos hacia niveles arenosos más profundos.

Se identificó como zona de recarga de la Formación Cacho los afloramientos rocosos en el flanco occidental del SS-Tsc. Además, la hidroquímica de los pozos en este sector sugieren el fracturamiento de la roca que favorece la mezcla de aguas bicarbonatadas proveniente de la Formación Sabana. Esta hipótesis implica que las dos formaciones están en contacto discordante por erosión diferencial de la Formación Bogotá como se presentó en el modelo geológico.

La zona de recarga de la Formación Arenisca Labor y Tierna está claramente definida en los flancos del SS-Tsc, y donde recarga agua meteórica se evidencia la mezcla con aguas con mayor tiempo de residencia dentro del acuífero.

Los parámetros físico químicos analizados, tanto de las muestras de agua de la Formación Arenisca Labor y Tierna y del punto AP-C-40 de la Formación Sabana, registran valores inferiores a los establecidos en el criterio de pH de desinfección para consumo humano y doméstico, y la muestra AP-C-03 de la Formación Cacho registra un valor que supera el límite permitido por CE. Los parámetros de las demás muestras se encuentran dentro de los límites requeridos para consumo humano y doméstico, uso agrícola y pecuario.

Respecto a los indicadores RAS, PSP, SE y CSR se concluye que el agua de las tres unidades hidrogeológicas puede ser usada para riego, a pesar de existir una alta probabilidad de enriquecimiento de sodio producto del intercambio iónico que se produce al precipitar el calcio y magnesio en periodos secos cuando el pH baja. Al darse este intercambio se produce una transformación en el suelo que desfavorece el drenaje, y por tanto la filtración del agua meteórica hacia los niveles acuíferos principalmente en la Formación Sabana.

5.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO

El área de estudio se ubica en la Cordillera Oriental Colombiana, en la altiplanicie de la Sabana de Bogotá, inserta en la provincia Sabana Centro de la cuenca del río Bogotá. Se caracteriza por poseer dos morfologías, una de planicie donde el clima es Frío Semiárido, y otra que se localiza en el sector montañoso, topográficamente más elevado, con un clima Muy Frío. El régimen pluviométrico es de tipo bimodal originado por la variación de la zona de confluencia intertropical que se extiende hacia el occidente del país.

Basados en datos, registros y observaciones directas de campo se plantea la necesidad de conocer la interacción existente del agua a lo largo de su recorrido por diferentes unidades geológicas del SS-Tsc para comprender su comportamiento hidrodinámico e hidrogeoquímico a través de un MHC en el municipio de Tocancipá como se aprecia en la Figura 79 y 80, y su cartografía en la Figura 81.

La secuencia estratigráfica general está definida de base a techo por rocas del Cretáceo iniciando con las tres unidades del Grupo Guadalupe, Arenisca Dura, Plaeners y Arenisca Labor y Tierna, suprayacidas por rocas de la Formación Guaduas, rocas del Paleógeno de la Formación Cacho y Formación Bogotá que son cubiertas por las Formaciones cuaternarias Sabana y Chía. También se presentan depósitos aluviales recientes, coluviales y rellenos antrópicos distribuidos a lo largo del área.

El SS-Tsc es una estructura geológica inferida asimétrica que en su núcleo aloja depósitos no consolidados cubriendo formaciones de edades Paleógenas y Cretácicas, cuyos flancos hacen parte del Anticlinal de Sopó – Sesquilé al oriente, y del Anticlinal de Nemocón al occidente. Al norte del Municipio el eje del sinclinal presenta una dirección NE-SW con flancos buzando entre 10° y 25°, que cambian de dirección a NS en límites con el municipio de Sopó donde el flanco occidental alcanza una inclinación de 35°. Esta estructura está cortada al oriente por una falla de cabalgamiento, más o menos paralela a los cerros, que elevó el bloque de rocas Cretácicas y las dejó en contacto con rocas de edad Paleógena. En esta investigación se propone como Falla de Tocancipá. En este mismo flanco se aprecia un replegamiento de la roca que fue denominado Anticlinal de Tocancipá que hace parte de la estructura mayor conocida como Anticlinal de Sopó Sesquilé.

Por sus características litológicas y estructurales se identifican las Formaciones Arenisca Labor y Tierna, Cacho y Sabana como unidades de interés hidrogeológico. Las Formaciones Plaeners, Guaduas y Bogotá actúan como sustratos impermeables debido a su composición predominantemente arcillosa. El modelo hidrodinámico identificó los flujos de agua subterránea de tipo intermedio y ninguna de las unidades de interés presenta zona de descarga natural dentro del área municipal, mientras que las descargas artificiales están asociadas a la explotación del recurso hídrico por medio de bombeo en pozos profundos.

El modelo hidrológico identificó como las principales zonas de recarga las áreas de montaña donde afloran rocas permeables de la Formación Arenisca Labor y Tierna, así como la planicie donde se expone superficialmente la Formación Sabana. Este modelo señala que las zonas de tránsito del agua superficial están asociadas a quebradas y canales que descienden por las laderas y corren por la planicie aluvial hacia el efluente principal de la región que es el río Bogotá.

El modelo hidrogeoquímico refleja cierta complejidad en cuanto a procesos de intercambio catiónico, principalmente en las Formaciones Sabana y Cacho. Aunque en la Formación Arenisca Labor y Tierna se aprecia cierta estabilidad química del agua, es evidente que las tres unidades están gobernadas por procesos de interacción agua roca que alteran su composición.

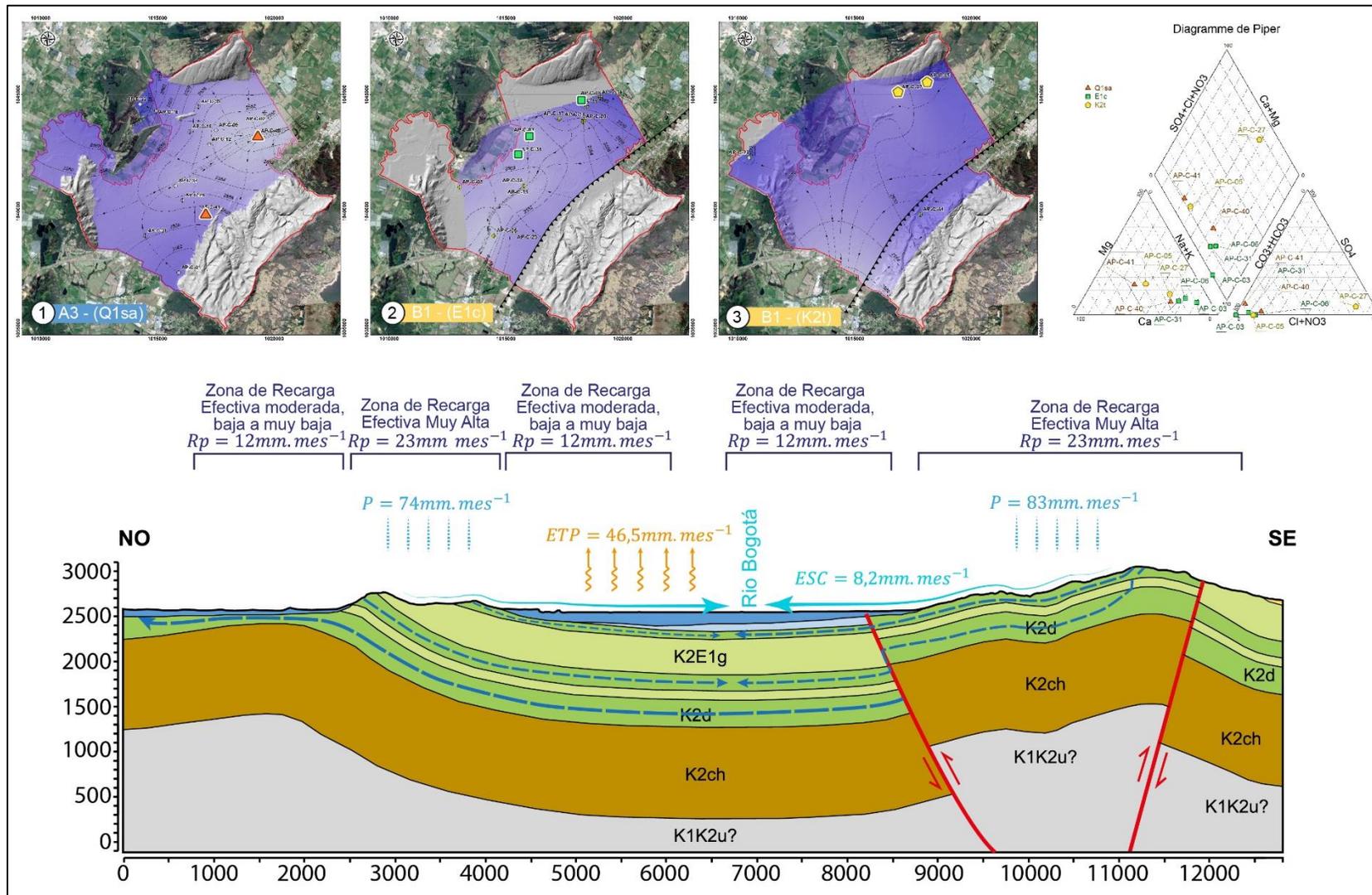


Figura 79. Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

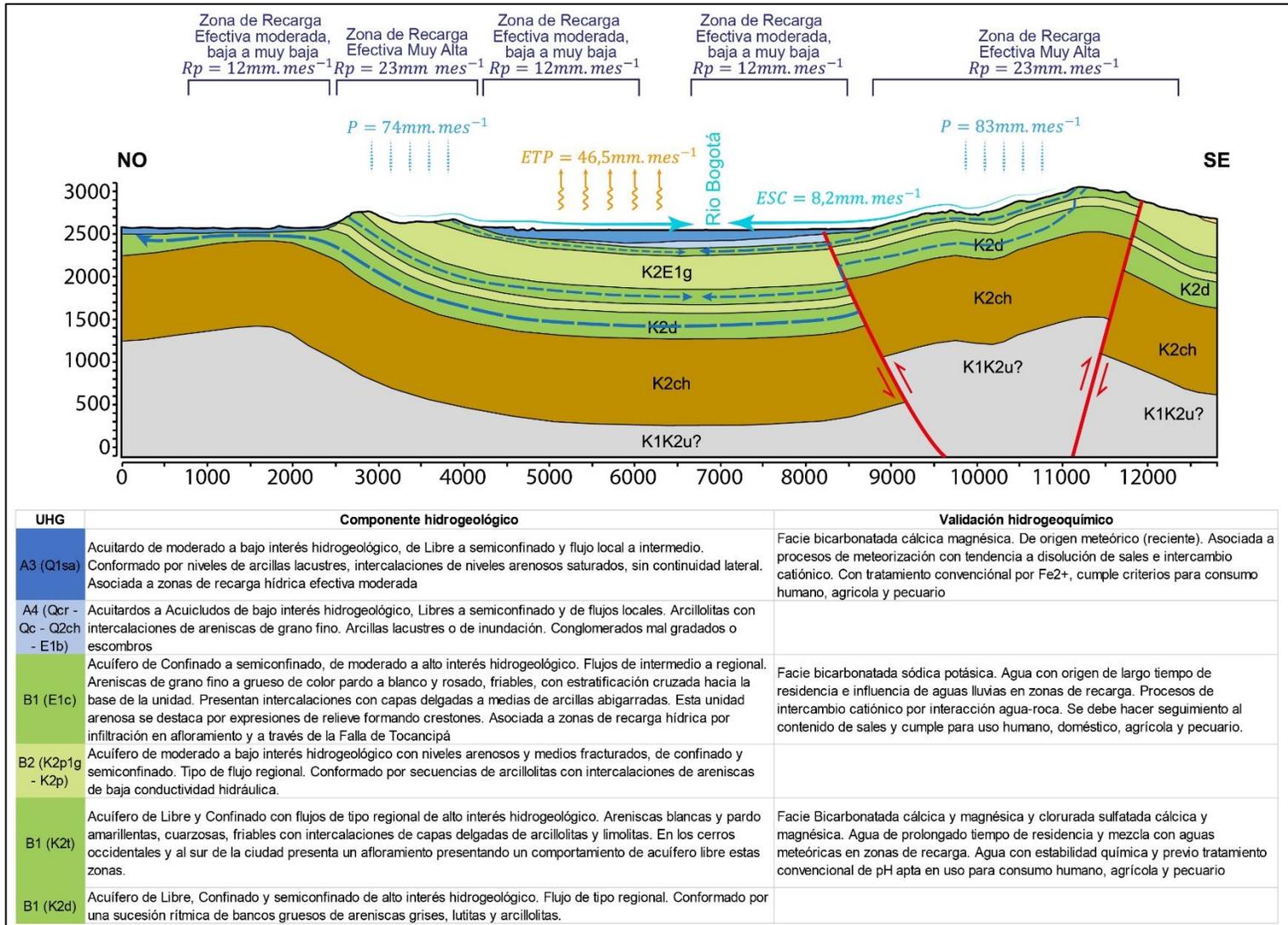


Figura 80. Leyenda del Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.
 Fuente: Elaboración propia, 2021.

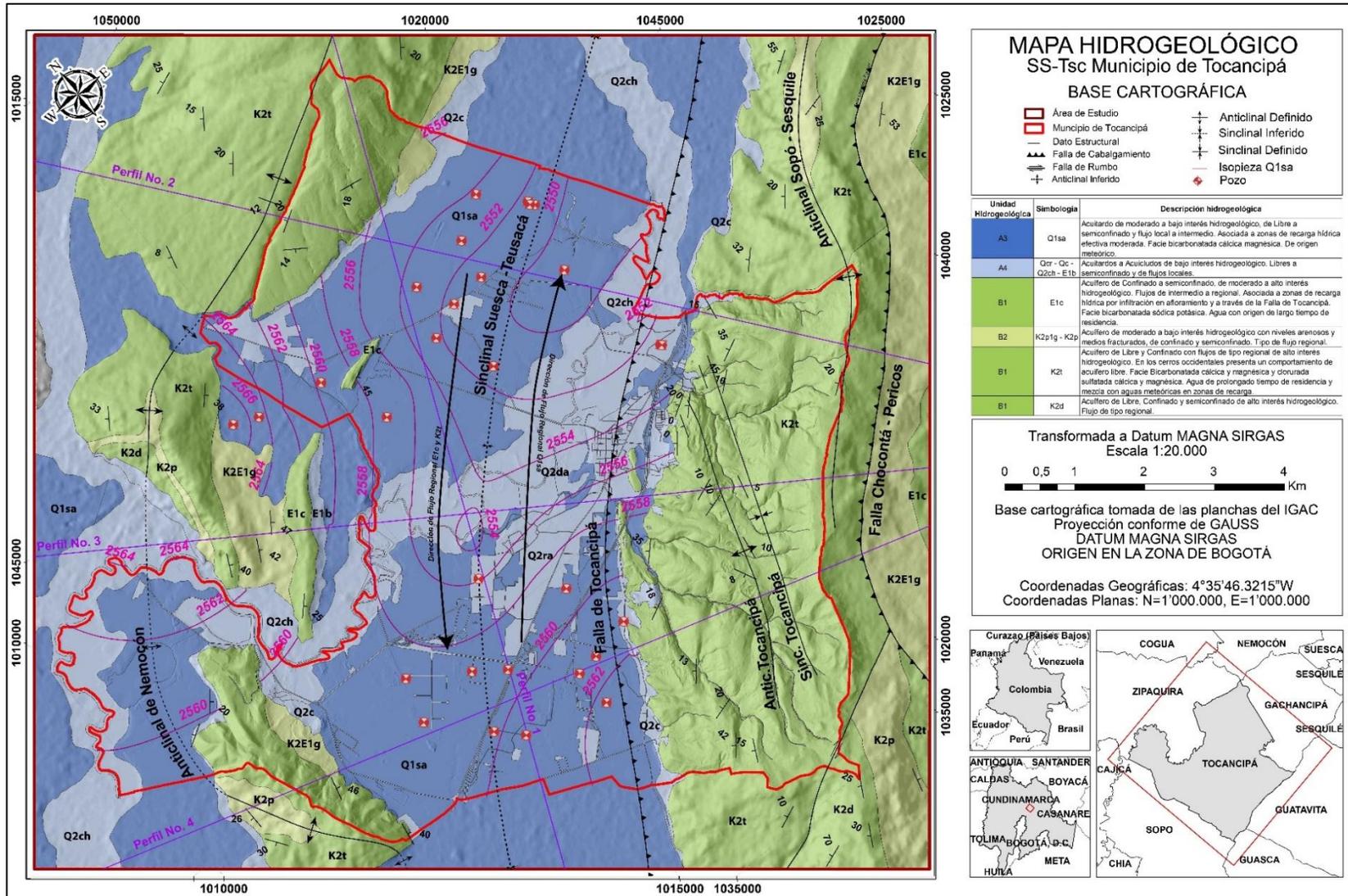


Figura 81. Mapa Hidrogeológico Conceptual (MHC) del SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.
 Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.5.1 Formación Arenisca Labor y Tierna (k2t)

Esta unidad se expone superficialmente en las zonas topográficamente más altas ocupando gran parte de los cerros circundantes conformando los flancos de la estructura del SS-Tsc. El flanco oriental de la estructura está cortado por una falla de cabalgamiento, denominada Falla de Tocancipá, que pone en contacto rocas de la Formación Arenisca Labor y Tierna con rocas de las Formaciones Cacho y Bogotá.

La litología de esta formación es de tipo granular, dispuesta en capas de areniscas cuarzosas intensamente fracturadas intercaladas con delgadas capas de arcilla favorecen la recarga potencial. El análisis del balance hídrico indica que la precipitación alcanza un registro promedio multianual con valor 960 mm sobre los cerros circundantes, por tanto, fueron definidas como zonas de recarga efectiva muy alta. Localmente en sectores localizados al norte y sur del Municipio se presentan valores ligeramente más bajos con 870 mm, allí fueron clasificadas como zonas de recarga efectiva moderada a baja. Esta variación de categoría obedece a que algunas características como vegetación, tipo y uso de suelo han sido modificadas por actividad antrópica disminuyendo la capacidad de filtración del agua principalmente en zonas donde se desarrolla minería de cantera y urbanismo.

Bajo el área que ocupa la planicie, la Formación Arenisca Labor y Tierna se encuentra confinada a profundidades mayores a 600 m profundidad. El límite hidrogeológico del acuífero está definido en la base por la Formación Plaeners, y en el techo por la Formación Guaduas. En los cerros periféricos donde aflora el acuífero presenta un comportamiento libre.

Los parámetros hidráulicos permiten considerarlo un acuífero confinado, de alta productividad y por tanto de alto interés hidrogeológico. Las líneas de flujo son de carácter regional con orientación NE-SW cuya zona de descarga se encuentra al sur fuera del límite municipal.

La tendencia que refleja la variación del nivel estático es descendente. Este comportamiento se explica por la extracción continua por bombeo de pozos que alcanza un 20% del volumen total aprovechado de agua subterránea en el Municipio. Otro factor que provoca el descenso del nivel en el acuífero es el cambio de las características permeables de suelos y rocas en las zonas de recarga como producto de las actividades extractivas en canteras. Evidencia de ello es el abatimiento drástico de manantiales que se ubicaban en las partes altas del Municipio.

En aquellas zonas donde la zona de recarga es directa por infiltración del agua meteórica la hidroquímica presenta facies bicarbonatadas cálcica y magnésica, mientras que en zonas donde se presentan recargas laterales profundas la facie es de tipo clorurada-sulfatada-magnésica-cálcica y magnésica. Aunque localmente se presentan mezclas con aguas recientes, los procesos de transformación química son prolongados a través del tiempo y su comportamiento exhibe cierta estabilidad química. Los altos contenidos de cloruros pueden estar asociados a contaminación antrópica o posiblemente por diapirismo regional.

Los valores de pH del agua en esta formación tienden presentar un carácter ácido, por lo que requiere tratamiento y desinfección para consumo humano y doméstico. Para uso agrícola y pecuario cumplen criterios establecidos en el decreto 1076 de 2015.

Las reservas totales (Q_T) fueron calculadas en $4,80E+08$ m³ para condiciones de un acuífero confinado, que alcanza un área de 68,22 km². El espesor geológico promedio se determinó en 140 m y se tomó un coeficiente de abatimiento de $5,90E-03$.

5.5.2 Formación Cacho (E1c)

La Formación Cacho reviste especial interés, debido a que es la unidad con menor exposición superficial restringida a una pequeña franja en el flanco occidental del sinclinal que se extiende bajo la planicie aluvial hacia el oriente hasta alcanzar contacto con la Falla de Tocancipá bajo depósitos cuaternarios.

La composición litológica de esta unidad corresponde a areniscas de grano medio y niveles de arena gruesa con intercalaciones de bancos gruesos de arcillas. En el sector donde aflora presenta porosidad primaria baja debido al grado de cementación intergranular, en consecuencia, se clasificó como una zona de recarga efectiva moderada a pesar de que los valores de precipitación promedio mensual multianual son del orden de 930 mm.

La Formación Cacho bajo la planicie aluvial adquiere las características de un acuífero confinado por capas sello, cuyo límite hidrogeológico inferior puede alcanzar 300 m de profundidad, limitado por contacto neto y concordante con la Formación Guaduas. El límite superior se puede encontrar a profundidades menores a 100 m y lo marca la Formación Bogotá, excepto en el sector norte sobre el flanco occidental donde ésta en contacto discordante con depósitos de la Formación Sabana. En el flanco occidental la recarga del acuífero se presenta por infiltración de aguas lluvia sobre las rocas aflorantes, y bajo depósitos cuaternarios donde se estableció una conexión hidráulica con materiales de la Formación Sabana. En el flanco oriental se identificó otra zona de recarga a lo largo de la falla de Tocancipá con flujos provenientes de la Formación Arenisca Labor y Tierna.

En profundidad la Formación Cacho presenta porosidad secundaria por fracturamiento que permite considerarlo con interés hidrogeológico de moderado a alto debido a que aporta el mayor volumen de agua subterránea explotada en el Municipio. El flujo es de carácter intermedio que transita hacia el eje de la estructura y se integran a un flujo regional con orientación NE-SW. La zona de descarga natural se localiza fuera del área de estudio, y la descarga artificial se realiza por bombeo de pozos profundos como se mencionó anteriormente.

La evolución del nivel piezométrico de este acuífero marca una tendencia decreciente de manera acelerada respecto a los otros acuíferos de la zona. Esta tendencia se debe a que esta unidad aporta aproximadamente el 50% del volumen que se realiza por descarga artificial en la zona.

Desde el punto de vista hidrogeoquímico corresponde a una mezcla de aguas bicarbonatadas sódicas potásicas que evidencian contacto con aguas con periodos de residencia altos dentro del acuífero. Estas mezclas se producen por la filtración del agua lluvia en los afloramientos de la roca, o por conexión hidráulica con la Formación Sabana en profundidades menores a 100 m. Las líneas de flujo del modelo hidrogeoquímico validan las líneas definidas en el modelo hidrodinámico ratificando el carácter regional en dirección al NE-SW.

El agua en su recorrido dentro de la unidad acuífera entra en contacto con minerales provenientes de niveles arcillosos y desarrolla procesos de intercambio catiónico que sustituyen iones de calcio y potasio por sodio. Este enriquecimiento del ión sodio se evidencia en los resultados calculados de los indicadores de calidad de agua donde el PSP supera un valor del 80%, por tanto, estas aguas requieren permanente control para su uso en riego agrícola. Los demás parámetros cumplen para consumo humano, doméstico y uso pecuario.

Las reservas totales (Q_T) fueron calculadas en $5,11E+07$ m³ para condiciones de un acuífero confinado, que alcanza un área de 30,52 km². El espesor geológico promedio se determinó en 90 m y se tomó un coeficiente de abatimiento de 5,05E-03.

5.5.3 Formación Sabana (Q1sa)

Hacia las partes bajas del municipio de Tocancipá los depósitos cuaternarios cubren la mayor parte del área de la planicie con espesores variables entre 10 y 170 m de profundidad. La litología está compuesta por niveles arenosos de alta permeabilidad y porosidad intercalados con materiales de texturas finas de arcillas y limos que disminuyen su potencial de recarga efectiva.

El modelo hidrológico identificó el área de la planicie como el área de recarga del acuífero de la Formación Sabana. La precipitación promedio mensual multianual alcanza registros que llegan a 910 mm. La zona de tránsito del agua superficial se realiza a través de los cauces de quebradas y canales con flujos provenientes de las partes altas en su recorrido hacia la zona de descarga que corresponde al río Bogotá. El balance hídrico establece que la recarga potencial de agua que se infiltra en el suelo representa el 17% del valor de la precipitación promedio multianual y se realiza

Las intercalaciones de niveles granulares y arcillosos que conforman esta unidad se consideran como acuitardo de libre a semiconfinado y por tanto de moderado interés hidrogeológico. Estratigráficamente el límite inferior reposa discordante sobre las Formaciones Bogotá o Arenisca Labor y Tierna según el área de ocurrencia, aunque localmente, hacia el flanco occidental del sinclinal también se infiere el contacto discordante con la Formación Cacho y se crea una conexión hidráulica entre estos dos acuíferos.

Las líneas equipotenciales obtenidas del modelo hidrodinámico revelan un flujo de tipo intermedio a regional, con una dirección definida en sentido SW-NE. El análisis de las líneas de flujo indica que la descarga natural se realiza fuera del área de estudio, lo que sustenta la desconexión hidráulica con el sistema superficial del río Bogotá en este sector. El análisis de la evolución de la variación del nivel estático de esta unidad indica una ligera tendencia al descenso. El relativo equilibrio se atribuye al bajo volumen explotado, y su vez a la rápida recuperación de los niveles acuíferos. Al igual que los otros acuíferos la descarga artificial se realiza por el bombeo de pozos profundos con un aporte del 10% del volumen total explotado.

La composición química del agua de la Formación Sabana corresponde a una facie predominante bicarbonatada cálcica a magnésica que tiende a bicarbonatada sódica. El origen de las aguas de esta formación está asociada a procesos meteóricos, los cuales superficialmente disuelven carbonatos y a medida que se profundiza se presenta el intercambio catiónico. Esta alteración química se presenta principalmente entre iones de sodio que reemplazan a los de calcio y potasio. Este comportamiento ratifica que las direcciones de flujo son de carácter intermedio que provienen de los flancos del sinclinal en dirección al eje donde convergen para tomar dirección SW-NW en búsqueda de la zona de descarga fuera del municipio de Tocancipá.

Al comparar los resultados de los componentes químicos analizados con los parámetros establecidos en el decreto reglamentario se evidencia que el agua de este acuífero cumple con los criterios de calidad para tratamiento convencional y desinfección para consumo humano y doméstico y para uso pecuario. Para uso Agrícola debe hacerse seguimiento por el alto porcentaje de sodio posible que supera el 50%.

Las reservas totales (Q_T) fueron calculadas en $1,84E+07$ m³ para condiciones de un acuífero libre, que cubre un área de 53,43 km². El espesor saturado promedio se determinó en 21,02 m y se tomó una recarga de $1,56E-01$ m año⁻¹. Estas reservas pueden representar la solución a corto y mediano plazo bajo condiciones críticas por un eventual desabastecimiento de agua en el Municipio.

5.6 POTENCIAL DEL APROVECHAMIENTO DEL RECURSO HÍDRICO

En una zona o región con diferentes posibilidades para aprovechar un nivel acuífero, es la profundidad de perforación el factor determinante para acceder a él. Otros elementos pueden entrar en juego al momento de tomar la decisión de pinchar el suelo, como por ejemplo las características hidráulicas, de calidad o la probabilidad de recarga, entre otras, que al final resultan irrelevantes ante la inminente necesidad de aprovechamiento del recurso. En este sentido, el potencial de un acuífero se entiende como la facilidad de acceder a él y de poder explotarlo.

Esta investigación se realizó con base a análisis de ensayos geo eléctricos, de perforaciones de pozos y observaciones de campo con el cual se elaboró un modelo geológico del SS-Tsc, que al integrarlo con resultados hidrológicos y la caracterización hidrodinámica e hidrogeoquímica se obtuvo un MHC 3D para el municipio de Tocancipá. De este modelo se pudo identificar que los acuíferos de las Formaciones Sabana, Cacho y Arenisca Labor y Tierna, aunque presentan algunos parámetros de calidad fuera de rangos permitidos, pueden ser aprovechadas en volumen y calidad con previo tratamiento convencional para consumo humano y doméstico o en actividades agrícolas y pecuarias, por tanto, su potencial estará dado en función de la disponibilidad de alcanzar alguno de ellos.

De las tres unidades de interés, el acuífero de la Formación Cacho representa cerca del 50 % del volumen explotado en aguas subterráneas, y su disposición espacial determina las zonas con mejor prospección para la explotación del recurso en el municipio de Tocancipá. Se plantea en este apartado de la investigación la elaboración de un mapa que identifique estas áreas en función de la profundidad. Para ello se aplicó el proceso esquematizado en la Figura 82.

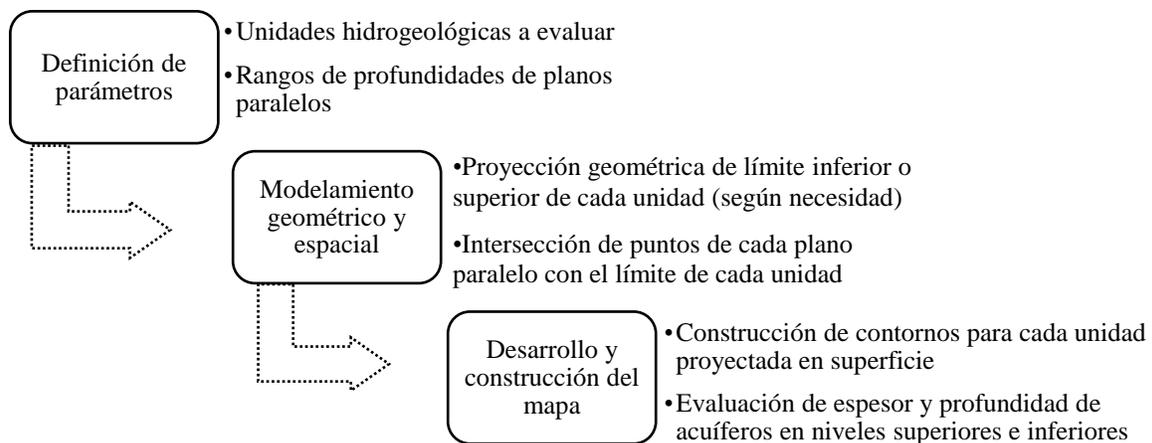


Figura 82. Diagrama de Proceso para la zonificación de acuíferos en Tocancipá.

Fuente: Elaboración propia, 2021.

5.6.1 Definición de parámetros

Como ya se mencionó las diferentes características geológicas, hidráulicas y de composición geoquímica definieron a las Formaciones Sabana, Cacho y Arenisca Labor y Tierna como las principales unidades acuíferas que conforman el SS-Tsc en el municipio de Tocancipá.

Se tomó como línea base la cota topográfica de 2560 msnm que representa un promedio general de la planicie de Tocancipá. A partir de ella se trazaron 3 planos paralelos en profundidad que coinciden con las cotas 2500, 2400 y 2300 msnm o su equivalente en profundidad a 160, 200 y 300 m. El plano más bajo corresponde a la altura donde se presenta el contacto más profundo entre la Formación Cacho y la Formación Guaduas, localizada muy próxima al eje del sinclinal. Los otros dos planos fueron definidos a criterio del investigador.

5.6.2 Modelamiento geométrico y espacial

Del modelo geológico se tomó la geometría espacial del límite inferior de la unidad Cacho y el límite superior de la Formación Arenisca Labor y Tierna. Estas formas geométricas fueron cruzadas por los diferentes planos paralelos, lo que dio origen a una serie de puntos de intersección que definen la posición del límite seleccionado de la unidad a una determinada profundidad.

5.6.3 Desarrollo y construcción del mapa

Los puntos de intersección obtenidos de las Formaciones Cacho y Arenisca Labor y Tierna fueron proyectados en superficie y unidos para generar líneas de contorno de cada unidad. En cada punto proyectado se determinó el espesor de la unidad acuífera que está por encima de él y la profundidad a la que se encuentra su límite inferior.

En los puntos donde la unidad Arenisca Labor y Tierna se encuentra bajo la Formación Cacho se procedió de manera similar considerando el límite superior de la unidad Cretácica y se establecieron rangos de la profundidad a la que se localiza.

En concordancia con lo anterior se realizó la construcción final del mapa bajo dos supuestos. El primero que considera el espesor de la Formación Sabana, y la profundidad en que aparece la Formación Arenisca Labor y Tierna respecto a la Formación Cacho. El segundo que considera el espesor de la Formación Sabana respecto a la Formación Arenisca Labor y Tierna.

Según la representación gráfica que se ilustra en la Figura 83, el mapa resultante presenta cinco zonas donde se indica la profundidad a la que los diferentes acuíferos están disponibles. En resumen, la zonificación está determinada en función de la profundidad de las unidades acuíferas y los rangos definidos se presentan en la Tabla 37.

Tabla 37. Zonificación de acuíferos en función de la profundidad.

Zona	Q1sa	E1c	K2t
	Profundidad (m)		
1	< 200	200 – 300	>900
2	< 200	100 - 200	800 - 900
3	< 100	< 100	600 - 800
4	<100	-	<600
5	< 60	-	< 100

Fuente: Elaboración propia, 2021.

La zona 5 representa alto interés hidrogeológico. Se evidencia que a profundidades inferiores a 100 m se encuentra el acuífero de la Formación Arenisca Labor y Tierna, en contraste con la zona 4 donde la Formación Arenisca Labor y Tiernas se alcanza a profundidades mayores de 600 m y el espesor de la Formación Sabana es relativamente delgado.

Las zonas 1, 2 y 3 también representan zonas de alto interés hidrogeológico, en ellas se puede acceder a los acuíferos de las Formaciones Sabana y Cacho a profundidades inferiores a 300 m. Finalmente, la zonificación muestra que a profundidades mayores de 300 m el aprovechamiento del recurso se restringe al acuífero de la Formación Arenisca Labor y Tierna.

Bajo este escenario se evidencia que el SS-Tsc guarda un alto potencial de sus recursos hídricos subterráneos que pueden ser considerarlos como una fuente alterna viable para el abastecimiento en el municipio de Tocancipá.

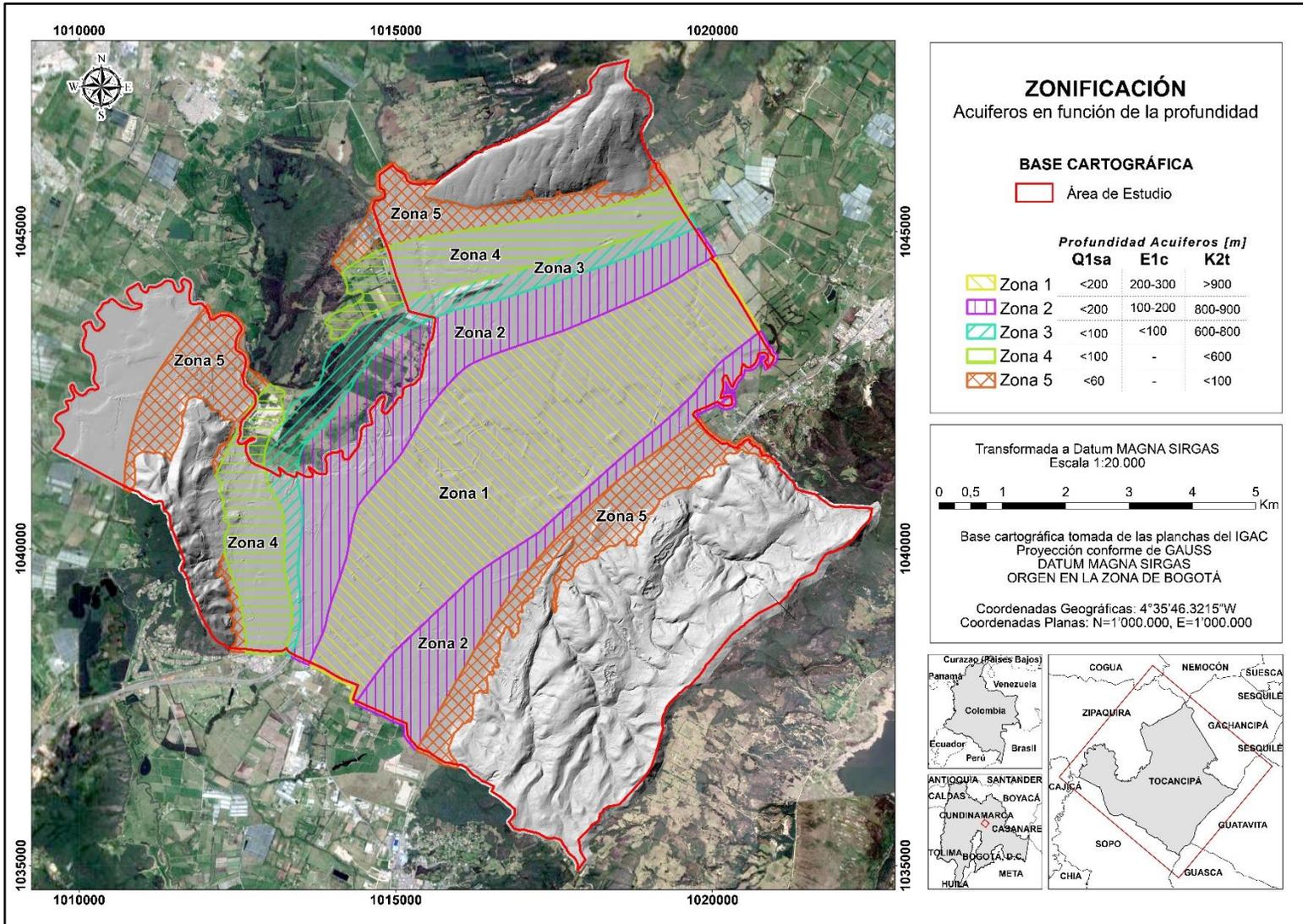


Figura 83. Zonas de interés en función de la profundidad en el municipio de Tocancipá.
Fuente: Elaboración propia, 2021.

6. CONCLUSIONES

En el modelo geológico geofísico se trazó el eje del sinclinal ligeramente al occidente respecto a lo indicado en la plancha 209 y 228 del SGC. Igualmente se identificaron dos estructuras en el flanco oriental del sinclinal que son propuesta en esta investigación como Falla de Tocancipá y Anticlinal de Tocancipá. La Falla de Tocancipá es de cabalgamiento que elevó el bloque de rocas de la Formación Arenisca Labor y Tierna y las puso en contacto con rocas de la Formación Cacho con una orientación similar a la Falla Chocontá – Pericos. El Anticlinal de Tocancipá corresponde a un replegamiento de la Formación Arenisca Labor y Tierna con dirección al NE que termina en el límite municipal con Gachancipá.

El espesor máximo para la Formación Sabana es menor a 170 m, encontrándose en el límite inferior reportado por el SGC. En la Formación Bogotá se evidenció un adelgazamiento hacia los costados en profundidad debido a procesos de erosión diferencial lo que permitió el contacto discordante de la Formación Cacho con depósitos de la Formación Sabana. Las demás unidades se encuentran dentro de rangos promedio según valores de la literatura técnica existente.

El análisis hidrológico evidencia que sectores al norte y sur del Municipio, donde se registran precipitaciones promedio mensual multianual del orden de 870 mm sobre rocas permeables, son más susceptibles a disminuir la efectividad de la recarga comparada con zonas que registran precipitaciones ligeramente mayores que alcanzan valores de 910 mm sobre depósitos cuaternarios. En estas zonas la intervención antrópica es el principal factor que altera la infiltración del agua al producir cambios en las características del suelo y del macizo rocoso por actividades como urbanismo, deforestación o minería, estas últimas desarrolladas principalmente en el eje del Anticlinal de Tocancipá. La recarga de la Formación Sabana en la planicie es por infiltración de aguas lluvias que alcanza valores de 12 mm mes^{-1} a través de niveles arenosos. La recarga en los afloramientos rocosos en las partes altas es de 23 mm mes^{-1} .

Las líneas de flujo obtenidas del análisis potenciométrico para el acuífero de la Formación Sabana indican que son de tipo local, con dirección contraria al efluente principal que es el río Bogotá, lo que sugiere desconexión hidráulica entre estos dos sistemas, mientras que las líneas de flujo de los acuíferos de las Formaciones Cacho y Arenisca Labor y Tierna son de tipo intermedio que se integran hacia el eje del SS-Tsc a un flujo con orientación NE-SW. La zona de descarga para todas las unidades está fuera del área de estudio.

Los resultados a muestras de agua reflejan cierta complejidad en la hidroquímica que se desarrolla dentro de los acuíferos, asociados principalmente a mezclas de aguas lluvias con aguas residentes y su interacción con la roca generando procesos de intercambio catiónico ocurridos entre iones sodio con calcio y magnesio. Los parámetros de calidad analizados bajo el Decreto 1076 de 2015 del Ministerio de Ambiente en esta investigación indican que el agua para consumo humano, riego o en actividades pecuarias debe considerar algún tipo de tratamiento según su destinación. En actividades agrícolas se debe llevar a cabo seguimiento permanente, en especial al acuífero de la Formación Cacho por sus altas concentraciones de iones sodio, y de la Formación Arenisca Labor y Tierna por pH y altas concentraciones de cloro y nitratos.

En el MHC del SS-Tsc se evidencia que las características geológicas, hidrológicas, hidráulicas e hidrogeoquímicas permiten considerar los acuíferos de las Formaciones Arenisca Labor y Tierna, Cacho y Sabana como una fuente alterna y viable que garantiza el desarrollo de los diferentes proyectos en el municipio de Tocancipá y sus necesidades. Se estima que de ellas actualmente se explota un volumen de $634.670 \text{ m}^3 \text{ mes}^{-1}$, y se calculan reservas explotables del orden de $5,49\text{E}+08 \text{ m}^3$.

De las tres unidades, la Formación Cacho es sin duda la de mayor relevancia, aunque históricamente ha sido subvalorada. De ella se explota más del 50% del agua en la zona a través de pozos que no superan los 300 m de profundidad. Estas rocas corresponden a una lito arenita, compuesta por cuarzo mono y policristalino de textura subangular a angular con microfracturas interconectadas que generan porosidad primaria y secundaria, cuya recarga es por infiltración de aguas lluvias donde aflora, por conexión hidráulica con la Formación Sabana, y por aportes del Acuífero de la Arenisca Labor y Tierna a través de la Falla de Tocancipá. Los ensayos de calidad fisicoquímicos del agua indican que es apta para consumo humano y pecuario, y con seguimiento a las concentraciones de sodio puede ser utilizada para riego.

El MHC exhibe que toda el área del municipio de Tocancipá es una zona de alto interés hidrogeológico. El análisis integral de los diferentes componentes, geológico, hidrológico, hidrodinámico e hidrogeoquímico, sobre las unidades acuíferas permitió engranar variables como espesor, distribución espacial, zonas de recarga y dirección de flujo para determinar los rangos de la zonificación. Las cinco zonas definidas fueron concebidas en función de la profundidad de los acuíferos de la Formación Cacho y/o de la Formación Arenisca Labor y Tierna, respecto a una cota de referencia de 2560 msnm.

El resultado de la zonificación sustenta el objetivo principal de esta investigación y se constituye en una línea base para el desarrollo de diferentes escenarios que tiendan a concretar los planes de crecimiento del municipio de Tocancipá. Igualmente, se convierte en un elemento para corroborar mediante análisis matemáticos la coherencia con los datos medidos, en función del crecimiento poblacional del Municipio y de las áreas de interés asociadas a proyectos poblacionales, industriales o agrícolas.

Aunque los acuíferos presentan estabilidad en la evolución del nivel piezométrico sin cambios considerables en un futuro próximo cercano, es necesario adelantar un estudio que sustente las causas del abatimiento de manantiales en las partes altas de los cerros, y la incidencia de los cambios en las características del suelo y del macizo rocoso por actividades antrópicas como urbanismo, deforestación o minería, estas últimas desarrolladas principalmente en el eje del Anticlinal de Tocancipá que afectan directamente la zona de recarga de los acuíferos de las Formaciones Arenisca Labor y Tierna y Cacho.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, C. A., & Pineda, J. E. (2002). Características hidrológicas de la Sabana de Bogotá. *Universidad Pontificia Javeriana*.
- Alcaldía de Tocancipá. (2014). *PBOT en Concertación 2015-2027*.
- Alcaldía de Tocancipá. (2018). *Informe de gestión de Tocancipá*.
- Alvarez, A. (1997). Gestión del agua subterránea en La Sabana de Bogotá. *Revista Geológica Colombiana*, 81-101.
- Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). Applied Groudwater Modeling. *Applied Groundwater Modeling*, 3-25.
- ASCE. (1972). *Manual sobre Gestión y Administración de Acuíferos Subterráneos*.
- Ayres, R., & Wescot, D. (1985). Water quality for Agriculture. FAO. *Irrigation and Drainage paper(29)*, 174.
- CAM. (2016). *Evaluación regional del agua Subterránea en el departamento del Huila y Estudio hidrogeológico, parestamiento, diagnóstico y formulación del plan de manejo ambiental de acuíferos (PMMA)*. Neiva, Huila: Corporación Autónoma Regional del Alto Magdalena.
- CAR. (2006). *Inclusión del balance hídrico, implementación del modelo hidrogeológico en el área de la Sabana de Bogotá*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca, Bogotá.
- CAR. (2018). *Geofísica de magneto telúrica, perforación de piezómetros e instrumentación de transmisión satelital para monitoreo en tiempo real de niveles piezométricos y calidad del agua subterránea en la cuenca del Río Bogotá*. Bogotá.
- CAR, Planeación Ecológica Ltda, & Ecoforest Ltda. (2018). *Elaboración del diagnóstico, Prospectiva y formulación de la Cuenca Hidrográfica del Río Bogotá. Estudios POMCA Río Bogotá, Subcuencas sector Sisga-Tibitoc*. Bogotá, Colombia.
- Carvajal. (2012). *Propuesta metodológica sistempatica para la generación de mapas geomorfológicos analíticos aplicados a la zonificación por movimientos en masa. Escala 1:100.000*.
- Castillo, A., & Vence, L. (2009). *Evaluación de la calidad microbiológica y fisicoquímica de aguas subterráneas ubicadas en los municipios de La Paz*

y San Diego, Cesar. Universidad Popular del Cesar – Corporación Autónoma del Cesar (Corpocesar), Cesar, Colombia.

- Corporación Red Jóvenes Constructores de Paz. (2013). *Caracterización de Usuarios para el Municipio de Tocancipá, Cundinamarca*. Recuperado el 17 de 1 de 2021, de <https://www.tocancipa-cundinamarca.gov.co/Ciudadanos/Caracterizacionusuarios/Caracterizaci%C3%B3n%20de%20Usuarios.pdf>
- Corzo, J. (2007). El agua como disolvente. *Universidad de La Laguna, España*, [Online]
<http://bioquibi.webs.ull.es/bioquimica%20estructural/Archivoszip/enlacesnovevalentes/hidrofóbica.pdf>.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Ed. Omega.
- Davis, S., & De Wiest, R. (2009). *Hidrogeología*. Barcelona, España: Ediciones Ariel.
- Delin, G., & Risser, D. (2007). *Ground-Water Recharge in Humid Areas of the United States—A Summary of Ground-Water Resources Program Studies*. (USGS, Ed.)
- Díaz, P. L. (2016). *Evolución sedimentaria y estructural del Eoceno Superior, Cordillera Oriental de Colombia, Sur América*. Barcelona, España: Universidad de Barcelona.
- Elumalai, V., Brindha, B., Sithole, B., & Lakshmanan, E. (2017). Spatial interpolation methods and geostatistics for mapping groundwater contamination in a coastal area. *Environmental and geostatistics for mapping groundwater contamination in a coastal area*, 24(12), 11601-11617. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8681-6>
- Empresa de Servicios Públicos de Tocancipá. (2019). *Fuentes de abastecimiento de agua potable municipio de Tocancipá*. Obtenido de <http://esptocancipa.com/acueducto/2019>
- Empresa de Servicios Públicos de Tocancipá. (2019). *Plan de acción proyectado ESPT 2020*.
- Fragala, F. A., & Obregón, N. (2011). Estimación de la recarga media anual en los acuíferos de La Sabana de Bogotá. (U. P. Javeriana, Ed.) *Dialnet*, 15(1), 145-169.
- Freeze, A., & Cherry, J. (1979). *Original Grounwater*.

- Goerl, R. F., Kobiyama, M., & Santos. (2012). Hidrogeomorfología: Principios, Conceitos, Processos E Aplicações. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(2), 109-110.
- Gómez Rave, J. C. (2009). *Geología, geofísica, hidrogeoquímica e isótopos, como herramientas para definir un modelo conceptual hidrogeológico, caso de aplicación: acuífero costero del municipio de Turbo*. Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
- González, J., & Arboleda, C. (2015). Social Infrastructure Development: The Case for Private Participation in Potable Water Supply in Colombia. *PM World Journal*, IV(10), 1-15 [Online]. Available: https://pmworldlibrary.net/wp-content/uploads/2015/10/pmwj39-Oct2015-González_Arboleda-Botero-second edition.pdf 37.
- Guevara D, J. (2003). *Métodos de estimación y ajuste de datos climáticos*. (Segunda ed.). Mérida, Venezuela: Universidad Central de Venezuela. Recuperado el 3 de Agosto de 2019
- Güiza, S., & Espinosa, Á. (2005). *Cartografía geoquímica de la plancha 209 Zipaquirá*. INGEOMINAS, Bogotá.
- Güller, C., Thyne, G., & McCray, J. (2002). *Evaluation of graphical and multivariate statistical methods for classification of water chemistry data* (Vol. 10(4)).
- Gutiérrez, C. H., & Camargo, L. A. (1992). *Hidrogeología de la cuenca de los rios Alto Bogotá y Sisga, Sabana de Bogotá*. INGEOMINAS, Bogotá.
- Gutiérrez, H., & Castaño U, C. (2002). *Páramos y Ecosistemas Alto Andinos de Colombia en condición HotSpot y Global Climatic Tensor*. (IDEAM, Ed.) Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2004). Metodología para el cálculo del Índice de Escasez de agua superficial. En IDEAM, & O. d. ONU (Ed.). Lima.
- IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la evaluación regional del agua* (Vol. Capítulo 2. Evaluación Regional del Agua Subterránea (ERA)). Bogotá.
- IDEAM. (2017). *Atlas climatológico de Colombia*. Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2017). *Validación de las fórmulas de evapotranspiración de referencia (Eto) para Colombia*. Nota Técnica, Bogotá, Colombia.
- IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua (ENA)*. Bogotá.
- IDEAM, INVEMAR. (2017). *Protocolo de monitoreo del agua*. Bogotá.

- INGEOMINAS. (1997). *Consideraciones sobre las aguas subterráneas en Colombia y sus posibilidades de explotación*. Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS. (Julio de 2002). *Modelo Hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá*. Recuperado el 8 de 02 de 2021, de <http://recordcenter.sgc.gov.co/B3/12006010002788/documento/pdf/0101027881101000.pdf>
- INGEOMINAS. (2002). *Modelo Hidrogeológico conceptual de La Sabana de Bogotá*. Técnico Final, INGEOMINAS, Bogotá.
- INGEOMINAS. (2003). *Geología de la plancha 209 Zipaquirá*. Recuperado el 05 de 02 de 2021, de <https://pdfslide.tips/documents/memoria-explicativa-planchar-209.html>.
- INGEOMINAS. (2003). *Memoria explicativa plancha 209 de Zipaquirá a escala 1:100.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- INGEOMINAS. (2004). *Programa de Exploración de Aguas Subterráneas - PEXAS*. Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS. (2005). *Geología de la Sabana de Bogotá*. INGEOMINAS, Bogotá.
- INGEOMINAS. (2005). *Memoria explicativa plancha geológica 3a a escala 1:100.000*. Bogotá: Servicio Geológico Colombiano.
- INGEOMINAS. (2007). *Atlas Hidrogeológico de Colombia en escala 1:500.000 (en revisión)*. Bogotá, Colombia.
- INGEOMINAS. (2007). Geología de La Sabana de Bogotá. *Publicaciones especiales del Ingeominas, Vol. 28*, pp 1-103.
- Jalali, M. (2007). Hydrochemical identification of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the Chah Basin in Western Iran. *Environ Monit Assess*(130), 347–364.
- Kumar, M., Kumari, K., Ramanathan, A., & Saxena, R. (2007). A comparative evaluation of groundwater suitability for irrigation and drinking purposes in two intensively cultivated districts of Punjab, India. *Environ Geol*(53), 553–574.
- Li, S., & Zhang, Q. (2008). Geochemistry of the upper Han River basin, China, 1: Spatial distribution of major ion compositions and their controlling factors. *Applied Geochemistry*, 3535–3544. .
doi:<https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.08.012>.
- López, C. (2016). Análisis de la distribución espacial y temporal de la precipitación en la cuenca del río Chicú, Sabana de Bogotá, Colombia. *Perspectiva Geográfica*, 21(1), 63-90.

- López, C. (2016). Evaluación química ambiental del recurso hídrico subterráneo de la cuenca del río Chicú. Sabana de Bogotá, Colombia. *Universidad Nacional de La Plata, Argentina*, 110-260.
- López, C. (2018). Análisis de las características fisicoquímicas del agua subterránea de la cuenca del río Chicú, Colombia, usando indicadores hidroquímicos y estadística multivariante. (U. EAFIT, Ed.) *Ingeniería y Ciencia*, 14, 35-68.
- Martínez-González, M., Sánchez-Villegas, A., Toledo-Atucha, E., & Faulin-Fajardo, J. (2014). *Bioestadística amigable* (3a ed.). Barcelona: Elsevier.
- Mejía, M. V., & Ramírez, E. J. (2016). *Análisis de las variaciones de niveles piezométricos del complejo acuífero Cuaternario, registrados dentro de los pozos profundos, por la CAR, entre 1998 y 2007, en La Sabana de Bogotá*. Universidad Católica de Colombia, Bogotá.
- MinAmbiente. (2010). *Decreto 3930 de 2010*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MinAmbiente. (2010). *Política Nacional para la Gestión Integral del Recurso Hídrico*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Sostenible.
- MinAmbiente. (2012). *Clasificación Climática Caldas-Lang*. Bogotá, Colombia. Recuperado el 14 de Agosto de 2019
- MinAmbiente. (2014). *Guía metodológica para la formulación de planes de manejo ambiental de acuíferos*. Bogotá, Colombia: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- MinAmbiente. (2015). *Decreto único reglamentario 1076 de 2015*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.
- Monroy A, J., & Jiménez O, L. (2016). *Mapa semi-detallado de conflictos de uso del suelo comparado con el POT y el POMCA del río Bogotá para la vereda "La Fuente" del municipio de Tocancipá*. U. La Salle, Bogotá.
- Pérez F, D. (1995). *La Explotación del agua subterránea*. La Habana, Cuba.
- Pérez, G., & Salazar, A. (1978). *Estratigrafía y facies del Grupo Guadalupe*. (U. Nacional, Ed.) Recuperado el 05 de 02 de 2021, de <https://revistas.unal.edu.co/index.php/geocol/article/view/30407/30566>.
- Pinilla, W., Quimbayo, L., & Villabón, R. (2014). *Análisis de procesos Territoriales de Tocancipá*. Tocancipá, Colombia.
- Puebla Gutiérrez, J., Rodríguez Rodríguez, V., & Santos Preciado, J. (1995). *Técnicas Cuantitativas (Estadística básica)*. Barcelona, España: Oikos-Tau.

- Pulido, O., & Oyola, M. (1996). *Evaluación hidrogeológica prefactibilidad municipio de Tocancipá*. Bogotá: INGEOMINAS.
- Quintero, S. (1993). *Hidráulica de pozos. Publicaciones Facultad de ingeniería. Universidad Nacional de Colombia*. Bogotá.
- Sánchez, F. J. (2012). *Evolución geoquímica de las aguas subterráneas*. (E. Universidad de Salamanca, Editor) Recuperado el 16 de Abril de 2021, de https://hidrologia.usal.es/temas/Evolucion_geoquimica.pdf.
- Sánchez, N. (2017). *Cálculo de la precipitación media sobre la península de La Guajira usando el método Thiessen*. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/10654/16671>.
- Sarmiento, G. (1994). *Estratigrafía, palinología y paleoecología de la Formación Guaduas*. (INGEOMINAS, Ed.) Recuperado el 06 de 02 de 2021, de <https://revistas.sgc.gov.co/index.php/boletingeo/article/view/198/169>.
- Schosinsky N, G. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34(35), 13-30. [fecha de Consulta 11 de Mayo de 2020]. ISSN: 0256-7024. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=454/45437342002>.
- SDA. (2013). *Sistema de modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital de Bogotá*. Secretaria Distrital de Ambiente, Bogotá.
- SGC. (2015). *Modelo Hidrogeológico del Área de Inírida*. Bogotá, D.C.
- SGC. (2019). *Cartografía hidrogeológica de sistemas acuíferos estratégicos para el país*. Recuperado el 17 de 03 de 2021, de <https://www2.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/Geociencias/Paginas/Cartograf%C3%ADahidrogeol%C3%B3gicasistemasacu%C3%ADferosestrat%C3%A9gicoparaelpa%C3%ADs.aspx>
- Sociedad geológica de Londres. (2015). *Geología para la sociedad*. Londres, UK. Recuperado el 2021, de www.geolsoc.org.uk/geology-for-society
- Tóth, J. (2000). Aguas subterráneas como agente geológico: causas, procesos y manifestaciones. *Boletín Geológico y Minero*(111), 9–25.
- Vargas, N. O. (2001). *Zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia Escala 1:1.200.000*. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, Postgrado en Recursos Hidráulicos , Bogotá D.C.
- Velandia, F., & Bermoudes, O. (2002). Fallas longitudinales y transversales en La Sabana de Bogotá. (Ingeominas, Ed.) *Boletín de geología*, 24(39), 12.
- Yidana, S. M., & Yidana, A. (2009). Assessing water quality using water quality index and multivariate analysis. *Environ Earth Sci*(59), 1461–1473.

- Yidana, S., Banoeng-Yakubo, B., & Akabzaa, T. (2010). Analysis of groundwater quality using multivariate and spatial analyses in the Keta basin, Ghana. *Journal of African Earth Sciences*, 58(2), 220-234.
- Zhou, Y. (2009). A critical review of groundwater budget myth, safe yield and sustainability. *Journal of hydrology*, 370(1-4), 207-213.

Anexo A. Localización de perforaciones de pozos consultadas

No.	Punto	Y(N-S)	X(E-W)	No.	Punto	Y(N-S)	X(E-W)
1	AP-C-02	1044221	1019592	34	MT11	1037434	1015157
2	AP-C-03	1043253	1016014	35	MT22	1039660	1016363
3	AP-C-15	1044433	1014612	36	MT23	1040909	1016850
4	AP-C-19	1043920	1018340	37	MT24	1041538	1017993
5	AP-C-32	1044588	1014260	38	MT87	1039032	1014852
6	AP-C-39	1044501	1018459	39	MT27	1049238	1025368
7	AP-O-08	1038831	1016734	40	SEV_1	1040739	1013341
8	AP-O-09	1038704	1016112	41	SEV_2	1040164	1014436
9	AP-O-10	1038666	1015771	42	SEV_3	1039112	1014358
10	AP-O-01	1039720	1016408	43	SEV_4	1040053	1012400
11	AP-O-11	1038817	1014300	44	SEV_5	1038898	1013901
12	AP-O-12	1039369	1015022	45	SEV_6	1040419	1014353
13	AP-O-13	1039679	1014610	46	SEV_7	1039137	1012711
14	AP-O-14	1039566	1013612	47	SEV_8	1040640	1014513
15	AP-O-15	1040210	1013816	48	SEV_9	1039641	1014937
16	AP-O-20	1040636	1015533	49	SEV_10	1039676	1014906
17	AP-O-24	1044404	1017540	50	SEV_11	1040103	1016360
18	AP-O-25	1043874	1017793	51	SEV_12	1039461	1016541
19	AP-O-28	1042830	1017654	52	SEV_13	1038744	1016289
20	AP-O-31	1041530	1019684	53	SEV_14	1040640	1014513
21	AP-O-32	1044320	1019547	54	SEV_15	1039956	1016315
22	AP-O-33	1044267	1019540	55	SEV_16	1039749	1017240
23	AP-O-34	1038484	1014618	56	SEV_17	1039833	1016732
24	AP-O-39	1038100	1015800	57	SEV_18	1039493	1014784
25	AP-O-42	1041512	1019697	58	SEV_19	1039639	1016293
26	AP-O-51	1044240	1015610	59	SEV_20	1039725	1017033
27	AP-O-64	1043665	1017286	60	SEV_21	1044235	1016257
28	AP-C-40	1043232	1019318	61	SEV_22	1038178	1016541
29	AP-C-14	1044877	1019043	62	SEV_23	1042313	1018248
30	MT6	1044686	1017902	63	SEV_24	1038744	1015474
31	MT7	1043475	1018821	64	SEV_25	1039059	1015653
32	MT8	1042350	1019335	65	SEV_26	1039679	1014610
33	MT10	1037920	1014624				

Anexo B. Correlación hidrogeológica cualitativa de SEV

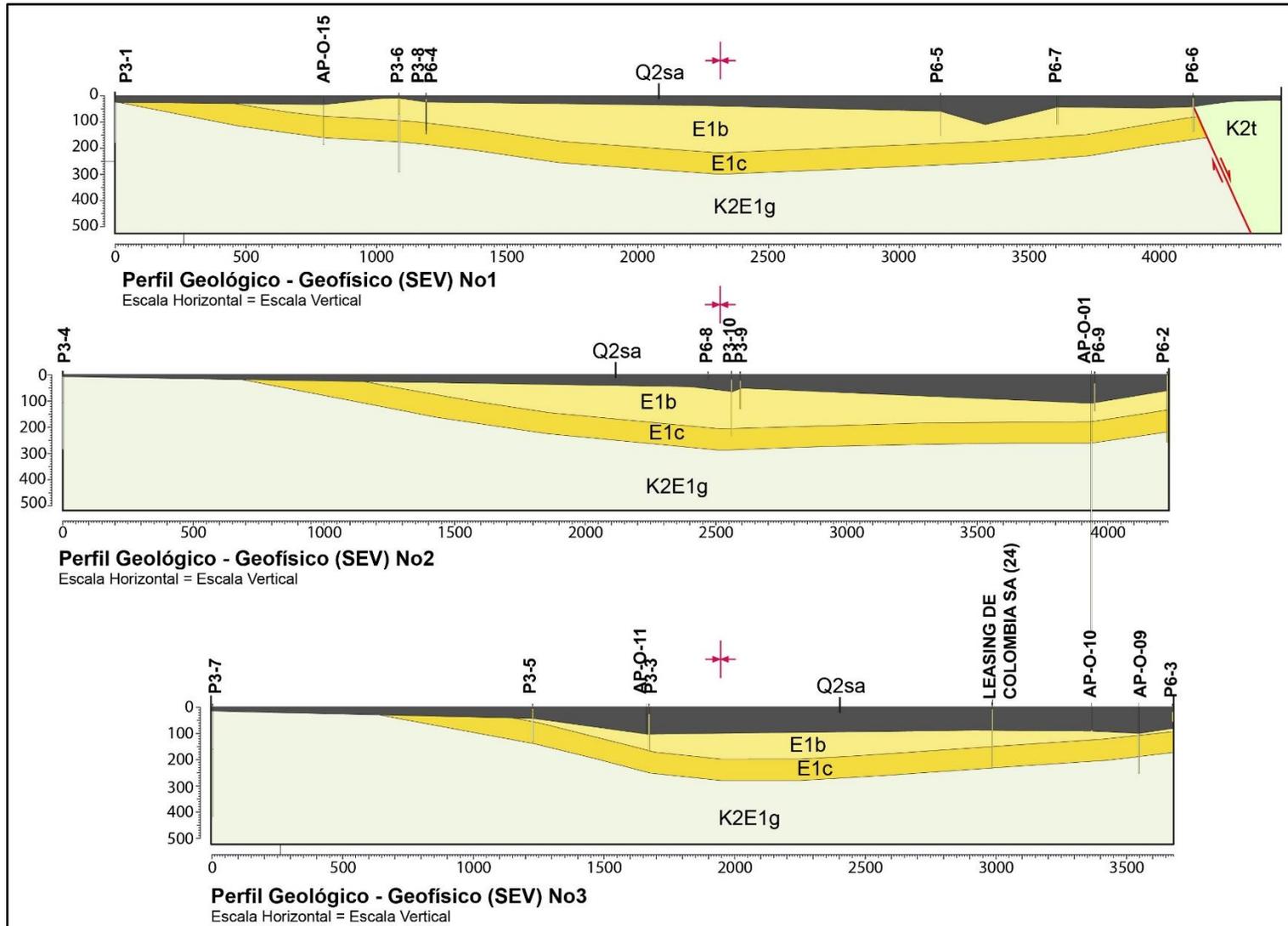
No. SEV	No. Capa	Resistividad (Ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Unidad Geológica	Correlación hidrogeológica cualitativa
1	1	109,0	0,6	0,6	Q1sa	Suelo arenoso
	2	40,6	2,8	3,5	Q1sa	Arcilla arenosa
	3	117,0	2,5	6,0	Q1sa	Arenas saturadas
	4	44,4	18,3	24,3	Q1sa	Arcilla arenosa
	5	21,4	152,0	176,0	K2E1g	Arcillolita
	6	98,5	-	-	K2t	Arenas saturadas
2	1	79,4	1,1	1,1	Q1sa	Suelo arenoso seco
	2	145,0	1,0	2,1	Q1sa	Arenas saturadas
	3	51,1	39,8	41,9	E1c	Arena arcillosa
	4	8,7	156,0	198,0	K2E1g	Arcillolitas
	5	33,6	-	-	K2E1g	Arenisca limosa
3	1	10,2	1,0	1,0	Q1sa	Suelo arcilloso
	2	49,6	27,3	28,3	Q1sa	Arenas arcillosa
	3	10,3	8,1	36,4	E1b	Arcillas
	4	41,0	64,6	101,0	E1b	Arcillas con delgadas capas de arena
	5	9,9	67,3	168,0	E1b	Arcillas
	6	114,0	-	-	E1c	Arenisca conglomerática saturada
4	1	57,3	1,3	1,3	Q1sa	Suelo arenoso
	2	94,5	7,5	8,8	Q1sa	Arenas saturadas
	3	12,3	97,5	106,0	K2E1g	Arcillolita
	4	266,0	175,0	282,0	K2t	Arenisca conglomerática saturadas
	5	66,7	-	-	K2p	Arenisca saturada
5	1	11,1	3,9	3,9	Q1sa	Suelo arcilloso
	2	482,0	3,8	7,8	Q1sa	Arenas y gravas saturadas
	3	12,8	11,2	19,0	E1b	Arcillas
	4	138,0	25,0	44,0	E1c	Arenas conglomeráticas saturadas
	5	43,6	87,0	131,0	K2E1g	Arcillolita con arenas saturada
	6	298,0	-	-	K2t	Arenisca conglomerática saturada
6	1	15,1	0,9	0,9	Q1sa	Suelo arcilloso
	2	18,4	4,6	5,6	Q1sa	Limos arcillosos
	3	44,8	3,6	9,2	Q1sa	Arenas arcillosa
	4	215,0	13,7	22,8	E1c	Gravas
	5	60,4	47,0	69,8	E1c	Arena arcillosa
	6	20,7	215,0	285,0	K2E1g	Limolita
	7	46,9	-	-	K2t	Arenisca saturada
7	1	131,0	0,8	0,8	Q1sa	Suelo conglomerático
	2	21,6	15,6	16,3	Q1sa	Limos arcillosos
	3	3,3	104,0	120,0	K2E1g	Arcillolita
	4	38,1	39,1	159,0	K2E1g	Arcillolita con arenas saturada
	5	166,0	251,0	410,0	K2t	Arenisca conglomerática saturada
	6	40,2	-	-	K2p	Arcillolita saturada
8	1	29,6	1,1	1,1	Q1sa	Suelo arenoso seco
	2	57,2	0,5	1,6	Q1sa	Arenas arcillosa
	3	19,2	1,6	3,1	Q1sa	Limos arcillosos
	4	85,8	9,4	12,5	Q1sa	Arenas saturadas
	5	21,8	11,1	23,6	E1b	Arcillas, limos y arenas saturadas
	6	88,7	106,0	130,0	E1c	Arenisca saturada
	7	22,4	-	-	E1c	Limolitas arcillosas
9	1	206,0	1,0	1,0	Q1sa	Suelo limoso
	2	29,5	2,7	3,7	Q1sa	Arenas y limo
	3	17,3	19,4	23,1	Q1sa	Arcilla y limo
	4	4,8	28,4	51,5	E1b	Arcillas
	5	41,2	77,4	129,0	E1c	Arenisca con arcilla
	6	5,3	-	-	K2E1g	Arcillolitas
10	1	130,0	0,8	0,8	Q1sa	Suelo limo arenoso

	2	19,7	0,4	1,2	Q1sa	Arenas limosas
	3	62,6	8,9	10,1	Q1sa	Limos arenosos
	4	3,2	9,9	19,9	Q1sa	Arcillas
	5	9,1	44,7	64,7	E1b	Arcillas
	6	39,5	165,0	230,0	E1c	Limolitas y arenitas
	7	18,0	-	-	K2E1g	Limolitas
	11	1	28,2	2,3	2,3	Q1sa
2		192,0	3,6	5,9	Q1sa	Gravas saturadas
3		18,6	9,3	15,2	Q1sa	Limos
4		82,2	87,4	103,0	E1b	Arcillas y arenas saturadas
5		22,6	144,0	246,0	E1c	Limolitas arenítica
6		32,6	-	-	E1c	Arenitas limolíticas saturadas
12	1	53,3	1,0	1,0	Q1sa	Suelo arenoso seco
	2	12,4	1,4	2,5	Q1sa	Arcillas
	3	65,4	130,0	132,0	E1b	Arcillas y arenas saturadas
	4	25,0	122,0	255,0	E1c	Intercalaciones de arena y arcilla
	5	59,6	-	-	E1c	Arenitas saturadas
13	1	48,4	1,4	1,4	Q1sa	Suelo arenoso
	2	21,6	1,7	3,1	Q1sa	Limos
	3	84,1	2,2	5,3	Q1sa	Arenas saturadas
	4	11,1	5,6	10,9	Q1sa	Arcillas
	5	84,7	8,3	19,2	Q1sa	Arenas saturadas
	6	10,2	13,7	32,9	E1b	Arcillas
	7	31,0	24,3	57,2	E1b	Arcillas con delgadas capas de arena
	8	131,0	-	-	E1c	Arenitas saturadas
14	1	144,0	0,7	0,7	Q1sa	Suelo arenoso seco
	2	13,6	1,3	2,0	Q1sa	Arcillas
	3	111,0	11,8	13,8	Q1sa	Arenitas saturadas
	4	37,7	44,9	58,8	E1b	Arcillas con delgadas capas de arena
	5	14,7	49,7	108,0	E1b	Arcillas
	6	124,0	-	-	E1c	Arenitas saturadas
15	1	36,6	2,9	2,9	Q1sa	Suelo arenoso
	2	157,0	3,5	6,4	Q1sa	Gravas saturadas
	3	68,2	34,0	40,5	Q1sa	Arena arcillosa
	4	42,5	17,6	58,1	Q1sa	Arena arcillosa
	5	71,8	89,9	148,0	E1b	Arcillas y arenas saturadas
	6	20,8	-	-	E1c	Limolitas
16	1	64,2	1,2	1,2	Q1sa	Suelo arenoso
	2	18,7	0,5	1,7	Q1sa	Limos arenosos
	3	101,0	2,7	4,4	Q1sa	Arenas saturadas
	4	18,5	3,8	8,2	Q1sa	Limos arenosos
	5	64,9	32,7	40,9	E1b	Arcillas y arenas saturadas
	6	302,0	93,0	134,0	K2t	Arenitas conglomeráticas saturadas
	7	9,3	-	-	K2p	Arcillolitas
17	1	282,0	0,7	0,7	Q1sa	Suelo gravoso seco
	2	24,5	3,2	3,9	Q1sa	Arenitas limolíticas
	3	104,0	4,9	8,8	Q1sa	Arenas saturadas
	4	17,9	8,1	16,9	Q1sa	Limos
	5	74,0	25,2	42,1	Q1sa	Limos arenosos saturados
	6	26,5	65,2	107,0	E1b	Arcillas, limos y arenas saturadas
	7	61,7	-	-	E1c	Arenitas saturadas
18	1	163,0	0,7	0,7	Q1sa	Suelo arenoso seco
	2	8,9	1,2	1,9	Q1sa	Arcillas
	3	45,2	17,5	19,4	Q1sa	Arenas saturadas
	4	13,9	-	-	E1b	Arcillas
19	1	255,0	1,4	1,4	Q1sa	Suelo arenoso seco
	2	14,4	1,3	2,7	Q1sa	Arcillas
	3	54,2	30,1	32,8	Q1sa	Arenas saturadas

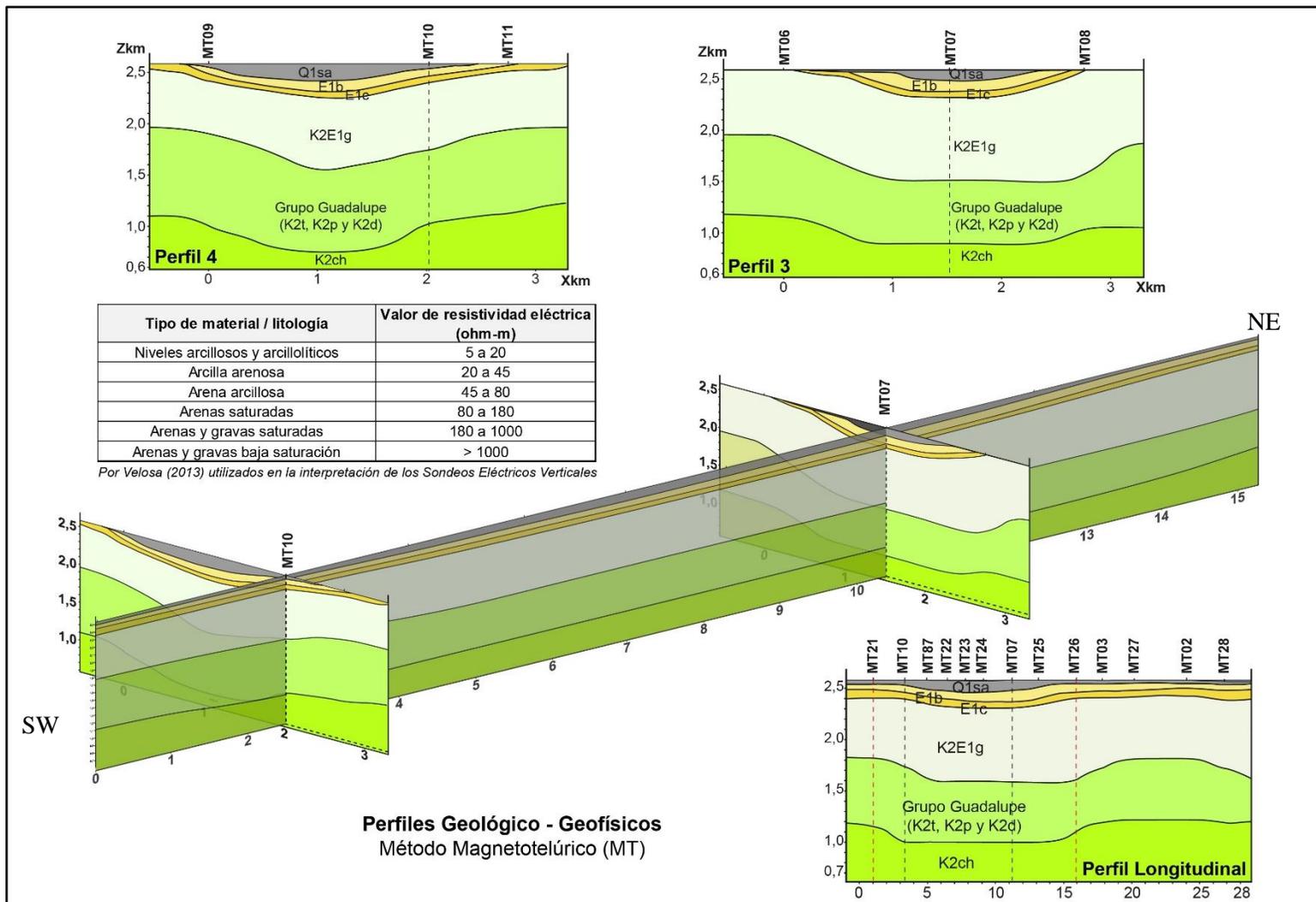
	4	9,5	104,0	137,0	E1b	Arcillas
	5	34,1	-	-	E1c	Arenitas limolíticas
20	1	18,0	1,0	1,0	Q1sa	Suelo Arcilloso
	2	215,0	5,0	6,0	Q1sa	Arenas secas
	3	140,0	24,0	30,0	Q1sa	Arena y gravas con poca agua
	4	75,0	45,0	75,0	Q1sa	Arenas y gravas saturadas
	5	44,0			Q1sa	Arenas saturadas
21	1	125,0	1,0	1,0	Q1sa	Capa vegetal
	2	1100,0	6,0	7,0	Q1sa	Terraza aluvial
	3	608,0	9,0	16,0	E1b	Arcillas y limos con numerosas grietas
	4	230,0	66,0	82,0	E1b	Arcillas, limos, turbas, arenas y gravas saturadas
	5	135,0	98,0	180,0	E1c	Formación Areniscas del Cacho
	6	5,0			K2E1g	Formación Guaduas
22	1	34,5	8,9	8,9	Q2c	Suelo arcilloso
	2	303,0	26,6	35,5	K2t	Arenisca saturada
	3	13,5	14,1	49,6	K2t	Arcillolita (Lodolita)
	4	263,5	53,4	103,0	K2t	Arenas de grano fino a medio saturadas
	5	19,4	25,6	128,5	K2t	Arcillolita (Lodolita)
	6	366,1	45,9	174,4	K2t	Arenas de grano fino a medio saturadas
	7	9,9			K2p	Arcillolita
23	1	45,0	0,7	0,7	Q1sa	Suelo limoso
	2	8,9	0,5	1,2	Q1sa	Arcillas
	3	460,0	1,0	2,2	Q1sa	Arenas muy secas
	4	13,5	3,4	5,6	Q1sa	Arcillas y limos
	5	56,5	63,4	69,0	Q1sa	Arenas saturadas
	6	26,0	35,0	98,4	E1b	Arcillas, limos y arenas saturadas
	7	790,0	186,0	221,0	E1c	Arenisca saturada
	8	315,0			E1c	Arenisca saturada
24	1	20,0	1,4	1,4	Q1sa	Arcillas
	2	440,0	7,6	9,0	Q1sa	Gravas con matriz arenosa
	3	90,0	29,0	38,0	E1b	Arenas con niveles de arcillas o limos arenosos
	4	210,0	12,0	50,0	E1b	Gravas con matriz arenosa
	5	34,0	180,0	230,0	E1b	Arcillas con delgadas capas de arena
	6	420,0			E1c	Areniscas, gravas en matriz arenosa limpias
25	1	25,0	1,5	1,5	Q1sa	Arcillas
	2	380,0	13,5	15,0	Q1sa	Gravas con matriz arenosa
	3	65,0	23,0	38,0	E1b	Arcillas con niveles de arenas o limos arenosos
	4	230,0	17,0	55,0	E1b	Gravas con matriz arenosa
	5	44,0	165,0	220,0	E1b	Arcillas con delgadas capas de arena
	6	500,0			E1c	Areniscas, gravas en matriz arenosa limpias
26	1	41,0	0,6	0,6	Q1sa	Capa vegetal
	2	44,0	1,3	1,9	Q1sa	Suelo
	3	77,0	18,0	19,9	Q1sa	Arenas saturadas y gravas
	4	48,0	81,0	100,9	E1b	Arcillas con delgadas capas de arena
	5	23,0	131,5	232,4	E1c	Intercalaciones de arena y arcilla
	6	35,0			E1c	Arenitas limolíticas saturadas

Fuente: Tomado y modificado de CAR, 2018

Anexo C. Perfiles geofísicos a partir de SEVs



Anexo D. Perfil geofísico transversal y longitudinal a partir de MT



Anexo E. Balance Hídrico de Suelos

DATOS DE ENTRADA													
Cfo (Coeficiente de retención pluvial de follajes)	0,12			Densidad Aparente (gr/cm ³)	1,30								
fc (Capacidad de infiltración)	60			Profundidad de las raíces (mm)	800								
Kfc = 0,267ln(fc) – 0,000154(fc) – 0,723	0,36			Hsi =Capacidad de campo (mm)	229								
Kp (Factor por pendiente)	0,10			Mes de inicio HSi	Diciembre								
Kv (Factor por vegetación)	0,10			PM (Punto de marchitez) (mm)	156								
Suma (Kfc + Kp + Kv)	0,56												
Ci (Coeficiente de infiltración)	0,56												
BALANCE HÍDRICO DE SUELOS (TArCu)		*****											
PARÁMETRO	Año / Mes	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE

Precipitación Promedio Mensual (mm)		37	49	75	103	104	76	77	65	58	106	91	47
Fracción de Lluvia interceptada por el follaje													
RET con Cfo = 0,12	Promedio	6	6	9	12	12	9	9	8	7	13	11	6
Precipitación que infiltra													
Pi = Ci*(P-Ret)	Promedio	18	24	37	51	51	38	38	32	29	52	45	23
Escorrentía Superficial													
ESC = P – Ret – Pi	Promedio	14	19	29	40	40	29	30	25	22	41	35	18
Balance de suelos													
Temperatura Promedio Mensual (mm/mes)		14	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
ETP (mm/mes) por Thornthwaite de la Estación Checua		55	53	61	61	62	55	55	57	54	59	56	56
HSi = HS * DA * PR	Promedio	195	186	185	191	200	205	203	202	198	195	205	206
HD (mm/mes) = HSi + Pi – PM	Promedio	56	54	67	86	95	87	85	79	71	91	93	73
ETR (mm/mes) Revisar si (C1+C2)/2*ETP es <=> HD	Promedio	26	24	32	39	44	39	39	36	32	41	40	33
HSf	Promedio	186	185	191	200	205	203	202	198	195	205	205	196
Rp													
Rp = Pi + HSi – HSf – ETR (mm/mes)	Promedio	0	0	0	4	2	1	0	0	0	1	4	0
DCC													
DCC = CC – HSf	Promedio	42	43	38	29	24	26	26	31	34	24	24	34
ETR1 = (C1)(ETP)	Promedio	40	37	50	57	59	53	53	54	48	55	52	48
ETPR													
ETPR = (HS - PM)(ETP)/(CC-PM)	Promedio	30	22	24	29	36	37	36	36	31	31	37	39

DATOS DE ENTRADA													
Cfo (Coeficiente de retención pluviométrica de follajes)	0,12	Densidad Aparente (gr/cm ³)	1,67										
fc (Capacidad de infiltración)	1200	Profundidad de las raíces (mm)	2500										
$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154(fc) - 0,723$	0,99	Hsi =Capacidad de campo (mm)	418										
Kp (Factor por pendiente)	0,06	Mes de inicio HSi	Diciembre										
Kv (Factor por vegetación)	0,10	PM (Punto de marchitez) (mm)	167										
Suma (Kfc + Kp + Kv)	1,15												
Ci (Coeficiente de infiltración)	1,00												

BALANCE HÍDRICO DE SUELOS (Ta+PM)													
PARÁMETRO													
Año / Mes	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	

Precipitación Promedio Mensual (mm)	Promedio	37	49	75	103	104	76	77	65	58	106	91	47
Fracción de Lluvia interceptada por el follaje													
RET con Cfo = 0,12	Promedio	6	6	9	12	12	9	9	8	7	13	11	6
Precipitación que infiltra													
Pi = Ci*(P-Ret)	Promedio	31	42	66	91	92	67	67	57	51	93	80	41
Escorrentía Superficial													
ESC = P – Ret – Pi	Promedio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Balance de suelos													
T	Temperatura P	14	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
ETP (mm/mes) por Thornthwaite de la Estación Guasca	Promedio	54	49	55	56	56	51	53	56	52	57	54	58
HSi = HS * DA * PR	Promedio	392	373	371	379	398	406	408	408	407	401	407	407
HD (mm/mes) = HSi + Pi – PM	Promedio	255	248	270	304	322	307	309	299	292	328	320	280
ETR (mm/mes) Revisar si (C1+C2)/2*ETP es <=> HD	Promedio	47,0	42,9	49,5	52,7	54,4	49,4	52,0	54,7	50,3	55,5	52,5	53,7
HSf	Promedio	373	371	379	398	406	408	408	407	401	407	406	393
Rp	Promedio	1,9	1,7	7,8	21,0	28,1	16,3	15,2	3,9	7,4	32,0	28,3	1,1
Rp = Pi + HSi – HSf – ETR (mm/mes)	Promedio	1,9	1,7	7,8	21,0	28,1	16,3	15,2	3,9	7,4	32,0	28,3	1,1
DCC	Promedio	44,1	46,9	38,1	19,9	11,4	9,4	9,1	10,5	16,4	10,3	11,3	24,4
DCC = CC – HSf	Promedio	44,1	46,9	38,1	19,9	11,4	9,4	9,1	10,5	16,4	10,3	11,3	24,4
ETR1 = (C1)(ETP)	Promedio	51	46	53	55	56	50	53	56	52	57	53	56
ETPR	Promedio	48	41	45	47	52	48	51	54	50	53	52	55
ETPR = (HS - PM)(ETP)/(CC-PM)	Promedio	48	41	45	47	52	48	51	54	50	53	52	55

DATOS DE ENTRADA													
Cfo (Coeficiente de retención pluviométrica de follajes)	0,12	Densidad Aparente (gr/cm ³)	1,35										
fc (Capacidad de infiltración)	192	Profundidad de las raíces (mm)	600										
$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154(fc) - 0,723$	0,65	Hsi =Capacidad de campo (mm)	216										
Kp (Factor por pendiente)	0,10	Mes de inicio HSi	Diciembre										
Kv (Factor por vegetación)	0,18	PM (Punto de marchitez) (mm)	140										
Suma (Kfc + Kp + Kv)	0,93												
Ci (Coeficiente de infiltración)	0,93												

BALANCE HÍDRICO DE SUELOS (Tag)													
PARÁMETRO													
Año / Mes	*****												
Precipitación Promedio Mensual (mm)	Promedio	37	49	75	103	104	76	77	65	58	106	91	47
Fracción de Lluvia interceptada por el follaje													
RET con Cfo = 0,12	Promedio	6	6	9	12	12	9	9	8	7	13	11	6
Precipitación que infiltra													
Pi = Ci*(P-Ret)	Promedio	29	39	62	85	85	62	63	53	47	87	74	38
Escorrentía Superficial													
ESC = P – Ret – Pi	Promedio	2	3	5	6	6	5	5	4	3	6	5	3
Balance de suelos													
Temperatura Promedio Mensual (mm/mes)		14	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
ETP (mm/mes) por Thornthwaite de la Estación Checua	Promedio	55	53	61	61	62	55	55	57	54	59	56	56
HSi = HS * DA * PR	Promedio	199	188	189	198	208	211	211	211	209	204	210	209
HD	1994												
ETR (mm/mes) Revisar si (C1+C2)/2*ETP es <=> HD	Promedio	38	37	48	55	58	52	52	52	47	55	52	46
HSf	Promedio	188	189	198	208	211	211	211	209	204	210	208	200
Rp													
Rp = Pi + HSi – HSf – ETR (mm/mes)	Promedio	2	1	6	20	24	10	11	3	6	27	24	1
DCC													
DCC = CC – HSf	Promedio	28	27	18	8	5	5	5	7	12	6	8	16
ETR1 = (C1)(ETP)	Promedio	50	48	59	60	61	55	55	56	54	59	56	54
ETPR													
ETPR = (HS - PM)(ETP)/(CC-PM)	Promedio	39	28	33	41	53	50	51	52	48	47	51	49

DATOS DE ENTRADA													
Cfo (Coeficiente de retención pluvial de follajes)	0,20	Densidad Aparente (g	1,50										
fc (Capacidad de infiltración)	600	Profundidad de las rai	1500										
$K_{fc} = 0,267 \ln(fc) - 0,000154(fc) - 0,723$	0,89	Hsi =Capacidad de can	270										
Kp (Factor por pendiente)	0,06	Mes de inicio HSi	Diciembre										
Kv (Factor por vegetación)	0,20	PM (Punto de marchit	45										
Suma (Kfc + Kp + Kv)	1,15												
Ci (Coeficiente de infiltración)	1,00												

BALANCE HÍDRICO DE SUELOS (BASN)													
PARÁMETRO	Año / Mes	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE

Precipitación Promedio Mensual (mm)	Promedio	37	49	75	103	104	76	77	65	58	106	91	47
<u>Fracción de Lluvia interceptada por el follaje</u>													
RET con Cfo =0,12	Promedio	8	10	15	21	21	15	15	13	12	21	18	10
<u>Precipitación que infiltra</u>													
Pi = Ci*(P-Ret)	Promedio	29	39	60	83	83	61	61	52	46	85	73	37
<u>Escorrentía Superficial</u>													
ESC = P – Ret – Pi	Promedio	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<u>Balace de suelos</u>													
Temperatura Promedio Mensual (mm/mes)		14	14	15	15	15	14	14	14	14	14	14	14
ETP (mm/mes) por Thornthwaite de la Estación Guasca	Promedio	54	49	55	56	56	51	53	56	52	57	54	58
HSi = HS * DA * PR	Promedio	239	221	217	226	243	254	257	256	253	246	255	255
HD (mm/mes) = HSi + Pi – PM	Promedio	222	214	233	264	281	271	273	263	255	287	283	247
ETR (mm/mes) Revisar si $(C1+C2)/2*ETP$ es \leq HD	Promedio	45,3	41,1	47,6	51,2	53,3	48,6	51,1	53,4	49,0	54,6	51,5	52,3
HSf	Promedio	221	217	226	243	254	257	256	253	246	255	254	240
Rp													
Rp = Pi + HSi – HSf – ETR (mm/mes)	Promedio	0,9	1,0	4,3	15,3	18,3	10,5	10,9	2,0	4,4	21,9	22,2	0,2
DCC													
DCC = CC – HSf	Promedio	48,9	52,7	44,2	27,0	15,9	13,5	14,1	17,5	23,6	14,9	15,9	30,1
ETR1 = (C1)(ETP)	Promedio	50	45	52	54	55	50	53	56	52	56	53	56
ETPR													
ETPR = (HS - PM)(ETP)/(CC-PM)	Promedio	46	39	42	45	49	47	50	53	48	51	51	54

Anexo F. Inventario de puntos de agua, unidad geológica de captación, aforo y nivel estático de pozos de agua subterránea en Tocancipá

Item	Punto	Categoría	Y(N-S)	X(E-W)	Unidad geológica de captación	Profundidad del pozo (m)	Aforo de caudal (l s ⁻¹)
1	AP-C-01	4	1037375	1015913	Q1sa	30,0	
2	AP-C-02	1	1044221	1019592	Q1sa	72	
3	AP-C-03	1	1043253	1016014	E1c	134	2,62
4	AP-C-04	3	1044494	1016743	Q1sa	84	
5	AP-C-05	1	1045590	1018085	K2t	160	7,62
6	AP-C-06	1	1044836	1018251	E1c	145	
7	AP-C-07	1	1042732	1017926	Q1sa	40	
8	AP-C-08	1	1041041	1013011	E1c	72	8,90
9	AP-C-09	1	1043477	1017515	Q1sa	100,0	2,00
10	AP-C-10	2	1039647	1016870	Q1sa	54	
11	AP-C-11	3	1038666	1016454	Q1sa	95	
12	AP-C-12	4	1042872	1017222	Q1sa		
13	AP-C-13	2	1041093	1015781	E1c	250	
14	AP-C-14	1	1044877	1019043	E1c	106	8,50
15	AP-C-15	1	1044433	1014612	K2t		4,53
16	AP-C-16	1	1044310	1014953	Q1sa	70,0	3,33
17	AP-C-17	1	1043960	1017289	E1c	130	14,11
18	AP-C-18	3	1043411	1016385	Q1sa	30,0	
19	AP-C-19	1	1043920	1018340	E1c	117	12,01
20	AP-C-20	1	1043831	1018300	E1c	200	7,34
21	AP-C-21	3	1037808	1015491	E1c	200	
22	AP-C-22	1	1038399	1014935	E1c	270	43,00
23	AP-C-23	2	1039138	1015350	E1c	262	42,00
24	AP-C-24	1	1040873	1019646	K2d	320,0	16,77
25	AP-C-25	1	1045727	1015209	K2t		8,39
26	AP-C-26	1	1043828	1017907	Q1sa	71,0	
27	AP-C-27	1	1045100	1016897	K2t	92	3,92
28	AP-C-28	1	1040477	1016081	Q1sa	60	3,04
29	AP-C-29	1	1042292	1010476	Q1sa	81	12,75
30	AP-C-30	1	1041891	1010428	Q1sa	130	

Item	Punto	Categoría	Y(N-S)	X(E-W)	Unidad geológica de captación	Profundidad del pozo (m)	Aforo de caudal (l s ⁻¹)
31	AP-C-31	1	1042425	1015537	E1c		
32	AP-C-32	4	1044588	1014260	Q1sa	60,0	
33	AP-C-33	1	1044483	1016758	K2t	84,0	11,98
34	AP-C-34	1	1039863	1017815	K2t	114,0	
35	AP-C-35	5	1038956	1014478	E1c	185,0	
36	AP-C-36	5	1038956	1014478	Q1sa	100,0	
37	AP-C-37	5	1041093	1015781	Q1sa	100,0	
38	AP-C-38	5	1041093	1015781	E1c	259,0	
39	AP-C-39	1	1044501	1018459	E1c	133,0	27,42
40	AP-C-40	1	1043232	1019318	Q1sa	93,0	9,99
41	AP-C-41	2	1039952	1017060	Q1sa	60,0	
42	AP-O-01	1	1039720	1016408	k2E1g	930	

Categoría 1. Pozo Activo

Categoría 2. Pozo Inactivo

Categoría 3. Pozo Sellado

Categoría 4. Pozo Abandonado

Categoría 5. Pozo piezométrico

Anexo G. Parámetros hidráulicos registrados por unidad geológica de captación

Item	Pozo	Y(N-S)	X(E-W)	Unidad geológica	CE (l s ⁻¹ m ⁻¹)	T (m ² dia ⁻¹)	K (m dia ⁻¹)	S
1	AP-C-02	1044221	1019592	Q1sa	6,90E-02	3,10E+00		1,00E-04
2	AP-C-04	1044494	1016743	Q1sa	1,72E+00	2,03E+02		
3	AP-C-08	1041041	1013011	E1c	3,90E-01			
4	AP-C-19	1043920	1018340	E1c	2,43E+00	3,25E+02		1,44E-03
5	AP-C-20	1043831	1018300	E1c	5,03E+00	9,97E+02		
6	AP-C-22	1038399	1014935	E1c	5,13E+00	6,09E+02		
7	AP-C-23	1039138	1015350	E1c	3,43E+00	9,36E+02		
8	AP-C-29	1042292	1010476	K2t	6,13E-01	3,49E+01		
9	AP-C-39	1044501	1018459	E1c	5,15E+00	5,16E+02		
10	AP-O-01	1039720	1016408	k2E1g	1,83E+00	2,76E+02	3,92E-04	
11	AP-O-06	1037713	1016600	K2t	3,00E-02	4,30E-01		
12	AP-O-08	1038831	1016734	K2t	3,01E+01	2,86E+01	1,36E-01	3,01E-06
13	AP-O-09	1038704	1016112	K2t	4,76E-02	4,65E+01	1,86E-02	2,21E-03
14	AP-O-10	1038666	1015771	E1c	1,56E+00	6,55E+01		9,49E-03
15	AP-O-11	1038817	1014300	Q1sa	6,40E-01			
16	AP-O-12	1039369	1015022	Q1sa	3,40E-01	3,04E+01	1,38E+00	
17	AP-O-14	1039566	1013612	E1c	2,36E-01	3,03E+01		9,90E-04
18	AP-O-15	1040210	1013816	E1c	1,66E-01	1,84E+01		2,00E-02
19	AP-O-20	1040636	1015533	Q1sa	3,20E-02	1,83E-01		
20	AP-O-24	1044404	1017540	E1c	1,75E+00			
21	AP-O-25	1043874	1017793	Q1sa	7,00E-02	3,47E+00		
22	AP-O-28	1042830	1017654	Q1sa	3,20E-01	2,05E+01		2,00E-03
23	AP-O-30	1042920	1017782	Q1sa	2,04E-01	3,25E+01	1,08E+00	3,11E-06
24	AP-O-32	1044320	1019547	Q1sa	7,90E-02	3,56E+00		1,00E-04
25	AP-O-33	1044267	1019540	Q1sa	7,20E-02	3,25E+00		1,00E-04
26	AP-O-39	1038100	1015800	Q1sa	3,85E-01	1,66E+01		
27	AP-O-40	1013990	1016700	Q1sa	3,00E-01	2,02E+01		1,00E-03
28	AP-O-46	1041840	1017250	Q1sa	2,16E-01	2,18E+01		1,00E-03
29	AP-O-51	1044240	1015610	Q1sa	7,35E-01	2,01E+01		
30	AP-O-55	1039620	1014535	E1c	2,40E-01	2,70E+01	9,80E-01	3,40E-03
31	AP-O-56	1038744	1015474	E1c	2,41E+00	8,01E+02		1,48E-16
32	AP-O-57	1039058	1015653	E1c	4,96E+00	8,64E+02		3,24E-08
33	AP-O-62	1043615	1016874	Q1sa	4,04E-01	4,63E+01	9,27E-01	2,33E-01

Anexo H. Caudal por descarga artificial

Item	Pozo	Y(N-S)	X(E-W)	Unidad Geológica	Caudal Concesionado (m3/mes)
1	AP-C-02	1044221	1019592	Q1sa	25,9
2	AP-C-09	1043477	1017515	Q1sa	926,0
3	AP-C-16	1044310	1014953	Q1sa	2255,0
4	AP-C-18	1043411	1016385	Q1sa	5,3
5	AP-C-28	1040477	1016081	Q1sa	362,9
6	AP-C-32	1044588	1014260	Q1sa	4666,0
7	AP-C-33	1044483	1016758	Q1sa	3551,0
8	AP-C-41	1039952	1017060	Q1sa	233,0
9	AP-O-11	1038817	1014300	Q1sa	120,0
10	AP-O-12	1039369	1015022	Q1sa	1555,2
11	AP-O-20	1040636	1015533	Q1sa	4304,0
12	AP-O-25	1043874	1017793	Q1sa	285,1
13	AP-O-28	1042830	1017654	Q1sa	261,9
14	AP-O-30	1042920	1017782	Q1sa	638,0
15	AP-O-31	1041530	1019684	Q1sa	26,0
16	AP-O-32	1044320	1019547	Q1sa	6842,9
17	AP-O-33	1044267	1019540	Q1sa	207,4
18	AP-O-49	1041148	1017183	Q1sa	1723,1
19	AP-O-62	1043615	1016874	Q1sa	596,2
20	AP-O-64	1043665	1017286	Q1sa	420,0
21	AP-C-03	1043253	1016014	E1c	2022,0
22	AP-C-06	1044836	1018251	E1c	12026,9
23	AP-C-08	1041041	1013011	E1c	6748,6
24	AP-C-19	1043920	1018340	E1c	216,7
25	AP-C-31	1042425	1015537	E1c	621,9
26	AP-C-39	1044501	1018459	E1c	19440,0
27	AP-O-10	1038666	1015771	E1c	1244,2
28	AP-O-13	1039679	1014610	E1c	23405,7
29	AP-O-14	1039566	1013612	E1c	402,0
30	AP-O-15	1040210	1013816	E1c	12400,0
31	AP-O-23	1044235	1016257	E1c	2566,1
32	AP-O-24	1044404	1017540	E1c	11648,0
33	AP-O-55	1039620	1014535	E1c	1125,0
34	AP-O-56	1038744	1015474	E1c	26408,1
35	AP-O-57	1039058	1015653	E1c	26408,1
36	AP-C-05	1045590	1018085	K2t	7776,0
37	AP-C-15	1044433	1014612	K2t	623,7
38	AP-C-27	1045100	1016897	K2t	15552,0
39	AP-C-29	1042292	1010476	K2t	1477,4
40	AP-C-34	1039863	1017815	K2t	1722,7
41	AP-O-06	1037713	1016600	K2t	2263,0
42	AP-O-07	1038178	1016541	K2t	2070,0
43	AP-O-08	1038831	1016734	K2t	11952,0
44	AP-O-09	1038704	1016112	K2t	11664,0
45	AP-O-01	1039720	1016408	K2E1g	136080,0

Anexo I. Resultados ensayos Físico Químicos

Parámetro	Punto	AP-C-29	AP-C-05	AP-C-06	AP-C-28	AP-C-41	AP-C-27	AP-C-31	AP-C-40	AP-C-33	AP-C-30	AP-C-03
	Fecha ensayo	18/01/21	5/02/21	12/02/21	4/01/21	4/01/21	10/01/21	16/03/21	6/11/20	2/10/20	23/12/20	12/03/20
	UG.	Q1sa	K2t	E1c	Q1sa	Q1sa	K2t	E1c	Q1sa	K2t	Q1sa	E1c
pH	UM.	6,5	5,0	6,5	6,5	6,8	5,5	6,5	5,4	5,0	6,9	6,9
EC	μS/cm	50,0	10,0	80,0	40,0	40,0	21,0	50,0	60,0	30,0	58,0	180,0
TDS	mg l ⁻¹	339,7	6,8	66,8	42,8	61,6	20,4	41,4	29,6	41,4	395,9	136,3
K ⁺	mg l ⁻¹	2,4	0,4	1,0	1,5	1,7	0,8	1,1	0,9	0,9	2,7	2,4
Ca ⁺	mg l ⁻¹	43,4	0,6	2,6	4,7	6,4	0,6	2,4	1,6	1,1	46,0	2,8
Mg ²⁺	mg l ⁻¹	5,6	0,3	1,3	2,1	2,1	0,2	0,8	0,4	0,2	5,8	1,7
Na ⁺	mg l ⁻¹	63,2	0,4	12,7	3,4	3,8	1,1	7,7	3,7	7,2	75,1	24,5
NH ₄ ⁺	mg l ⁻¹	0,5	0,1	0,0	0,3	0,1	2,7	0,3	1,9	6,5	0,3	3,1
Fe ⁺	mg l ⁻¹	0,0	0,0	0,0	0,7	0,5	0,0	0,2	0,5	0,1	0,0	0,8
HCO ₃ ⁻	mg l ⁻¹	88,1	4,5	44,5	26,3	42,8	2,4	26,5	17,5	10,5	132,0	96,6
Cl ⁻	mg l ⁻¹	135,0	0,3	4,1	0,1	0,2	4,3	0,2	1,5	10,2	132,0	0,1
PO ₄ ³⁻	mg l ⁻¹	0,0	0,0	0,0	0,2	0,2	0,0	0,1	-	-	0,1	3,6
SO ₄ ²⁻	mg l ⁻¹	0,3	0,0	0,1	3,0	3,3	1,0	0,3	0,4	0,3	0,3	0,0
NO ₃ ⁻	mg l ⁻¹	1,1	0,2	0,5	0,5	0,5	7,2	1,8	1,2	4,5	1,5	0,8
Error Balance iónico	%	1,94	0,04	-0,02	12,64	-0,04	-0,04	0,09	0,10	17,76	1,72	-0,03

Anexo J. Resultados de Estadística de concentraciones de cationes por unidad hidrogeológica

<i>Q1sa</i>	<i>TDS</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Fer</i>	<i>NH4</i>	<i>HCO3</i>	<i>Cl</i>	<i>SO4</i>	<i>PO4</i>	<i>NO3</i>
Media	45,62	6,10	50,00	4,02	1,24	3,76	1,29	0,54	0,99	30,15	0,84	1,85	0,10	0,85
Error típico	16,02	0,70	10,00	2,42	0,84	0,06	0,39	0,00	0,91	12,65	0,66	1,49	0,10	0,35
Mediana	45,62	6,10	50,00	4,02	1,24	3,76	1,29	0,54	0,99	30,15	0,84	1,85	0,10	0,85
Desviación e	22,66	0,99	14,14	3,42	1,19	0,08	0,55	0,00	1,29	17,89	0,93	2,10	0,14	0,49
Varianza de l	513,28	0,98	200,00	11,66	1,41	0,01	0,30	0,00	1,66	320,05	0,87	4,41	0,02	0,25
Rango	32,04	1,40	20,00	4,83	1,68	0,12	0,78	0,00	1,82	25,30	1,32	2,97	0,20	0,70
Mínimo	29,60	5,40	40,00	1,60	0,40	3,70	0,90	0,54	0,08	17,50	0,18	0,36	0,00	0,50
Máximo	61,64	6,80	60,00	6,43	2,08	3,82	1,68	0,54	1,90	42,80	1,50	3,33	0,20	1,20

<i>E1c</i>	<i>TDS</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Fer</i>	<i>NH4</i>	<i>HCO3</i>	<i>Cl</i>	<i>SO4</i>	<i>PO4</i>	<i>NO3</i>
Media	81,52	6,63	49,33	2,60	1,25	14,97	1,50	0,32	1,15	55,87	1,46	0,11	1,24	1,05
Error típico	28,36	0,13	17,90	0,13	0,26	4,98	0,44	0,23	0,98	21,02	1,32	0,07	1,17	0,39
Mediana	66,81	6,52	50,00	2,56	1,33	12,70	1,14	0,18	0,34	44,50	0,18	0,05	0,12	0,79
Desviación e	49,13	0,23	31,01	0,22	0,45	8,62	0,76	0,40	1,69	36,41	2,28	0,13	2,02	0,68
Varianza de l	2413,50	0,05	961,33	0,05	0,20	74,27	0,58	0,16	2,86	1325,40	5,21	0,02	4,10	0,47
Coefficiente i	1,23	1,64	-0,10	0,78	-0,74	1,10	1,66	1,42	1,66	1,27	1,73	1,67	1,73	1,46
Rango	94,89	0,42	62,00	0,44	0,89	16,78	1,39	0,75	3,08	70,10	4,00	0,24	3,55	1,29
Mínimo	41,44	6,47	18,00	2,40	0,77	7,72	0,99	0,02	0,01	26,50	0,09	0,03	0,03	0,53
Máximo	136,33	6,89	80,00	2,84	1,66	24,50	2,38	0,77	3,09	96,60	4,09	0,26	3,58	1,82

<i>K2It</i>	<i>TDS</i>	<i>pH</i>	<i>CE</i>	<i>Ca</i>	<i>Mg</i>	<i>Na</i>	<i>K</i>	<i>Fer</i>	<i>NH4</i>	<i>HCO3</i>	<i>Cl</i>	<i>SO4</i>	<i>PO4</i>	<i>NO3</i>
Media	13,55	5,24	15,50	0,59	0,25	0,77	0,62	0,01	1,39	3,46	2,26	0,51	0,02	3,70
Error típico	6,80	0,21	5,50	0,02	0,00	0,37	0,17	0,01	1,32	1,01	1,99	0,46	0,01	3,50
Mediana	13,55	5,24	15,50	0,59	0,25	0,77	0,62	0,01	1,39	3,46	2,26	0,51	0,02	3,70
Desviación e	9,62	0,30	7,78	0,02	0,00	0,53	0,23	0,01	1,86	1,43	2,82	0,64	0,01	4,95
Varianza de l	92,58	0,09	60,50	0,00	0,00	0,28	0,06	0,00	3,47	2,06	7,94	0,41	0,00	24,50
Rango	13,61	0,42	11,00	0,03	0,01	0,75	0,33	0,01	2,64	2,03	3,98	0,91	0,01	7,00
Mínimo	6,75	5,03	10,00	0,57	0,24	0,40	0,45	0,00	0,07	2,44	0,27	0,05	0,01	0,20
Máximo	20,36	5,45	21,00	0,60	0,25	1,15	0,78	0,01	2,71	4,47	4,25	0,96	0,02	7,20



Potencial hidrogeológico del sinclinal Suesca-Teusacá (sector central) como fuente de abastecimiento en el municipio de Tocancipá, Cundinamarca (Colombia)

Pérez, Alejandro (*); Gómez, Diego (*)

alejandro_perezv@hotmail.com, diegomez656@gmail.com

(*) Facultad de Ingeniería Ambiental - Universidad Antonio Nariño, Colombia

Palabras Clave: Acuífero, Formación Cacho, Zonas de interés hidrogeológico

Resumen:

El municipio de Tocancipá se localiza en el sector delimitado como Sabana Centro, cuenca alta del río Bogotá, y se ha convertido en un polo de desarrollo agrícola e industrial. La sostenibilidad de este crecimiento requiere prever la identificación de nuevas fuentes para el abastecimiento de agua que garanticen el suministro ante la demanda, y en ese sentido surge la pregunta: ¿qué fuentes de abastecimiento hídrico existe en el municipio que garantice el suministro de agua para el desarrollo de futuros proyectos inmobiliarios, agrícolas e industriales?

El modelo geológico - Geofísico del sinclinal Suesca-Teusacá (sector central) se desarrolló a partir de resultados de 26 SEV, 13 ensayos de Magnetotelúrica, y la información de 29 perforaciones profundas realizadas en el área. Con la reconstrucción geométrica de la estructura se propuso el trazado de una falla inversa al oriente del municipio, (Falla de Tocancipá), desplazando rocas de edad Cretácica y Paleógena, y que está cubierta por la Formación Sabana.

Con los registros hidrológicos se determinaron valores de precipitación promedio mensual multianual que varían de 860 mm a 970 mm, y con ellos la identificación de zonas de recarga potencial, de tránsito y descarga de agua superficial. Los parámetros del balance hídrico se calcularon por el método de Schosinsky, y su análisis muestra como la intervención antrópica afecta las zonas de recarga.

Los parámetros hidráulicos de cada unidad geológica fueron recopilados de 33 pruebas de bombeo con los cuales se clasificaron los acuíferos. El comportamiento hidrodinámico de los acuíferos fue evaluado a partir de los resultados de monitoreo de en 30 pozos, y el análisis de los registros históricos del periodo 1998-2021 indican descensos que no superan 20m.

El análisis hidrogeoquímico permitió identificar las facies presentes en los acuíferos, y mediante relaciones iónicas e indicadores cloros alcalinos se evidenció la complejidad que existe en procesos de intercambio catiónico, ocurridos principalmente en las Formaciones Sabana y Cacho. La Formación Arenisca Labor y Tierna refleja cierta estabilidad química del agua.

Finalmente, se integran las caracterizaciones de los diferentes componentes y con ello se desarrolla un modelo hidrogeológico conceptual que permite plantear cinco zonas de interés hidrogeológico referidas a la posición espacial que ocupa la Formación Cacho. El volumen que aporta esta unidad supera el 50% del volumen total explotado en el área, evidenciando el potencial acuífero que tiene el sinclinal para ser considerado como una fuente alterna de abastecimiento en el municipio de Tocancipá.



Abstract

The municipality of Tocancipá is located in the zone denominated as Sabana Centro, upper basin of Bogotá river, and has become a pole for the agricultural and industrial growth. The sustainability of this development requires the identification of new sources for the hydric provisioning that guarantees the supply given the demand. According to that, a question arises: ¿what sources of hydric provisioning there are in the municipality to secure the supply of water and development of future plans of infrastructure, agriculture and industry?

The geological model - geophysical of the syncline Suesca-Teusacá (central sector) was developed from 26 SEV, 13 test of Magnetotelluric, and the information of 29 drills done in the area. With the geometrical reconstruction of the structure, an inverse fault to the east of the municipality (Tocancipá's fault) was identified, scrolling rocks from the cretaceous and paleogene, and being covered by the Sabana formation.

With the hydrological registers of precipitation values, it was set a monthly multi year average between 860mm to 970mm, with them, the identification of potential zones for reloading, transit and discharge of superficial water. The parameters of the hydric balance were calculated using the Schosinsky method, its analysis shows how the anthropic intervention affects the reload zones.

The hydraulic parameters of each geological unit were collected from 33 pumping tests to classify the aquifers. The hydrodynamic behaviour of them was evaluated using the monitoring results of 30 ponds, and the analysis of historical registers of the period between 1998-2021 indicates level drops that are not above 20m.

The hydrogeochemical analysis allowed the identification of the actual facies in the aquifers, and through ionic relations and chloric alkaline indicators it was evident a complexity that exists in the processes of cationic exchange that occurs principally in the Sabana, and Cacho formations. The Arenisca Labor and Tierna formation, reflect some chemical stability of the water.

Finally, the characterisation of the different components are integrated in the study and with that, the hydrological model it's developed, its conceptual approach allows to propose five zones of hydrological interest according to the spacial distribution of the Cacho formation. The volume that this unit contributes with, exceeds the 50% of the total volume exploited in the area. In that order of ideas it is evident that the hydric potential of this syncline, could be considered as an alternate source of water provisioning for the municipality of Tocancipá.