
MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO SUBSUPERFICIAL O SOMERO EN EL PERÍMETRO URBANO DEL DISTRITO CAPITAL

Convenio de asociación No SDA-CV 20161264

INFORME METODOLÓGICO: INFORME QUE CONTENGA LA METODOLOGÍA DE
CONSTRUCCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y DEL MODELO
ANALÍTICO DEL ACUÍFERO DE BOGOTÁ

Diciembre 2017

TABLA DE CONTENIDO

1	INTRODUCCIÓN	7
1.1	CONTEXTO.....	7
1.2	ESTUDIOS PREVIOS EN LA SABANA DE BOGOTÁ.....	8
1.3	OBJETIVOS Y ALCANCE	10
2	ÁREA DE ESTUDIO.....	12
2.1	Morfología e Hidrografía	12
2.2	Marco Geológico Regional.....	15
2.3	Rasgos Estructurales	21
3	METODOLOGÍA.....	23
3.1	RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN	23
3.2	ESTIMACIÓN DE LA RECARGA	52
3.3	MODELO GEOLÓGICO LOCAL.....	82
3.4	MODELACIÓN REGIONAL EN ELEMENTOS ANALÍTICOS (AEM).....	114
3.5	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	127
4	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	151
4.1	CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL	151
4.2	MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	152
4.3	INCERTIDUMBRE.....	153
5	BIBLIOGRAFÍA.....	155

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2-1 Cuencas del sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá. Fuente: http://www.idiger.gov.co/riesgo-por-inundacionHidráulica</i>	15
<i>Figura 3-1. Metodología de construcción del modelo hidrogeológico conceptual.....</i>	23
<i>Figura 3-2 Clasificación de pozos, aljibes y manantiales en los depósitos consolidado y no consolidado</i>	28
<i>Figura 3-3. Base de datos de puntos de agua clasificados según el depósito de extracción</i>	29
<i>Figura 3-4. Puntos de agua con información de transmisividad (T) – Depósito no consolidado</i>	30
<i>Figura 3-5. Puntos de aguas con información de conductividad (K) – Depósito no consolidado</i>	30
<i>Figura 3-6. Puntos de aguas con información de pH – Depósito no consolidado.....</i>	31
<i>Figura 3-7 Proporción de parámetros hidroquímicos en el depósito no consolidado</i>	32
<i>Figura 3-8. Puntos de agua con información de oxígeno-18 – Depósito no consolidado.....</i>	33
<i>Figura 3-9 Valores de pH de los vertimientos en ríos y vertimientos de empresas</i>	34
<i>Figura 3-10 Histograma de frecuencias de los valores de pH en vertimientos y en pozos</i>	35
<i>Figura 3-11. Esquema conceptual del balance hídrico</i>	36
<i>Figura 3-12. Corte hidrogeológico esquemático de la sabana de Bogotá.....</i>	38
<i>Figura 3-13. Corte geológico que muestra la presencia de la unidad acuífera de la Formación Tilatá (Tpt) entre El Rosal y la Avda. Caracas en Bogotá</i>	38
<i>Figura 3-14. Modelo hidrogeológico esquemático de la cuenca de la sabana de Bogotá.</i>	43
<i>Figura 3-15. Balance hídrico a nivel anual de la sabana de Bogotá</i>	44
<i>Figura 3-16. Estructura del modelo numérico construido por JICA (.....</i>	45
<i>Figura 3-17. Distribución de la recarga en el modelo numérico de JICA.....</i>	46
<i>Figura 3-18. Límites del modelo numérico de JICA</i>	47
<i>Figura 3-19. Límites del modelo numérico de JICA. En verde: General Head Boundary (GHB); en azul: Constant Head Boundary (CHB); en rojo: drenaje superficial.</i>	48
<i>Figura 3-20 Cuencas identificadas dentro del área de estudio.....</i>	53
<i>Figura 3-21 Clasificación textural de las unidades geo pedológicas empleadas para definir las unidades de suelo</i>	60
<i>Figura 3-22 Triangulo Textural USDA</i>	64
<i>Figura 3-23 Curvas de nivel generadas a partir del modelo de elevación digital</i>	68
<i>Figura 3-24 Mapa de pendientes.....</i>	69
<i>Figura 3-25 Hidrografía de Bogotá (Fuente: Javeriana, 2017)</i>	70
<i>Figura 3-26 Metodología de la aplicación del modelo</i>	71
<i>Figura 3-27 Estaciones de precipitación</i>	73
<i>Figura 3-28 Estaciones de temperatura en la zona de estudio.....</i>	74
<i>Figura 3-29 Curva de relación de temperatura máxima y elevación para enero</i>	75
<i>Figura 3-30. Extensión ArcSWAT en ArcGIS.....</i>	76
<i>Figura 3-31 Microcuencas en el modelo SWAT.</i>	77
<i>Figura 3-32 Unidades Hidrológicas de Respuesta</i>	78
<i>Figura 3-33 Estaciones virtuales para las subcuencas.....</i>	79
<i>Figura 3-34 Duración del día en horas de acuerdo a la latitud.....</i>	81
<i>Figura 3-35. Definición de la grilla del modelo geológico 3D.</i>	82
<i>Figura 3-36 Distribución de las perforaciones en rangos de profundidad.....</i>	83
<i>Figura 3-37. Distribución en superficie de las perforaciones usadas en el modelo 3D.....</i>	83
<i>Figura 3-38. Leyenda litológica.</i>	84
<i>Figura 3-39. Modelo litológico 3D para el área urbana del distrito capital exagerado 7 veces en la vertical .</i>	85

Figura 3-40. Histograma de distribución para cada uno de los diferentes materiales.....	85
Figura 3-41. Modelo estratigráfico con exagerado 7 veces en la vertical.....	86
Figura 3-42. Histograma de proporción de las formaciones presentes en el área de estudio.....	86
Figura 3-43 Perfiles estratigráficos G-G', J-J', O-O'; exagerados 10 veces en la vertical.	87
Figura 3-44. Distribución espacial de los valores de pH medida en los pozos de agua subterránea para la zona de estudio.	95
Figura 3-45. Distribución espacial de los valores de Temperatura medida en los pozos de agua subterránea para la zona de estudio.	96
Figura 3-46. Distribución espacial de los valores de Conductividad Eléctrica medida en los pozos de agua subterránea para la zona de estudio.	97
Figura 3-47. Representación espacial de los cloruros para las diferentes campañas.	98
Figura 3-48. Medidas de Cl- en las campañas de a) Jica 2009; b) Jica 2003; c) Hidrogeocol 2000 y d) Ingeominas 1998-2000.....	99
Figura 3-49. Histograma de frecuencias de electroneutralidad	100
Figura 3-50 Diagrama de Piper (depósito no consolidado)	102
Figura 3-51 Diagrama de piper - depósito consolidado	102
Figura 3-52. Diagrama de Piper - Clasificación grupos A, B, C, y D	103
Figura 3-53 Mapa de puntos de agua agrupados en Clase A, B, C y D.	104
Figura 3-54. Diagramas de cajas iones mayoritarios (mg/l). Depósitos consolidados y no consolidados.....	106
Figura 3-55. Representación graficas de los diagramas de Stiff para los depósitos consolidados y no consolidados localizados en la zona de estudio.....	107
Figura 3-56 Diagrama de Schoeller (a) depósito no consolidado y (b) depósito consolidado	108
Figura 3-57. Representación de las 4 clases de agua diferenciadas mediante la clasificación mediante los diagramas de Schoeller-Berkaloff.....	109
Figura 3-58 Relaciones iónicas a) Ca/Mg , b) Ca+Mg-HCO ₃ +SO ₄ , c) Ca+Mg - Cl, d) Na/Cl - Cond, e) Cl/HCO ₃ - Cl, y f) Na-Cl	110
Figura 3-59 Variación altitudinal del contenido isotópico de O18 (‰) y D(‰) respecto a la precipitación.	111
Figura 3-60 Variación altitudinal del contenido isotópico del O18 (‰)	112
Figura 3-61 Dispersividad del isotópico del O18 (‰) respecto a la profundidad (Clarck 2015)	113
Figura 3-62 Dispersión del isotópico del O18 (‰) respecto a la profundidad en los pozos del Distrito y Sabana de Bogotá	114
Figura 3-63. Representación de los perfiles en planta sobre los mapas geológicos (227, 228, 246 y 247)	116
Figura 3-64. Perfil Geológico corte A-A'	117
Figura 3-65. Dominio y representación del modelo analítico de flujo 2D, perfil geológico A-A'	117
Figura 3-66. Perfil Geológico corte B-B'.....	118
Figura 3-67. Dominio y representación del modelo analítico de flujo 2D, perfil geológico B-B'.....	118
Figura 3-68 Análisis de Sensibilidad, Perfil A. Tiempo de simulación a 1000 años para todos los escenarios.	122
Figura 3-69 Análisis de Sensibilidad, Perfil B. Tiempo de simulación a 1000 años para todos los escenarios.	123
Figura 3-70 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1	125
Figura 3-71 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1	125
Figura 3-72. Representación espacial de los caudales de explotación en la zona de estudio.	129
Figura 3-73. Representación especial de los niveles estáticos (msnm) consignados en los reportes (SDA 2013, JICA 2009, SIAM 2006, JICA 2003, UNAL 2003, INGEOMINAS 2002, HIDROGEOCOL 2000).....	131
Figura 3-74. Comparación de los niveles estáticos puntuales de los reportes (SDA 2013 y, UNAL 2003).	132
Figura 3-75. Niveles (msnm) interpolados con los datos de los reportes (SDA 2013 y, UNAL 2003) usando un krigado simple con la herramienta geoespacial de ArcGis.	133

<i>Figura 3-76. Sectorización de los niveles en función de los abatimientos. Esto se hace para realizar el análisis de la evolución temporal del nivel.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 3-77. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 1.</i>	<i>135</i>
<i>Figura 3-78. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 2.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 3-79. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 3.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 3-80. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 4.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 3-81. Localización de las estaciones pluviométricas en donde se tomaron medidas de CI en la lluvia.</i>	<i>140</i>
<i>Figura 3-82 Áreas de recarga consideradas para el balance hídrico global. En amarillo el polígono del área de estudio del proyecto. En verde el polígono considerado para la estimación de la recarga rural. En rojo el polígono del retorno de agua por riego de cultivos. En rosado, azul y negro los sub-polígonos de recarga urbana, cada color representativo de una tasa de recarga diferente.</i>	<i>142</i>
<i>Figura 3-83. Localización de los perfiles hidrogeológicos para la zona de estudio.</i>	<i>146</i>
<i>Figura 3-84 Representación gráfica del perfil hidrogeológico O-O'</i>	<i>147</i>
<i>Figura 3-85. Representación gráfica del perfil hidrogeológico J-J'</i>	<i>148</i>
<i>Figura 3-86. Representación gráfica del modelo hidrogeológico conceptual.</i>	<i>149</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 2-1 Relación de estaciones por entidad</i>	12
<i>Tabla 2-2. Ambientes Sedimentarios en la cuenca de la Sabana de Bogotá</i>	19
<i>Tabla 3-1 Resumen Información secundaria recolectada</i>	24
<i>Tabla 3-2 Resumen de información principal para la construcción del modelo geológico 3D</i>	24
<i>Tabla 3-3 Fuentes de información para la recolección de información secundaria - puntos de agua</i>	25
<i>Tabla 3-4 Resumen de actividades realizadas en campo</i>	52
<i>Tabla 3-5 Estadísticos descriptivos de variables hidrogeológicas</i>	52
<i>Tabla 3-6 Relación entre coberturas CLC y coberturas SWAT</i>	54
<i>Tabla 3-7 Relación entre coberturas CLC y coberturas SWAT</i>	56
<i>Tabla 3-8 Atributos enlazadores entra la capa de geopedología y los estudios de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca.</i>	57
<i>Tabla 3-9 Parámetros requeridos en el modelo SWAT</i>	60
<i>Tabla 3-10 Densidad aparente en función del contenido de arcillas</i>	63
<i>Tabla 3-11 Intervalos de clasificación textural en función del porcentaje de arenas, limos y arcillas.</i>	65
<i>Tabla 3-12 Conductividad hidráulica</i>	65
<i>Tabla 3-13. Albedo en función de las superficies típicas de la tierra</i>	66
<i>Tabla 3-14 Relación albedo y texturas del estudio de suelos del IGAC</i>	66
<i>Tabla 3-15. Clasificación de pendientes</i>	69
<i>Tabla 3-16 Relación de estaciones por entidad</i>	72
<i>Tabla 3-17. Coeficientes de regresión para índices de radiación (RG/RA) y brillo solar (n/N) medios mensuales para agrupaciones geográficas y todas las estaciones en la zona cafetera colombiana.</i>	80
<i>Tabla 3-18. Radiación solar extraterrestre</i>	80
<i>Tabla 3-19. Propiedades físicas de las formaciones geológicas de la zona de estudio.</i>	89
<i>Tabla 3-20. Propiedades físicas de las formaciones geológicas de la zona de estudio.</i>	90
<i>Tabla 3-21. Tipos de agua identificados en los depósitos consolidados y no consolidados</i>	101
<i>Tabla 3-22 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil A</i>	119
<i>Tabla 3-23 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil B</i>	119
<i>Tabla 3-24 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil A</i>	120
<i>Tabla 3-25 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil B</i>	120
<i>Tabla 3-26. Datos de lluvia ponderada por el volumen medidos en el Cuenca alta del río Bogotá en (Ingeominas 2001). La precipitación p, se reporta en el estudio de Ingeominas como un promedio mensual.</i>	139
<i>Tabla 3-27. Valores de cloruros medidos en los manantiales de la cuenca alta del río Bogotá presentados en Fuente: Ingeominas (2001).</i>	141
<i>Tabla 3-28 Escenarios de balance hídrico global. En rojo los datos que presentan mayor incertidumbre.</i>	143

1 INTRODUCCIÓN

1.1 CONTEXTO

En Colombia el agua subterránea representa una gran reserva de abastecimiento, no sólo para consumo humano, sino principalmente para uso agrícola e industrial, especialmente en aquellas zonas donde el recurso hídrico superficial es limitado, ya sea por calidad o por cantidad. En este sentido, la mayoría de los estudios de aguas subterráneas realizados en el país, han sido desarrollados en acuíferos regionales, donde el mayor porcentaje del área es rural. Estos estudios, por lo general, están enmarcados en políticas del manejo integrado de los recursos hídricos, y son fundamentales para llegar a una gestión conjunta del agua en el territorio, a fin de garantizar una explotación sostenible del recurso.

En los últimos años, las investigaciones conducidas en la modelación de acuíferos en el país, ha ido evolucionando, se ha pasado del uso de modelos cualitativos (i.e., conceptuales) a modelos cuantitativos (i.e., numéricos o analíticos), reconociendo que estos últimos permiten una mejor aproximación de la realidad y constituyen la base fundamental para la construcción de herramientas de gestión del acuífero. Sin embargo, hay que señalar que el modelo hidrogeológico conceptual es el punto de partida de cualquier modelo numérico; su construcción debe ser cuidadosa, ya que, puede tener numerosas interpretaciones subjetivas, por lo que la incertidumbre de los modelos conceptuales siempre estará limitada por la información con la que se cuente.

El acuífero de Bogotá D.C., en particular representa un acuífero urbano de gran complejidad, en el que, para llegar a un modelo conceptual adecuado, es requerido considerar los procesos particulares que suceden en acuíferos someros que se extienden bajo un área urbanizada. Estos procesos son afectados por las intervenciones que se realizan en el subsuelo, como la instalación de infraestructura de servicios públicos (acueducto, alcantarillado, energía), la construcción de obras subterráneas, la extracción de agua subterránea en la construcción de sótanos, el cambio del material de los primeros metros para construcción de la malla vial.

Si bien los procesos fundamentales asociados a aguas subterráneas urbanas no son muy diferentes a las rurales, las escalas espaciales y de tiempo suelen ser considerablemente diferentes. Estas escalas tienen especial importancia cuando se quiere gestionar los riesgos inherentes al desarrollo de una ciudad, como el riesgo por contaminación del acuífero ante fugas de hidrocarburos de las Estaciones De Servicio (EDS) y el riesgo por subsidencia ante la constante extracción de agua subterránea en la construcción de edificaciones e infraestructura.

Este proyecto representa entonces, uno de los primeros ejercicios de investigación desarrollados en el país, que busca contribuir al conocimiento y entendimiento de los procesos que tienen lugar en los acuíferos urbanos, en particular, en los acuíferos someros. Los resultados esperados en este proyecto, son muy atractivos de cara a los retos que el país afronta en la urbanización de ciudades intermedias, y renovación urbanística de las ciudades principales. Siempre garantizando una mejor calidad de vida para sus habitantes.

1.2 ESTUDIOS PREVIOS EN LA SABANA DE BOGOTÁ

Bogotá está localizada en la vertiente occidental de la cordillera oriental de los Andes colombianos, con una altitud que oscila entre los 2.650 y los 3.750 m.s.n.m. entre los 4°28' a 4°47' Norte y 74° 06' a 74° 13'. Este ocupa una extensión de 163.660,94 ha, de las cuales 23,41% es suelo urbano y el 76,59% es rural. (SDA I. , 2015). En cuanto a la precipitación, Bogotá se encuentra influenciada por la Zona de Confluencia Intertropical (ZCIT), franja que recibe las corrientes de aire cálido y húmedo (vientos alisios) provenientes de los grandes cinturones de alta presión, situados en la zona subtropical de los hemisferios norte y sur, creando así corrientes de aire que al encontrarse en el trópico forman una zona de baja presión, que originan masas de nubes y abundantes precipitaciones pluviales.

El primer periodo húmedo (lluvias) se presenta entre los meses de abril y junio y el segundo, entre los meses de septiembre y noviembre. Los periodos secos se presentan en los meses de diciembre a marzo y de junio a agosto. Respecto al clima, Bogotá tiene un clima frío, subhúmedo y con tendencia a la sequía hacia el sur y sur oeste del área urbana. La temperatura varía entre 14,5°C en la parte baja del río Tunjuelo y 7°C en la cuenca alta de este río (3.450 msnm). A nivel diario, la oscilación de temperatura es significativa, ya que puede acercarse a diferencias hasta de 10°C (SDA-, 2007)

La principal corriente hídrica que atraviesa la ciudad es el río Bogotá, dentro del casco urbano se encuentran los ríos: Juan Amarillo, Fucha y Tunjuelo. Estas corrientes alimentan el conjunto de humedales comprendido por: Burro, Capellanía, Conejera y el Conejito, Córdoba, Guaymaral y Torca, Jaboque, Juan Amarillo, Santa María del Lago, Techo, Tibanica y Vaca.

El monitoreo hidrometeorológico de la ciudad de Bogotá lo realizan principalmente la Corporación Autónoma Regional (CAR), de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

En el Distrito capital, se registra la información meteorológica a nivel diario y subdiario de estaciones de tipo: sinóptica principal (SP), pluviográfica (PG), pluviométrica (PM), meteorológica especial (ME), climatológica principal (CP), y climatológica ordinaria (CO). Asimismo, se cuenta con una red de estaciones hidrológicas clasificadas en limnigráfica (LG) y limnimétrica (LM) las cuales algunas registran valores diarios o subdiarios. A nivel distrital la mayoría de las estaciones de monitoreo son de tipo convencional y un porcentaje menor tienen un componente electrónico. Lo que representa que la mayoría de los registros sea de tipo diario y no subdiario.

Desde el punto de vista subsuperficial, no se realiza un monitoreo permanente de niveles por lo que las principales fuentes de información están asociadas a estudios previos facilitados por la Secretaría Distrital de Ambiente en el marco del presente convenio, el SICAT (Sistema de información para el inventario, catalogación, valoración y administración de la información técnico-científica) del Servicio Geológico Colombiano, con medición de niveles desde el año 1985. Adicionalmente, una fuente de información importante está representada en los expedientes 01 localizados en los archivos físicos

de la SDA. Desde esta perspectiva, en términos de información se encontraron algunas limitaciones relacionadas con la falta de información de profundidad de extracción, o en su defecto, dos o más profundidades diferentes para un mismo pozo.

La sabana de Bogotá comprende la cuenca alta del río Bogotá y el área del Distrito Capital y representa la región más industrializada y poblada de Colombia. Muchas de sus industrias y todos los cultivos de flores están soportados por extracciones de agua subterránea. Algunos municipios hacen uso extensivo de este recurso para suministro potable. Desde los años 80-90, paralelamente al desarrollo agro-industrial, en los principales acuíferos de esta región se han registrado importantes descensos de los niveles piezométricos, que han llevado varios expertos a concluir que se está utilizando más agua de la que se recarga y que, en algunos sectores, se deberían limitar futuros aprovechamientos de los acuíferos. Sin embargo, históricamente se han generado opiniones diversas sobre lo relacionado con la estimación de la recarga. En particular, las estimaciones realizadas por estudios previos han variado por más de un orden de magnitud (de 0 a 132 mm/año).

Rodríguez (1986) a través de un estudio de datación del agua subterránea concluye que los acuíferos de la sabana de Bogotá están conformados por agua relativamente vieja y que la recarga a estos sistemas no es substancial. En contraste, Lobo-Guerrero y Uscategui (1992) sugieren que debido a los descensos desarrollados durante los últimos años debería existir algún tipo de recarga en el acuífero. La posición de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón - JICA (EAAB-JICA, 2009) sobre la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo de esta región se aparta de las demás, ya que concluye que en esta región existen suficientes recursos hídricos subterráneos, es decir la recarga (132 mm/año) es mucho mayor del aprovechamiento subterráneo, resultado que según JICA justifica la construcción de pozos adicionales en zonas poco explotadas.

Por otra parte, es importante resaltar el estudio realizado por PNUD-DAMA-Hidrogeocol (1999), cuyo objetivo era elaborar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del área de jurisdicción del DAMA (Distrito Capital). El balance hídrico sugiere que en el área de Bogotá la recarga real y los bombeos de agua subterránea son similares, ambos del orden de $1\text{ m}^3/\text{s}$, siendo la recarga potencial del orden de $2\text{ m}^3/\text{s}$. Hidrogeocol considera que los descensos pronunciados de niveles piezométricos que se observan en muchos pozos se pueden explicar con la recarga pequeña, las bajas a media permeabilidades de los acuíferos y su bajo coeficiente de almacenamiento. Las simulaciones numéricas sugieren que los tiempos de tránsito desde la zona de recarga hasta la ciudad son del orden de 10,000 años, lo que sugiere que agua subterránea con miles de años de edad no necesariamente implica que esta no se mueva.

El antecedente más reciente está asociado al estudio desarrollado por la SDA (2013), en el que se desarrolló un modelo conceptual del área urbana del Distrito Capital con base en el análisis de variables climatológicas y estimación del balance hídrico, levantamiento geológico de detalle a escala 1:25,000, generación de un mapa de curvas de igual espesor de los depósitos cuaternarios, elaboración de mapas de isopiezas para diferentes temporadas, interpretación de pruebas de bombeo para la estimación de los parámetros y procesamiento de datos hidrogeoquímicos e isotópicos (deuterio, O-18) de diferentes tipos de agua (lluvia, superficial, subterránea). La recarga, estimada por tres métodos diferentes presenta valores para el área de estudio que varían entre 70 y 157 mm/año. Los valores encontrados son en ese sentido similares a la estimada por JICA (2009). Las

tasas más altas de recarga se generarían en los cerros orientales, donde se reportan valores mayores a 190 mm/año.

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

Si bien los procesos fundamentales asociados a aguas subterráneas urbanas no son muy diferentes a las rurales, las escalas espaciales y de tiempo suelen ser considerablemente diferentes. Estas escalas tienen especial importancia cuando se quiere gestionar los riesgos inherentes al desarrollo de una ciudad, como el riesgo por contaminación del acuífero ante fugas de hidrocarburos de las Estaciones De Servicio (EDS) y el riesgo por subsidencia ante la constante extracción de agua subterránea en la construcción de edificaciones e infraestructura.

Estas particularidades hacen que sea indispensable plantear un cambio en el paradigma de cómo se ha evaluado el ciclo hidrogeológico en acuíferos urbanos en Colombia que incluyen algunos estudios previos, en especial, aquellos asociados al área de estudio. Es por eso, que en el marco de este proyecto, se propone un esquema de modelación que tiene en cuenta no solamente la recarga natural, sino también la artificial asociada a pérdidas de los sistemas de acueducto y alcantarillado. Adicionalmente, se propone un esquema conceptual de alta resolución, en el que se consideren las primeras capas de baja profundidad que interactúan con la infraestructura subterránea, siendo de principal relevancia la estructura de redes de acueducto y alcantarillado.

1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE

El modelo hidrogeológico conceptual de Bogotá D.C propuesto recoge toda la información disponible, que además es recopilada en una base de datos robusta que representa la fuente de información mas completa y actualizada para el área de estudio, y trata de incorporar las conclusiones de los diferentes estudios realizados previamente. Sin embargo, propone un esquema conceptual completamente diferente de los propuestos anteriormente en la medida que se incluyen las consideraciones particulares de acuíferos localizados en áreas urbanas.

En particular, se construyó un modelo geológico 3D del acuífero de Bogotá que integra toda la información disponible que se encontraba en algunos casos fraccionada y dispersa para conformar una herramienta de análisis modulable y actualizable, lo que representa un potencial de conocimiento bastante importante de cara al análisis de interacciones entre los elementos del

contexto urbano con las capas acuíferas someras y a su vez con cuerpos de agua estratégicos del distrito. Adicionalmente, se construyó un modelo hidrológico que contempla la recarga natural y artificial, esta última asociada a estimaciones de pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado del distrito. Este modelo se prevé sea calibrado con la información de presiones de la EAAB que recién arribó y con el modelo analítico que hace parte del último entregable del presente convenio.

Por otra parte, se construyó un modelo analítico 2D regional cuyo objetivo principal es refinar las condiciones de frontera del modelo hidrogeológico de Bogotá. A través de este se logró identificar que las zonas de recarga se extienden más al oriente de la divisoria de aguas oriental del Distrito, al igual que hacia el occidente, que se tienen descargas en la zona de piedemonte (flujos locales), descargas a través de las fallas transversales hacia el Cuaternario y que los tiempos de tránsito van desde cientos de años a miles de años. Por esta razón, este modelo permite distinguir flujos regionales, intermedios y locales, con una distribución diferente al sur y al norte de la ciudad. Se evidencia la probabilidad de flujos verticales, provenientes de la recarga en los cerros, que viajan a través de los depósitos consolidados, en especial el Grupo Guadalupe y ascienden hasta el cuaternario.

Las limitaciones del modelo están asociada a diferentes fuentes de incertidumbre que incluyen desde el punto de vista de la información de pozos, la profundidad de extracción (para un mismo pozo se reportaban dos o más profundidades), caudales de extracción (gran parte reportados como el caudal concesionado), clasificación de pozos activos y no activos y ubicación de los filtros. Esto deriva en incertidumbre en la estimación de la demanda ya que no se cuenta con un inventario actualizado, que registre los pozos que se encuentran inactivos, de reportar los nuevos, y medir el caudal extraído en los pozos activos.

Con respecto al balance hídrico global de la sabana de Bogotá, a la cual pertenece el área de estudio del Distrito, existen incertidumbres principalmente relacionadas con el flujo de agua subterránea desde la base del Complejo Neógeno-Cuaternario desde/hacia el complejo Paleógeno o Guadalupe. Así como, con la propagación de la infiltración efectiva relacionada con las pérdidas de la red de acueducto y alcantarillado de Bogotá, hacia horizontes más profundos del relleno Cuaternario. Sin embargo, con la modelación analítica en 3D y la modelación 1D de la zona no saturada se espera bajar los niveles de incertidumbre de algunos de estos aspectos.

Aunque el presente proyecto se centra en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual, el cual es presentado en el presente documento, este también delinea la ruta hacia la construcción del modelo numérico en fases posteriores. En ese sentido, el modelo hidrogeológico conceptual de Bogotá D.C., representa la primera fase hacia la construcción de un modelo numérico. Este modelo numérico alimentado con la recopilación de información primaria complementaria permitirán reducir la incertidumbre de tal manera que se consolide una herramienta de soporte de decisiones que permitirá potencializar el trabajo realizado para la construcción del modelo hidrogeológico presentado en este documento.

2 ÁREA DE ESTUDIO

2.1 Morfología e Hidrografía

El monitoreo hidrometeorológico de la ciudad de Bogotá lo realizan principalmente la Corporación Autónoma Regional (CAR), de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) y el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM).

En el Distrito capital, se registra la información meteorológica a nivel diario y subdiario de estaciones de tipo: sinóptica principal (SP), pluviográfica (PG), pluviométrica (PM), meteorológica especial (ME), climatológica principal (CP), y climatológica ordinaria (CO). Asimismo, se cuenta con una red de estaciones hidrológicas clasificadas en limnigráfica (LG) y limnimétrica (LM) las cuales algunas registran valores diarios o subdiarios. A nivel distrital la mayoría de las estaciones de monitoreo son de tipo convencional y un porcentaje menor tienen un componente electrónico. Lo que representa que la mayoría de los registros sea a nivel diario.

Teniendo en cuenta la consulta de estaciones del distrito Capital, se procedió a solicitar la información hidrometeorológica a la SDA, a lo cual se ha logrado recopilar información de 48 estaciones de precipitación de las siguientes entidades: SDA, IDEAM, FOPAE y EAAB. Los registros de la CAR se consultaron en el centro de documentación de la entidad.

En el Distrito Capital la precipitación se monitorea principalmente por estaciones de FOPAE, IDEAM, CAR, EAAB y las estaciones de la Red de Calidad Del Aire de Bogotá. Estos registros son de tipo diario y en ocasiones subdiario (horario).

Con el fin de construir una base de datos con registros diarios se procedió a realizar la lectura de la información suministrada por algunas entidades. Luego se identificaron sus posiciones geográficas, verificando que todas las estaciones tuvieran el mismo sistema de proyección cartográfica. Para la consolidación de los registros de precipitación diaria se unificaron los formatos de lectura de la información diaria del EAAB, la CAR, el IDEAM y la SDA.

Tabla 2-1 Relación de estaciones por entidad

ENTIDAD	No DE ESTACIONES
FOPAE	12
SDA	4
EAAB	16
IDEAM	8
CAR	8
Total	48

gPara la consolidación de los registros de temperatura se tomó la información de registros diarios de 8 estaciones meteorológicas del IDEAM. El formato de la base de datos se unificó para el periodo comprendido entre 1980 a 2015. Como resultado se dispone de una base de datos que contiene los registros horarios para 8 estaciones que comprenden el periodo de 1980 a 2015.

Con el fin de adelantar las actividades del proyecto relacionada con el aspecto cartográfico, se procedió a revisar la información suministrada por la SDA. Para los análisis hidrológicos que se han realizado a la fecha se cuenta con la siguiente información en formato .shp

1. Perímetro urbano
2. Cobertura vegetal
3. Uso del suelo
4. Cuencas del distrito
5. La información de la red troncal de alcantarillado pluvial.
6. La información de la Red Troncal Alcantarillado Sanitario.

El Distrito Capital (Bogotá) se encuentra ubicada en la Sabana de Bogotá y limita por el oriente con los cerros de Monserrate (3.152 m.s.n.m.) y Guadalupe (3.260 msnm) que determinan en gran parte las características hídricas de esta área conformando la red hidrográfica de la ciudad.

El drenaje natural de estos cerros en su vertiente occidental se desarrolla a través de una gran cantidad de quebradas que se convierten en los afluentes de los principales ríos de la ciudad: Salitre, Fucha, Tunjuelo Y Torca. Las cuencas de estos ríos drenan el agua de más del 90 % del área urbanizada.

2.1.1 Análisis de las cuencas hídricas del Distrito Capital

A continuación se presenta una breve descripción de cada una de las cuencas asociadas al área de estudio:

2.1.1.1 Cuenca del río Salitre

La cuenca del río Salitre se encuentra ubicada en el sector centro-norte del Distrito Capital, limita por el norte con la cuenca del río Torca y el humedal La Conejera, por el occidente con el río Bogotá y el humedal Jaboque, al oriente con los municipios de La Calera y Choachí, y por el sur con la cuenca del río Fucha.

La cuenca del Salitre tiene un área de drenaje de 13.964 hectáreas. Posee una longitud de cauce principal de 19,76 km y la pendiente media del cauce es de 3,32 %. Su altura promedio es de 2.870 msnm, donde la cota máxima está por el orden de los 3.200 msnm y la mínima está sobre los 2.540 msnm aproximadamente.

2.1.1.2 Cuenca del río Fucha

La cuenca del río Fucha se subdivide en tres sectores, cuenca alta la cual corresponde a la parte montañosa, cuenca media que inicia a la entrada del río al perímetro urbano de la ciudad de Bogotá

hasta la avenida Boyacá y la cuenca baja desde la avenida Boyacá hasta su desembocadura en el Río Bogotá. Está localizada en el sector centro-sur del Distrito Capital, y drena las aguas de oriente a occidente para finalmente entregarlas al río Bogotá.

El río Fucha es uno de los cuerpos hídricos más importantes de la sabana de Bogotá con una longitud de 17,30 km, este nace en los cerros orientales y como producto de la confluencia de las quebradas La Osa y Upata. La cuenca tiene un área total de drenaje de 17.536 Ha, correspondientes 12.991 ha urbanas y 4.545 Ha en la parte rural (correspondiente a los cerros orientales); y una pendiente promedio del 5.3 %.

2.1.1.3 Cuenca del río Tunjuelo

El río Tunjuelo nace a partir de la confluencia de los ríos Chisacá, Mugroso y Curubital en las estribaciones del Páramo del Sumapaz, las cuales convergen al Embalse La Regadera a 2.900 msnm de altitud que tiene la capacidad de contener un volumen de agua de 4 millones de m³. A partir de este embalse se llama río Tunjuelo, donde toma una dirección sur a norte por el valle longitudinal de Usme. Al llegar a la zona urbana sur de Bogotá, donde toma un rumbo norte-oeste y oeste hasta la confluencia con el río Bogotá. Este río tiene una extensión de 73 km, siendo su área de drenaje urbana 41.427 hectáreas y 4.237 hectáreas rurales.

2.1.1.4 Cuenca del río Torca

La cuenca del canal Torca tiene un área de drenaje 6.008,69 hectáreas y cuenta con una longitud de 13.06 km. desde el conjunto residencial Bosque de Pinos ubicado en la Carrera 6 con Calle 153 hasta su entrega al río Bogotá. Este río nace en los cerros orientales y desemboca al sistema humedal Torca-Guaymaral a altura de la Autopista Norte, en cercanía a los terrenos del cementerio Jardines de Paz, y a su vez drena al norte de la cuenca media del río Bogotá. La cuenca se conforma por tres subcuencas principales: El Cedro, San Cristóbal y Serrezuela, que se inician en los cerros orientales de la ciudad y cuyos canales se encuentran revestidos.

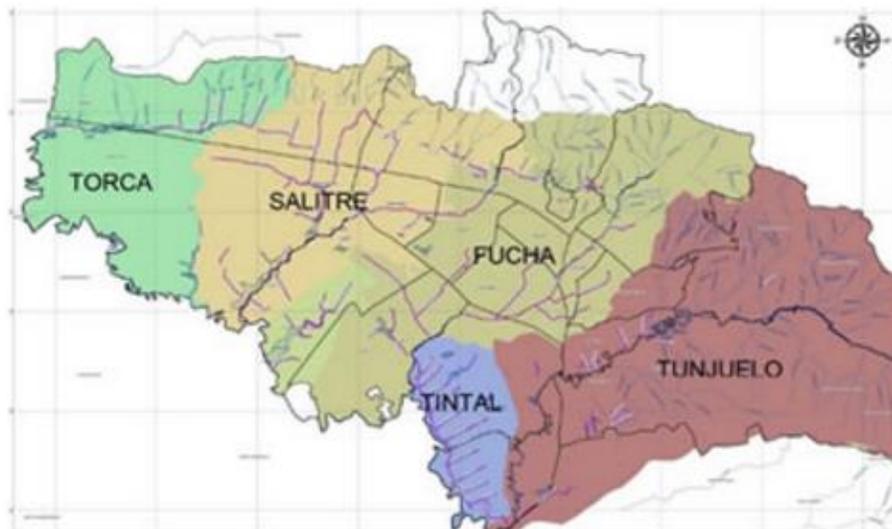


Figura 2-1 Cuencas del sistema de drenaje de la ciudad de Bogotá. Fuente: <http://www.idiger.gov.co/riesgo-por-inundacionHidraulica>

2.2 Marco Geológico Regional

1:100.000, 227 (Acosta & Ulloa, 2001a), 228 (Corredor & Terraza, 2015), 246 (Acosta & Ulloa, 2001b), 247 (A. Patiño et al., 2011). Cada una de estas planchas incluye una parte de la zona urbana del distrito de Bogotá sin embargo, debido a la utilización de nomenclaturas y conceptos geológicos diferentes, el empate entre estas planchas presentan problemas de tipo estratigráfico y estructural, de igual manera los depósitos cuaternarios fueron mapeados con poca resolución. Para este trabajo el INGEOMINAS realizó una actualización de la cartografía geológica para la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2005) incluyendo las diferenciaciones propuestas para estos depósitos por Helmens & van der Hammen (1995). La nomenclatura usada principalmente para este trabajo es la propuesta en el estudio desarrollado por la SDA (2013).

Con base en la información mencionada anteriormente se define que el área urbana de la ciudad de Bogotá se encuentra construida sobre lo que corresponde estructuralmente a una cuenca intramontana o intracordillera de origen tectono-sedimentario, conformada por una secuencia de unidades litológicas consolidadas y no consolidadas, con edades que van desde el Cretácico Superior hasta el reciente.

La evolución geológica de esta cuenca sedimentaria conocida como cuenca de la Sabana de Bogotá se encuentra ligada a la evolución geológica de la actual cordillera oriental. El registro sedimentario de esta cuenca comienza cuando aún la Cordillera Oriental estaba en una etapa *sinrift* (Cooper et al., 1995) con fallas normales que controlaban la sedimentación y que posteriormente se reactivaron por inversión tectónica, durante la orogenia andina en el Mioceno-Plioceno (Colletta, Hebrard, Letouzey, Werner, & Rudkiewicz, 1990 & Branquet et al., 2002) para dar origen al levantamiento de la cordillera durante el Plioceno (Thomas van der Hammen & Hooghiemstra, 1997).

Esta cuenca está conformada por una secuencia sedimentaria con edades del Cretácico Superior, Paleógeno, Neógeno y Cuaternario, definidos por la siguiente nomenclatura la cual difiere entre el oriente y el occidente de la cordillera, principalmente en las unidades del Cretácico Superior. En este sentido la nomenclatura usada en el oriente corresponde a la Formación Chipaque y al occidente las Formaciones Simijaca, La Frontera y Conejo. Para este trabajo se decidió tomar la Formación Chipaque como formación continua de oriente a occidente simplificando esta nomenclatura para efectos de la modelación ya que esta y sus formaciones correlacionables estratigráficamente son muy similares en su contenido litológico. Para las unidades de edad Campaniano y Maastrichtiano, la nomenclatura utilizada son las formaciones que conforman el Grupo Guadalupe (Arenisca Dura, Plaeners y Labor-Tierna).

Para las unidades litoestratigráficas del Paleógeno y Neógeno han sido ampliamente utilizadas en la Sabana de Bogotá y alrededores correspondientes a las Formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Usme y Tilatá. Para el Cuaternario las denominaciones propuestas por Helmens & van der

Hammen (1995) corresponden a las Formaciones Marichuela, Tilatá, Subachoque, Tunjuelito, Sabana y Chía.

Se describen a continuación en orden cronológico las unidades geológicas que afloran en la cuenca intramontana de la Sabana de Bogotá, haciendo principal énfasis en la Unidades del Neógeno-Cuaternario, para las cuales se usa la nomenclatura propuesta por Kuhry-Helmens (1990) y Thomas van der Hammen & Hooghiemstra (1997).

2.2.1.1 Estratigrafía

A continuación, se describen las unidades estratigráficas del área de estudio, comenzando de la más antigua.

Unidades del Cretácico

Formación Chipaque (Ksch)

Ingeominas (2005) siguen el criterio de Renzoni (1967), es decir determinan como Formación Chipaque a la secuencia de rocas finas que suprayace a la Formación Une e infrayace a la Formación Arenisca Dura y que aflora al Oriente del Río Bogotá.

A partir de una columna levantada en las veredas de Gazuca y Mulato, se pudo medir un espesor aproximado de 1027m en el que principalmente está constituida hacia la base por arcillolitas grises oscuras con algunos horizontes silíceos de color gris oscuro, hacia el centro y techo de la formación está caracterizado por una sucesión fina principalmente de arcillolitas intercaladas con algunos bancos arenosos de no más de 20m de espesor, hacia el techo aunque siguen predominando las arcillas es la parte más arenosa con laminación interna plano-paralela.

Las areniscas están dispuestas en capas medias y gruesas con contactos ondulados, continuos, intercaladas con capas de limolitas con laminación lenticular y continua de areniscas de grano fino.

La edad de esta Formación es Cenomaniano Superior- Santoniano, según Ingeominas (2005)

Según similitudes litológicas y fauna colectada permiten correlacionar esta formación con las Formaciones Simijaca, La Frontera y Conejo, que afloran en el Occidente del Río Bogotá según diferentes autores.

GRUPO GUADALUPE

Segun Ingeominas (2005), el Grupo Guadalupe está compuesto por las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna. En la Sabana de Bogotá, este grupo se reconoce por encima de la formación Chipaque y es suprayacida por la Formación Guaduas.

Formación Arenisca Dura (Ksgd)

Esta unidad litoestratigráfica reposa concordantemente y transicionalmente sobre la Formación Chipaque y es suprayacida por la Formación Plaeners. La sección tipo se localiza en el cerro El Cable (oriente de Bogotá), con un espesor que varía desde 300 a 449m, está constituida por areniscas en un 63% y 37% de limolitas, arcillolitas y liditas.

Consta de intercalaciones de capas muy gruesas de areniscas cuarzosas de color gris a blanco, de grano fino a medio, con cementación silíceas, bien seleccionadas en capas delgadas a muy gruesas y muy consolidadas, con intercalaciones de capas delgadas de lodolitas limolitas y arcillolitas de colores claros con espesores delgados.

El contacto superior con la Formación Plaeners es concordante y está determinado donde desaparecen los paquetes de areniscas de gran potencia y aparecen los estratos gruesos de limolitas.

La edad es Campaniano Inferior o Santoniano- Campaniano.

Formación Plaeners (Ksgp)

Esta unidad litoestratigráfica reposa concordantemente sobre la Formación Arenisca Dura y suprayace a la Formación Arenisca Labor, presenta un espesor que varía de 73 a 160m.

Consiste de intercalaciones de lodolitas y arcillolitas con gran abundancia de foraminíferos bentónicos en la parte inferior, en la parte media niveles líticas y hacia la parte superior intercalaciones de lodolitas y areniscas, la edad es Campaniano Inferior.

Formación Labor-Tierna (Ksglt)

Su espesor total aproximado es de 157 a 325m y está constituida hacia la base por areniscas cuarzosas, de color gris claro, de grano fino a medio, ligeramente friables, la parte intermedia predominan arcillolitas y el conjunto superior está constituido por areniscas cuarzosas de color gris claras, de grano medio a grueso, con estratificación cruzada.

Los contactos se observan morfológicamente, el límite inferior es transicional rápido y concordante con la Formación Plaeners, pasa de intercalaciones de limolitas silíceas, arcillolitas a capas arenosas con intercalaciones de limolitas y arcillolitas de la Formación Arenisca de Labor-Tierna. El contacto superior con la Formación Guaduas es neto y concordante, al pasar de paquetes arenosos a arcillolitas de la Formación Guaduas.

Su depositación ocurrió en un ambiente litoral durante el Maestrichtiano Inferior a Medio.

Unidades del Paleógeno

Formación Guaduas (Tkg)

Comprende a la unidad que aflora en la región de Bogotá y que suprayace el grupo Guadalupe en contacto neto y concordante, e infrayace la Formación Bogotá, por intermedio del Horizonte del Cacho que sería la parte más baja del piso de Bogotá, en contacto neto.

El espesor total de la Formación Guaduas es muy variable puede llegar hasta los 1090m (Sarmiento, Van Wess, & Cloetingh, 2006).

La unidad está constituida por arcillolitas compactas de color gris en ocasiones rojas, intercaladas con bancos importantes de areniscas cuarzosas de grano fino, matriz arcillosa, con abundantes mantos de carbón en la parte inferior y media.

Esta se depositó en un ambiente de aguas tranquilas (pantanos) y de llanuras aluviales durante el Maastrichtiano Superior (límite superior del Cretácico) y Paleoceno Inferior.

Formación Cacho (T1c)

El horizonte el Chacho corresponde al conjunto inferior ubicado en el piso de la Formación Bogotá, el cual tiene una naturaleza “arenisco ripioso” (Ingeominas, 2005) y está constituido por una secuencia de areniscas cuarzosas de color amarillento a rojizo, de grano medio a conglomerático, friables, con abundante cemento ferruginoso, algunas veces interestratificada con arcillolitas grises claras, rojizas y violáceas.

El espesor estimado para esta formación es de unos 100-180m, sin embargo, otros autores reportan espesores menores.

Su ambiente de depositación es debido a corrientes fluviales trenzadas con llanuras de inundación adyacentes. El contacto superior es normal con la Formación Bogotá. Su edad es Paleoceno medio

Formación Bogotá (Tib)

La Formación Bogotá corresponde a la unidad que suprayace a la Formación Cacho e infrayace a la Formación Regadera en contacto discordante. Consiste hacia la base de arcillolitas grises, blandas y plásticas con intercalaciones de areniscas grises claras a verdosas, de grano fino hacia la base y de grano grueso hacia el tope. El conjunto superior es predominantemente arcilloso. Es la unidad de mayor espesor el cual se estima de 1600m (Julivert, 1962) y se considera que la depositación ocurrió en un ambiente de llanura aluvial y de ríos meándricos durante el Paleoceno Superior- Eoceno inferior (Kuhry-Helmens, 1990)

Formación Regadera (Tir)

Esta unidad suprayace a la formación Bogotá e infrayace a la formación Usme, esta restringe sus afloramientos al oriente de la Sabana, se encuentra constituida por capas de areniscas de cuarzo y fragmentos líticos, de color gris claro, con abundante matriz arcillosa, e intercalaciones de arcillolitas de color gris claro a oscuro, blandas y plásticas, las cuales predominan hacia el tope de la unidad, el espesor total varía aproximadamente entre 400-600m.

Su ambiente de depositación corresponde a corrientes fluviales de carácter trenzado a meandriforme. Su edad es Eoceno medio (Ochoa et al., 2012)

Formación Usme (Tiu)

Secuencia de origen marino que aflora en el sinclinal del Tunjuelo (sinclinal de Usme), representada hacia la parte basal por lutitas de color gris y amarillo rojizo, con intercalaciones de arenisca de grano fino. La parte superior consta de areniscas de color gris claro, cuarzosas, de grano grueso a conglomeráticas.

El espesor aproximado para esta unidad es de 300m- 600m. Su límite inferior con la infrayacente Formación Regadera es discordante, y el superior no se ha establecido por estar cubierto de material no consolidado del Neógeno Cuaternario.

Se considera de ambiente continental lacustre y palustre, con una edad del Eoceno Superior - Oligoceno Inferior.

Unidades del Neógeno y Cuaternario

Las unidades no consolidadas del área de la Sabana de Bogotá, unidades de gran interés en el presente trabajo, abarcan desde el Plioceno hasta el presente y están conformadas principalmente por sedimentos de origen fluvial, lacustre, pantano, glacial o la combinación de estos ambientes.

En la zona que se conoce como más profunda de la Cuenca de la Sabana de Bogotá se han identificado espesores aproximados de 560m (Torres, Vandenberghe, & Hooghiemstra, 2005) por medio de una perforación profunda en cercanías al municipio de Funza sin contacto con roca. También se consiguió una perforación con 600m de profundidad elaborada recientemente en el sector de Bilbao al nororiente de la ciudad otorgada por la SDA en la que no se identificó contacto con roca, corroborando de esta manera que algunos sectores de la cuenca podrían tener espesores de sedimentos no consolidados de aproximadamente 600m.

Después del evento de máxima deformación del Mioceno, se generaron cuencas intracordillera sobre la cual a partir del Mioceno Superior-Plioceno se deposita la Formación Tiltatá, formación que marca el levantamiento de la Sabana de Bogotá desde 600m hasta los 2600 m.s.n.m (Cooper et al., 1995). Con este levantamiento, a finales del Plioceno comienza a formarse la cuenca de la Sabana.

Torres *et al* (2005) identificó que el relleno sedimentario de esta cuenca el cual representa el piso de un antiguo lago durante el Plioceno tardío-Pleistoceno, inició hace 3,2ma, acumulando aproximadamente 586m de sedimentos no consolidados como depocentro de la cuenca, esta depositación se dió en 4 ambientes sedimentarios diferentes, ver Tabla 2-2.

Ambiente Sedimentario	Edad (ma)	Intervalo (m)	Espesor (m)
Fluvio-lacustre	3,2 - 3	586 - 530	56
Pantanosos con algo de actividad fluvial	3 - 1,5	530 - 325	205
Lacustre	1,5 - 0,028	325 - 5	320
Fluvial (Rio Bogotá y tributarios)	0,028 - Actual	5-0	5

Tabla 2-2. Ambientes Sedimentarios en la cuenca de la Sabana de Bogotá

Modificado de (Torres et al., 2005).

Formación Tiltatá (N2t)

Descrita originalmente por Scheibe (1933), corresponde a la primera unidad del relleno no consolidado de la Sabana de Bogotá, que reposa discordantemente sobre los sedimentos consolidados.

Compuesta por gravas, con matriz arenosa de grano medio, limo, arcilla y turba. Esta unidad presenta discontinuidad tanto vertical como lateral. Su espesor es muy variable y puede llegar a los 300m (Julivert, 1962).

Su ambiente de sedimentación es fluviolacustre; según Helmens & van der Hammen (1994) esta formación fue depositada después del plegamiento de la cordillera oriental, pero antes del levantamiento completo de la misma, marcando el levantamiento de la Sabana desde los 600 m.s.n.m hasta los 2600 m.s.n.m (Cooper et al., 1995). Esta unidad, con edad del Plioceno-Pleistoceno, aflora en las laderas de la subcuenca del Río Subachoque, alrededor del embalse de Sisga y en los sinclinales de Mochilas y Sisga.

Formación Subachoque (Qsu)

Esta unidad suprayace la Formación Tilatá definida por T. Van der Hammen, Werner, & van Dommelen (1973) como la unidad intermedia entre las Formaciones Tilatá y Sabana, basado en aspectos generales de litoestratigrafía y perturbación tectónica de las unidades, mostrados por los sedimentos. Consiste de arcillas arenosas y horizontes de turba/lignito que alternan arenas arcillosas o arenas arcillosas y gravas. Sin embargo, esta fracción gruesa de la Formación Subachoque fue interpretada como indicativo de condiciones glaciales, generalmente sus estratos no están tectónicamente alterados. Edad Pleistoceno Temprano.

Formación Río Tunjuelo (Qrtsa)

Lobo-Guerrero (1992) define formación río Tunjuelo el complejo de conos fluvio – glaciares del río Tunjuelito, de los Ríos San Cristóbal, San Francisco y Arzobispo, y de las Quebradas Las Delicias, La Vieja, Rosales y Chicó, en el sur y oriente de Santafé de Bogotá, y el cono del Río Subachoque. La parte más antigua de la capital se asienta sobre la formación Tunjuelo.

El cono fluvio glacial de Tunjuelito es un extenso depósito del curso bajo del río Tunjuelito, en el sur de la ciudad, entre el ápice en la quebrada El Aleñadero, 3km al sur de Usme, y su parte distal en los barrios de Bosa, Class, Kennedy, Bavaria y San Rafael. Los sedimentos que constituyen el depósito son bloques hasta de 2m de diámetro, grava, arena, limo y arcilla. Su ambiente es fluvio-glacial.

Formación Sabana (Qsa)

Esta Unidad fue definida por Hubach (1957) está compuesta en su mayor parte por capas horizontales, poco consolidadas, de arcillas plásticas grises y verdes, en menor proporción por lentes y capas de arcillas turbosas, turbas, limos, arenas hasta gruesas, restos de madera y capas de diatomita. También hay numerosas capas de cenizas volcánicas, el máximo espesor registrado es de 317m, esta formación suprayace la Formación Subachoque. Su ambiente es lacustre y tiene una edad del Pleistoceno.

Formación Chía (Qch)

Helmens & van der Hammen (1994), denominan Formación Chía a los 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 con edades del Holoceno hasta de 16000 años (Van der Hammen,2005).

2.3 Rasgos Estructurales

La configuración tectónica para la cuenca en la Sabana de Bogotá debido a su complejidad estructural se difiere mucho a través de los diferentes autores que la han estudiado tanto en los trazos de fallas como en los eventos que las originan y por su puesto en los movimientos relativos de las mismas.

En este trabajo se resalta la importancia de las estructuras que propone INGEOMINAS (2002) bajo la cobertura cuaternaria ya que estas pueden ejercer algún control en el comportamiento hidrogeológico.

INGEOMINAS (2002) propone que a partir de interpretación de imágenes satelitales Landsat complementan las fallas cartografiadas en estudios anteriores de tipo NE (fallas longitudinales) e interpretan fallas en sentido NW (fallas transversales). Estos dos sistemas de fallas componen un enrejado en la región de la Sabana, el cual será descrito a continuación limitándonos a las de influencia para el presente trabajo y advirtiendo que los nombres usados en estas fallas son provisionales para la mayoría, excepto las ya definidas en la cartografía existente

Fallas Longitudinales

Estas se caracterizan en general como fallas de cabalgamiento y retrocabalgamiento, correspondientes con el estilo estructural conocido como “*escama delgada o despellejo de piel delgada*”, localizando la zona de despegue en las rocas del Cretácico inferior, inclusive con posible incidencia de los depósitos salinos.

La interacción de los movimientos de estas fallas hacia el SE y NW, conformó las alturas y depresiones topográficas que se extienden longitudinalmente en la Sabana, en sentido NE y N-S, esta interacción de estas fallas propicio el máximo abatimiento topográfico entre los cerros de Cota y Tabio-Tenjo, a lo largo de la actual cuenca del Río Chicú, donde se detectaron espesores de más de 586m. A continuación, se mencionan algunas de las Fallas de este tipo

- Falla Bogotá
- Falla El Dorado
- Falla El Porvenir
- Falla de Mosquera

Fallas Transversales

Las Fallas transversales son quizás el aspecto que mayor controversia puede generar en una discusión sobre la tectónica de la sabana de Bogotá, inicialmente porque no todos los autores coinciden en sus trazos y tampoco en los mecanismos que la generan y su incidencia en la actual estructura de Sabana.

Básicamente se atribuye a la mayoría de estas fallas un movimiento de rumbo y la conformación de Bloques tectónicos transversales, que a su vez pueden ser subdivididos por fallas longitudinales.

Además, se acepta que, en algunos sectores de la Sabana, las fallas que aparecen como transversales, pueden estar asociadas a fallas longitudinales y actuar como rampas laterales de los cabalgamientos Camargo (1995).

- Falla El Salitre
- Falla Rio Juan Amarillo
- Falla Usaquen
- Falla Fucha
- Falla San Cristobal
- Falla Rio Tunjuelo
- Falla de Bojacá

3 METODOLOGÍA

En esta sección se presenta la metodología usada para la construcción de modelo hidrogeológico conceptual del Acuífero de Bogotá D.C. En particular, se detallan las fases del proceso de construcción y los resultados obtenidos en cada una de las fases, así como las suposiciones y simplificaciones usadas. Se plantean 5 fases principales en la construcción del modelo hidrogeológico conceptual (Figura 3-1) que incluyen: (1) recopilación y análisis de la información, (2) estimación de la recarga, (3) construcción del modelo geológico local, (4) modelación analítica regional y (5) construcción del modelo hidrogeológico conceptual soportado en la modelación analítica local. Es de resaltar que en el enfoque propuesto existe una retroalimentación directa entre el modelo hidrogeológico conceptual y el modelo analítico que representa un cambio importante de paradigma en los procesos de construcción de modelos hidrogeológicos conceptuales en el contexto nacional, regional y mundial.

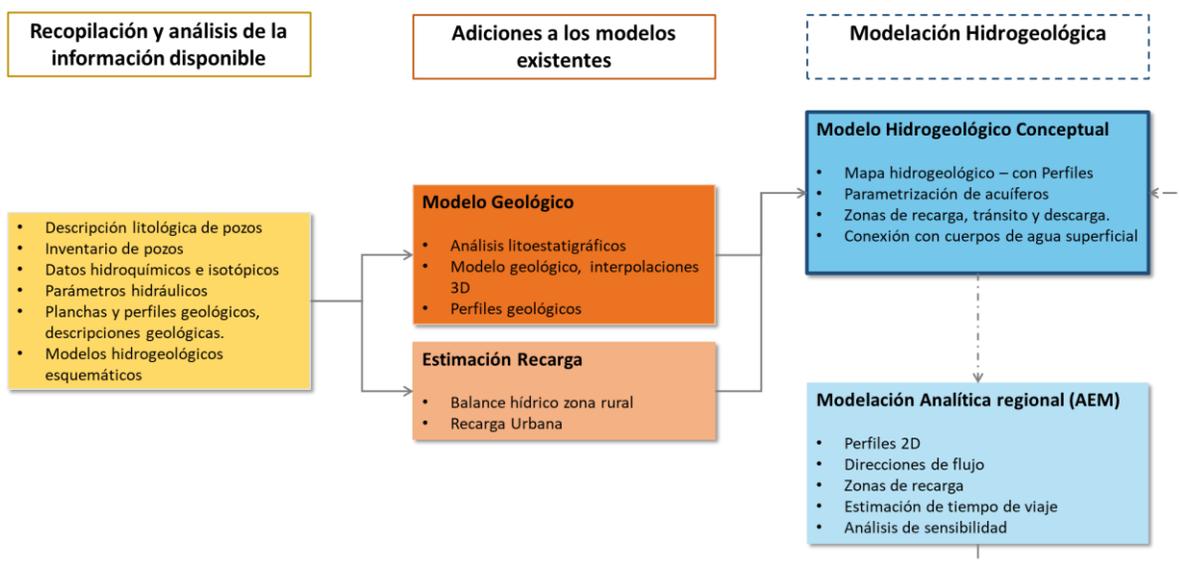


Figura 3-1. Metodología de construcción del modelo hidrogeológico conceptual

3.1 RECOPIACIÓN DE LA INFORMACIÓN

Se recopiló toda la información disponible asociada al acuífero regional de la Sabana de Bogotá debido a que se identificó una conectividad importante en las capas acuíferas con el acuífero de Bogotá. En ese sentido, se hizo una búsqueda exhaustiva de datos de diferentes fuentes de información que incluyó la CAR, el Servicio Geológico

El propósito de esta actividad es recopilar todos los estudios previos que han sido realizados en la zona de estudio y que representan la información (datos) usada para la consolidación de una geodatabase y la información generada como modelos geológicos, modelos hidrológicos, y modelos hidrogeológicos conceptuales y matemáticos que exponen diferentes visiones del comportamiento del sistema y que fueron fundamentales para la construcción de los modelos desarrollados en el presente proyecto. A continuación, se presenta un resumen de la información recopilada (data), donde se especifican las fuentes, y se presentan algunas clasificaciones de los datos de cara a los objetivos del proyecto. Después se hace una breve reseña histórica de los principales estudios sobre la hidrogeología de esta región y la evolución de las ideas con respecto a la recarga, el modelo hidrogeológico conceptual y la sobreexplotación de los acuíferos.

3.1.1 Información secundaria

En esta sección se presentan la información secundaria recolectada de los puntos de agua tales como pozos, aljibes y manantiales ubicados a lo largo de la sabana de Bogotá. Esta información consiste en los puntos de agua con al menos uno de los siguientes parámetros: profundidad de extracción, caudal, parámetros hidráulicos, niveles estáticos y dinámicos, hidroquímica e isótopos (ver Tabla 3-1). Se recolectaron 8108 datos correspondiente a 3957 puntos de agua en un periodo de tiempo no continuo de 31 años (1985 a 2015).

Tabla 3-1 Resumen Información secundaria recolectada

	Total	Profundidad extracción	Nivel estático	Caudal	Hidroquímica	Parámetros hidráulicos	Isótopos
Pozos	3957	2008	1231	1811	236	96	166
Datos	7947	2104	2998	2150	738	209	358

En la Tabla 3-2 se muestra la información más sustancial recopilada para la construcción del modelo geológico 3D de este trabajo, esta información consiste principalmente de investigaciones del subsuelo ya sean directas en forma de perforaciones o indirectas en forma de geofísica, llevadas a cabo en la sabana o directamente en el área urbana con diferentes objetivos.

Esta información fue procesada y depurada extrayendo los registros litológicos más completos y detallados que permitieran construir los topes y bases de cada una de las formaciones geológicas, de igual manera la información geofísica fue de gran importancia para este modelo facilitando la construcción de la superficie de basamento rocoso que limita modelación en la base para así obtener solo una interpolación de la secuencia no consolidada.

Tabla 3-2 Resumen de información principal para la construcción del modelo geológico 3D

Fuente	Año	Formato de Archivo	Título de estudio	Aporte	Uso
SDA	2013	PDF, JPG	EXPEDIENTES	Registro litológico de Perforaciones	Modelo Geológico 3D

Alcaldía Mayor de Bogotá D.C.	2015	PDF	Diseño para la primera línea del metro del sistema integrado de transporte público-SITP para la ciudad de Bogotá	Registro litológico de Perforaciones Geofísica	Modelo Geológico 3D
Ingeominas	1997	PDF	MICROZONIFICACIÓN SÍSMICA DE SANTA FÉ DE BOGOTÁ	Geofísica	Modelo Geológico 3D
SDA	2013	PDF XLS	SISTEMA DE MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL DISTRITO CAPITAL BOGOTÁ	Geofísica Registros litológicos de perforaciones Mapa Geológico	Modelo Geológico 3D
Universidad Nacional de Colombia	2006	PDF XLS	Proyecto: Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá.	Geofísica Registros litológicos de perforaciones	Modelo Geológico 3D
CAR	1969 1992	PDF	Red de monitoreo de la sabana de Bogotá	Registros litológicos de perforaciones	Modelo Geológico 3D
JICA	2003	PDF	Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá.	Registros litológicos de perforaciones	Modelo Geológico 3D

3.1.1.1 Fuentes de información

Para la recolección de la información se recurrió a las diferentes fuentes disponibles, en especial los estudios previos facilitados por la Secretaría Distrital de Ambiente en el marco del presente convenio. Adicionalmente, una fuente importante de información fue recolectada del SICAT (Sistema de información para el inventario, catalogación, valoración y administración de la información técnico-científica) del Servicio Geológico Colombiano, con medición de niveles desde el año 1985. También, fueron consultados 72 expedientes 01 de la SDA (ver Tabla 3-3).

Tabla 3-3 Fuentes de información para la recolección de información secundaria - puntos de agua

Autor	Año	Fecha de muestra	Tipo	Título del estudio	Aporte*
INGEOMINAS	1988	1985-1988	PDF	Índice General de Pozos, Aljibes y Manantiales.	P, Q
Robles, J.	1990	1989-1990	PDF	Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá - Hidrogeología de la Cuenca del Río Subachoque. Datos de Ensayos de Acuíferos.	P,Q,T
INGEOMINAS	2000	1999	PDF	Estudio Hidrogeológico Cuantitativo de la Sabana de Bogotá - Hidrogeología de la Cuenca del Río Subachoque.	P, HQ, ITP

Autor	Año	Fecha de muestra	Tipo	Título del estudio	Aporte*
Hidrogeocol	2000	1999	.doc	Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de santa fe de Bogotá, D.C.	P, Q, NE, T, HQ
INGEOMINAS	2001	1998-2000	PDF	Informe Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos de la Cuenca Alta del Río Bogotá.	P, ITP
INGEOMINAS	2002	2001-2002	PDF	Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá.	P, Q, NE, T
JICA	2003	2000-2003	.doc	Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá.	P, Q, NE, T, HQ, ITP
Universidad Nacional de Colombia	2006	2005-2006	.doc	Proyecto: Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá.	Q, NE, HQ
SIAM	2006		.doc	Inclusión del balance hídrico, implementación del modelo hidrogeológico y capacitación en Modflow.	P, Q, NE, T
JICA	2009	2007-2009	.pdf	Estudio de abastecimiento sostenible de agua para la ciudad de Bogotá y áreas circundantes basado en el manejo integrado de recursos hídricos en la república de Colombia.	P, Q, NE
CAR	2012	1998-2012	.xls	Base de datos .	P, NE
SDA	2012	2010-2012	.xls	Hoja Maestra.	P, Q
SDA	2013		PDF	Sistema de modelamiento hidrogeológico del distrito capital Bogotá.	P, Q, NE, HQ, T, ITP
CAR	2015	2010-2015	.xls	Concesión pozos de la Sabana.	P, Q

Autor	Año	Fecha de muestra	Tipo	Título del estudio	Aporte*
Expedientes 01			PDF	Expedientes de pozos	P, Q, NE, T

*P= Profundidad

Q= Caudal

NE= Nivel estático

HQ= Hidroquímica

T= Parámetros hidráulicos (transitividad, conductividad, coeficiente de almacenamiento y capacidad específica).

ITP= Isótopos (oxígeno-18 y deuterio)

3.1.1.2 Limitaciones

Las principales limitaciones encontradas a lo largo del proceso de recolección se relacionan con la falta de información de profundidad de extracción, o en su defecto, dos o más profundidades diferentes para un mismo pozo. En los casos que hay vacíos se relaciona espacialmente la profundidad establecida por otra fuente en caso de exista; en el caso de dos valores para un mismo pozo se revisan las concesiones de extracción para verificar profundidades o se concede mayor credibilidad a la información contenida en los expedientes. A lo largo de este ejercicio, se evidenció que en algunos puntos existe una propagación de errores entre estudios.

Otra limitante trata de la nomenclatura de los pozos ya que para varios puntos de agua no fue posible encontrar el respectivo código. Este trabajo propone darle prioridad a la metodología establecida por Ingeominas (por ejemplo: 227 II B 002), de lo contrario se tomará la nomenclatura asignada por el autor del respectivo estudio.

Por último, con el fin definir la extracción de caudales en el modelo geológico conceptual, la definición de pozos activos e inactivos es una característica que no está definida para la totalidad de la información, así como la ubicación de los filtros a lo largo del pozo.

3.1.1.3 Clasificación de los puntos de agua por profundidad de extracción

La respuesta de los pozos está sujeta al tipo de depósito del cual se está extrayendo. En este orden de ideas, la clasificación de los pozos se hace para depósitos consolidados (Complejo Paleógeno y Complejo Acuífero Guadalupe) y no consolidados, superficie definida en este trabajo. En la etapa subsecuente a la presente entrega se realizará la clasificación por unidad geológica al depósito no consolidado.

Como se especificó en el numeral de limitaciones, no fue posible asignarle una profundidad de extracción a todos los pozos, así las cosas, el orden de prioridades de clasificación es se describe en los siguientes puntos y en la Figura 3-2:

1. En caso de conocer la profundidad de extracción de pozo: según la superficie de espesores del depósito no consolidado definida el presente trabajo con base en las diferentes perforaciones consultadas.
2. En caso de no conocer la profundidad del pozo: según la clasificación hecha por la fuente de donde se tomó la información.

3. En caso de no conocer la profundidad del pozo y su ubicación en superficie está en depósito consolidado: el pozo es clasificado como “consolidado”.

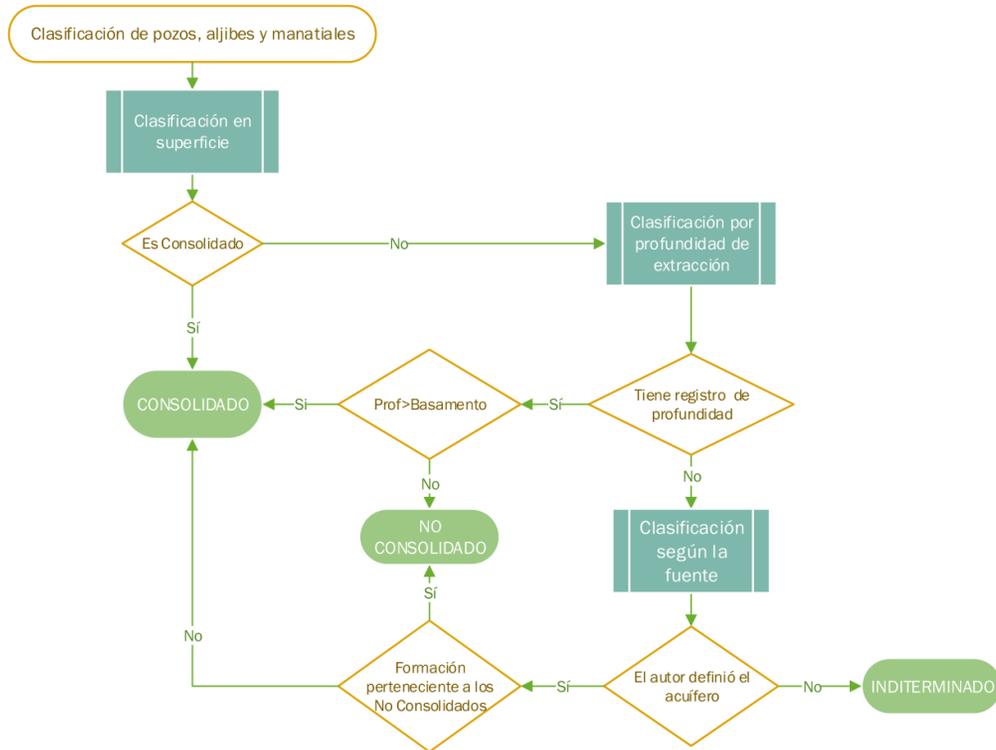


Figura 3-2 Clasificación de pozos, aljibes y manantiales en los depósitos consolidado y no consolidado

En la Figura 3-3 se referencia la base de datos recopilada y se indica el respectivo tipo de depósito de extracción de los puntos de agua.

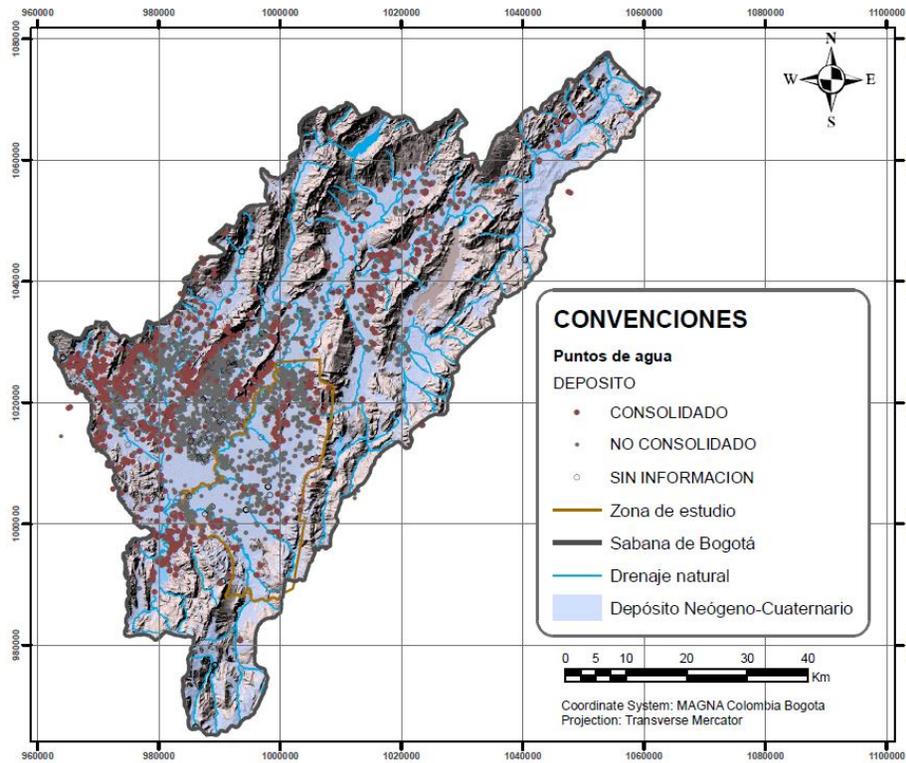


Figura 3-3. Base de datos de puntos de agua clasificados según el depósito de extracción

3.1.1.4 Parámetros hidráulicos

En este punto se recolectaron los valores interpretados de las pruebas de bombeo de transmisividad (T), conductividad (K), capacidad específica (CE) y coeficiente de almacenamiento (S). En la Figura 3-4 y Figura 3-5 se presentan los puntos de agua que extraen del depósito no consolidado con valores de transmisividad y conductividad ubicados en el Distrito Capital.

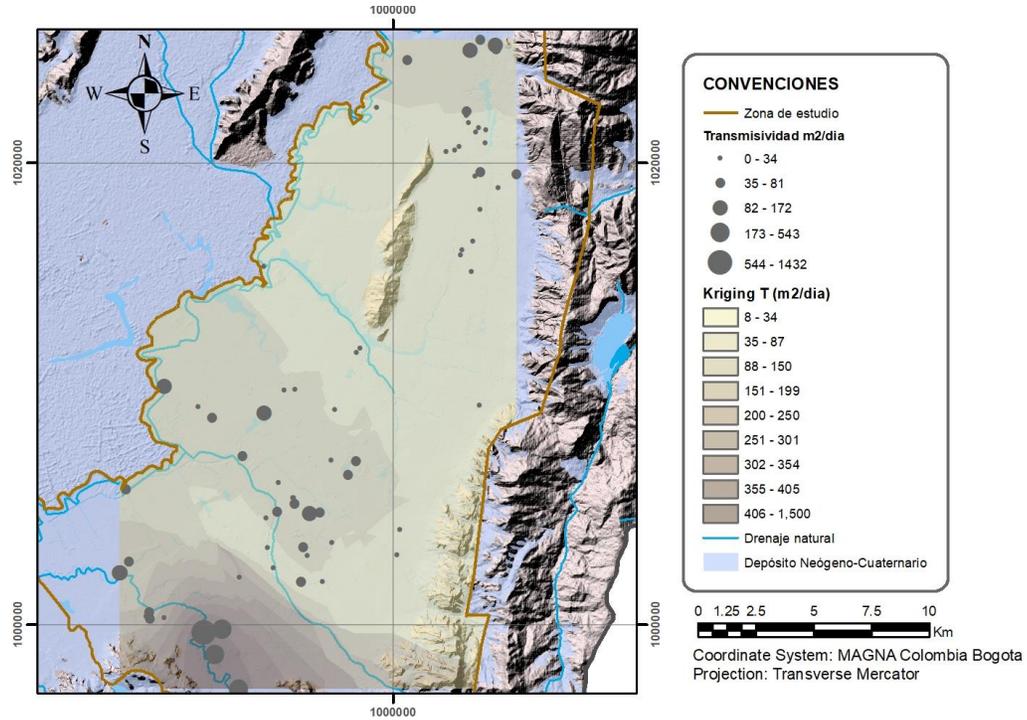


Figura 3-4. Puntos de agua con información de transmisividad (T) – Depósito no consolidado

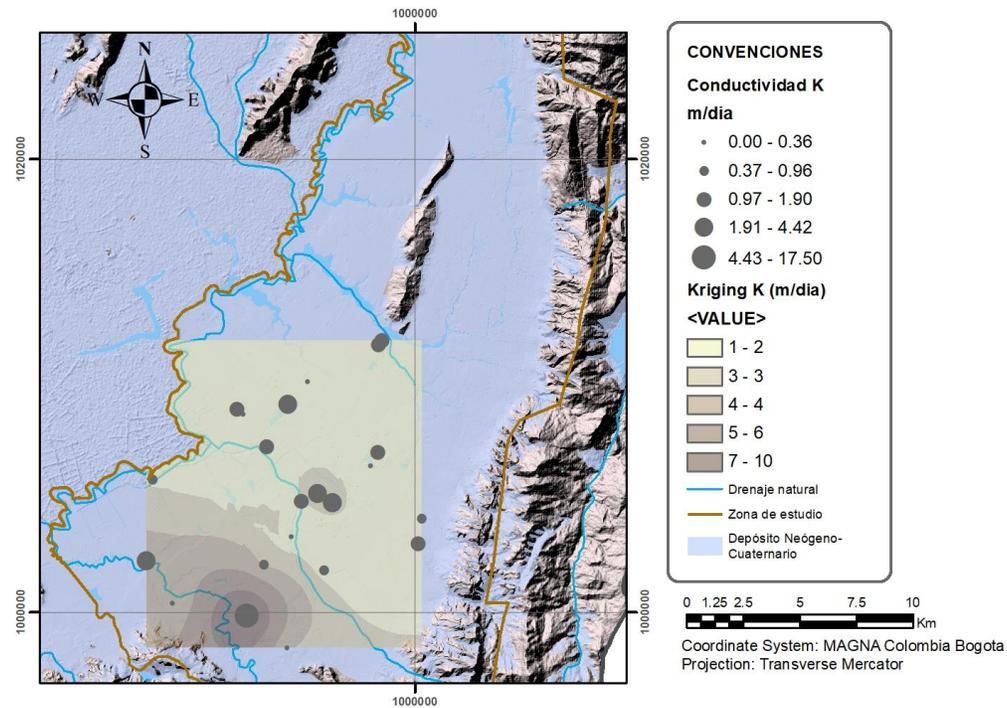


Figura 3-5. Puntos de aguas con información de conductividad (K) – Depósito no consolidado

3.1.1.5 Mediciones hidroquímicas

La información hidroquímica recolectada incluye hasta 71 parámetros. En la Figura 3-6 se referencia a modo de ejemplo el pH de los puntos de agua que extraen del depósito no consolidado y en la Figura 3-7 se referencia la proporción de cada uno de los parámetros medidos en los pozos para el depósitos no consolidado.

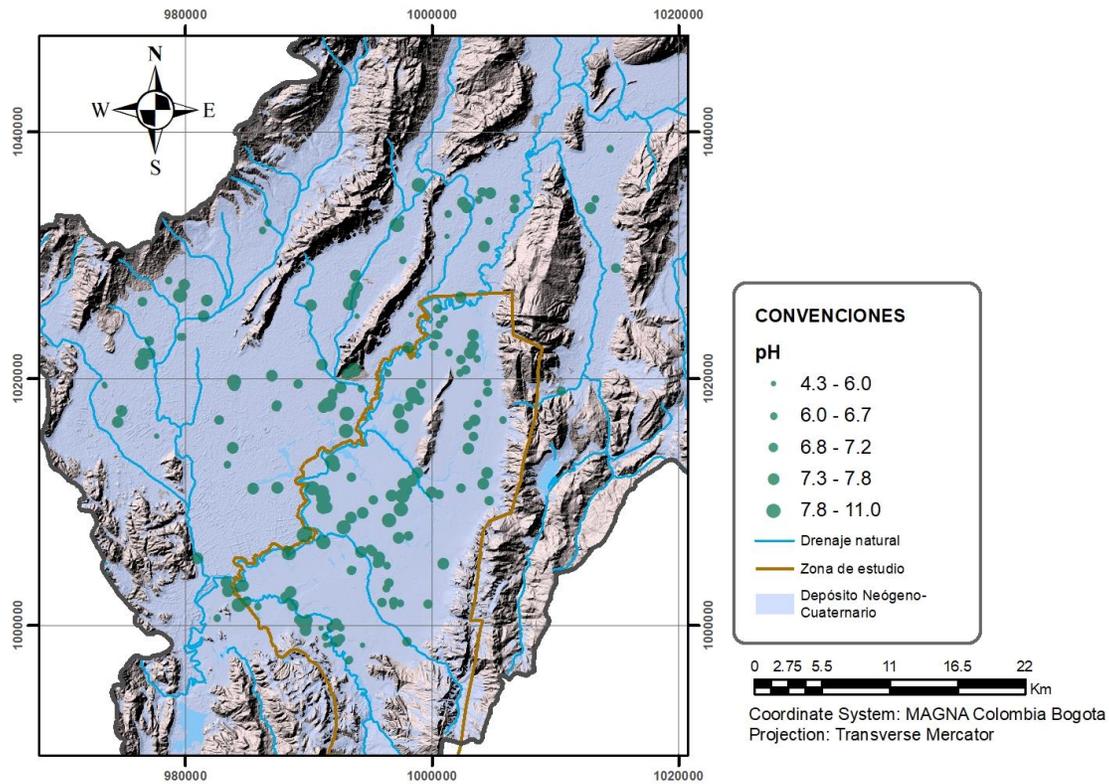


Figura 3-6. Puntos de aguas con información de pH – Depósito no consolidado

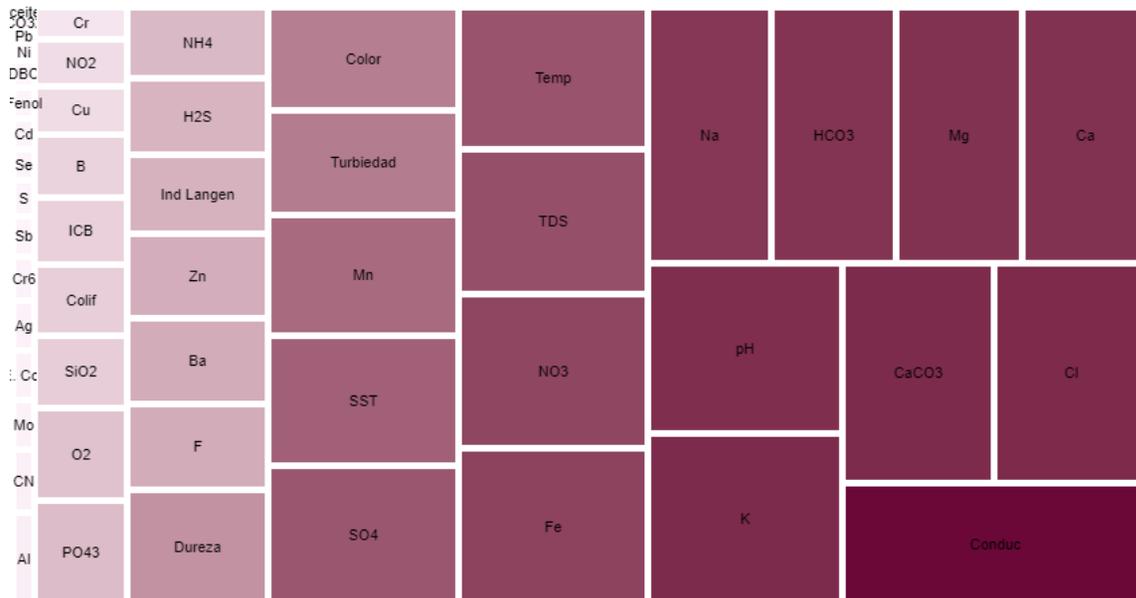


Figura 3-7 Proporción de parámetros hidroquímicos en el depósito no consolidado

3.1.1.6 Medición de isótopos

Se recolectaron mediciones de oxígeno-18, deuterio, carbono-14, carbono-13 y tritio. A modo de ejemplo se presentan en la Figura 3-8 los valores de oxígeno-18 de los pozos de agua que extraen del depósito no consolidado.

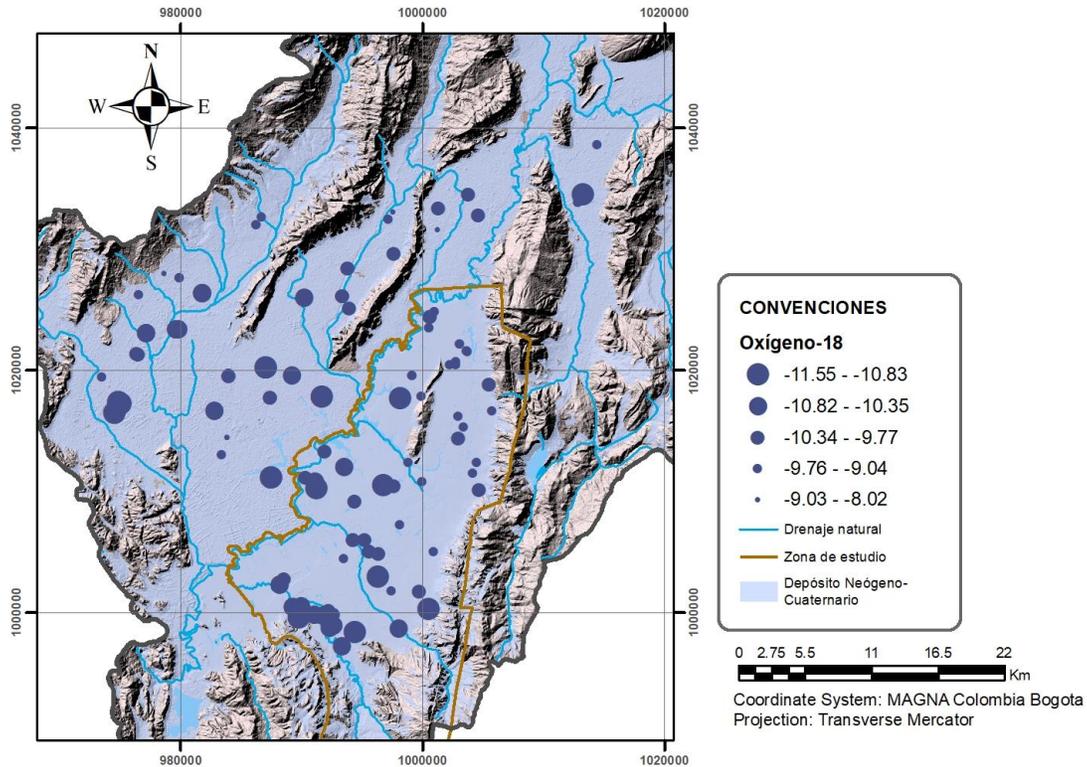


Figura 3-8. Puntos de agua con información de oxígeno-18 – Depósito no consolidado

3.1.1.7 Recopilación de medición de vertimientos

Dentro de los datos recopilados se tuvo acceso a las mediciones hidroquímicas de vertimientos para 384 puntos de agua superficial distribuidos sobre los ríos Juan Amarillo, Fucha y Tunjuelito (información suministrada por la SDA). Estas mediciones fueron realizadas entre agosto de 2000 y enero de 2001; los registros cuentan con información de pH, temperatura, color, olor, aspecto, DBO, DQO, SST y caudal. Los valores de pH (ver Figura 3-9) eventualmente serán comparados con los valores de pH encontrados en los pozos de agua para determinar su posible correlación con la hidroquímica del agua subterránea en las diferentes unidades geológicas.

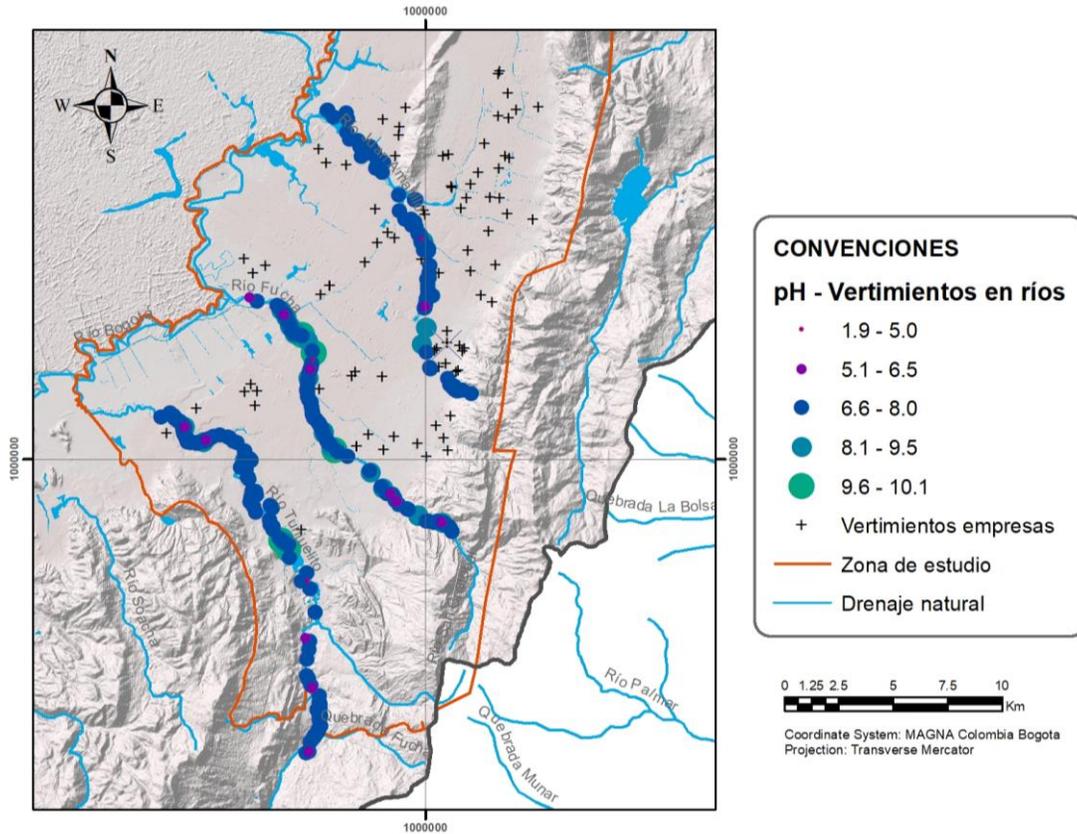


Figura 3-9 Valores de pH de los vertimientos en ríos y vertimientos de empresas

En la Figura 3-10 se referencia el histograma de frecuencias obtenido para los valores de pH medidos en los vertimientos en los ríos, en los pozos con extracción en los depósitos cuaternarios no consolidados y en los pozos con extracción en el depósito consolidado.

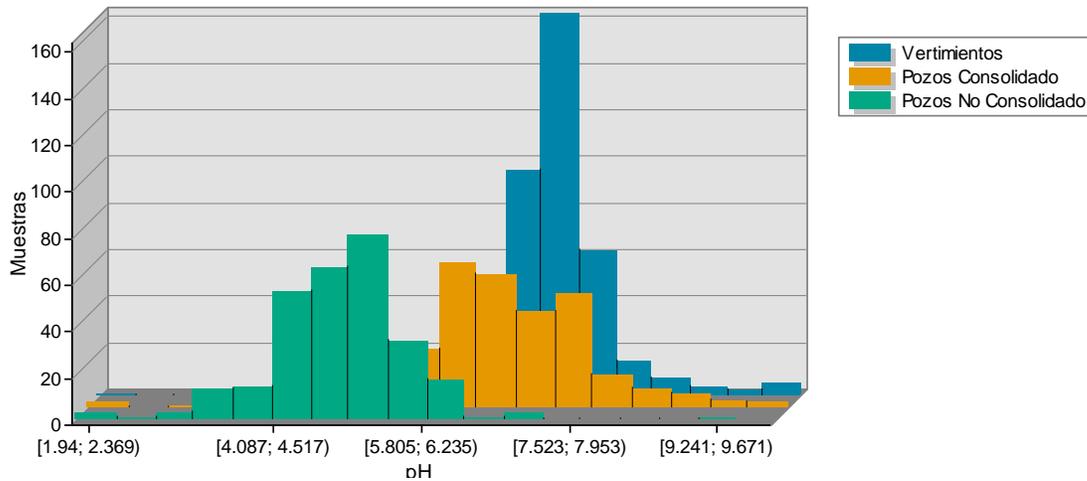


Figura 3-10 Histograma de frecuencias de los valores de pH en vertimientos y en pozos

3.1.2 Estudios previos

La sabana de Bogotá, que comprende la cuenca alta del río Bogotá y el área del Distrito Capital, es la región más industrializada y poblada de Colombia. Muchas de sus industrias y virtualmente todos los cultivos de flores están soportados por extracciones de agua subterránea. Algunos municipios hacen uso extensivo de este recurso para suministro potable. Desde los años 80-90, paralelamente al desarrollo agro-industrial, en los principales acuíferos de esta región se han registrado importantes descensos de los niveles piezométricos, que han llevado varios expertos a concluir que se está utilizando más agua de las que se recarga y que, en algunos sectores, se deberían limitar futuros aprovechamientos de los acuíferos. Sin embargo, históricamente se han generado opiniones contrastantes sobre el tema de la recarga, cuyas estimaciones han variado por más de un orden de magnitud (desde aproximadamente 0 a 132 mm/año). La posición de la Agencia de Cooperación Internacional del Japón - JICA (EAAB-JICA, 2009) sobre la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo de esta región se aparta de las demás, ya que concluye que en esta región existen suficientes recursos hídricos subterráneos, es decir la recarga (132 mm/año) es mucho mayor del aprovechamiento subterráneo, resultado que según JICA justifica la construcción de pozos adicionales en zonas poco explotadas.

Es evidente que, frente a las emergencias hídricas, como la que ha sostenido el país durante la sequía del 2015-2016, que causó fuertes descensos de niveles en los reservorios de agua superficial en Cundinamarca, el agua subterránea juega un papel estratégico. Estas situaciones podrían también ser causadas por episodios de contaminación masiva (naturales o índole terrorista) de los reservorios de agua superficial o daños a la infraestructura que transporta el agua desde los reservorios a los puntos de almacenamiento en la ciudad, y deben ser consideradas como posibles escenarios catastróficos para incrementar la resiliencia de la infraestructura hídrica de la región.

3.1.2.1 Datación del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá y Sus Implicaciones Hidrogeológicas. Geología Colombiana No. 15 (Cesar Rodríguez, 1986.)

Rodríguez parte del análisis del balance hídrico anual, que ahorra un resultado de infiltración próxima a cero, para inferir que la cuenca de la sabana de Bogotá es una cuenca hidrogeológica cerrada, que no tiene ni entadas ni salidas de agua subterránea. Sin embargo, reconoce que los ríos y quebradas del área pueden recibir caudal base (Figura 3-11). Analizando los resultados de isotopos radioactivos (C-14 y Tritio) en muestras de aguas subterráneas tomadas de diferentes pozos de la sabana de Bogotá, se reportan edades del agua subterráneas de hasta varios miles de años (rango: agua moderna – 17,382 años basado en el método de Vogel). Los valores de infiltración, estimados mediante las edades del agua basadas en C-14, la profundidad de la muestra y la porosidad de la roca, resultan ser de unos pocos mm/año, excepto por dos pozos en las zonas de Madrid y Bojacá donde se reportan infiltraciones de 26 y 59 mm/año, respectivamente. Se observa que estos dos pozos se encuentran cerca de los cerros de Madrid y cerca de los cerros occidentales, potenciales zonas de recarga. Rodríguez afirma que las elevadas edades de algunos pozos que captan el Complejo Acuífero Guadalupe y ubicados cerca de la zona de recarga (i.e. pozo Madrid y Cartagenita con edades de aproximadamente 8,000 y 17,000 años), indican que no hay recarga reciente debido a que no hay flujo en este acuífero y que se encuentra saturado desde hace miles de años. Adicionalmente, el autor reporta que todas las muestras de agua tomadas de la Formación Sabana (Cuaternario) presentan edades mayores a 5,000 años y sugiere que son sistemas acuíferos con recarga muy limitada. El reporte concluye que los acuíferos de la sabana de Bogotá están conformados por agua relativamente vieja y que la recarga a estos sistemas no es substancial.

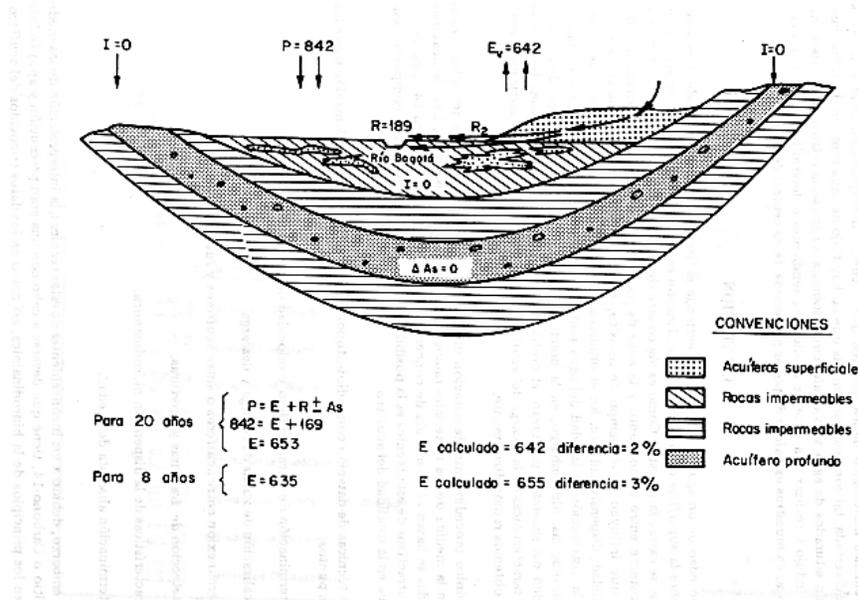


Figura 3-11. Esquema conceptual del balance hídrico

Fuente: Rodríguez (1978)

3.1.2.2 *Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia. Sociedad Colombiana de Ingenieros. Sociedad Colombiana de Geotecnia (Alberto Lobo-Guerrero Uscátegui, 1992.)*

En este artículo Lobo-Guerrero resalta el problema de la sobreexplotación de los acuíferos, evidente en muchos sectores de la región que presentan descensos en los niveles piezométricos entre 3 y 5 m/año, causada por una tasa de bombeo total superior a la recarga del sistema acuífero. Estos fenómenos son observados no solamente en los depósitos no consolidados de la Formación Sabana sino también en el Acuífero Guadalupe. El autor no comparte el modelo conceptual de Rodríguez (1986), el cual asume que no hay recarga en los acuíferos de la sabana de Bogotá y que el acuífero Guadalupe sigue saturado de agua. El argumento contra Rodríguez sería que los niveles se están bajando rápidamente en ambos acuíferos y por lo tanto estos no siguen completamente saturados de agua. Adicionalmente, este descenso regional de los niveles estaría causando problemas de hundimiento de los suelos que afectan las construcciones y las vías.

En este trabajo Lobo-Guerrero presenta un corte hidrogeológico esquemático de la sabana de Bogotá (Figura 3-12), donde se observa que existen flujos ascendentes desde las formaciones cretácicas hacia la parte basal de los depósitos no consolidados o poco consolidados de las formaciones del Neógeno-Cuaternario. Se nota como el nivel piezométrico del período pre-industrial haya disminuido como consecuencia de la extracción de las aguas subterráneas.

CORTE HIDROGEOLOGICO ESQUEMATICO DE LA CUENCA DEL RIO BOGOTA

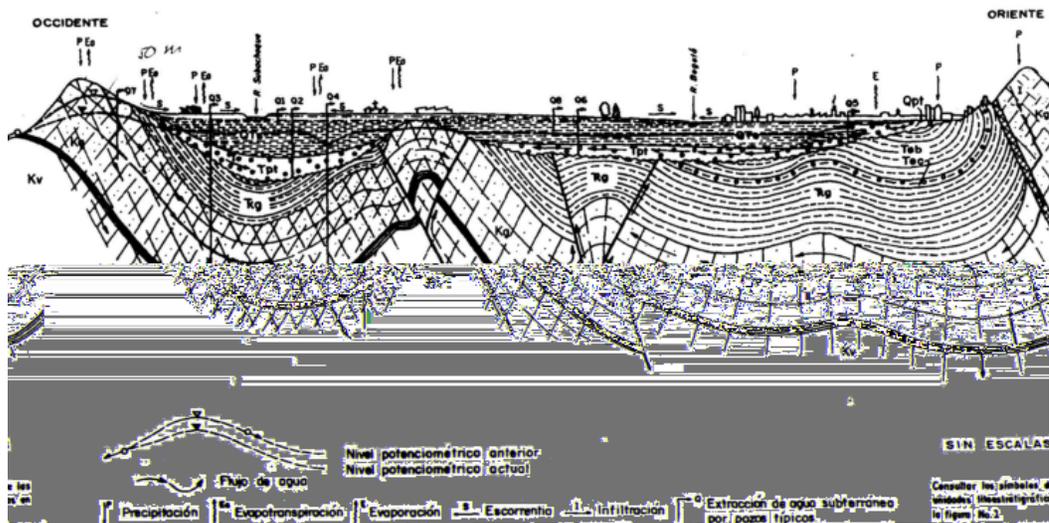


Figura 3-12. Corte hidrogeológico esquemático de la sabana de Bogotá

Fuente: Lobo-Guerrero (1992).

El agua subterránea se explotaba desde la época de las colonias, siendo raras las casas que en este período no tuvieran aljibes o manantiales. Las principales áreas de recarga de los depósitos cuaternarios eran [y potencialmente son] los abanicos aluviales presentes en las zonas de piedemonte, sin embargo, Lobo-Guerrero considera que con la progresiva urbanización e impermeabilización de la ciudad el rol de recarga de estas franjas ha venido disminuyendo.

La Figura 3-12 muestra que la parte más profunda de los sinclinales que pertenecen al sinclinorio de la sabana de Bogotá, presenta la unidad acuífera más importante del Complejo Neógeno-Cuaternario, la Formación Tiltá (Tpt). La Figura 3-13 muestra la misma unidad en un corte geológico detallado, entre la Avda Caracas y El Rosal, que demuestra la presencia de la Formación Tiltá por debajo de la Formación Sabana en la zona industrializada. Mientras que los pozos de la Formación Sabana tienen rendimientos entre 0.1 y 5 L/s, los pozos de la Formación Tiltá tienen rendimientos entre 3.5 y 20 L/s. De acuerdo con el autor, esta es la misma unidad acuífera que produce agua subterránea para los cultivos de flores y las industrias de la región.

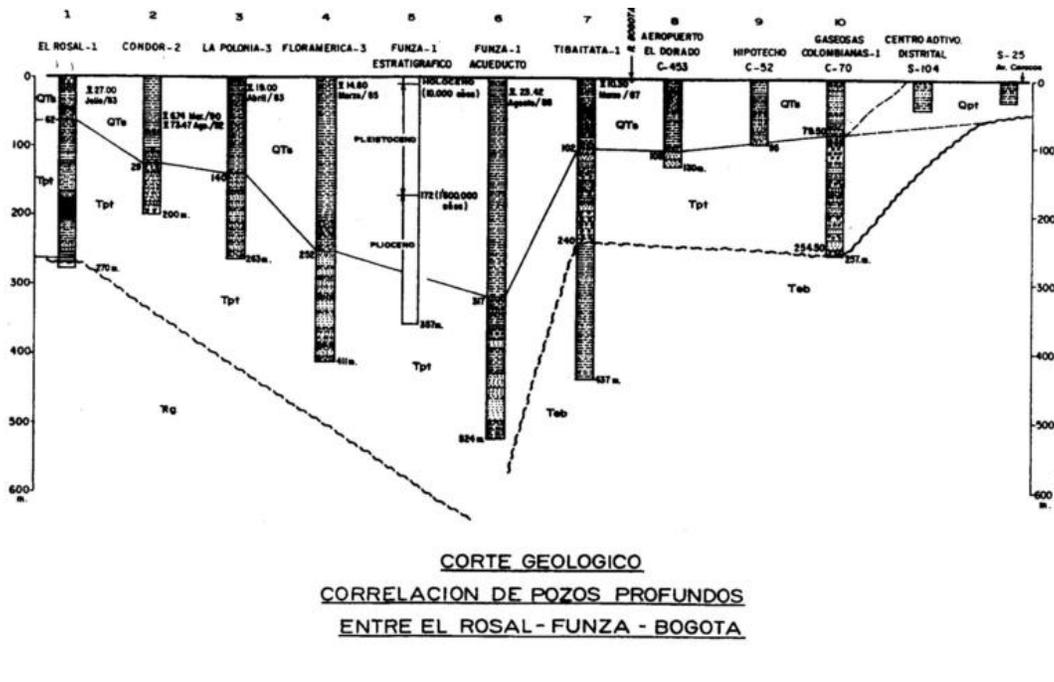


Figura 3-13. Corte geológico que muestra la presencia de la unidad acuífera de la Formación Tiltá (Tpt) entre El Rosal y la Avda. Caracas en Bogotá

Fuente: Lobo-Guerrero (1992).

3.1.2.3 Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. Informe Final (PNUD-DAMA-Hidrogeocol, 1999.)

El objetivo de este estudio fue elaborar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico del área de jurisdicción del DAMA (Distrito Capital), sin embargo, la firma consultora Hidrogeocol analizó una zona más grande (2184 km²) para tener en cuenta los aspectos hidrogeológicos regionales. El modelo geológico desarrollado por Hidrogeocol subdivide el área de estudio en 12 bloques tectónicos delimitados por fallas longitudinales y transversales, que pueden comportarse como barreras impermeables o facilitar el flujo de agua a través de ellas. El balance hídrico sugiere que en el área de Bogotá la recarga real y los bombeos de agua subterránea son similares, ambos del orden de 1m³/s, siendo la recarga potencial del orden de 2 m³/s. La calibración del modelo numérico en estado estacionario (antes de la explotación) se realizó asumiendo que la tabla de agua estuviera cerca de la superficie, mientras que la calibración en estado transitorio se apoyó en datos esporádicos de pozos, aparentemente debido a la falta de una red de monitoreo de agua subterránea. Hidrogeocol considera que los descensos pronunciados de niveles piezométricos que se observan en muchos pozos se pueden explicar con la recarga pequeña, las bajas a media permeabilidades de los acuíferos y su bajo coeficiente de almacenamiento. Las simulaciones numéricas sugieren que los tiempos de tránsito desde la zona de recarga hasta la ciudad son del orden de 10,000 años [lo cual sugiere que agua subterránea con miles de años de edad no necesariamente implica que esta no se mueva, es decir que no haya flujo en el acuífero según el modelo de Rodríguez (1986)]. Hidrogeocol sugiere que para profundidades mayores a 600m (Acuífero Guadalupe) aún se podría bombear un caudal adicional de 0.5 m³/s, llegando a un total de extracción de 1.5 m³/s.

3.1.2.4 Caracterización Geoquímica e Isotópica de los Acuíferos de la Cuenca Alta de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2001)

En este estudio se reportan los resultados de un convenio de cooperación entre Ingeominas (hoy en día Servicio Geológico Colombiano) y la CAR para analizar la hidrogeoquímica (iones mayoritarios) e isotopía (isotopos estables y radioisótopos) de diferentes componentes del ciclo hidrológico en la sabana de Bogotá. Se analizaron muestras tomadas de 95 pozos representativos de los diferentes acuíferos de la región, además se tomaron muestras de lluvia, manantiales, ríos y lagunas. En las zonas de recarga del acuífero Guadalupe, así como en los depósitos cuaternarios de piedemonte prevalecen las facies bicarbonatadas-cálcicas (Ca-HCO₃), mientras que en los pozos profundos del Guadalupe cubiertos por sedimentos cuaternarios y en los mismos sedimentos fluvio-lacustres predominan las facies bicarbonatadas-sódicas (Na-HCO₃). En unos manantiales con flujos profundos se presentan aguas cloruradas-sódicas (Na-Cl), por ejemplo, en el manantial de Tabio que presenta además temperaturas mayores a 40°C, y cuya alimentación esta posiblemente relacionada con flujos salinos profundos procedentes de la Formación Chipaque (Cretácico Inferior) que aflora en los alrededores. A lo largo del flujo [sectores profundos del acuífero] predomina un ambiente reductor, con presencia de hierro disuelto, sulfatos y manganeso disuelto.

Las conductividades eléctricas (CE) de los sedimentos cuaternarios aumentan desde valores de 10uS/cm en los piedemontes hasta valores de 1,200 uS/cm en el centro de la cuenca de la Sabana de Bogotá, donde el espesor del Cuaternario es mayor. Aguas arriba en el valle de Subachoque se presentan conductividades de hasta 150 uS/cm mientras que aguas arriba del valle de Chicú se

presenta una anomalía hidrogeoquímica con CE hasta de 1,500-2,000 uS/cm, las cuales son atribuidas a la influencia de fuentes similares a las que generan los manantiales termales de Tabio. Los cloruros (Cl) aumentan desde los bordes hacia el centro de la Sabana, alcanzando concentraciones máximas de 95.7 mg/L. En algunos sectores se presentan valores considerablemente más altos, notoriamente cerca de Tabio (343.9 mg/L) y arriba de la población de Gachanzipá, en el valle de Bogotá (249,9 mg/L), que se consideran como anomalías hidrogeoquímicas. La presencia de material orgánico en los sedimentos del Neógeno-Cuaternario (turbas) enriquece este acuífero de Carbono Orgánico Disuelto (COD), el cual aumenta progresivamente hacia el centro de la cuenca Cuaternaria, donde se detecta la presencia de metano. El carbono de estos materiales orgánicos representaría la fuente para la formación del metano (CH₄).

Las características geoquímicas del acuífero Guadalupe son difícil de resumir en un mapa o en una tabla, ya que están controladas por el grado de fracturación, que varía en el espacio. Ingeominas afirma que, de forma general, el flujo en esta unidad procede desde las zonas de afloramiento (cerros) hacia las zonas más profundas del acuífero. Lo soportan las bajas CE (<200 uS/cm) en las zonas de piedemonte y en los afloramientos del sector Muña y Facatativá, mientras que en los sectores más profundos de la cuenca la CE aparentemente aumenta hasta 600 uS/cm. [se trata de todas formas de valores relativamente bajos de conductividad hidráulica que estarían reflejando la escasa reactividad de los minerales que componen el Complejo Guadalupe].

El análisis de isotopos estables del agua indica que el sistema de flujo superficial (ríos principales, manantiales de menor altura, aljibes) tienen un rango de $\delta^{18}\text{O}$ entre -9.0 y -7.0 ‰, el cual está asociado con las precipitaciones de la zona plana. Ingeominas considera que este sistema podría estar hidráulicamente desconectado del sistema profundo, que presenta mayor variabilidad en los isotopos estables y es en general más empobrecido de -9.5 ‰ $\delta^{18}\text{O}$, indicando por lo tanto una recarga a mayor altura. El muestreo de isotopos estables del agua (Deuterio y O-18) se realizó también en los ríos y manantiales de la zona plana durante la estación seca. Los resultados fueron similares para estos dos tipos de cuerpos de agua, indicando que se tiene un componente de la recarga a cotas menores de 2,700m, y esta recarga es la que alimenta el flujo base de los ríos. [esta consideración es muy importante porque estaría soportando la presencia de flujos subterráneos sub-superficiales que forman el flujo base hacia los drenajes principales y estarían desconectados de los sistemas acuíferos más profundos].

Las edades del agua subterránea se calcularon con base en el análisis de C-14, por medio del método de Pearson et al. (1970) para la zona de recarga y del código NETPATH (Plummer et al., 1994) para corregir la determinación de las edades en los sectores con presencia de metano, debido a que el metano disuelto en el agua diluye la concentración de C-14 y produce un efecto de envejecimiento adicional. Las edades de las aguas subterráneas en el Guadalupe varían entre ciento de años en las zonas de recarga hasta más de 15,000 años en pozos del acuífero Guadalupe ubicados en las áreas de piedemonte. La aplicación del programa NETPATH en los sedimentos del Neógeno-Cuaternario en el valle de Subachoque produjo edades entre 7,400 y 25,500 años, con los primeros representativos de la parte media del valle y los segundos de sectores alejados de las zonas de recarga. En el Cuaternario por lo tanto el agua subterránea circula y se renueva muy lentamente. Según

Ingeominas, estas consideraciones tienen implicaciones para la regulación del recurso hídrico subterráneo de la unidad cuaternaria que es la más explotada de la región.

3.1.2.5 *Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá (Ingeominas, 2002)*

En este reporte los autores reconocen que existen importantes diferencias sobre el modelo hidrogeológico de la región. Rodríguez (1994) insiste que es una cuenca cerrada, mientras que Álvarez (1997) y Van der Hammen (1998) afirman que se está extrayendo más agua subterránea de la que se recarga naturalmente [i.e. la cuenca hidrogeológica no es cerrada]. Por lo tanto, este estudio surge de la necesidad de ampliar el conocimiento hidrogeológico de la sabana de Bogotá a nivel regional, a partir del conocimiento de su tectónica y geología estructural.

Para definir el esquema tectónico de la región, se interpretaron imágenes Landsat a escala 1:100,000 y en falso color, que permitieron definir los principales lineamientos tectónicos regionales. La geología estructural se revisó posteriormente con base en los datos del Banco Nacional de Datos Hidrogeológicos de Ingeominas, sondeos eléctricos verticales y estudios de gravimetría realizados por Ingeominas y otras empresas consultoras. Las fallas regionales cartografiadas en trabajos anteriores tienen esencialmente dirección NE (fallas longitudinales), sin embargo, en este estudio Ingeominas identifica también unas fallas regionales con rumbo NW (fallas transversales), que no necesariamente coinciden con las fallas propuestas en trabajos anteriores. Los dos sistemas de fallas forman un reticulado. Las fallas longitudinales son fallas con mecanismos inversos (fallas de cabalgamiento y retrocabalgamiento) que bordean los cerros y que tienen transporte tectónico hacia NW o SE. El movimiento de estas fallas influyó la morfología que actualmente se observa en la Sabana de Bogotá. Sobre la existencia de las fallas transversales hay opiniones diferentes, sin embargo, el trabajo de Ingeominas se basa en las conjeturas de Gómez (1985 y 1991) y Reyes (1993), además de las observaciones de Velandia (1997), que resaltan la importancia de estas fallas en el esquema tectónico de la sabana de Bogotá. Las fallas transversales son fallas de rumbo que estarían conformando un esquema de bloques tectónicos transversales, a su vez delimitados por fallas longitudinales.

Estos bloques tectónicos pueden estar controlando el comportamiento del agua subterránea, precisamente Ingeominas considera que las fallas con mecanismos inversos (de cabalgamiento) estarían actuando como barreras “impermeables”, aislando las zonas de recarga, mientras que las fallas transversales son consideradas generalmente de carácter distensivo o extensional, que las convierte en excelentes conductoras de agua y propicias para la recarga de acuíferos, especialmente en sectores intensamente fracturados. De acuerdo con este concepto, la Falla de Bogotá (longitudinal) estaría actuando como barrera para la recarga de los acuíferos de los depósitos cuaternarios, recarga que se concentraría a lo largo de las numerosas fallas transversales que afectan los cerros, particularmente las que tienen continuidad hacia NW. Lo demuestra el hecho que es posible encontrar termales asociados a estas fallas transversales [esta última observación está soportada por los perfiles geofísicos del Metro en la zona de piedemonte que muestra, además de la Falla de Bogotá, numerosas fallas transversales a esta].

Para mejor entender la hidrogeología de los depósitos cuaternarios es importante resumir en este documento la evolución de la sedimentación cuaternaria, basada en el estudio de Ingeominas. La

laguna de la sabana de Bogotá se formó al finalizar el Plioceno Medio-Superior, como resultado del levantamiento final de la cordillera oriental, este episodio llevó a la sedimentación de la Formación Tilatá (depósito fluvio-lacustre de canal). Durante el Pleistoceno, la alternancia de épocas frías, húmedas y secas, marcadas por la variación de precipitación anual y periodos glaciales e interglaciales (deshielo), causaron fluctuaciones importantes del nivel de la laguna, que llevo a la deposición de diferentes materiales (capas de turbas intercaladas con arcillas lagunares, sedimentos fluviales y fluvio-glaciales). El aporte de las quebradas desde los cerros produjo la formación de depósitos de abanico aluvial [también conocidos como complejos de conos en los cerros orientales]. En la última glaciación (40,000-28,000 años), desapareció completamente la laguna de la sabana de Bogotá y en el periodo postglacial subsecuente, que se extiende hasta el Holoceno (10,000 años-actualidad), se originó un cambio de ambiente lacustre a ambiente fluvial con la depositación de sedimentos aluviales por parte de los principales drenajes.

El modelo hidrogeológico de Ingeominas identifica, a nivel regional, tres unidades hidroestratigráficas principales, que están limitadas lateralmente por la estructura de bloques tectónicos antes descrita: (i) Complejo Acuífero de los Depósitos No Consolidados; (ii) Complejo Acuitardo del Paleógeno y (iii) Complejo Acuífero Guadalupe. El espesor de los depósitos no consolidados, en la parte central de la cuenca, supera los 500m (sector Funza-Engativá), sin embargo, estos depósitos se caracterizan por cambios bruscos en la litología (variaciones de facies) por lo tanto forman acuíferos locales de extensión limitada y poca importancia hidrogeológica. El Complejo Paleógeno se considera, a nivel regional, como relativamente impermeable, a pesar de la presencia de pequeños niveles de areniscas en las Formaciones Usme, Bogotá, Guaduas (inferior), siendo la única unidad acuífera la Formación Cacho, presente en el sector centro-oriental de la sabana. Debido a la estructura tectónica de la sabana de Bogotá, el Complejo Paleógeno está ausente en la parte central y occidental de la cuenca artesiana de la sabana de Bogotá. El Complejo Acuífero Guadalupe aflora en los cerros presentes en los alrededores de la sabana de Bogotá y representa un acuífero de elevada importancia regional, que está confinado abajo por la Formación Chipaque [considerada como el basamento “impermeable” de la sabana de Bogotá] y registra espesores máximos de 950m.

Para la cuenca de la sabana de Bogotá, Ingeominas considera dos zonas de recarga, una exterior y una interior (Figura 3-14).

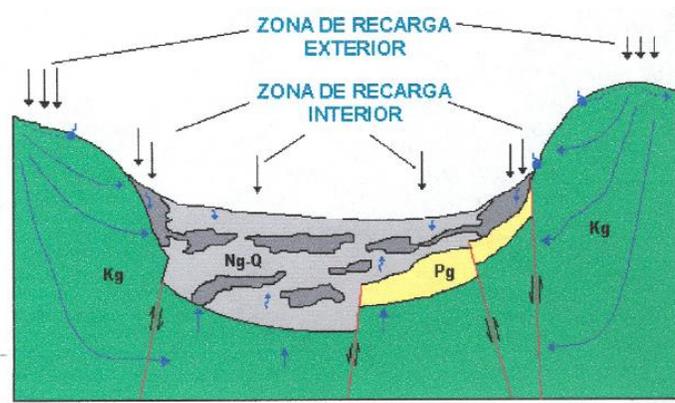


Figura 3-14. Modelo hidrogeológico esquemático de la cuenca de la sabana de Bogotá.

Fuente: Ingeominas (2002)

En la zona interior, es decir la zona plana de la sabana, la recarga se genera por infiltración de las precipitaciones [recarga directa], y es mayor hacia las zonas de piedemonte donde la presencia de depósitos no consolidados de grano más grueso facilita la infiltración de la lluvia. Ingeominas considera también la recarga por infiltración de las fuentes superficiales (rio Bogotá y sus tributarios) que se concentra en la parte más cercana a los piedemontes por encima de la cota 2600 msnm, debido a que los cauces de la parte plana son pocos profundos y desconectados de los acuíferos principales. El aporte de los embalses presentes en la sabana (superficie total de 62 km²) es considerado mínimo, porque estos suprayacen rocas sedimentarias del Paleógeno que son de baja permeabilidad. Los balances hídricos diarios realizados por la CAR en estos embalses soportarían estas consideraciones. Ingeominas reconoce también que, dentro la zona de recarga interior, las superficies irrigadas (425 km²) podrían aportar agua a los sistemas acuíferos, sin embargo, no se tenían datos al respecto para este estudio. La zona de recarga exterior (1000 km²) coincide con los afloramientos de las rocas del Complejo Acuífero Guadalupe, donde hay procesos de recarga directa por lluvia, infiltración de corrientes superficiales, y probablemente recarga por fenómenos de condensación del vapor de agua contenido en las fracturas de las rocas como han argumentado algunos autores (Trombe, 1988; Klimochkin, 1978).

Las diferencias altimétricas entre la planicie y las zonas de recarga exterior producen en el Complejo Acuífero Guadalupe sistemas confinados de alta presión, los cuales contribuyen a la alimentación de la parte inferior del sistema Neogeno-Cuaternario (flujos ascendentes), a través de las que Ingeominas denomina “ventanas hidrogeológicas”, por ejemplo, fallas, como lo demuestra la presencia de aguas termales en algunos lugares de la sabana de Bogotá. De acuerdo con la modelación numérica preliminar realizada por Ingeominas, en los depósitos cuaternarios se estarían generando dos tipos de flujos, ascendente desde el complejo Acuífero Guadalupe y descendente causado por infiltración de las lluvias y aguas superficiales, especialmente en las zonas de piedemonte (Figura 1). La descarga natural de los acuíferos se realizaría a través de manantiales y, secundariamente, a través de las corrientes superficiales en la zona de piedemonte.

El aumento de la extracción de agua subterránea [especialmente a partir de las décadas de los años 80-90], ha causado un descenso de niveles piezométricos que han alcanzado los 70m en el campo de pozos del sector occidental de la sabana de Bogotá, que extrae del Complejo Cuaternario, mientras que otras zonas no han registrado descensos superiores a los 15-20m. Se infiere que esta situación podría haber modificado las relaciones hidráulicas originales entre los complejos acuíferos, existiendo antes de la explotación intensiva un flujo ascendente generalizado desde el Acuífero Guadalupe hacia los depósitos no consolidados y ahora, con el bombeo intensivo de la cuenca artesiana, se puede haber agotado este aporte desde el Guadalupe e invertido el gradiente hidráulico generado un goteo desde los depósitos no consolidados hacia las formaciones rocosas más profundas, que tiene implicaciones para la evaluación de los recursos hídricos subterráneos.

3.1.2.6 *Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) – Agencia de cooperación Internacional del Japón (JICA), 2003. Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá. Informe Final.*

Este estudio fue comisionado por la EAAB y realizado con el apoyo de los expertos de JICA. Este tuvo varios objetivos, a saber: (i) evaluar el potencial de los recursos hídricos subterráneos; (ii) investigar la situación del medio ambiente relacionada con estos recursos, (iii) formular el plan de desarrollo de las aguas subterráneas y, (iv) llevar a cabo la transferencia de tecnología al personal de la EAAB.

En el capítulo 4 del estudio, que analiza el potencial de los acuíferos, JICA identifica los posibles mecanismos de recarga del complejo acuífero Cuaternario y del acuífero Guadalupe. Se infiere que el primero se podría estar recargando de los ríos y los sedimentos de las zonas de piedemonte, mientras que el segundo de las montañas que rodean la sabana de Bogotá [aquí es oportuno resaltar que el estudio difiere de la conceptualización de algunos trabajos (Rodríguez, 1978, 1986) donde se considera la sabana de Bogotá como una cuenca hidrogeológica cerrada]. En este estudio el balance hídrico parte de la estimación de la precipitación y del coeficiente de escorrentía. Es importante anotar que JICA considera el aporte de la descarga de la red de alcantarillado al caudal del río Bogotá y resta este aporte de la escorrentía observada en el río Bogotá para poder estimar el caudal real sin aportes. La recarga estimada por JICA se basa en una ecuación de balance hídrico que contempla la estimación de la precipitación, evapotranspiración real (estimada a través del balance hídrico del suelo) y la escorrentía total (suma de la escorrentía directa de la cuenca y del caudal base). Cabe anotar que el balance hídrico del suelo se alimentó con datos de precipitación y evaporación total diaria (aproximadamente 8 años de datos). Los resultados sugieren una recarga promedio de 144 mm/año, equivalente al 18% de la precipitación promedio anual. El balance hídrico de JICA se resume en la Figura 3-15.

Artículo	mm/año	m ³ /año	Tota l%	% de balance de aguas subterráneas
- Precipitación anual	802	108.5	100.0	-
- Evapo-transpiración anual	430	58.0	53.6	-
- Escorrentía superficial anual	228	31.0	28.4	-
- Recarga anual de agua subterráneas	144	19.5	18.0	100.0
- Uso anual de aguas subterráneas	27	3.7	3.4	18.8
- Ingreso anual de aguas subterráneas al Área de Estudio	8	1.1	1.0	5.6
- Salida anual de aguas subterráneas del Área de Estudio	125	16.9	15.6	86.8

Figura 3-15. Balance hídrico a nivel anual de la sabana de Bogotá

Fuente: EAAB-JICA (2003).

JICA desarrolló también una simulación de aguas subterráneas con el código Modflow. Inicialmente se realizó una simulación a nivel regional (32,000 km²), abarcando un área del tamaño aproximado del departamento de Cundinamarca. Con esta simulación JICA identificó una salida de aguas subterráneas hacia el Valle del Magdalena. Sucesivamente realizó una simulación más detallada en el área de la sabana de Bogotá. Los resultados de las simulaciones sugieren que: (i) antes del desarrollo, las aguas subterráneas de la sabana de Bogotá fluyan hacia el valle del Magdalena, (ii) después de desarrollo de los acuíferos, se incrementó el flujo hacia los campos de pozos de bombeo,

(iii) el flujo de agua subterránea no está limitado dentro del área de estudio en el sentido que, a medida que aumenta la extracción, la influencia del bombeo regional se extenderá afuera de los límites del área de estudio.

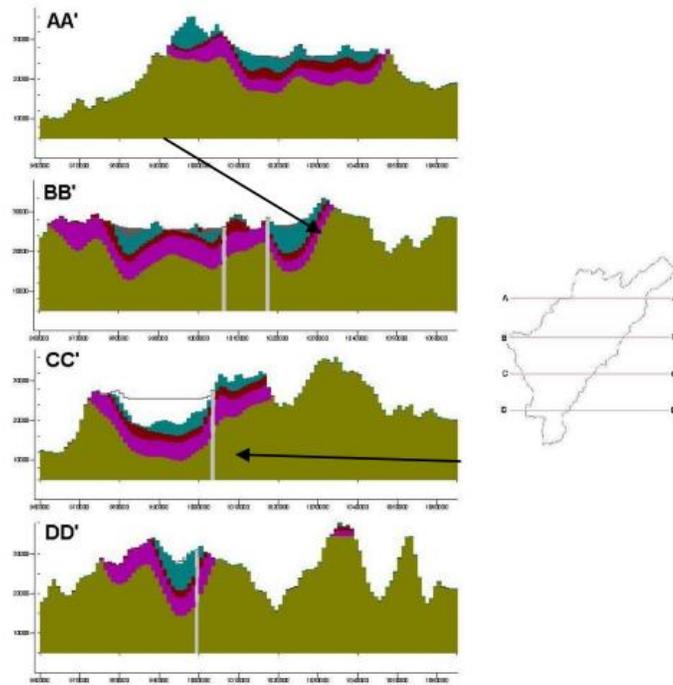


Figura 3-16. Estructura del modelo numérico construido por JICA (

Fuente: EAAB-JICA (2003)

La Figura 3-16 muestra la estructura del modelo construido por JICA, que consideró 5 unidades hidrogeológicas, de acuerdo con la clasificación de Ingeominas, mientras que la parametrización del modelo se basó en las estadísticas de los parámetros hidráulicos.

La Figura 3-17 muestra la distribución espacial de la recarga en el modelo. Se observa que en la mayoría del área urbana (excepto el sector sur del distrito), la recarga ingresada al modelo es de cero y que la recarga es mayor en los cerros orientales y occidentales.

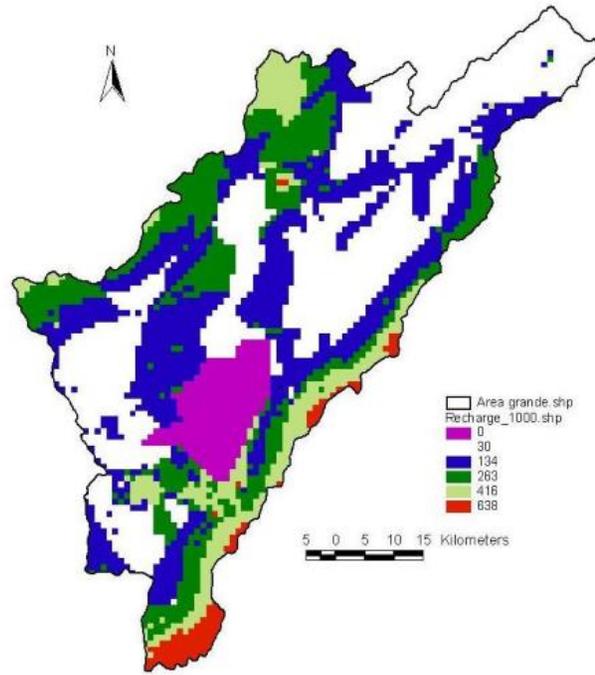


Figura 3-17. Distribución de la recarga en el modelo numérico de JICA

Fuente: EAAB-JICA (2003)

El balance hídrico del modelo de JICA sugiere que la recarga de agua subterránea (144 mm/año) se reparte entre bombeo de los acuíferos (27 mm/año) y salida de agua subterránea del área de estudio (117 mm/año). El modelo de JICA indica también que en el sistema acuífero del Cretáceo se generan importantes salidas de agua subterránea afuera del área de estudio [esta situación es diametralmente opuesta a la inferida por Rodríguez (1987)].

3.1.2.7 Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá (EAAB) – Agencia de cooperación Internacional del Japón (JICA), 2009. Estudio del Abastecimiento Sostenible de Agua para la Ciudad de Bogotá y Áreas Circundantes basado en el manejo Integrado de Recursos Hídricos en la República de Colombia. Informe Final.

El objetivo principal de este estudio fue lo de desarrollar el Plan Maestro y el Estudio de Factibilidad para el suministro de agua a la ciudad de Bogotá durante situaciones de emergencia, a través del uso del agua subterránea, con miras al año 2020 para su puesta en marcha. Estas situaciones de emergencia podrían materializarse durante grandes terremotos que pueden causar daños en la infraestructura hídrica superficial. El estudio proponía la construcción de 66 pozos de agua subterránea en el acuífero Guadalupe, distribuidos a lo largo de los cerros orientales y del sur de Bogotá [se entiende que, hasta la fecha, la EAAB no obtuvo los necesarios permisos ambientales para la fase exploratoria en los cerros orientales, zonas que son declaradas reservas forestales, y que logró

realizar solo algunos pozos a cotas inferiores caracterizados por rendimientos hídricos inferiores a los esperados].

En este estudio se revisan además las condiciones naturales del sistema hidrogeológico de la sabana de Bogotá. Es interesante resumir aquí los resultados presentados por JICA acerca de posibles infiltraciones de agua al Acuífero Guadalupe, que se generarían por las fugas desde el fondo del embalse San Rafael. JICA reporta que “la infiltración de agua a través del fondo del embalse fue evaluada mediante un cálculo diario entre enero de 1998 y marzo del 2001” y que “de acuerdo a los resultados de los cálculos, el promedio mensual de infiltración de agua proveniente del embalse San Rafael es de 3.7 m³/s. Esta cantidad de agua se infiltra al Acuífero Cretáceo de los Cerros Orientales, lo que aumentará el potencial de desarrollo de aguas subterráneas en el área”. [nos preguntamos si esta entrada de agua se incorporó luego en el modelo numérico de JICA].

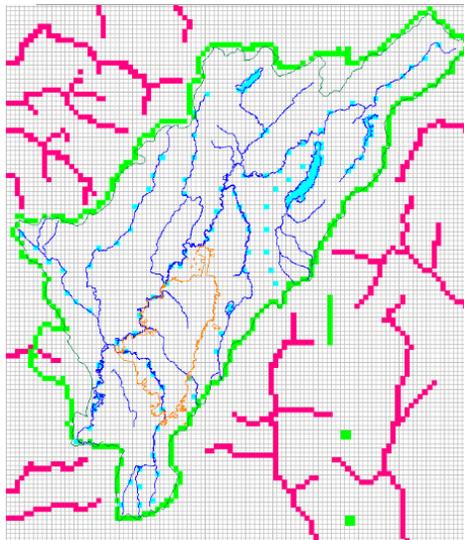


Figura 3-18. Límites del modelo numérico de JICA

En verde: General Head Boundary (GHB); en azul: Constant Head Boundary (CHB); en rojo: drenaje superficial.

Fuente: EAAB-JICA (2009).

Medidores automáticos de nivel fueron instalados en el 2001 en 11 pozos del Cuaternario. El informe muestra los resultados del monitoreo de niveles entre el 2001 y el 2008 y concluye que: (i) a pesar de que más de 7,000 pozos de agua subterránea fueron perforados en la región, el nivel del agua subterránea no ha disminuido y no disminuirá en un largo período de tiempo, (ii) el nivel del agua en el Cuaternario claramente responde a las estaciones y a la infiltración de la lluvia, por lo tanto, concluye que el sistema Cuaternario recibe recarga.

En este estudio se desarrolla una simulación numérica con énfasis en el acuífero Cretácico de los cerros orientales y Sur de Bogotá. En la Figura 3-18 se presentan los límites de este modelo y en la Figura 3-19, la distribución de la recarga por celda [aparentemente diferente de la distribución presentada en el informe de JICA del 2003], que se traduce en una recarga promedio de 132 mm/año.

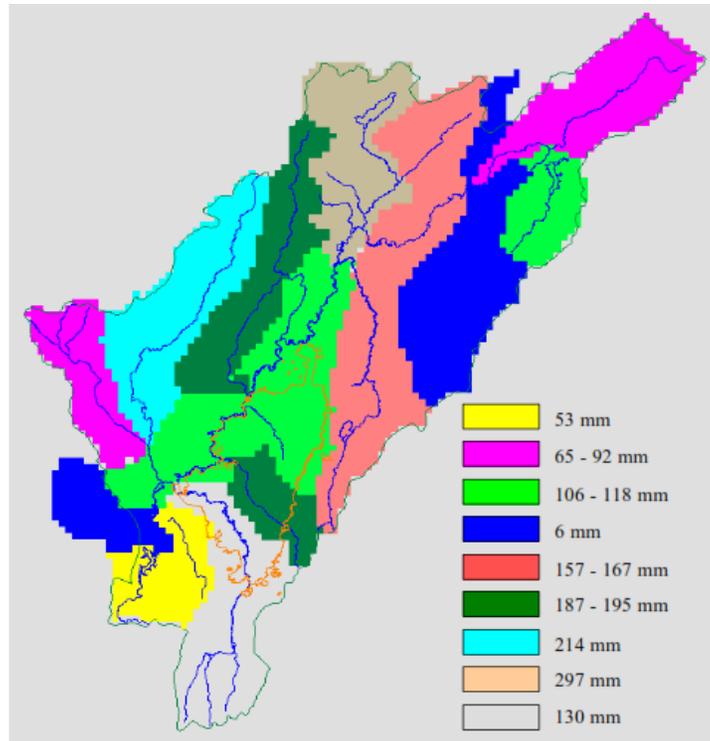


Figura 3-19. Límites del modelo numérico de JICA. En verde: General Head Boundary (GHB); en azul: Constant Head Boundary (CHB); en rojo: drenaje superficial.

Fuente: EAAB-JICA (2009).

3.1.2.8 Universidad Nacional de Colombia, 2006. Proyecto: Brindar apoyo técnico y actualizar herramientas para la regulación del aprovechamiento de las aguas subterráneas en Bogotá. Contrato Inter-administrativo No. 190/2005. Informe Final.

Este informe realizado por la Universidad Nacional de Colombia para el DAMA (hoy Secretaría Distrital de Ambiente) revisa el modelo hidrogeológico construido por la firma Hidrogeocol Ltda para el DAMA en 1999. Según los autores este modelo no representa adecuadamente las características hidrogeológicas de los depósitos no consolidados, particularmente en el modelo numérico no se representan las lentes de arena de los acuíferos cuaternarios que alimentan más del 92% de los pozos del Distrito Capital. Se resalta la necesidad de investigar la localización, continuidad lateral y sistema de recarga de estas lentes. De acuerdo con el modelo conceptual desarrollado por la Universidad Nacional, la recarga al sistema cuaternario es despreciable en términos de balance hídrico, porque las lentes de arena estarían rodeadas por materiales de muy baja permeabilidad (arcillas y limos). Sin embargo, el reporte identifica la necesidad de desarrollar un modelo matemático específico para las lentes de arena del Cuaternario con propósitos de evaluación, gestión y pronóstico del recurso hídrico subterráneo.

3.1.2.9 *Secretaría Distrital de Ambiente (SDA), 2013. Subdirección de Recurso Hídrico y del Suelo. Sistema de Modelamiento Hidrogeológico del Distrito Capital. Bogotá.*

La SDA desarrolla un modelo conceptual del área urbana del Distrito Capital con base en el análisis de variables climatológicas y estimación del balance hídrico, levantamiento geológico de detalle a escala 1:25,000, generación de una mapa de curvas de igual espesor de los depósitos cuaternarios, elaboración de mapas de isopiezas para diferentes temporadas, interpretación de pruebas de bombeo para la estimación de los parámetros y procesamiento de datos hidrogeoquímicos e isotópicos (deuterio, O-18) de diferentes tipos de agua (lluvia, superficial, subterránea). La recarga viene estimada por tres métodos: ecuación de balance hídrico, mapas de isorecarga potencial y mediante el método de Cheeturvedi (Sinha y Sharma, 1988), arrojando valores promedio para el área de estudio de respectivamente 70 mm/año, 157 mm/año y de 143 mm/año [se observa que estas dos últimas tasas de recarga son similares a la estimada por JICA (2009), que es de 132 mm/año]. Las tasas más altas de recarga se generarían en los cerros orientales, donde se reportan valores mayores a 190 mm/año.

Con base en el análisis de isótopos estables (deuterio, O-18), la SDA concluye que la mayoría de humedales estudiados presentan conexión con aguas subterráneas caracterizadas por flujos intermedios a regionales, mientras que el humedal Juan Amarillo presenta solo alimentación local por parte del agua de lluvia. Por otro lado, los pozos y aljibes sugieren mezclas de agua de lluvia (flujo subterráneo local) con agua subterránea con flujo intermedio a regional. [se nota que algunas alturas de recarga reportadas por la SDA exceden considerablemente las elevaciones topográficas registradas en los cerros que rodean Bogotá; es posible que esta aparente inconsistencia sea debida a la ecuación utilizada para la relación del deuterio con la altura (Rodríguez, 2004), sin embargo, se necesita más investigación al respecto].

La SDA reporta rangos amplios de transmisividad para los diferentes complejos acuíferos, a saber, entre 5.4 y 1064 m²/día para el Acuífero Guadalupe (Cretácico), entre 1.37 y 373 m²/día para la Formación Sabana (Cuaternario) y entre 315 y 1432 m²/día para Formación Chía – Río Tunjuelo (Cuaternario), esta última presente esencialmente en el sector sur del Distrito Capital. En lo relativo a los descensos de los niveles piezométricos en el último decenio (2000-2010 aproximadamente), se reporta que las zonas más afectadas corresponden a áreas con mayor presencia de industrias que aprovechan el agua subterránea, es decir los sectores de Puente Aranda (descensos de 5-10m), Kennedy (descensos de 20m) y Fontibón (descensos históricos hasta de 12m con recuperaciones locales recientemente) [se destaca que estas tasas de descenso son diferentes de las antiguamente reportadas por Lobo-Guerrero (1992) que son de 5-10 m/año].

3.1.3 Información recopilada en campo

A continuación, se presenta un resumen de la metodología y algunos resultados encontrados en la fase de campo realizada en el marco del convenio. La información específica recopilada en cada una de las visitas se puede encontrar en el (Anexo B).

A. Recopilación de información de estaciones de servicio (EDS), existentes en la zona de estudio

A partir de la información suministrada por la SDA, se elaboró un mapa con la localización de cada una de las EDS en la zona de estudio, con el fin de realizar la selección de las EDS para el trabajo de campo.

B. Selección de EDS para trabajos de campo

En desarrollo del estudio, se realizó la selección de estaciones de servicio de suministro de combustible, para la medición de niveles y ejecución de pruebas de slug en pozos de monitoreo.

C. Revisión de expedientes de la SDA, con información de las EDS seleccionadas

Se seleccionó y digitó la información relacionada con pozos de monitoreo existentes en las EDS seleccionadas, de los expedientes previamente revisados en la SDA.

D. Programación de estaciones de servicio (EDS), para la medición de niveles y ejecución de pruebas de slug.

Se elaboró un cronograma con la respectiva programación de estaciones de servicio (EDS), para la medición de niveles y ejecución de pruebas de slug.

E. Toma de datos en campo

El trabajo de campo, estuvo orientado a realizar la medición de niveles piezométricos, detección del espesor de producto libre, y ejecución de pruebas de slug.

La información de cada estación y de cada uno de los pozos encontrados fue recopilada en un formato elaborado con tal fin por la Universidad.

Los datos de campo generados durante la ejecución de las pruebas de slug, fueron registrados automáticamente por medio de dataloggers.

Los datos de las pruebas de slug, se interpretaron con el software AquiferWin32, y se estimó la conductividad hidráulica en cada uno de los pozos de monitoreo.

Las principales limitaciones para la interpretación de las pruebas de slug, radicó en la falta de información confiable de los pozos existentes en las estaciones de servicio visitadas, en especial la correspondiente a litología, diseños y profundidades de cada uno de los pozos. Por otra parte, la información disponible en los expedientes revisados de los pozos, en la mayoría de los casos no coincide con las características de los pozos encontrados durante las visitas.

Durante la revisión de los pozos de monitoreo, se evidenció la presencia de lodos en el fondo de algunos de ellos, posiblemente por falta de limpieza y purga después de construidos, lo cual puede incidir en la estimación de la conductividad hidráulica. En algunas estaciones se encontraron pozos sellados con concreto, y otros que de ninguna forma se pudieron abrir.

F. Interpretación de resultados

Para la interpretación de las pruebas de slug, se utilizó el método de Hvorslev, mediante la utilización del Software AcuíferWin 32.

La información cruda extraída de los dataloggers, fue sometida a un proceso de revisión, selección y corrección de los datos utilizados para el cálculo de la conductividad hidráulica.

Para la interpretación de las pruebas, se realizó una regresión lineal en aquellos puntos de datos cuyo desplazamiento normalizado varía de 0.15 a 0.25 (Butler, 1998).

G. Síntesis de resultados

En la Tabla 3-4, se presenta el resumen de las EDS visitadas, los niveles piezométricos medidos y las pruebas de slug test realizadas.

Tabla 3-4 Resumen de actividades realizadas en campo

EDS visitadas	178
Niveles medidos en pozos de monitoreo (PM)	569
Niveles medidos en pozos de observación (PO)	384
Número de pruebas de SLUG TEST realizadas	243

En la Tabla 3-5 se presenta estadísticos descriptivos de los niveles estáticos medidos y las conductividades hidráulicas estimadas.

Tabla 3-5 Estadísticos descriptivos de variables hidrogeológicas

Variable	Mínimo	Máximo	Promedio	Media geométrica
Conductividad hidráulica (m/s)	1.38E-09	3.75E-05	6.02E-06	8.51E-07
Niveles estáticos (m)	0.05	9.24	2.22	1.91

3.2 ESTIMACIÓN DE LA RECARGA

Para la estimación de la recarga, se plantea por una parte la modelación hidrológica usando SWAT para las cuencas asociadas al distrito de tal manera que se tenga una buena aproximación de la recarga natural. De manera complementaria, se realiza un análisis de recarga artificial de la zona urbana a través de cálculos basados en pérdidas de agua desde la red de acueducto y alcantarillado.

3.2.1 Información cartográfica de la zona de estudio

A continuación, se presenta la información cartográfica relacionada con las coberturas vegetales, suelos, topografía e hidrografía que se empleó como insumo para la construcción del modelo lluvia-escorrentía. Adicionalmente se presenta la homologación de códigos que se requirieron para llevar a cabo el funcionamiento del modelo.

3.2.1.1 Coberturas

El análisis de cobertura es de gran importancia para la elaboración del modelo hidrológico, pues es esta aquella que determina el comportamiento de la precipitación, una vez se transforma en escorrentía dentro de la cuenca. La información cartográfica fue elaborada a partir de insumos espaciales a escala 1:100.000 pertenecientes al año 2012. La metodología de homologación de coberturas utilizada fue la Corine Land Cover (CLC) y las bases de datos de coberturas del software

SWAT (Ver Figura 3-20) Cabe resaltar que el presente insumo fue entregado por la Secretaría Distrital de Ambiente y se analiza a continuación.

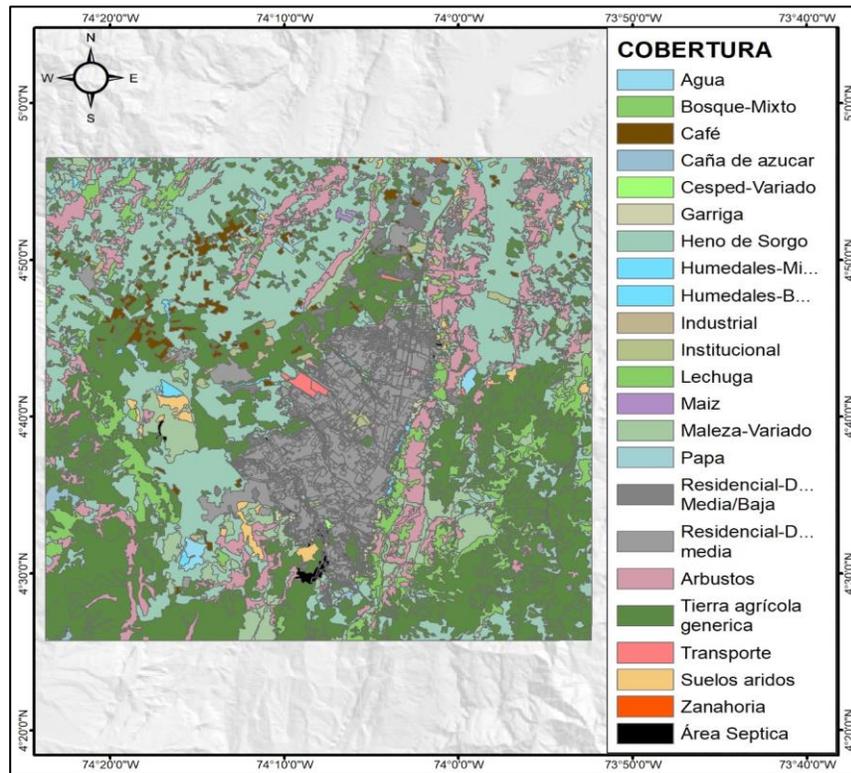


Figura 3-20 Cuencas identificadas dentro del área de estudio

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.1.2 Homologación de coberturas

SWAT posee un modelo simple de simulación de crecimiento de plantas que diferencia entre plantas anuales y perennes. En él, las plantas anuales crecen desde la plantación hasta la cosecha, y las plantas perennes se mantienen todo el año sobre la cuenca con un comportamiento promedio todo el tiempo. La entrada de información de coberturas al software SWAT se entiende como porcentaje de evapotranspiración del agua en cada una de las partes de las cuencas y la erosión de la misma. Los parámetros requeridos para la calibración se agrupan en tres diferentes clasificaciones:

- Crecimiento óptimo de la planta
- Estrés en el crecimiento de la planta
- Autofertilización del suelo

Para el cálculo de dichos parámetros se requieren varios muestreos en campo de la cobertura y su comportamiento estacional, con el objetivo de tener la mayor representatividad de los datos ingresados al modelo; sin embargo, no se cuenta con información que relacione los parámetros relacionados anteriormente, debido a esto, la cobertura CLC obtenida en el presente insumo se agrupo en diferentes coberturas genéricas ubicadas en la base de datos SWAT de valores predeterminados para las coberturas más representativas en las cuencas donde se han desarrollado diferentes simulaciones agrícolas. Los resultados se pueden observar en la Tabla 3-6.

Tabla 3-6 Relación entre coberturas CLC y coberturas SWAT

CODIGO SWAT	NOMBRE SWAT	CODIGO CLC	NOMBRE CLC
AGRL	Tierra agrícola genérica	2.2.3	Cultivos permanentes arbóreos
		2.2.4	Cultivos agroforestales
		2.4.1	Mosaico de cultivos
		2.4.2	Mosaico de pastos y cultivos
		2.4.3	Mosaico de cultivos, pastos y espacios naturales
		2.4.4	Mosaico de pastos con espacios naturales
		2.4.5	Mosaico de cultivos con espacios naturales
		2.5.3	Pastos y cultivos de clima frio
		2.6.3	Cultivos de clima frio, pasto y espacios naturales.
		2.6.4	Cultivos de pastos con espacios naturales
		2.6.5	Mosaico agro-urbano
COFF	Café	2.2.5	Café
		2.2.9	Cultivos confinados (Café)
CORN	Maíz	2.1.2	Cereales
CRRT	Zanahoria	2.1.1	Otros cultivos transitorios
FRST	Bosque-Mixto	3.1.1	Bosque denso
		3.1.2	Bosque natural fragmentado
		3.1.3	Bosque galería y/o ripario
		3.1.5	Bosque Plantado
		3.1.6	Bosque secundario
		3.1.7	Mosaico de Bosque plantado
		3.2.8	Rastrojos y bosques
GRAR	Garriga	3.2.5	Vegetación rupícola
LETT	Lechuga	2.1.4	Hortalizas
POTA	Papa	2.1.5	Tubérculos

CODIGO SWAT	NOMBRE SWAT	CODIGO CLC	NOMBRE CLC
RNGB	Maleza-Variado	2.3.3	Pastos enmalezados o enrastrados
		3.2.1	Pastos naturales y sabanas
		3.2.6	Rastrojos y pastos
		3.2.7	Rastrojo y tierras eriales
RNGE	Cesped-Variado	2.3.2	Pastos arbolados
SEPT	Área Séptica	1.3.2	Zona de disposición de residuos
SGHY	Heno de Sorgo	2.3.1	Pastos limpios
SUGC	Caña de azúcar	2.2.2	Cultivos permanentes arbustivos (Caña)
SWRN	Variedad de suelos áridos del Suroeste de USA	1.3.1	Zonas de extracción minera
		3.3.3	Tierras desnudas y degradadas
TEFF	Tef (Arbustos)	3.2.2	Arbustos y matorrales
		3.2.3	Vegetación esclerófila y/o espinosa
UIDU	Industrial	1.2.1	Zonas industriales o comercial
UINS	Institucional	1.4.1	Zonas verdes urbanas
		1.4.2	Instalaciones recreativas
URMD	Residencial-Densidad media	1.1.1	Tejido urbano continuo
URML	Residencial-Densidad Media/Baja	1.1.2	Tejido urbano discontinuo
UTRN	Transporte	1.2.2	Red vial, ferroviaria y terrenos asociados
		1.2.4	Aeropuertos
		1.2.5	Obras hidráulicas
WATR	Agua	5.1.1	Rios (50 m)
		5.1.2	Lagunas, lagos y ciénagas naturales
		5.1.3	Canales
		5.1.4	Cuerpos de agua artificiales
WETF	Humedales-Boscosos	3.1.4	Bosque de galería y ripario
		4.1.1	Zonas Pantanosas
WETL	Humedales-Mixtos	4.1.3	Vegetación acuática sobre cuerpos de agua

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.1.3 Distribución de coberturas a lo largo del área de estudio

A continuación, se relaciona la dinámica las coberturas a lo largo de toda el área de estudio. En la Tabla 3-7 se encuentra la distribución total y porcentual de cada una de las coberturas insumo. Debido a la expansión del polígono hacia el norte de la sabana de Bogotá, el porcentaje de áreas agrícolas genéricas supera el 30% de la cobertura total, lo cual es coherente debido a la aptitud económica de la zona. Por otro lado, los pastos constituyen el 29% de la cobertura total ubicada

principalmente hacia el área norte del distrito capital, y representa al resto de tierras rurales de la sabana de Bogotá que no desarrollan usos agrícolas. Un poco más del 12% del área de estudio es urbana y representa toda el área del distrito capital. Por último, los arbustos se encuentran ubicados en las áreas montañosas bajas con fuertes cambios de cobertura (arbustiva) sin necesidad de pasar a coberturas pastoriles.

Tabla 3-7 Relación entre coberturas CLC y coberturas SWAT

CODIGO	NOMBRE	ÁREA (Ha)	%
AGRL	Tierra agrícola genérica	101188	30.8%
COFF	Café	5158	1.6%
CORN	Maíz	249	0.1%
CRRT	Zanahoria	54	0.02%
FRST	Bosque-Mixto	21286	6.5%
GRAR	Garriga	789	0.2%
LETT	Lechuga	26	0.01%
POTA	Papa	739	0.2%
RNGB	Maleza-Variado	16973	5.2%
RNGE	Césped-Variado	210	0.1%
SEPT	Área Séptica	840	0.3%
SGHY	Heno de Sorgo (Pastos)	95148	29.0%
SUGC	Caña de azúcar	1007	0.3%
SWRN	Variedad de suelos áridos	2903	0.9%
TEFF	Tef (Arbustos)	32182	9.8%
UIDU	Industrial	1139	0.3%
UINS	Institucional	2640	0.8%
URMD	Residencial-Densidad media	32567	9.9%
URML	Residencial-Densidad Media/Baja	9035	2.8%
UTRN	Transporte	910	0.3%
WATR	Agua	1562	0.5%
WETF	Humedales-Boscosos	1605	0.5%
WETL	Humedales-Mixtos	228	0.1%
TOTAL		328437	100.0%

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.1.4 Suelos

A continuación, se presenta la información relacionada con los suelos del área de estudio. Para obtener la información que requiere el modelo SWAT se recurrió a dos fuentes principales, la primera fue el servicio web geográfico WMS de geopedología del instituto geográfico Agustín Codazzi IGAC el cual brinda la espacialización de polígonos de las unidades geopedológicas a escalas 1:100000. La

segunda fuente empleada fue el estudio general de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca también producto de la subdirección de Agrología del IGAC (Instituto Geografico Agustin Codazzi - Subdirección de agrologia, 2000).

Con el fin de determinar los parámetros requeridos por el modelo SWAT se encontró la necesidad de realizar un emparejamiento de información de las dos fuentes ya mencionadas. La capa de geopedología tiene entre sus atributos los perfiles de suelo que conforman cada unidad, estos perfiles sirvieron como atributo llave para enlazar la capa geopedológica con el estudio general de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca obteniendo así una descripción de los suelos existentes para cada unidad representativa de la capa geopedológica.

En la Tabla 3-8 se observa como los perfiles de la capa geopedológica fueron enlazados con el estudio de suelos y zonificación de tierras. El perfil seleccionado para representar la unidad de suelos fue el que presentó mayor porcentaje según la capa geopedología.

Tabla 3-8 Atributos enlazadores entra la capa de geopedología y los estudios de suelos y zonificación de tierras de Cundinamarca.

Suelo - capa Geopedología	Perfiles - capa Geopedología	Perfil enlazado - estudio de suelos y zonificación de tierras
CA	CUERPOS DE AGUA	CU - 132
MEAD	CU152, CU135	CU - 152
MEFE	CU132, EB23, EB24	CU - 132
MEFG	CU132, EB23, EB24	EB - 24
MEUE	MU31, CU154	MU31
MEUF	MU31, CU154	CU154
MGFE	CU149, CU126,CC210	CU149
MGFF	CU149, CU126,CC210	CC210
MGIE	AC73, AC57	AC73
MGIG	AC73, AC57	AC57
MGNC	CC333, CC332	CC333
MGSG	CU107, CU108	CU107
MGTc	MU-11	MU-11
MGTD	CC284, MU11, MU12	CC284
MISC	-	AC69
MKCd	AC - 33	AC - 33
MKCE	AC34, AC33, CU111	AC34
MKCF	AC34, AC33, CU111	AC33
MLCC	PS177, CC226, CU75, CC228	CC - 226
MLCD	PS177, CC226, CU75, CC228	CC 228
MLCE	PS177, CC226, CU75, CC228	CC - 226
MLFE	AC54, AC53	AC 54
MLFF	AC - 54	AC - 54

Suelo - capa Geopedología	Perfiles - capa Geopedología	Perfil enlazado - estudio de suelos y zonificación de tierras
MLIE	AC38, AC39, CC271	AC38
MLIF	AC38, AC39, CC271	AC39
MLIG	AC38, AC39, CC271	AC 39
MLJb	MU - 8	MU - 8
MLJC	MU8, MU24	MU8
MLJD	MU8, MU24	MU24
MLKC	MU9, N16, CC306	MU9
MLKD	MU9, N16, CC306	N16
MLSG	CC94, MU23	CC - 94
MLTc	AC - 69	AC - 69
MLTD	AC69, AC70	AC69
MLVE	CC307, CU79, CC308	CC - 307
MLVe2	CC - 307	CC - 307
MLVF	CC307, CU79, CC308	CU 79
MMCD	PB35A, CC230	CC230
MMCD2	PB35A, CC230	CC230
MMCe	CC - 230	CC - 230
MMCE2	PB35A, CC230	CC230
MMJC	CC205, CC251, AC55	CC - 205
MMKC	CC174, CC220, CC176	CC - 174
MMKD	CC174, CC220, CC176	CC-220
MMSG	PN31, PN33, AC16	AC-16
MMTd	AC - 90	AC - 90
MMVE	AC40, CU150	AC40
MMVe2	AC -40	AC -40
MMVF	AC40, CU150	AC 40
MMVF3	AC40, CU150	AC 40
MPIE	AC50, AC51	AC -50
MPIF	AC50, AC51	AC -50
MPKD	AC3, G37	AC-3
MPNB	AC5, AC72, PB42A	AC5
MPVe	G -52	G -52
MPVf	AC - 6	AC - 6
MQCd	AC - 12	AC - 12
MQCE	AC28, AC12	AC28
MQFf	AC - 83	AC - 83
MQIE	CC352, CC16	CC - 352
MQIF	CC352, CC16	CC - 352

Suelo - capa Geopedología	Perfiles - capa Geopedología	Perfil enlazado - estudio de suelos y zonificación de tierras
MQIG	CC352, CC16	CC - 352
MQJc	AC -35	AC -35
MQKC	C31, G22, C115	G 22
MQKD	C31, G22, C115	G 22
MQKDP	C31, G22, C115	G 22
MQVE	PA116, N31, PN18	CC 11 DE MQVE
MQVF	PA116, N31, PN18	PT466 DE MQVF
MQXB	CU138, CU115	CU138
MRIE	CC358, CC363	CC - 358
MRIG	CC358, CC363	CC - 358
MRKD	AC56, CC317	AC - 56
MRXC	CC359, AC71	CC - 359
MTEF	PL3, E2	PL3
RLOA	AC19, CT2B, AC7	AC - 19
RLQA	AC8, CT4A, AC18, CT14A	AC - 8
RLQb	AC -8	AC -8
RMOA	AC14, CU142	AC - 14
RMOb	AC - 14	AC - 14
RMQA	MU1, MU3, MU15	MU - 1
RMQb	MU - 1	MU - 1
RMRA	CU132, CU171, CC255	CU - 132
RMRb	CU - 132	CU - 132
ZU	-	

Fuente: Javeriana, 2017

Entre los atributos que conforman la capa de geopedología se encuentra la textura de las unidades, la cual permite hacer una clasificación tal como se presenta en la Figura 3-21.

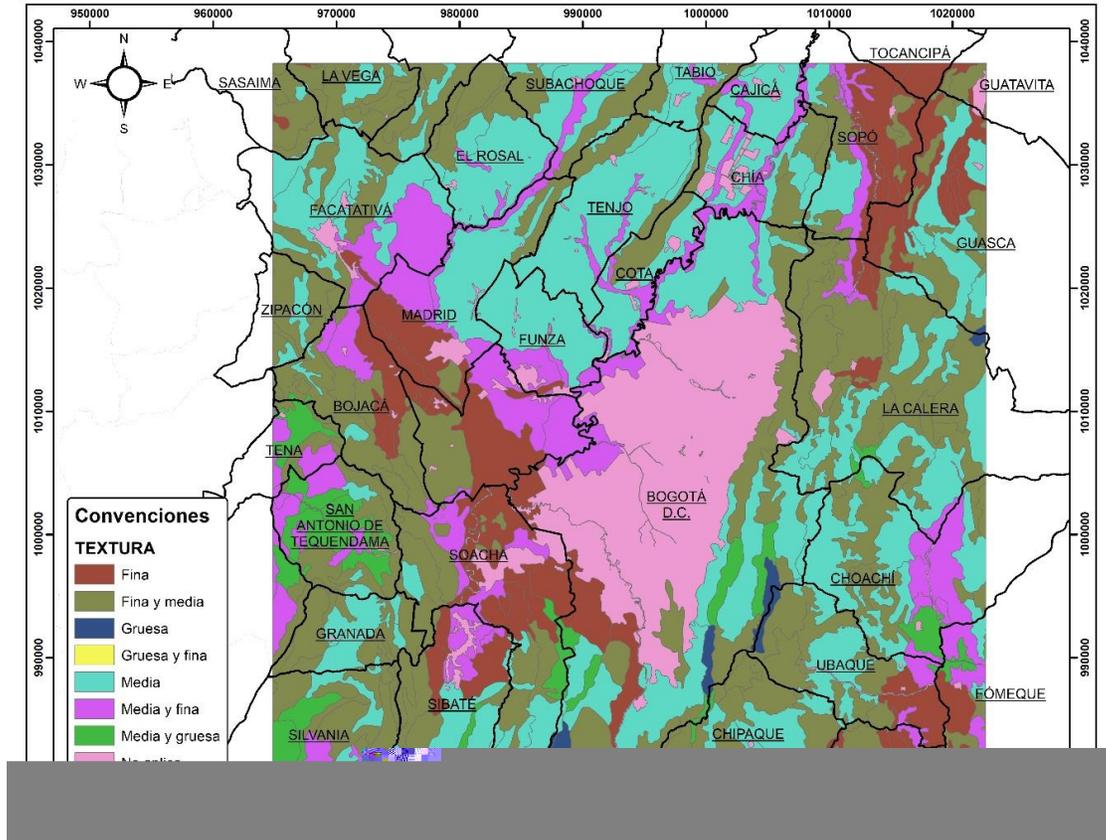


Figura 3-21 Clasificación textural de las unidades geo pedológicas empleadas para definir las unidades de suelo

Fuente: Javeriana, 2017

El modelo hidrológico SWAT requiere que la información de suelo sea ingresada de tal manera que cumpla con los parámetros de la tabla de suelos de la base de datos del modelo. En la Tabla 3-9 se encuentran los parámetros que conforman la tabla a satisfacer de la base de datos para cumplir con el requerimiento del modelo.

Tabla 3-9 Parámetros requeridos en el modelo SWAT

Atributo	Descripción
SNAM	Nombre suelo
NLAYERS	Numero de estratos de suelo
HYDGRP	Grupo hidrológico del suelo
SOL_ZMX	Profundidad máxima de raíces
ANION_EXCL	Fracción de porosidad
SOL_CRK	Grieta potencial del suelo

Atributo	Descripción
TEXTURE	Textura del perfil del suelo
SOL_Z	Profundidades de la capa suelo
SOL_BD	Densidad aparente húmedo
SOL_AWC	Capacidad de agua disponible de la capa de suelo
SOL_K	Conductividad hidráulica saturada
SOL_CBN	Contenido de carbono orgánico
CLAY	Contenido de arcillas
SILT	Contenido de limos
SAND	Contenido de arenas
ROCK	Contenido de roca fragmentada
SOL_ALB	Albedo de suelo húmedo
USLE_K	Factor k de la ecuación de erosionabilidad la de USLE
SOL_EC	Conductividad eléctrica
SOL_CAL	Porcentaje de carbonato de Calcio en el suelo.
SOL_PH	pH en el suelo

Fuente: SWAT input/Output Documentation (Arnold, y otros, 2012)

Cabe resaltar que los parámetros de profundidad de capa de suelo, densidad aparente, capacidad agua disponible, conductividad hidráulica saturada, contenido de carbono orgánico, contenido de arcillas, contenido de limos, contenido de arenas, contenido de rocas, albedo, factor de la ecuación de erosionalidad y la conductividad eléctrica están dados para cada uno de los estratos del suelo, teniendo como máximo 7 estratos.

Como se mencionó anteriormente, con el fin de obtener todos los parámetros requeridos por el SWAT se hizo una búsqueda de estos en el estudio de suelos y zonificación de tierras del IGAC, los parámetros no encontrados en el estudio fueron calcularon. A continuación, se presenta la manera en la que se determinó cada uno de los parámetros:

3.2.1.5 SNAM

El nombre identificador para cada tipo suelo es el estipulado por el IGAC tanto en la capa de geo pedología como en el estudio de suelos y zonificación de tierras. Para la capa de geo pedología este parámetro se relaciona con el atributo UCSuelo y sirvió como respaldo para el enlace realizado con los símbolos del suelo del estudio general de suelos.

3.2.1.6 NLAYERS

Hace referencia al número de estratos del suelo (Arnold, y otros, 2012), este parámetro se encontró directamente en el estudio de suelos y zonificación de tierras del IGAC.

3.2.1.7 HYDGRP

El grupo hidrológico del suelo es uno de los parámetros obligatorios en la entrada del modelo SWAT, el cual es definido en la documentación del modelo tal como se muestra a continuación (Arnold, y otros, 2012):

- Grupo A: Suelos conformados por grava y arena que se caracterizan por tener altas tasa de infiltración, lo cual se traduce a bajos potenciales de escurrimiento.
- Grupo B: Suelos con textura fina en transición a moderadamente gruesa (rugosa), se caracterizan por ser suelos moderadamente bien drenados, generando buenas tasas de infiltración y bajos índices de escurriendo.
- Grupo C: Suelos caracterizados por tener una tasa lenta de infiltración al estar saturados, generado un incremento en el escurrimiento
- Grupo D: Suelos conformados por arcillas expansibles, dónde las tasas de infiltración son bajas causando altos índices de escurrimiento.

Partiendo de las anteriores definiciones se realizó una relación entre los grupos hidrológicos y las granulometrías determinadas a partir del estudio de suelos y zonificación de tierras del IGAC. Los criterios tenidos en cuenta para la determinación del grupo hidrológica al que pertenece cada unidad fueron:

- Grupo A si Arena > 86 %
- Grupo B si Arena > 50 % y arcilla > 35 %
- Grupo C si Arcilla > 28 % y arena < 44 %
- Grupo D si Arcilla > 50 %

Como los cuerpos de agua y las zonas urbanas presentan un alto índice de escurrimiento se definieron en el grupo D.

3.2.1.8 SOL_ZMX

La profundidad máxima de las raíces no se encontró en ninguna de las fuentes ya mencionadas, en este caso el modelo asigna por defecto que las raíces se pueden desarrollar a lo largo del total de la profundidad del suelo (Arnold, y otros, 2012), sin embargo, se definió como la profundidad del primer estrato, ya que es donde se deposita la mayor cantidad de materia orgánica que permite un adecuado desarrollo radicular. Por lo anterior la profundidad máxima de raíces resulta igual al valor determinado para el primer estrato del parámetro SOL_Z.

3.2.1.9 ANION_EXCL

La fracción de porosidad del suelo es un parámetro opcional para el modelo (Arnold, y otros, 2012), en el estudio de suelos y zonificación se tierras del IGAC ni en la capa de geo pedología hay información referente a este parámetro, sin embargo, el modelo le asigna un valor de 0.5 por defecto en los casos en los que no se cuenta información.

3.2.1.10 SOL_CRK

El parámetro de grieta potencial del suelo se expresa como fracción total del volumen del suelo, sin embargo, es un parámetro opcional para el funcionamiento del modelo, razón por la que al no existir información el modelo asigna un valor estándar de 0,5. (Arnold, y otros, 2012)

3.2.1.11 TEXTURE

La textura referente a cada estrato del suelo es un parámetro obligatorio para el modelo el cual se obtuvo de la capa de geo pedología del IGAC.

3.2.1.12 SOL_Z

La profundidad de cada una de las capas del suelo es uno parámetros obligatorios para el modelo, este parámetro se encontró en la descripción por perfiles del estudio de suelos y zonificación de tierras del IGAC.

3.2.1.13 SOL_BD

El parámetro de densidad aparente del suelo húmedo es obligatorio para el modelo y no se encontró en el estudio de suelos y zonificación de tierras del IGAC, razón por la que se empleó la alternativa mostrada en la Tabla 3-10 de la USDA que permite tener un estimado de la densidad aparente en función del contenido de arcillas del suelo.

Tabla 3-10 Densidad aparente en función del contenido de arcillas

Porcentaje de Arcillas	Densidad Aparente
0-20	1.6
20-30	1.55
30-40	1.5
40-50	1.45
50-60	1.4

Fuente: (United states department agriculture, 2016)

3.2.1.14 SOL_AWC

La capacidad de agua disponible por capa de suelo es un parámetro obligatorio en el modelo, el cual expresa el agua disponible entre la zona de punto de marchitez (PMP) permanente y capacidad de campo (CC), siendo estos dos parámetros los que se determinaron en función de la granulometría de cada uno de los estratos y se emplearon como insumo para determinar la capacidad de agua disponible.

La capacidad de campo para cada uno de los estratos se estimó empleando la ecuación de Bodman y Mahmud (Bodman & Mahmud)

$$CC\% = (0.023 * Sand\%) + (0.25 * Silt\%) + 0.61 * Clay\%$$

Por otro lado, el punto de marchitez permanente se estimó por medio de la siguiente ecuación de Maximov

$$PMP\% = (0.001 * Sand\%) + (0.12 * Silt\%) + (0.57 * Clay\%)$$

A partir de estos resultados se estimó la capacidad de agua disponible como la diferencia que existen entre los dos niveles CC y PMP.

3.2.1.15 SOL_K

La conductividad hidráulica saturada del suelo es un parámetro de suma importancia y obligatoriedad para el funcionamiento del modelo, y en el estudio de suelos del IGAC no se encuentra información relacionada con este parámetro. Por lo anterior se recurre al triángulo textural de la USDA el cual se muestra en la Figura 3-22.

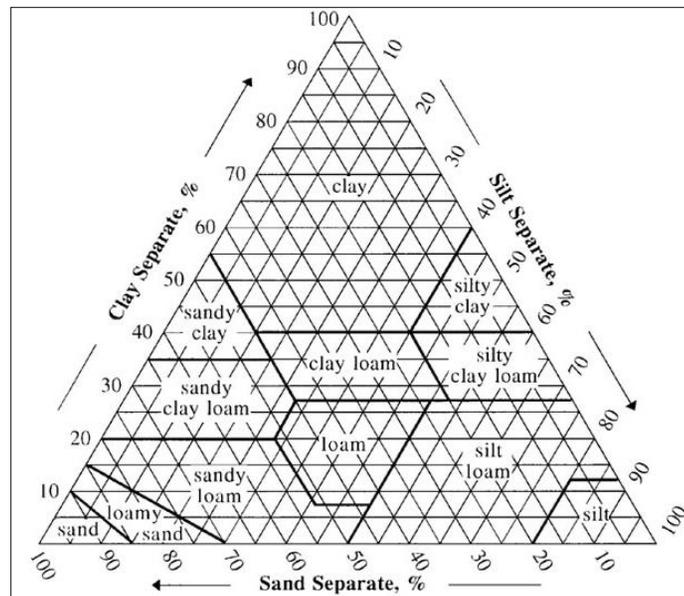


Figura 3-22 Triángulo Textural USDA

Fuente: (USDA, 2017)

A partir del triángulo textural mostrado en la Figura 3-22 la organización de las naciones unidas para la alimentación y la agricultura (FAO) realizó la clasificación textural en función de los porcentajes de arenas, limos y arcillas, definiendo unos intervalos que se muestran en la Tabla 3-11.

Tabla 3-11 Intervalos de clasificación textural en función del porcentaje de arenas, limos y arcillas.

Textura	% Arena		% Limo		% Arcilla	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max
Arenosa	86	100	0	14	0	10
Areno franca	70	89	0	30	0	15
Franco arenosa	50	70	0	50	0	20
Franco limosa	20	50	74	88	0	27
Franca	23	52	28	50	7	27
Franco arcillo arenosa	45	80	0	28	20	35
Franco arcillo limosa	0	20	40	73	27	40
Franco arcillosa	20	45	15	52	27	40
Arcillo arenosa	45	65	0	20	35	55
Arcillo limosa	0	20	40	60	40	60
Arcillosa	0	45	0	40	40	100

Fuente: (Organización de las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura-FAO (2009))

Luego de realizar la clasificación textural en función de la granulometría de las unidades de suelo se recurre a la Tabla 3-12 propuesta por Gabriels (Gabriels, Lobo, & Pulido, 2011) donde a partir de la textura se define de forma directa un valor de conductividad hidráulica saturada.

Tabla 3-12 Conductividad hidráulica

Textura	Ks (m/d)	Ks(cm/h)	ks (mm/hr)
Arenosa	15	62,5	625
Areno franca	13,5	56,3	563
Franco arenosa	3	12,5	125
Franco limosa	0,6	2,5	25
Franca	0,6	2,5	25
Franco arcillo arenosa	0,54	2,3	23
Franco arcillo limosa	0,15	0,6	6
Franco arcillosa	0,21	0,9	9
Arcillo arenosa	0,19	0,8	8
Arcillo limosa	0,09	0,4	4
Arcillosa	0,11	0,5	5

Fuente: Gabriels, Lobo, & Pulido (2011)

3.2.1.16 SOL_CBN

El contenido de Carbono Orgánico no se encuentra en el estudio de suelos y zonificación de tierras del IGAC y como no es parámetro indispensable para el funcionamiento del modelo no se tuvo en cuenta.

3.2.1.17 CLAY

El contenido de arcillas por estratos de suelos se encontró en el estudio de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca elaborado por el IGAC.

3.2.1.18 SILT

El contenido de limos por estratos de suelos se encontró en el estudio de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca elaborado por el IGAC.

3.2.1.19 SAND

El contenido de arenas por estratos de suelos se encontró en el estudio de suelos y zonificación de tierras del departamento de Cundinamarca elaborado por el IGAC.

3.2.1.20 ROCK

El contenido de cuerpos rocosos en los perfiles de suelos se encontró para algunos perfiles en el estudio de suelos y zonificación de tierras, para los casos donde no se encontró información se asignó cero ya que no es un parámetro obligatorio en el funcionamiento del modelo.

3.2.1.21 SOL_ALB

El albedo es el cociente entre la radiación global reflejada desde la superficie y la radiación global incidente sobre la superficie, estos valores se encuentran estipulados en la Tabla 3-13 para las superficies típicas de la tierra

Tabla 3-13. Albedo en función de las superficies típicas de la tierra

Superficie típica	Albedo
suelo negro seco	14
suelo negro húmedo	8
terreno arado húmedo	14
arena brillante fina	37
nieves densas seca y limpia	86

Fuente: *Mathematical models for atmospheric pollutants (Drake, 1979)*

Estas superficies típicas se relacionan con la textura encontrada en la capa a de geopedología IGAC, obteniendo la relación directa para estipular el albedo en los diferentes tipos de suelo tal como se muestra en la Tabla 3-14.

Tabla 3-14 Relación albedo y texturas del estudio de suelos del IGAC

Superficie típica	Clasificación textural		Albedo
suelo negro seco	Gruesa	Zonas urbanas	14
suelo negro húmedo	Media y gruesa	Gruesa y fina	8
terreno arado húmedo	Media	Media y fina	14
arena brillante fina	Fina	Fina y media	37
nieves densas seca y limpia	Nieves Perpetuas		86

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.1.22 ULSE_K

El factor K de la ecuación de erosionabilidad del suelo de la USLE es un parámetro obligatorio para el funcionamiento del modelo, sin embargo, en ninguna de las fuentes empleadas es un parámetro determinado, razón por la que se recurrió a la ecuación reducida de Wischmeier (Díez Hernández, 2007)

$$k = 2,71 * 10^{-6} * M^{1,14} * (12 - a)$$

Donde:

K = factor de erosionabilidad del suelo

M = Factor textura = X * Y

X = porcentaje de partículas de suelo comprendidas entre 0,002 y 0,1 mm (limos y arenas muy finas)

Y = Porcentaje de partículas comprendidas entre 0,002 y 2 mm

Para obtener los factores que determinan la variable M se tuvo en cuenta la granulometría encontrado en el estudio de suelos y zonificación de tierras del IGAC

a = Porcentaje de materia orgánica

El porcentaje de materia orgánica para cada perfil se encontró en el estudio de suelos y zonificación e tierras para el departamento de Cundinamarca elaborado por el IGAC

3.2.1.23 SOL_EC

El parámetro de conductividad hidráulica no se encuentra en el estudio de suelos del IGAC y no es un parámetro indispensable para el funcionamiento del modelo, razón para no tenerlo en cuenta.

3.2.1.24 SOL_Cal

El contenido de carbonato de calcio no es un parámetro indispensable para el funcionamiento del modelo, razón por la que no se tiene en cuenta.

3.2.1.25 SOL_pH

El pH del suelo tampoco es un parámetro indispensable para el funcionamiento del modelo, sin embargo, se encuentra en el estudio de suelos del IGAC, razón por la que se decide incluir.

3.2.1.26 Topografía

El modelo hidrológico SWAT requiere de forma indispensable una herramienta en formato raster que describa la topografía del área de estudio, para esto se recurre al modelo de elevación digital (DEM) con resolución espacial de 1 m. Con el fin de mostrar el comportamiento topográfico general del área de estudio se generaron curvas de nivel a partir del DEM con una separación de 50 m tal como se muestra en la Figura 3-23 .

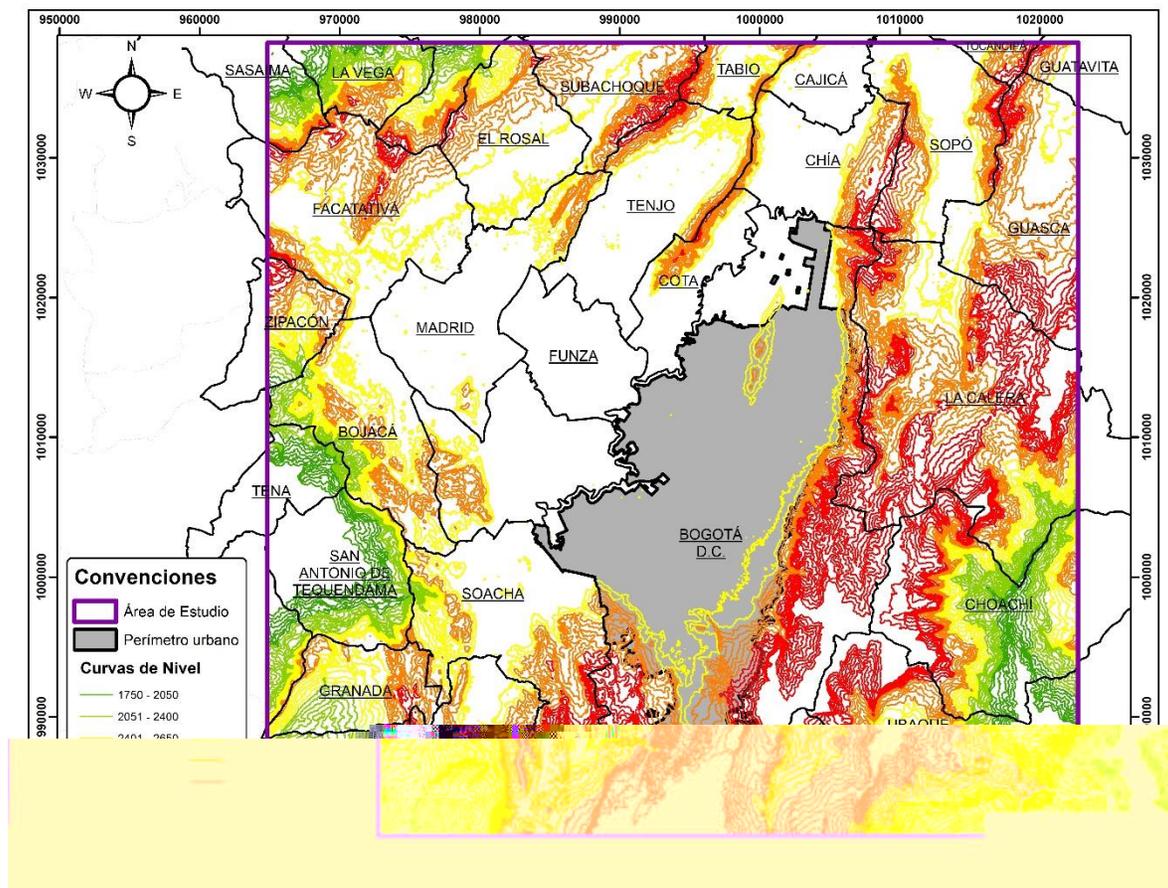


Figura 3-23 Curvas de nivel generadas a partir del modelo de elevación digital

Fuente: Javeriana, 2017

Partiendo de la Figura 3-23 se evidencia que las zonas con mayor altura sobre el nivel del mar se encuentran al oriente y sur del perímetro urbano de Bogotá, donde la cota oscila entre los 2901 y 3300 msnm y es evidente la existencia de la línea que parte aguas de los cerros orientales. Al aproximarse a Bogotá inicia un descenso donde las faldas de los cerros presentan alturas que varían entre los 2651 y 2900 msnm y continuando hacia el occidente se encuentra el área urbana de Bogotá donde las variaciones de la altura son pequeñas, generando una zona ligeramente plana que se

extiende hasta el occidente y norte de Bogotá, incluyendo la zona conocida como la sabana, donde las alturas capturadas por los sensores oscilan entre 2401 y 2650 msnm.

Tabla 3-15. Clasificación de pendientes

Pendiente (%)	Relieve
0 - 3	Plano Ligeramente plano
3 - 7	Ligeramente plano
7 - 12	Ligeramente inclinado
12 - 25	Fuertemente ondulado
25 - 50	Fuertemente quebrado
50 - 75	Escarpado
> 75	Muy escarpado

Fuente: Instituto geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Esta zona ligeramente plana se ratifica en el mapa de pendientes de la zona ilustrado en la Figura 3-24, el cual se construyó siguiendo los intervalos de pendientes estipulados en la Tabla 3-15 propuesta por el IGAC.



Figura 3-24 Mapa de pendientes

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.1.27 Hidrografía¹

El sistema de drenaje del Distrito Capital en general es de tipo superficial por medio de cauces naturales, canales y quebradas que tributan al tramo del río Bogotá, siendo el principal drenaje del distrito. El drenaje natural de los cerros en su vertiente occidental se convierte en los afluentes de los principales ríos de la ciudad: Salitre, Fucha, Tunjuelo Y Torca. Las cuencas de estos ríos drenan el agua de más del 90 % del área urbanizada. Ver Figura 3-25

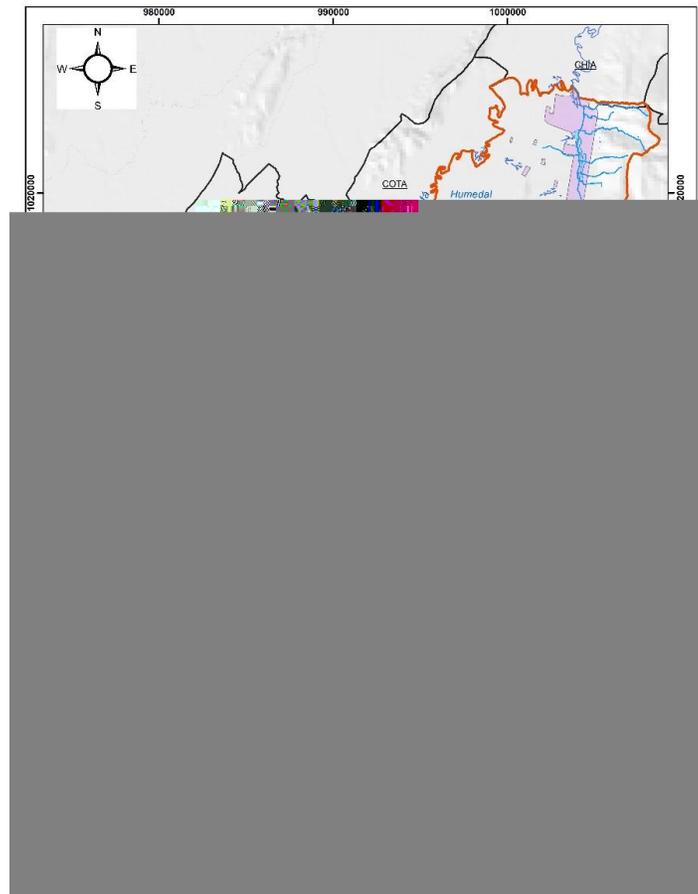


Figura 3-25 Hidrografía de Bogotá (Fuente: Javeriana, 2017)

¹ Información tomada y adaptada de “DESCRIPCIÓN Y CONTEXTO DE LAS CUENCAS HÍDRICAS DEL DISTRITO CAPITAL

(TORCA, SALITRE, FUCHA Y TUNJUELO)” http://www.ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=698885eb-239e-4c23-89ca-99d18bef5865&groupId=586236

3.2.2 Modelación Lluvia -Escorrentía

3.2.2.1 Construcción del modelo

La construcción del modelo hidrológico SWAT inicia con la recopilación de información cartográfica y climática de la zona de estudio. Una vez se tiene la información se generan los archivos de entrada al modelo y se integran siguiendo una secuencia lógica que se asemeja a la del proceso natural. En la Figura 3-26 se puede observar la metodología de aplicación del modelo.

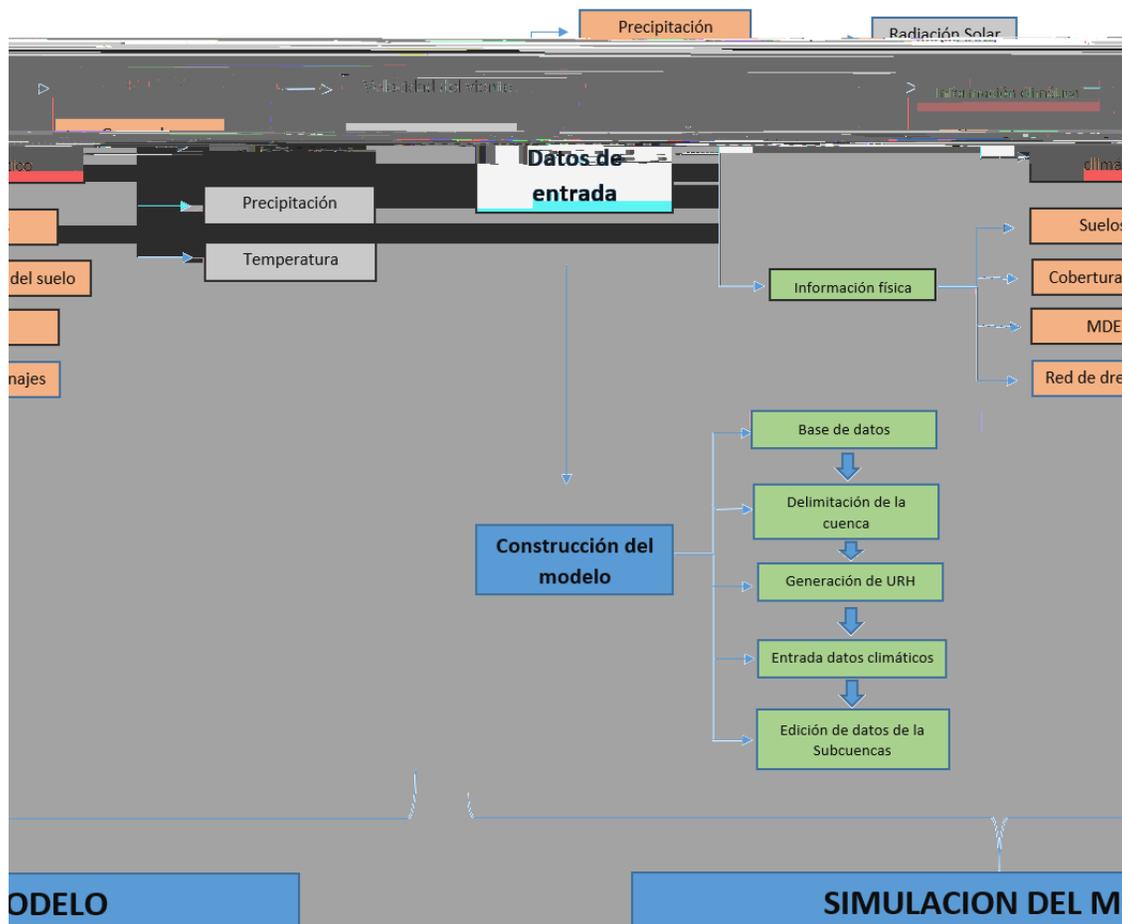


Figura 3-26 Metodología de la aplicación del modelo

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.2.2 Información de entrada

Los datos climatológicos que se emplean en el modelo son datos de precipitación diaria, radiación solar media diaria por mes, punto de rocío medio diario por mes, velocidad del viento media diaria por mes, temperatura máxima diaria, temperatura mínima diaria y días de precipitación, de estos

datos se derivaran otros, tales como: desviación estándar de la temperatura, desviación estándar de la precipitación, coeficiente de asimetría de la precipitación, probabilidad y ocurrencia de días húmedos y de días secos. Adicionalmente con la información de la topografía, datos climatológicos, mapas de uso y cobertura del suelo, tipo de suelo y precipitación, se generan otros datos secundarios, como pendientes, redes de drenajes y delimitación de subcuencas.

3.2.2.3 Construcción de la base de datos

Debido a que el modelo SWAT contiene una base de datos diferente a la de la zona de estudio de este proyecto, se construyó una base de datos con toda la información cartográfica y climatológica de la zona.

3.2.2.4 Precipitación

Para la consolidación de los registros de precipitación se unificaron los formatos de lectura de la información de precipitación diaria del EAAB, la CAR, el IDEAM y la SDA. Como resultado se dispone del archivo “precipitación total diaria.xls” que contiene los registros diarios de 124 estaciones. Cabe resaltar que para que el manejo de la información de precipitación fuera más fácil, fue necesario asignar un código arbitrario a las estaciones de IDIGER y de la SDA.

La información adquirida a la fecha de elaboración del presente informe sigue la siguiente relación:

Tabla 3-16 Relación de estaciones por entidad

ENTIDAD	No DE ESTACIONES
IDIGER	20
SDA	4
EAAB	30
IDEAM	62
CAR	8
Total	124

En la Figura 3-27 Estaciones de precipitación se puede observar la ubicación de cada una de las estaciones de precipitación.

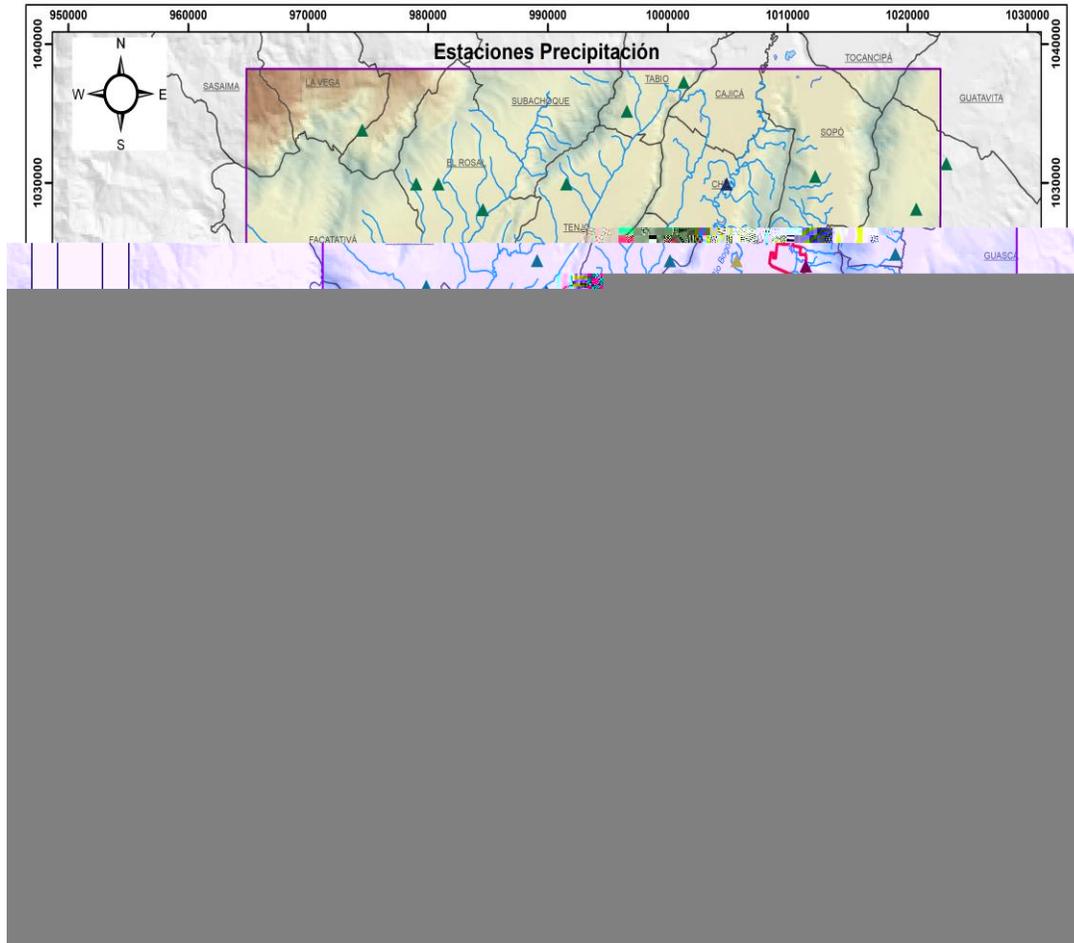


Figura 3-27 Estaciones de precipitación

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.2.5 Temperatura

El modelo SWAT requiere como insumo para los análisis del flujo del agua en la atmósfera y su interacción con la vegetación los valores de temperatura máxima y mínima media diaria por mes. Para la consolidación de los registros de temperatura se tomó la información de 22 estaciones del IDEAM. El formato de la base de datos se unificó para los registros de información y como resultado se dispone de dos archivos: “temperatura_minima.xls” y “temperatura_maxima.xls”. En la Figura 3-28 se puede observar la ubicación de cada una de las estaciones de temperatura.

Para obtener entonces valores de temperatura máxima y mínima se trabajó con registros diarios de temperatura máxima y mínima que sirvieron como insumo para construir una curva de temperatura contra altura sobre el nivel del mar, de modo tal se obtuvo una gráfica lineal que representa el gradiente geotérmico de la zona. Debido a que la variación de la temperatura también es afectada por la época del año, se construyó una curva de gradiente térmico para cada mes teniendo así 24 ecuaciones (12 para temperatura mínima y 12 para temperatura máxima).

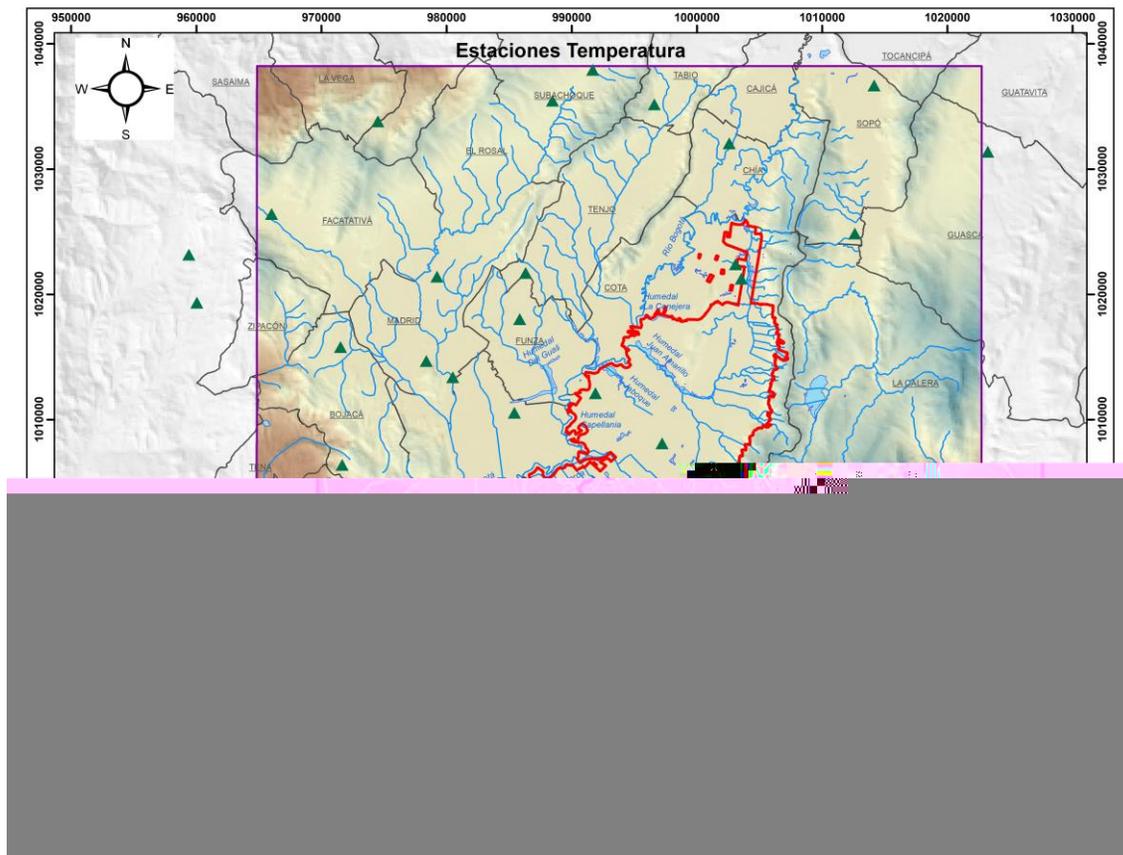


Figura 3-28 Estaciones de temperatura en la zona de estudio

Fuente: Javeriana, 2017

En la Figura 3-29 se muestra la curva de temperatura máxima y elevación para el mes de febrero, donde se ve que la relación es bastante buena considerando que el R^2 es de 0.90.

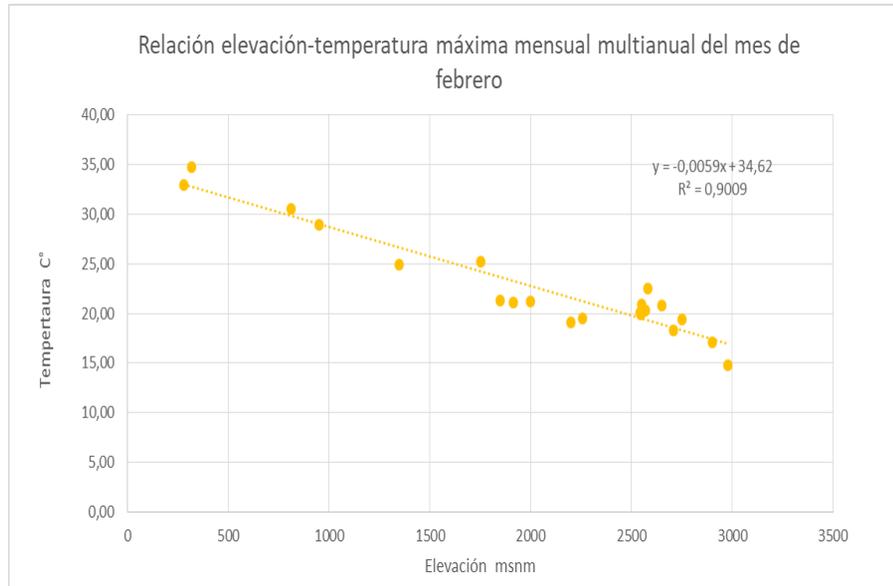


Figura 3-29 Curva de relación de temperatura máxima y elevación para enero

Fuente: Javeriana, 2017

Con estas ecuaciones se logró calcular la temperatura máxima, media y mínima media mensual para las microcuencas de análisis.

3.2.2.6 Coberturas y suelos

En cuanto a las coberturas se realizó la homologación de los códigos existentes de Corine Land Cover con los códigos identificadores de coberturas que trae implícito el modelo. También se diligencio la tabla de suelos de la base de datos del modelo con los parámetros característicos para cada uno de las unidades de suelo que se encontraron para la zona de estudio. La consolidación de esta información se explicó en el numeral 3.2.1.1y 3.2.1.4 de esta sección.

Una vez se cuenta con toda la información cartográfica y climatológica, se procede a construir los archivos de entrada del modelo. Para ello se trabajó con la herramienta ArcSWAT 2012, la cual es una extensión de ArcGIS de libre distribución. Ver Figura 3-30

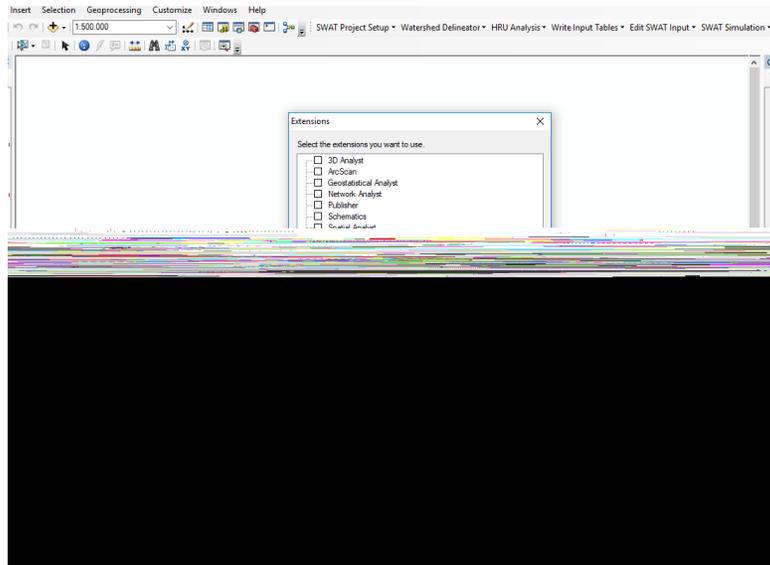


Figura 3-30. Extensión ArcSWAT en ArcGIS

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.2.7 Definición de Subcuencas

Las unidades de análisis para el modelo hidrológico son las microcuencas, estas fueron definidas bajo el criterio de diferencial la cuenca urbana de Bogotá, y las cuencas naturales de la parte alta de los cerros orientales y del sur. De esta forma se delimitaron 218 subcuencas. En la Figura 3-31 se presenta la división de las subcuencas.

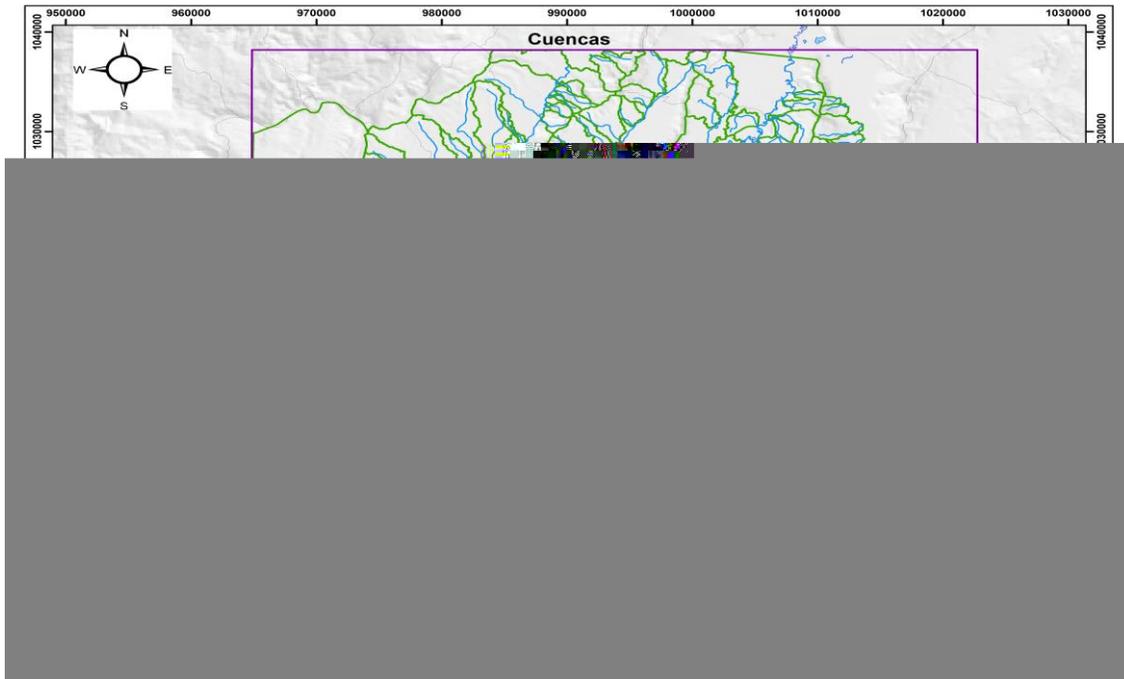


Figura 3-31 Microcuencas en el modelo SWAT.

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.2.8 Unidades de respuesta hidrológica

Las unidades de respuesta hidrológica (URH) son áreas de cuenca que son homogéneas en términos de su respuesta hidrológica al clima. Las URH están conformadas usualmente por áreas dispersas, desconectadas entre sí, pero que mantienen propiedades comunes de especial importancia hidrológica, como son: pendiente (que determina la velocidad de la escorrentía superficial), tipo de suelo y cobertura vegetal.

La generación de las HRU consistió en la división del área de estudio según la combinación de las características físicas de esta. Este procedimiento se realizó en dos pasos, en el primero se cargó y reclasificó la información requerida mediante tablas que relacionan la información de SWAT con la información de la base de datos que se creó para la zona de estudio. En el segundo paso se definió de las URH según el tipo de suelo, la cobertura del suelo y pendiente en cada subcuenca. Teniendo en cuenta que se encontraron 84 tipos de suelo, 53 tipos de cobertura y se definieron 5 clases de pendiente, para la zona de estudio se obtuvo un total de 6223 URH. En la Figura 3-32 se presenta el resultado de la construcción de las UHR.



Figura 3-32 Unidades Hidrológicas de Respuesta

Fuente: Javeriana, 2017

Debido a que el SWAT utiliza una sola estación para cada subcuenca, se crearon estaciones “virtuales” en los centroides de cada una de las microcuencas analizadas (ver Figura 3-33). Para asignar los valores de precipitación a cada estación virtual se trabajó con la estación de precipitación más cercana a cada una de estas.

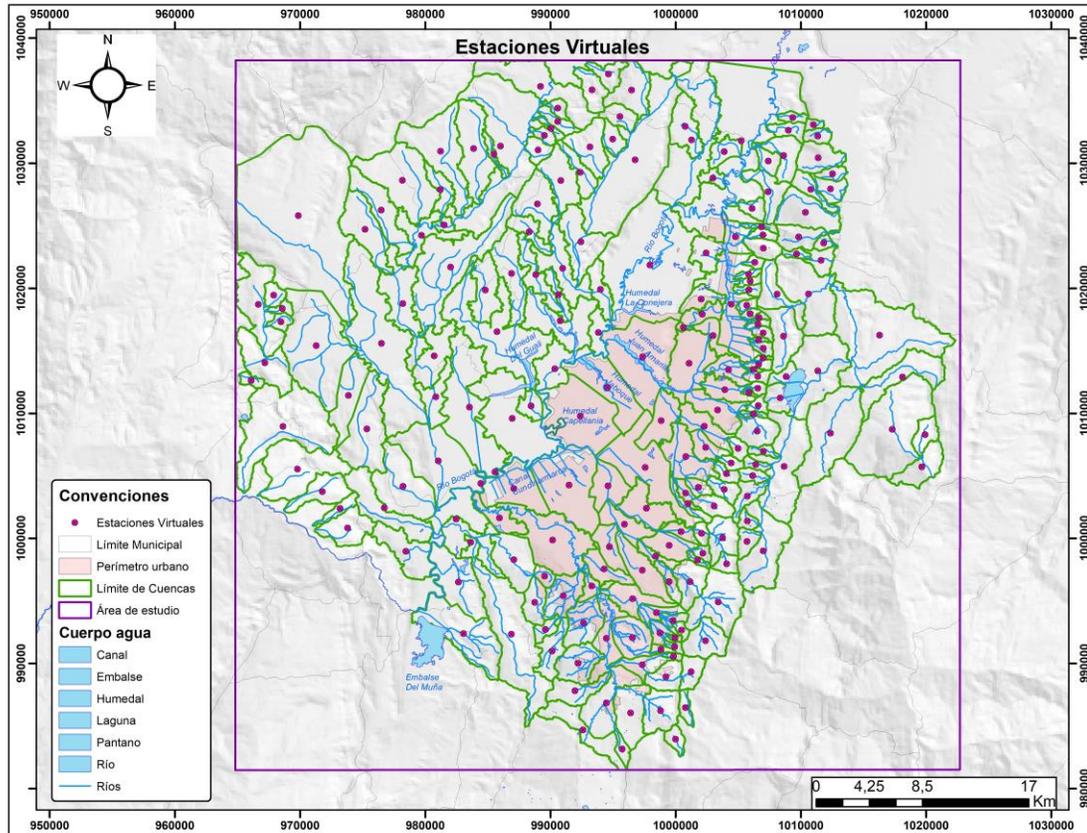


Figura 3-33 Estaciones virtuales para las subcuencas

Fuente: Javeriana, 2017

3.2.2.9 Radiación Solar

La radiación solar es un parámetro climático poco medido en la zona de estudio y en el país en general, sin embargo, existen metodologías que permiten estimar un valor mensual a partir de otras mediciones climáticas. Debido a la inexistencia de registros de radiación se optó por utilizar una metodología propuesta por Cenicafe (Guzmán, Baldión, Simbaqueva, Zapata, & Chacón, 2013), la cual utiliza los datos de brillo solar y la duración del día media mensual.

La relación entre radiación solar global diaria (RG) y la radiación solar global diaria recibida en el límite de la atmósfera (RA) está dada por:

$$\frac{RG}{RA} = \left(a + b \frac{n}{N} \right)$$

Donde n es Número de horas de sol en el sitio o brillo solar en horas y N es Máximo número de horas de brillo solar diarias astronómicamente posible, a y b son coeficientes específicos de la regresión múltiple.

Tabla 3-17. Coeficientes de regresión para índices de radiación (RG/RA) y brillo solar (n/N) medios mensuales para agrupaciones geográficas y todas las estaciones en la zona cafetera colombiana.

Agrupación	Estación	a	L.I.	L.S.	b	L.I.	L.S.	R^2
Zona norte	Pueblo Bello, San Antonio, El Rosario	0,167	0,146	0,187	0,696	0,65024	0,74222	0,834
Zona central andina	Rafael Escobar, Santa Helena, Albán, La Catalina, Maracay, Paraguaicito, La Sirena	0,234	0,224	0,243	0,497	0,47142	0,52285	0,776
Cordillera Oriental	Santa Bárbara, Jorge Villamil	0,249	0,230	0,269	0,515	0,43759	0,49032	0,675
Zona sur	La Trinidad, Manuel Mejía, Ospina Pérez	0,253	0,243	0,263	0,464	0,44987	0,58015	0,871
Única	Todas	0,221	0,214	0,228	0,553	0,534	0,572	0,790

L.I. = Límite inferior; L.S. = Límite superior

Fuente: Cenicafé, 2013

Teniendo en cuenta la Tabla 3-17 se tiene que la ecuación para la región del estudio es:

$$RG/RA = 0,234 + 0,497 (n/N)$$

Los valores de la radiación solar global diaria recibida en el límite de la atmósfera dependen de la latitud y de la época del año. Este parámetro se encuentra tabulado de acuerdo al mes y la latitud de la zona que se desee estudiar (Tabla 3-18).

Tabla 3-18. Radiación solar extraterrestre

Lat °	HEMISFERIO NORTE R_a en $MJ \cdot m^{-2} \cdot día^{-1}$											
	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Norte												
0.0	36.1	37.6	38.0	36.8	34.8	33.4	33.8	35.5	37.1	37.4	36.5	35.7
2.0	35.3	37.1	37.9	37.1	35.4	34.2	34.5	36.0	37.2	37.1	35.8	34.8
4.0	34.5	36.6	37.7	37.4	36.0	34.9	35.2	36.4	37.3	36.8	35.1	33.9
6.0	33.6	36.0	37.5	37.6	36.6	35.6	35.8	36.8	37.3	36.4	34.3	33.0
8.0	32.7	35.4	37.3	37.8	37.1	36.3	36.4	37.2	37.2	35.9	33.5	32.1

Fuente: Universidad Politécnica de Madrid (Almorox, 2010)

Los valores del máximo número de horas de brillo solar diarias astronómicamente posible (N), dependen directamente de la latitud y se determinan de acuerdo a la época del año (Figura 3-34).

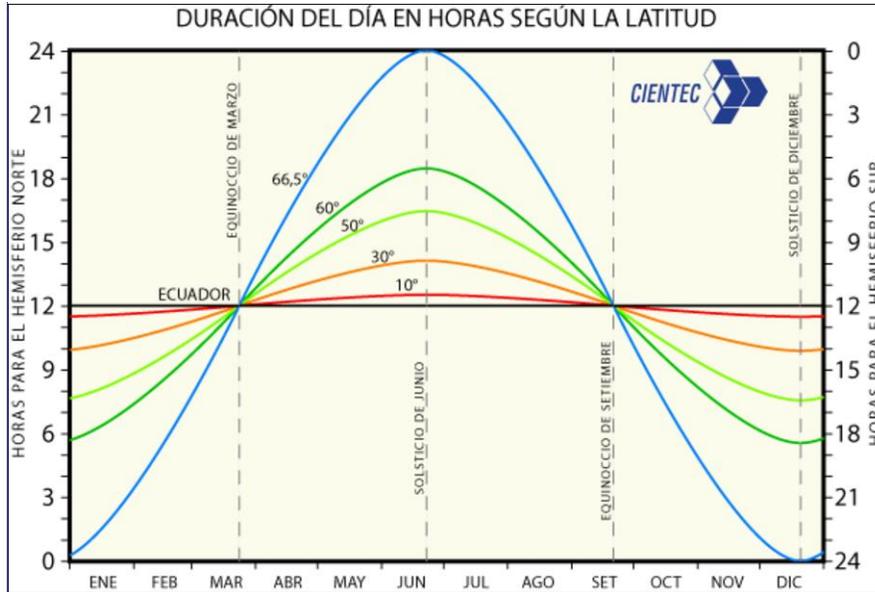


Figura 3-34 Duración del día en horas de acuerdo a la latitud

Fuente: Fundación Cientec (2007)

3.2.2.10 Punto de Rocío

El punto de rocío es la temperatura a la que empieza a condensarse el vapor de agua que se encuentra en el aire, produciendo neblina, rocío o si la temperatura es muy baja escarcha. Se estimó utilizando la metodología propuesta por el IDEAM en el atlas climático (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2010), la cual requiere datos de temperatura media y humedad relativa. En el atlas climático en el capítulo 2 se establece que:

$$PR = \frac{237.31 \ln e - 429.29943}{19.038525 - \ln e}$$

Donde PR es punto de rocío y e es la tensión de vapor, la cual se calcula por medio de la siguiente ecuación:

$$HR = (e / e_{s(t)}) \times 100$$

Donde HR es la Humedad, para extender el cálculo a las estaciones virtuales se estableció la relación entre humedad relativa y elevación. El parámetro $e_{s(t)}$ corresponde a la tensión saturante a la temperatura t . Este valor de $e_{s(t)}$ se calcula como una función de la temperatura media así:

$$e_{s(t)} = E^{1.8091 + (17.269425 t / (237.30 + t))}$$

Donde E es base de los logaritmos neperianos ($E=2.71828183$) y t la temperatura media, La cual se obtuvo mediante la elaboración de la curva del gradiente geotérmico para los doce meses

3.3 MODELO GEOLÓGICO LOCAL

Para definir las unidades hidroestratigráficas del Acuífero objeto de estudio, en el marco de este trabajo se realizó un modelo geológico 3D usando el software RockWork17. Este modelo nos permite tener una representación espacial de las diferentes formaciones que caracterizan esta cuenca intramontana. Para esto fue de gran importancia el mapa propuesto por Helmens & van der Hammen (1994) que detalla en superficie la distribución de estas formaciones y una columna tipo que interpreta la interacción de los diferentes ambientes en la cuenca. De igual manera el trabajo realizado por Torres et al (2005) es importante, debido a que limita en profundidad estos ambientes e ilustra la evolución geológica.

El modelo corresponde inicialmente al cubo delimitado por las coordenadas Xmin: 979650, Ymin: 986927, Xmax: 1009713, Ymax: 1027899 datum MAGNA Colombia Bogotá. Este presenta un área en superficie de 1247,8 Km², que el área urbana de la ciudad de Bogotá. Se definió una grilla de 250m en el eje X, 250m en el eje Y y 5m en el eje Z; para un área por celda de 62500m² (ver Figura 3-35).



Figura 3-35. Definición de la grilla del modelo geológico 3D.

Este modelo fue construido a partir de perforaciones seleccionadas previamente, filtradas por contenido de información del subsuelo detallada y confiable, todas estas tomadas de los antecedentes (CAR, SDA, UNAL, METRO DE BOGOTÁ). Se integró un total de 152 perforaciones con rangos de profundidades que van desde 32m hasta 615m. La distribución de las profundidades investigadas se observa en la Figura 3-36.

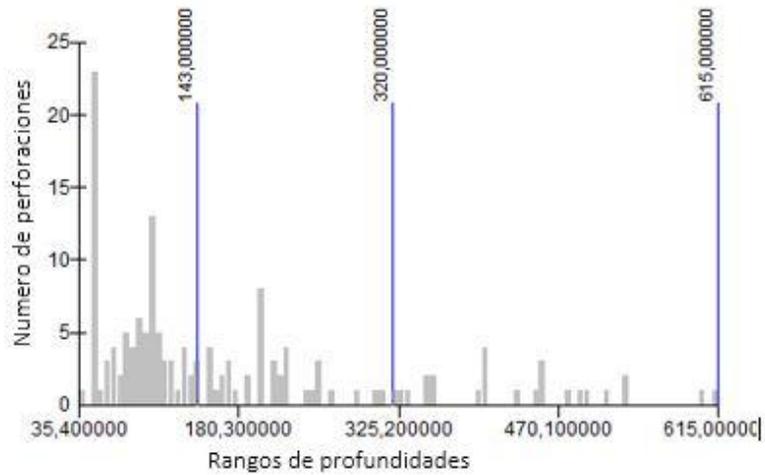


Figura 3-36 Distribución de las perforaciones en rangos de profundidad

Estas perforaciones se encuentran distribuidas en superficie como se muestran en la Figura 3-37

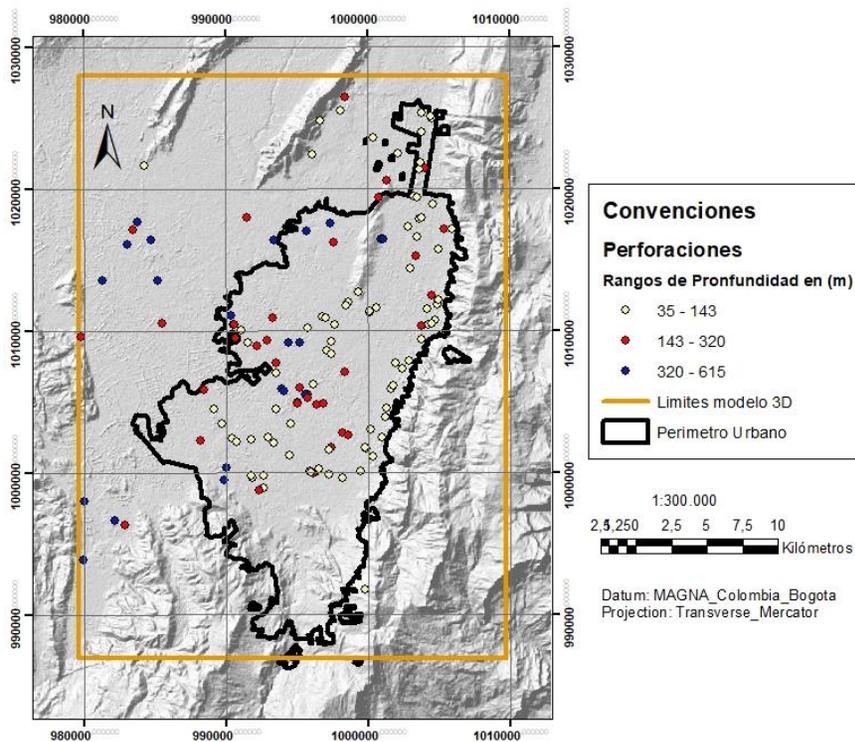


Figura 3-37. Distribución en superficie de las perforaciones usadas en el modelo 3D

Los registros litológicos de las perforaciones fueron simplificados en términos de 6 unidades litológicas principales, cada una con un valor numérico (G-Value) el cual fue usado para la correlación de las unidades lateralmente (Figura 3-38)

G-Value	Keyword	Pattern
1,0	ARCILLA	
5,0	ARENA	
4,0	GRAVA	
2,0	LIMO	
3,0	MATERIA ORGÁNICA	
6,0	ROCA	

Figura 3-38. Leyenda litológica.

Esta correlación se realizó por medio de un algoritmo integrado en el software (lateral bleeding); método usado para correlacionar litologías a través de perforaciones, teniendo en cuenta que estas sean horizontalmente continuas. Lo anterior es indicado, ya que en este modelo las unidades se encuentran no consolidadas y sin evidencias claras de accidentes geológicos que alteren la continuidad de estos. Las ventajas de este método es que reproduce correlaciones transgresivas y regresivas que son similares a lo que un geólogo dibujaría a mano, también para obtener resultados semejantes a los producidos por las fluctuaciones producidas por el nivel del antiguo lago.

Posteriormente a la correlación este modelo es filtrado por encima por la superficie topográfica y por debajo por la superficie de basamento rocoso, limitando de esta manera la correlación solo a los sedimentos no consolidados de la cuenca. Luego fue cortado con el polígono que limita el modelo hidrogeológico del presente trabajo (ver Figura 3-39).

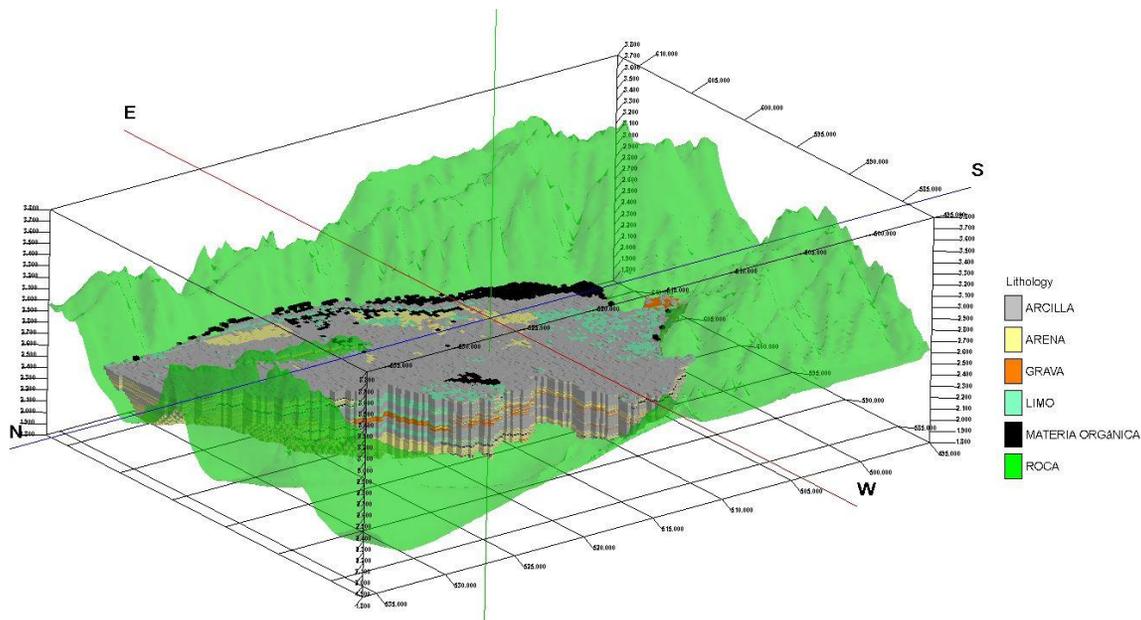


Figura 3-39. Modelo litológico 3D para el área urbana del distrito capital exagerado 7 veces en la vertical

Como resultado de esta modelación se producen porcentajes para cada unidad (Figura 3-40). Se puede entonces observar que considerando como 100% el total de sedimentos no consolidados del Neogeno-Cuaternario en el área de este trabajo, aproximadamente un 57% corresponde a Arcilla, 33% Arena, 5% Limo, 4% Grava y 1% Materia Orgánica (Turba).

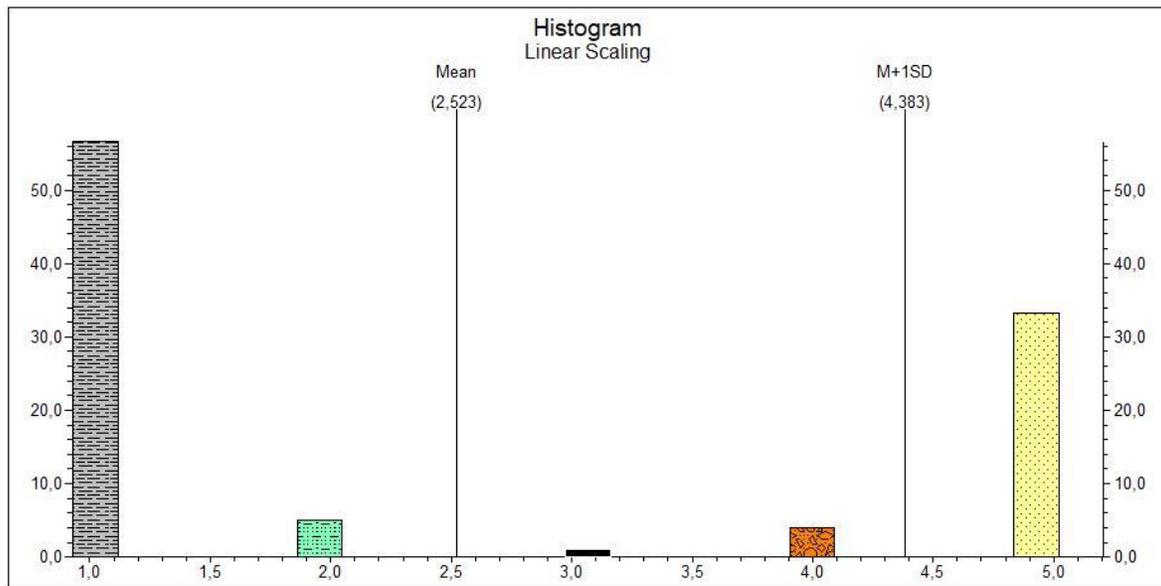


Figura 3-40. Histograma de distribución para cada uno de los diferentes materiales

Sin embargo, estos resultados podrían variar ampliamente teniendo en cuenta los criterios de descripción litológica para cada una de las perforaciones con las cuales se construyó este modelo.

Una vez construido el modelo litológico se realizaron cortes buscando identificar patrones de distribución de facies y/o ambientes que permitieran la construcción de las superficies de topes y bases para cada formación, y de esta manera construir el modelo estratigráfico (ver Figura 3-41).

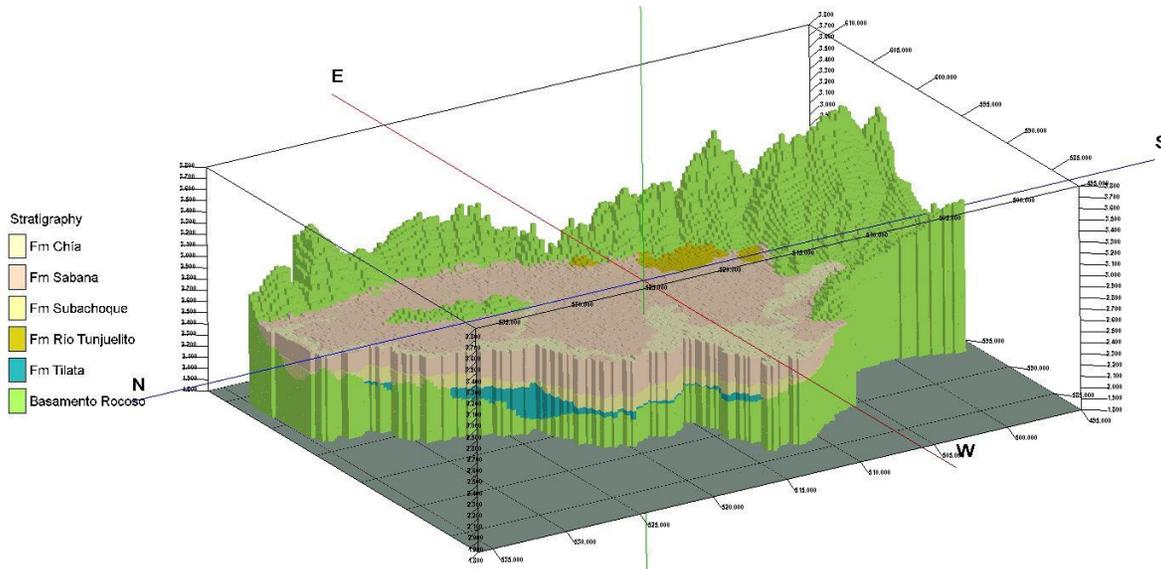


Figura 3-41. Modelo estratigráfico con exagerado 7 veces en la vertical

Es importante aclarar que estas formaciones no consolidadas deberían ser de color gris por su edad, sin embargo, con el objetivo de diferenciar estas unidades de manera clara se utilizaron los colores presentados en la columna estratigráfica propuesta por Helmens & van der Hammen (1994) para el área de la sabana de Bogotá. De igual manera aclaramos que la zona consolidada fue considerada en general como basamento rocoso sin diferenciar, dado el objetivo principal de este trabajo.

Como resultado de este modelo estratigráfico se obtiene una distribución en proporción de las formaciones (Figura 3-42).

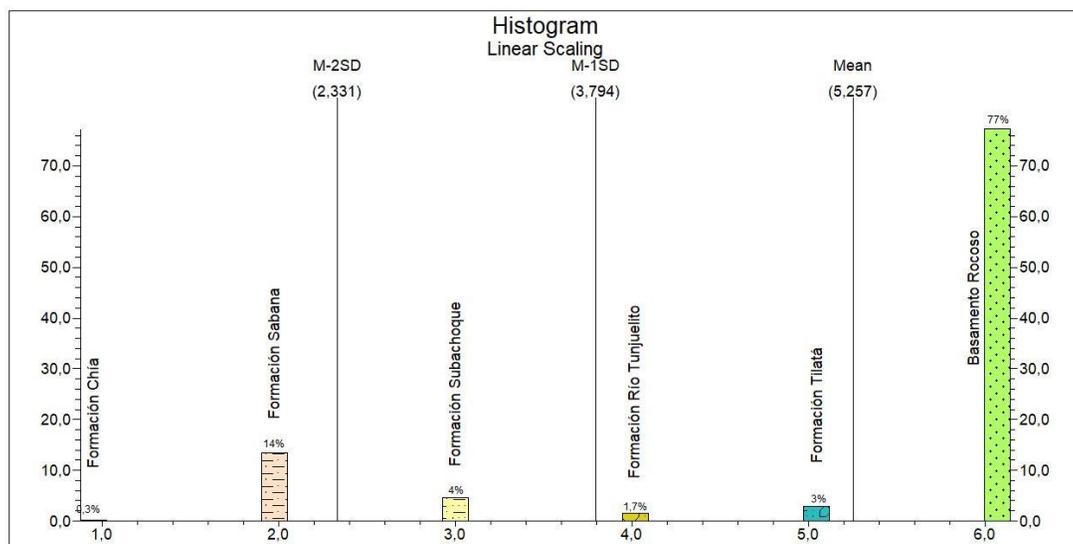


Figura 3-42. Histograma de proporción de las formaciones presentes en el área de estudio

La grafica anterior muestra que considerando como 100% el total de relleno sedimentario no consolidado, la Formación Sabana ocupa un 61%, la Formación Subachoque 17%, Formación Tiltatá 13%, Formación Rio Tunjuelito 8% y Formación Chía 1%.

A continuación, se muestran cortes geológicos exagerados 10 veces en la vertical que enseñan la distribución en profundidad de estas unidades (ver Figura 3-43).

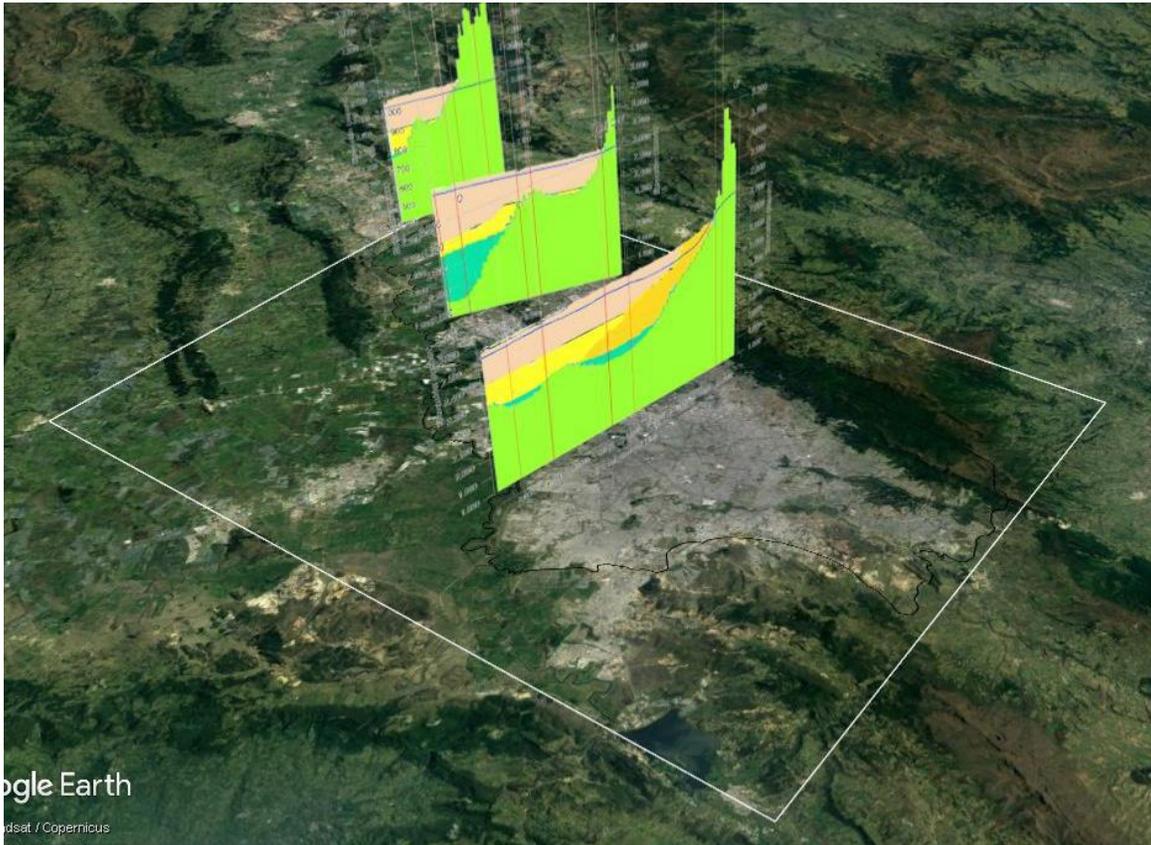


Figura 3-43 Perfiles estratigráficos G-G', J-J', O-O'; exagerados 10 veces en la vertical.

La Figura 3-43 ilustra algunos perfiles estratigráficos ubicados sobre la imagen de google earth, con una exageración vertical de 10, se puede apreciar la distribución de las formaciones en la cuenca, para lo cual fue de gran importancia el análisis de ambientes y evolución geológica propuesta por (K. Helmens, 1990) y (Torres et al., 2005). estos proponen que posteriormente a la última fase de plegamiento mayor de la cordillera hasta el Mioceno tardío, inicia la depositación de la Formación Tiltatá sobre el sustrato rocoso, esta depositación se da en el transcurso del levantamiento final de la cordillera, permitiendo de esta manera almacenar el valioso registro de la flora en forma de polen principalmente, que sustenta dicho levantamiento desde los 600msnm hasta 2600msnm. Esta sedimentación inicio en lo que parecen ser pequeñas cuencas marginales y luego hacia la parte central de la cuenca, acumulando así sedimentos de ambientes fluvio/lacustres en la base de la cuenca con espesor aproximado de 260m.

La Formación Río Tunjuelito reposa principalmente sobre el sustrato rocoso de la zona suroriental de la ciudad de Bogotá y parcialmente sobre la Formación Tilatá hacia el centro de la cuenca, con espesores aproximados de 220m correspondientes a los depósitos fluvio/glaciares del Cuaternario en forma de abanicos aluviales, acompañado de la depositación simultánea de la formación Subachoque para el desarrollo gradual de una cuenca sedimentaria grande y su ambiente es principalmente fluvio/lacustre acumulando espesores de esta última de aproximadamente 150m. Posteriormente se da la depositación de la formación sabana, formación muy especial en el objetivo de este trabajo por su espesor y extensión en el área de estudio, esta formación se fue depositando reduciendo la cuenca hacia el centro, en ambiente principalmente lacustre con espesores aproximados de 320m en el depocentro de la cuenca, esta formación es diferenciada en dos zonas principales propuestas en planta por (SDA, 2013) apoyando el concepto de (Torres et al., 2005) y (Kuhry-Helmens, 1990) que obedece al tipo de depósito lacustre y su distribución granulométrica, de igual manera contenido de materia orgánica.

3.3.1 Características Hidráulicas

Con el objetivo de determinar las propiedades hidráulicas (Conductividad Hidráulica K , Transmisividad T , Porosidad ϕ , Coeficiente de Almacenamiento S) de las diferentes formaciones geológicas, se realizó una revisión bibliográfica de la información disponible. Los informes donde se realizó modelación numérica (UNAL, 2005)(Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA, 2000a)(EAAB-JICA, 2009) usaron valores tanto obtenidos por medio de pruebas de bombeo como de la literatura. Por otro lado, el estudio hidrogeológico cuantitativo de la sabana de Bogotá (Ingeominas y CAR, 1991), presentó valores físicos para diferentes formaciones tanto del Neógeno-Cuaternario como del Terciario. En (INGEOMINAS, 2002b) se seleccionaron pozos en los cuales se habían realizado pruebas de bombeo y se contaba con los datos primarios de campo. En este estudio, estas pruebas fueron reinterpretadas aclarando que las pruebas se hicieron sin pozos de observación y que la mayoría son pruebas de corta duración. El total de pruebas analizadas fue de 61. Este estudio concluye que el acuífero de los depósitos no consolidados del Neógeno-Cuaternario presenta transmisividades entre 3 y 900 m²/día y las conductividades hidráulicas de 0.01 a mayor de 3 m/día. En la zona de almacenamiento los acuíferos son de tipo semiconfinado a confinado, con coeficientes de almacenamiento en un rango entre 1×10^{-3} y 1×10^{-7} . Particularmente en la formación Tilatá, con transmisividades entre 150 y 900 m²/día y las conductividades hidráulicas mayores de 1 m/día, es una unidad muy permeable y de alta producción. Los pozos que captan estos niveles en la cuenca del río Subachoque y en el norte de la cuenca artesiana entre las localidades de Briceño y Gachancipa producen caudales hasta los 40 l/seg. o más. Según la información recopilada y procesada en (INGEOMINAS, 2002a), los depósitos inconsolidados de la parte occidental de la cuenca artesiana limitada por la Falla de Madrid (subcuencas de los ríos Bojacá y Subachoque) son menos (Nosotros consideramos que hay un error de escritura y que es lugar de ser menos es más) permeables que los de la parte nororiental y oriental hasta la Falla El Dorado. En el primer caso, las transmisividades en general no superan 10 m²/día y las conductividades hidráulicas son del orden 0,01 m/día. Desplazándose hacia el oriente se observa un incremento paulatino de los parámetros hidráulicos llegando en el valle del río Bogotá a los valores de las transmisividades hasta los 100 m²/día (valores más comunes entre 30 y 60 m²/día) y las conductividades hidráulicas entre 0.1 y 0.5 m/día. En este mismo estudio, para el complejo acuitardo del paleógeno, se comenta que sus transmisividades, que

en general no superan los 5 m²/día, y las capacidades específicas menores 0.05 l/seg./m los caracterizan de baja permeabilidad y poca productividad. Es de aclarar que para nosotros, el Complejo Paleógeno resulta conformado principalmente por materiales que se comportan como acuitardos, excepto por la Formación Guaduas que puede considerarse como un acuífero muy pobre y la Formación Cacho que se considera como un acuífero de escasa importancia hidrogeológica (ver Anexo 4 para mayor detalle). Para este complejo, las transmisividades no superan generalmente los 20.4 m²/día y las capacidades específicas son menores a 0.008, por lo tanto, se asocian a unidades de baja conductividad hidráulica y baja productividad. En (INGEOMINAS, 2002a) se habla que los caudales de los pozos que captan las capas de los acuíferos confinados (subcuenca del río Subachoque, zona del Distrito Capital) pocas veces superan 1 l/s. Se dice también que las areniscas que componen el horizonte acuífero Cacho son de alta permeabilidad. Su valor promedio de transmisividad es de 200 m²/día, en algunos casos llega hasta 450 m²/día y la conductividad hidráulica varía de 0.3 a 3 m/día. Este horizonte acuífero en general es de tipo confinado al estar cubierto en la mayor parte del área por depósitos arcillosos. La producción de los pozos va desde 0.5 hasta 20 l/s. Para el complejo acuífero Guadalupe (INGEOMINAS, 2002a), comenta que los valores de la transmisividad varían entre 5 y 600 m²/día, la conductividad hidráulica entre 0.02 y 2.0 m/día, la capacidad específica entre 0.05 y 5.5 l/s/m y los coeficientes de almacenamiento más comunes se encuentran en el rango 1x10⁻⁴ y 1x10⁻⁷. El rendimiento individual de los pozos en promedio es de 20-25 l/s.

Por nuestro lado, se analizaron los valores de las propiedades hidráulicas incluidas en la base de datos, tratando de asignarlos a una determinada formación mediante la profundidad del pozo, información de los filtros, descripción litológica, etc. Los resultados son presentados en la Tabla 3-19.

Tabla 3-19. Propiedades físicas de las formaciones geológicas de la zona de estudio.

Tabla 3-20. Propiedades físicas de las formaciones geológicas de la zona de estudio.

Formación Geológica		Características Hidrogeológicas	Propiedades
Qdp	Depósitos de pendiente	Acuíferos de extensión local, discontinuos, libres a confinados. Conformados por limos a arenas con bloques, depósitos de abanicos aluviales y sedimentos lacustrinos, todos de origen local. De moderada a alta importancia hidrogeológica	Espesor máx. (m): 30*
Qch1	Chia	Acuífardo de extensión local conformado por arcillas de inundación, arcillas orgánicas/diatomíticas (Qch1), limos fluviales (Qch2), conforman una cobertera delgada de limos fluviales sobre gravas de la formación Tunjuelo (Qch3). Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 10
Qch2			
Qch3			
Qsa1	Sabana	Acuífardo de extensión local, conformado por arcillas lacustres. Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 320
Qsa2	Sabana	Acuífero multicapa de extensión regional, conformado por arcillas orgánicas, turbas, arcillas arenosas y arenas (arcillosas) intercaladas. De baja importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 30-204* K(m/d): 1-4* Espesor máx. (m): 320
Qsu	Subachoque	Acuífero multicapa de extensión regional, conformado por arcillas arenosas, arcillas orgánicas y turbas alternando con arenas arcillosas o con arenas arcillosas y gravas.	T(m ² /d): 7-160* K(m/d): 2-8* Espesor máx. (m): 150
Qsm	San Miguel	Acuífero de extensión local, confinado. Conformado por arcillas (limo/arenosas) caolínicas abigarradas y arenas arcillosas que a menudo contienen clastos subangulares muy meteorizados, que alternan con arcillas orgánicas, arenas y gravas. De poca importancia hidrogeológica	Espesor máx. (m): 15*

Qrtsa	Río Tunjuelito	Acuífero de extensión local, libre a confinado. Conformado por secuencias de gravas con intercalaciones de arenas arcillosas, arcillas, arcillas orgánicas y arcillas turbosas; las gravas pueden mostrar gradación, los cantos son redondeados con diámetros hasta de 40 cm. De moderada importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 220
N2t	Tilatá	Acuífero de extensión regional, confinado a semiconfinado, conformado por cantos de areniscas o limolitas en matriz arcillo - limosa e interestratificaciones de areniscas conglomeráticas y arcillolitas grises con presencia de lignito en su parte media, de la formación Tilatá. Conductividad hidráulica baja a media. De moderada importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 5.35-870 K(m/d): 0.08 - 6.6 S: 0.0025 CE(L/s/m): 0.6 - 1.5 Q(L/s): 0.1-41 Espesor máx. (m): 200
Tma	Marichuela	Depósitos de flujo torrencial (gravas hasta bloques redondeados en matriz arcillosa) o depositos de flujo gravitacional (fragmentos de roca hasta bloques subangulosos en matriz arenosa), alternando con sedimentos fluviales/lacustres (gravas, arenas compactas y arcillolitas(orgánicas)), colores rojos, localmente con influencia tectónica. espesor conocido 40m. De moderada importancia hidrogeológica	
Trm	Restos de meteorización de areniscas del Grupo Guadalupe	Acuífero de extensión regional, confinado. Conformado por bancos de areniscas desintegradas rodeadas por grandes concentraciones de arcillas caoliníticas limosas y arenosas, con intensos colores rojizos. De moderada importancia hidrogeológica.	K(m/d): 2-8*

Tiu	Usme	Acuitardo de extensión local. Conformado por lodolitas grises claras, con esporádicas intercalaciones de areniscas de cuarzo y feldespato de grano fino. El miembro superior compuesto por arcillolitas limosas varicoloreadas con intercalaciones de areniscas de grano fino a medio. Al tope de la formación aparecen capas de lignito y restos de materia orgánica. Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 300
Tir	Regadera	Acuífero de extensión local, restringido a zonas fracturadas, confinado a semiconfinado, conformado por areniscas de tamaño medio a grueso y conglomerados con intercalaciones de arcillolitas. Conductividad hidráulica baja. De poca importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 9.6 K(m/d): 0.32 CE(L/s/m): 0.005-0.07 Q(L/s): 0.06-4 Espesor máx. (m): 750
Tib	Bogotá	Acuífero de extensión regional. Conformado por arcillolitas abigarradas, predominantemente rojas, con intercalaciones de areniscas verdosas friables de grano fino que gradan a limolitas y arcillolitas limosas, El espesor de la unidad es 1095 m. Sin importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 1090
Tic	Cacho	Acuífero pobre confinado a semiconfinado de extensión regional, conformado por areniscas de grano fino a grueso de color pardo a blanco y rosado, friables, con estratificación cruzada hacia la base de la unidad. Presentan intercalaciones con capas delgadas a medias de arcillas abigarradas. Esta unidad arenosa se destaca por expresiones de relieve formando crestones. De poca importancia hidrogeológica.	T(m ² /día)=20.4*** CE(L/s/m)= 0.08*** Espesor máx. (m): 172
Tkgs	Guaduas conjunto superior	Acuífero pobre de extensión regional, discontinuo, conformado por secuencias de arcillolitas con	T(m ² /d): 2.13-20.4 S: 1.16E-3 - 7.2E-3 CE(L/s/m): 0.008

Tkgm	Guaduas conjunto medio	intercalaciones de areniscas y mantos de carbón. Generalmente de poca importancia hidrogeológica	Q(L/s): 0.5-4 Espesor máx. (m): 1100
Tkgi	Guaduas conjunto inferior		
Ksglt	Labor y Tierna	Acuífero de extensión regional, confinado, conformado por areniscas blancas y pardo amarillentas, cuarzosas, friables con intercalaciones de capas delgadas de arcillolitas y limolitas. En los cerros occidentales y al sur de la ciudad presenta un afloramiento presentando un comportamiento de acuífero libre estas zonas. De moderada importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 16-360 K(m/d): 1-8 S: 5.9E-3 - 2.5E-4 CE(L/s/m): 0.15 - 5 Q(L/s): 0.3-33 Espesor máx. (m): 600
Ksgp	Plaeners	Acuífero de extensión regional, restringido a zonas fracturadas, confinado a semiconfinado, conformados por una sucesión de arcillolitas, limolitas silíceas y liditas, con fracturamiento en las dos direcciones. Conductividad hidráulica baja. De poca importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 9.6 ** K(m/d): 0.32** CE(L/s/m): 0.05-0.07 Q(L/s): 0.06-4 Espesor máx. (m): 100
Ksgd	Arenisca Dura	Acuífero de extensión regional, restringido a zonas fracturadas, confinado a semiconfinado, conformado por una sucesión rítmica de bancos gruesos de areniscas grises, lutitas y arcillolitas. Hacia la parte superior se hallan limolitas silíceas de la Formación Arenisca Dura. De moderada importancia hidrogeológica.	T(m ² /d): 22-356 K(m/d): 0.8 CE(L/s/m): 0.08 Q(L/s): 0.5-4 Espesor máx. (m): 420
Ksch	Chipaque	Acuífero de extensión regional. Conformado por arcillolitas arenosas y arcillolitas carbonosas con intercalaciones limolíticas y niveles de liditas. Se presentan intercalaciones de areniscas cuarzosas de grano fino y muy fino glauconíticas y fosfáticas. De nula importancia hidrogeológica.	Espesor máx. (m): 1027

*Parámetros hidráulicos obtenidos del mapa hidrogeológico sector Tibitó - Salto de Tequendama. Ingeominas - CAR.(1991) * Valores obtenidos de la base de datos de pozos. PUJ-SDA (2017). ** Valores puntuales. ***Valores obtenidos de Modelo Hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá, (Ingeominas 2002).*

Es de aclarar que la mayoría de los datos de la tabla anterior en un gran porcentaje son recopilados presentando en algunos casos un rango de variabilidad. Este rango no necesariamente puede ser representativo del comportamiento hidráulico promedio de la unidad a la que haga referencia.

3.3.2 Caracterización Hidrogeoquímica

Para la realización de la caracterización geoquímica de las aguas subterráneas se usaron los datos consignados en la base de datos. Las medidas tomadas abarcan tanto la zona consolidada como no consolidada. El análisis se realizó teniendo presente las unidades hidrogeológicas descritas en XXXX y la localización de los pozos en donde se concluye que la explotación se da en los sedimentos cuaternarios y en el grupo Guadalupe.

Es de resaltar que como se comenta en Ingeominas (2001), el grupo Guadalupe por su naturaleza fracturada, discontinua y por la tectónica en forma de cuñas levantadas, determinar su sistema de flujo es complejo y como se habla tanto en ese informe como en este documento, se evidencia que el flujo proviene de las partes altas y montañosas hacia el centro de la cuenca y hacia el centro de la sabana. Esto genera tiempos de tránsito largos del orden de los miles de años que generan procesos de intercambio catiónico complejos. Por otro lado, su arquitectura de fallas puede producir flujos verticales volviendo el problema más complejo con las mezclas de aguas.

A continuación, se presenta la caracterización de las aguas subterráneas en la zona de estudio iniciando con sus características principales (pH, T, CE), luego analizando el comportamiento de los cloruros con el objetivo de poder obtener un valor de recarga y finalmente con la identificación de los grupos de las aguas subterráneas con su distribución espacial.

3.3.2.1 pH

En la Figura 3-44 se presenta la distribución espacial de los valores del pH medidos en los pozos de agua subterránea localizados en la zona de estudio. Los valores hacia pH ácidos son representados en tonalidades azules mientras que los pH básicos son representados con tonalidades ocres. El valor más ácido (4.6) fue medido en el pozo Petco el cual tiene una profundidad de 115 metros y que capta ocupando un espacio en el no consolidado y localizado al sur de la ciudad. Este valor no hace parte de la tendencia típica de los pozos que se encuentran en esta zona. El valor más básico (8.6) se localiza al nororiente de la ciudad. De nuevo, este valor no es representativo de los valores de la zona. La distribución espacial del muestreo muestra que los valores entre 5.6 a 8.5 se encuentran dispersos por todo el dominio. Las zonas donde se tienen los máximos descensos del nivel no presentan ninguna relación con los valores de pH, a excepción de la zona sur donde se encuentra una concentración de pH bajos

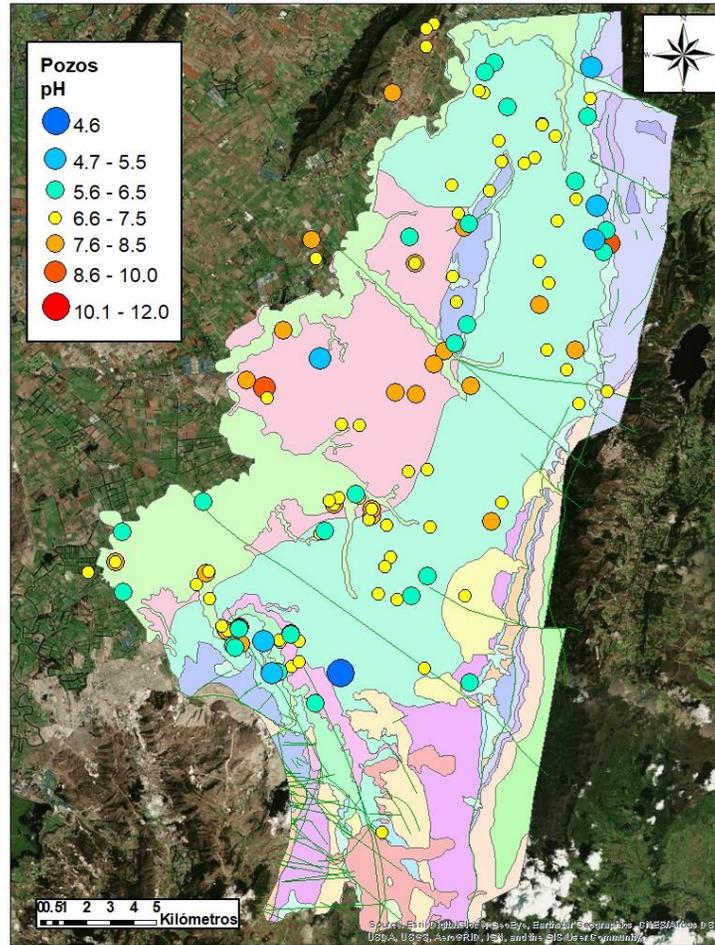


Figura 3-44. Distribución espacial de los valores de pH medida en los pozos de agua subterránea para la zona de estudio.

3.3.2.2 Temperatura

La Figura 3-45 presenta la distribución espacial de la temperatura medida en los pozos de agua subterránea en la zona de estudio. La temperatura en el piedemonte y en la zona entorno a esta se mantiene entre los 18°C - 20°C, presentándose un aumento hacia el occidente. Esto debido a que la captación se hace en pozos más profundos. Al sur de la ciudad se tienen dos puntos con temperaturas altas (Carboquímica N4, 34.8°C y Lafayette 27.2°C). Estos puntos coinciden con las mayores explotaciones y los mayores descensos del nivel. Por otro lado, al norte de la ciudad se tienen valores altos de temperatura en el club los Lagartos asociados a un flujo termal ascendente por la falla río Juan Amarillo.

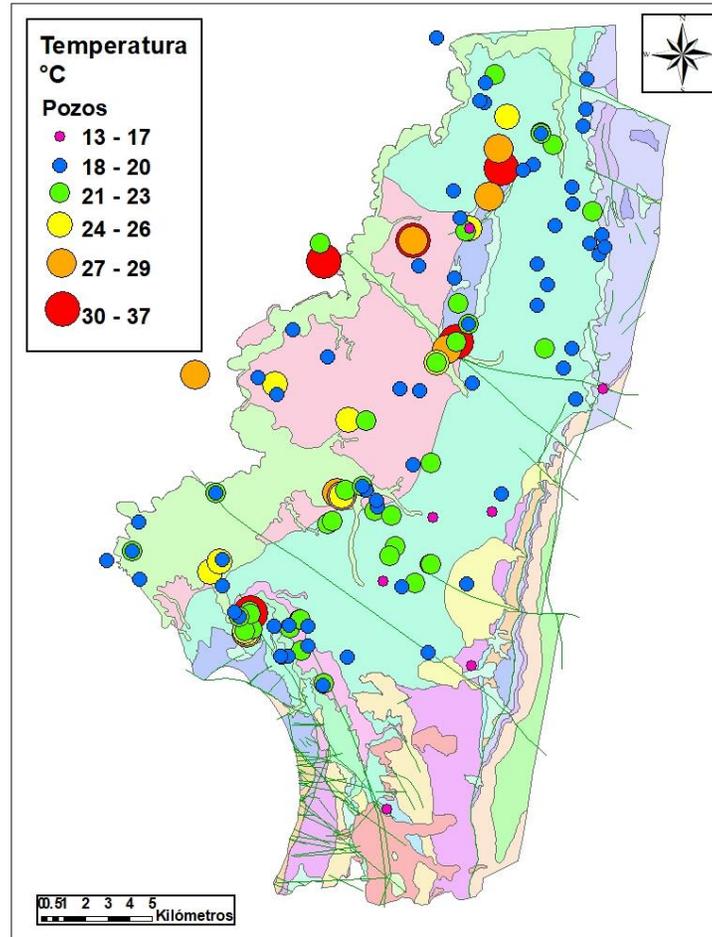


Figura 3-45. Distribución espacial de los valores de Temperatura medida en los pozos de agua subterránea para la zona de estudio.

3.3.2.3 Conductividad Eléctrica CE

La Figura 3-46 presenta la distribución espacial de la conductividad eléctrica (CE), medida en los pozos de agua subterránea en la zona de estudio. Los valores de CE son más bajos (entorno a $20\mu\text{S}$) en las zonas de piedemonte, presentando un aumento (entorno a los $1850\mu\text{S/cm}$) hacia el oeste de la cuenca. Este comportamiento de la CE es típico de zonas donde el agua de recarga va teniendo un enriquecimiento producto del intercambio catiónico. Básicamente el aumento de la salinidad con el paso del tiempo se da porque el agua disuelve o altera los minerales que encuentra en su recorrido (si tiene un tiempo suficiente para ello), hasta que alcanza el tope marcado por la constante de equilibrio correspondiente. Por lo tanto, ya no disolverá más ese mineral, continuará disolviendo otros minerales con una constante más elevada hasta que de nuevo alcance el equilibrio y así sucesivamente. En nuestra zona de estudio el agua de lluvia contiene HCO_3^- que reacciona en su recorrido con los minerales de la formación liberando sulfatos y transportando los cloruros que el

agua lleva en suspensión, produciendo un aumento de la CE. El límite de solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que, a su vez, son menos solubles que los cloruros. Por tanto, primero se alcanza el tope para los bicarbonatos, después (raramente) para los sulfatos, y finalmente (casi nunca) para los cloruros.

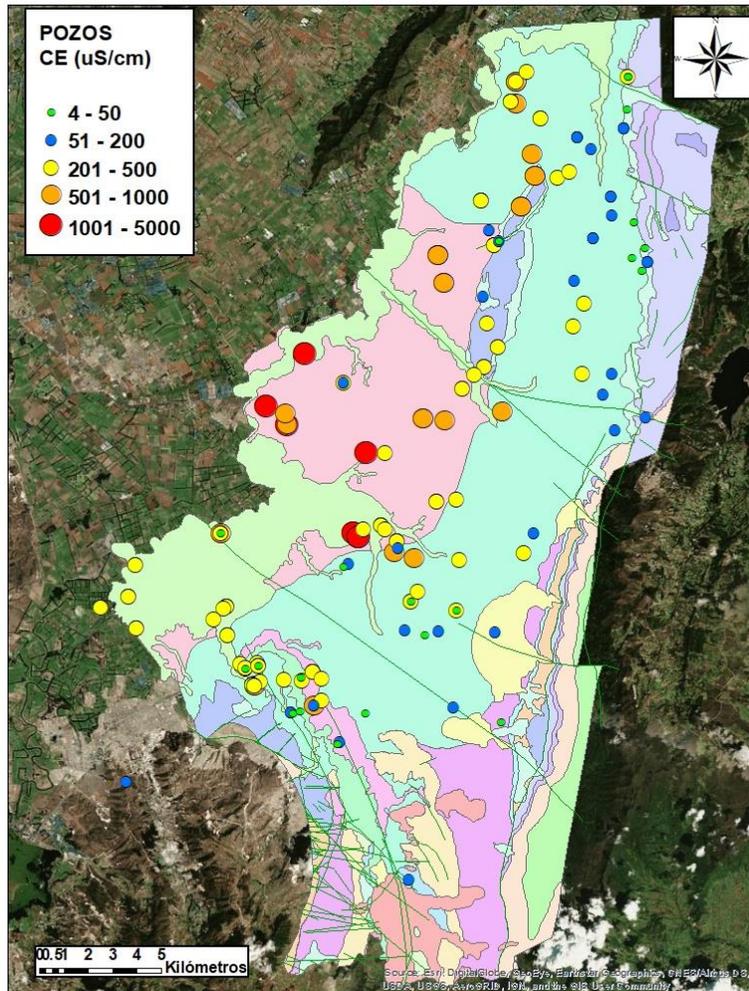


Figura 3-46. Distribución espacial de los valores de Conductividad Eléctrica medida en los pozos de agua subterránea para la zona de estudio.

3.3.2.4 Cloruros

Se analizó el comportamiento del Cl^- medido en las aguas subterráneas de los pozos localizados en la zona de estudio. Los datos de cloruros se tomaron de las siguientes campañas: a) (EAAB-JICA, 2009); b) (EAAB-JICA, 2003); c) (Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA, 2000b) y d) (INGEOMINAS, 2002a).

De la Figura 3-47, se puede observar que no es claro un comportamiento espacial de las concentraciones. Tampoco es claro un enriquecimiento en Cl^- a medida que el agua subterránea va avanzando hacia el interior de la cuenca de la Sabana de Bogotá (esto bajo el supuesto que las líneas de flujo avanzan desde los cerros orientales hacia el occidente). Esta falta de enriquecimiento en la dirección del flujo sugiere que los materiales geológicos de la sabana de Bogotá no son fuentes importantes de este elemento. Los valores altos de Cloruros, probablemente son por actividades antrópicas que están influyendo en los valores y en que se genere esa especie de aleatoriedad espacial en los datos.

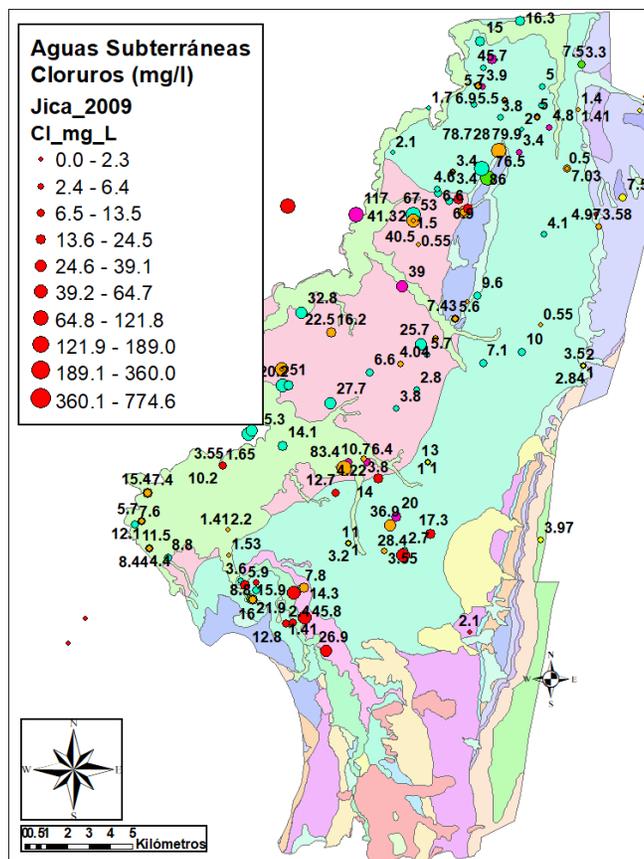


Figura 3-47. Representación espacial de los cloruros para las diferentes campañas.

Se presenta la escala de (EAAB-JICA, 2009) en puntos rojos. Esta escala es la misma para todas las medidas presentadas. (EAAB-JICA, 2003 puntos ocre); (Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA, 2000) puntos azules y (Ingeominas, 2001) puntos púrpuras y verdes.

La Figura 3-48, presenta las campañas de campo discriminadas por tiempo a) (EAAB-JICA, 2009); b) (EAAB-JICA, 2003); c) (Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA, 2000a) y d) (INGEOMINAS, 2002a). Se ha realizado esta discriminación para tratar de dilucidar un patrón de comportamiento espacio-temporal el cual sigue generando muchas dudas. La campaña de (EAAB-JICA, 2009) que es la que cuenta con

una mayor cantidad de datos parece indicar una relación entre la mayor extracción y las concentraciones más altas de Cl⁻. Esto puede generar falsos resultados a la hora de evaluar metodologías como la de la estimación de la recarga mediante el balance de masas de cloruros (CMB). Por este motivo se decidió usar los datos que están más cerca de las estaciones donde se midió el cloruro del agua de lluvia.

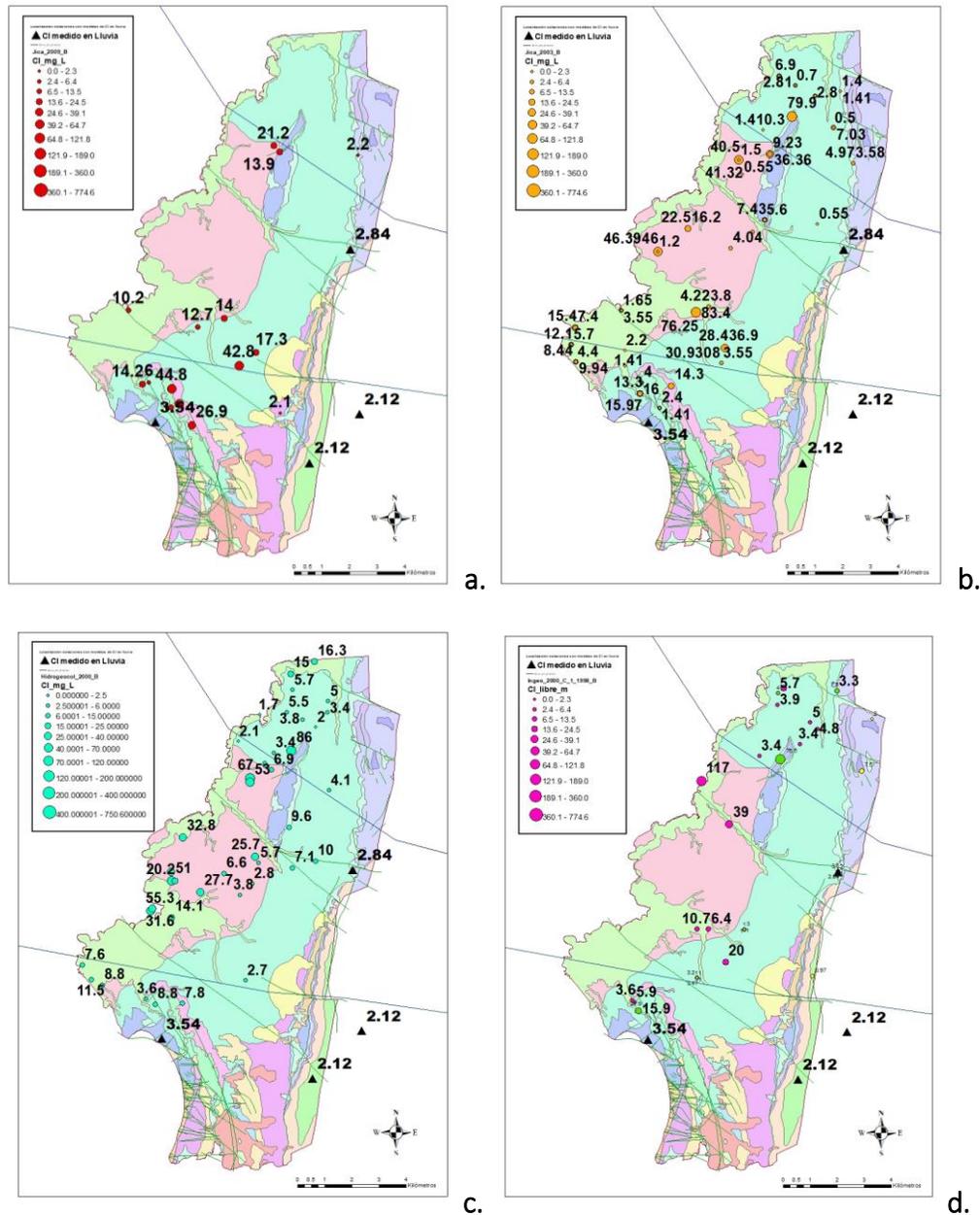


Figura 3-48. Medidas de Cl⁻ en las campañas de a) Jica 2009; b) Jica 2003; c) Hidrogeocol 2000 y d) Ingeominas 1998-2000

3.3.2.5 Identificación de los grupos de aguas subterráneas y su distribución espacial.

De acuerdo a la base de datos recopilada, 726 muestras contienen algún tipo de información hidrogeoquímica. De total de muestras, 627 son aptas para realizar el respectivo balance iónico (análisis apoyado con la herramienta AquaChem). De este grupo, 92 muestras fueron rechazadas y 533 fueron incluidas (85%). El criterio de aceptación o rechazo está dado por un error menor al 40% de electroneutralidad en cada una de las muestras (ver Figura 3-49). Aunque este porcentaje está muy por encima de lo recomendado (5%), se decidió, previo consejo de la SDA, aumentarlo para poder tener una muestra representativa en toda la zona de estudio. Se hizo un análisis de este aumento en los resultados arrojados mediante los diagramas de Piper encontrándose que las muestras con electroneutralidad superiores al 5% hacen parte de la tendencia general de los datos. Por otro lado, mediante el uso del software PHREEQC (USGS), se analizaron las muestras con contenidos altos de iones minoritarios con el fin de analizar que implicación podía tener en el balance iónico. Las muestras con contenidos altos de Fe presentaron errores superiores al 33%. Cambios en la concentración de este ion, hacían variar el error entre un 12% a un 51%. Este resultado da indicios de la importancia de tener medias de iones minoritarios donde se presume se puedan tener.

Respecto a la electroneutralidad entre depósitos, las muestras recolectadas de los pozos cuya profundidad máxima llega al depósito consolidado, presentan un error menor en comparación con los depósitos cuaternarios en los cuales se evidencia una tendencia a la electroneutralidad negativa.

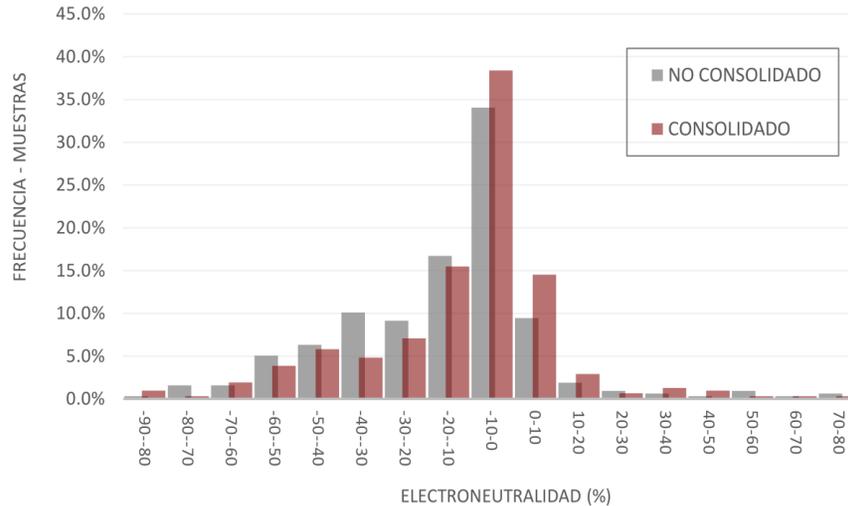


Figura 3-49. Histograma de frecuencias de electroneutralidad

Una vez depurados los valores que cumplen con un error aceptable del balance iónico (40% o menos de electroneutralidad) se identificaron para los depósitos consolidados y no consolidados, los diferentes tipos de agua mediante el software AquaChem (ver Tabla 3-21). Este análisis es realizado identificando la ubicación de los puntos desde los cerros o pie de monte, hasta los valles de la cuenca de la Sabana de Bogotá.

Tabla 3-21. Tipos de agua identificados en los depósitos consolidados y no consolidados

DEPÓSITO	Zona Centro – Valles de la cuenca de la Sabana de Bogotá	Pie de monte y cerros de la cuenca Sabana de Bogotá	Toda la cuenca
NO CONSOLIDADO	Na - NH ₄ - HCO ₃ - Cl Na - NH ₄ - HCO ₃ – SO ₄	Ca - HCO ₃ Ca - HCO ₃ – Cl Ca - HCO ₃ – SO ₄	Ca-Na
	Na - HCO ₃ Na - HCO ₃ - SO ₄ Na - HCO ₃ - Cl	Na – Cl Na – Cl – HCO ₃ Na – Cl – SO ₄	Mg – Ca Mg - Na
	Na - Ca - HCO ₃ Na - Ca - Cl		
CONSOLIDADO	Na - HCO ₃ – Cl Na - HCO ₃ – Cl – SO ₄	Na – K – Mg Na - K – HCO ₃ Na – K - Ca	Mg - Ca
		Na – Ca – Cl Na – Ca – SO ₄ Na – Ca – Mg	Na - Ca – HCO ₃ – SO ₄ Na - Ca – HCO ₃ – Cl
		Ca – Na – Cl Ca – Na – HCO ₃ Ca – Na – Mg Ca – Na – SO ₄	Na – HCO ₃ Na – HCO ₃ – SO ₄
		Ca – HCO ₃ Ca – HCO ₃ – SO ₄ Ca – HCO ₃ – NO ₃ Ca – HCO ₃ – CO ₃ Ca – HCO ₃ – Cl	

De las 263 muestras seleccionadas para los depósitos cuaternarios, los tipos de agua encontrados en el piedemonte son aguas principalmente de tipo bicarbonatadas cálcicas y en menor medida cloruradas y sulfatadas sódicas (ver Figura 3-50). Por otro lado, en las zonas de los valles predominan aguas de tipo bicarbonatadas sódicas y en menor medida bicarbonatadas cálcicas. Las aguas bicarbonatadas sódicas son extraídas en promedio a 160m mientras que en los cerros se extraen a 75m de profundidad. Las concentraciones medias de los iones mayoritarios de las muestras del depósito no consolidado están encabezadas por el bicarbonato (295 meq/l) y por el sodio (58.5 meq/l).

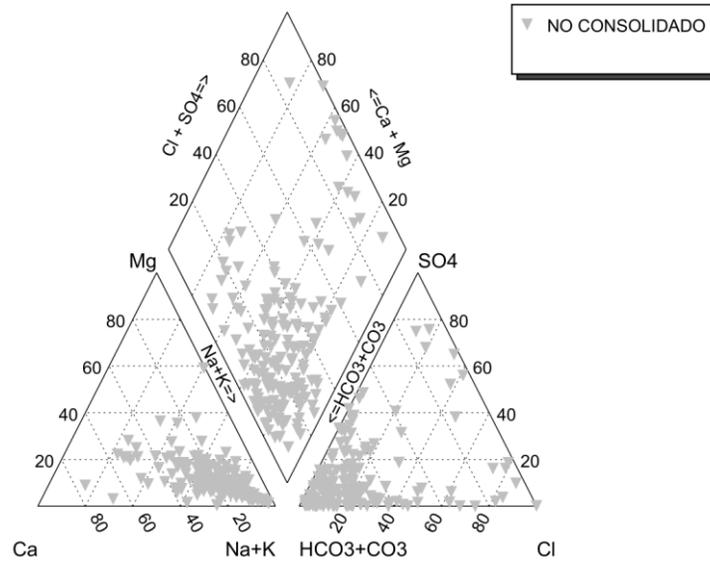


Figura 3-50 Diagrama de Piper (depósito no consolidado)

Para el caso de los depósitos consolidados (270 muestras seleccionadas) en las zonas de piedemonte y cerros predominan las aguas de tipo bicarbonatadas cálcicas y en menor medida cloruradas, cloruradas cálcicas y sulfatadas. En la zona de los valles, al igual que en el caso de los depósitos cuaternarios, predominan las aguas de tipo bicarbonatadas sódicas (ver Figura 3-51). Estas últimas son extraídas en promedio a 253m, mientras que en pie de monte y cerros a 168m de profundidad. Las concentraciones medias de los iones mayoritarios de las muestras del depósito consolidado están encabezadas por el bicarbonato (105.9 meq/l) y por el sodio (28.27 meq/l).

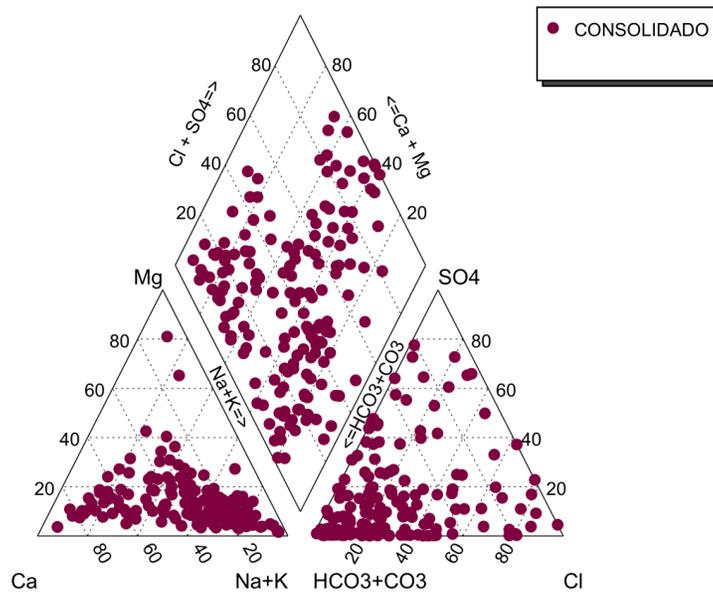


Figura 3-51 Diagrama de piper - depósito consolidado

Para los depósitos cuaternarios, se realizó una sub-agrupación (Clase A, B, C y D ver Figura 3-52) apoyada en el diagrama de Piper y en el esquema de Schoeller desarrollado en la Figura 3-57. La clase A, ubicada en los valles de la cuenca y algunos puntos en el pie de monte (135 muestras de tipo A) evidencia una trayectoria de aguas cloruradas a bicarbonatadas sódicas. En la clase B, concentrada en el valle de la cuenca (43 muestras), la trayectoria es de sulfatadas sódicas a bicarbonatadas sódicas. En la clase C (19 muestras) de magnésicas a bicarbonatadas sódicas, y en la clase D (22 muestras) aguas bicarbonatadas sódicas sin ningún tipo de trayectoria definida.

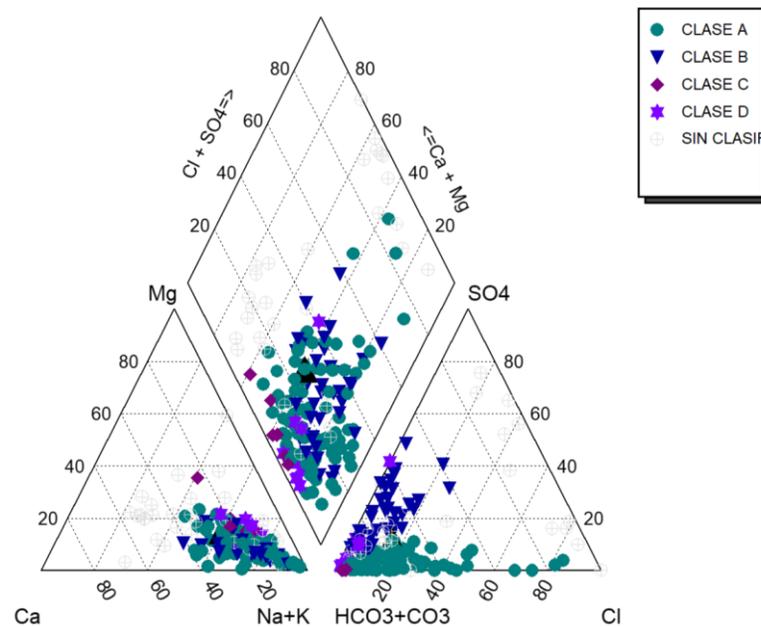


Figura 3-52. Diagrama de Piper - Clasificación grupos A, B, C, y D

El conjunto de grupo analizado en planta y en profundidad no evidencia ninguna correlación concisa (ver Figura 3-53). Es necesario analizar estos grupos con las diferentes unidades geológicas para encontrar algún tipo de correlación, tarea a realizar en la etapa subsecuente a la presente entrega.

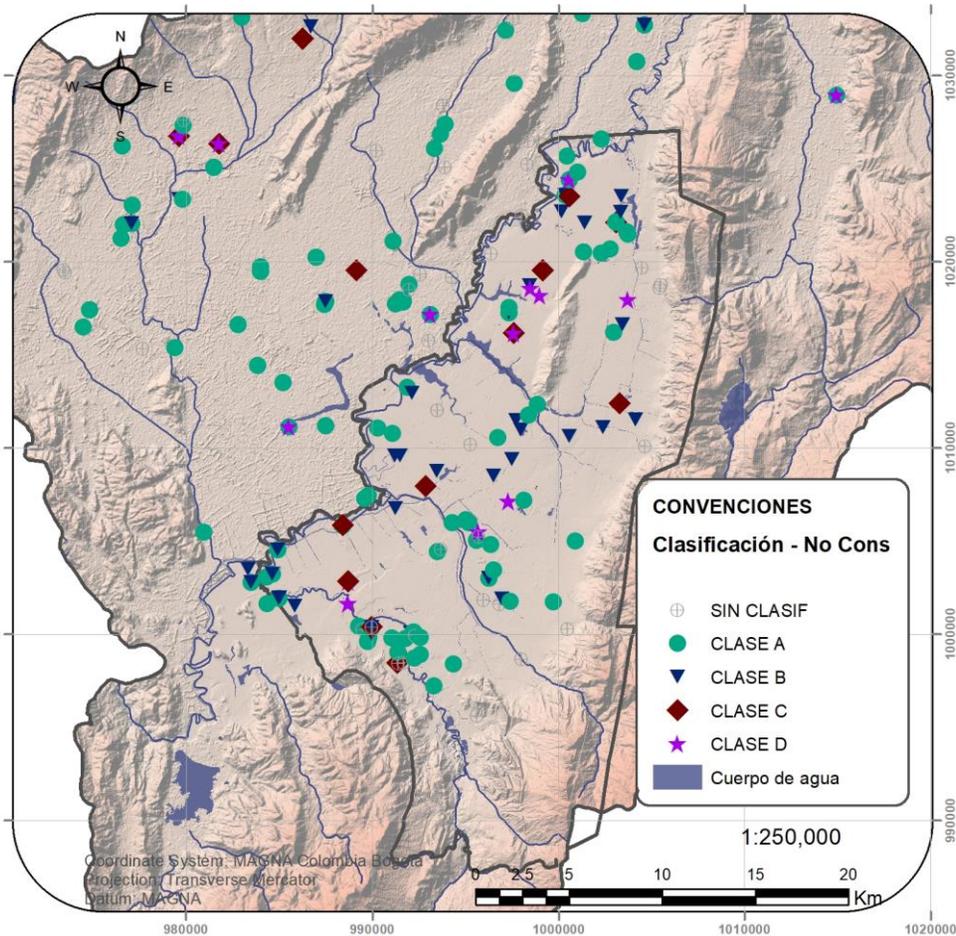
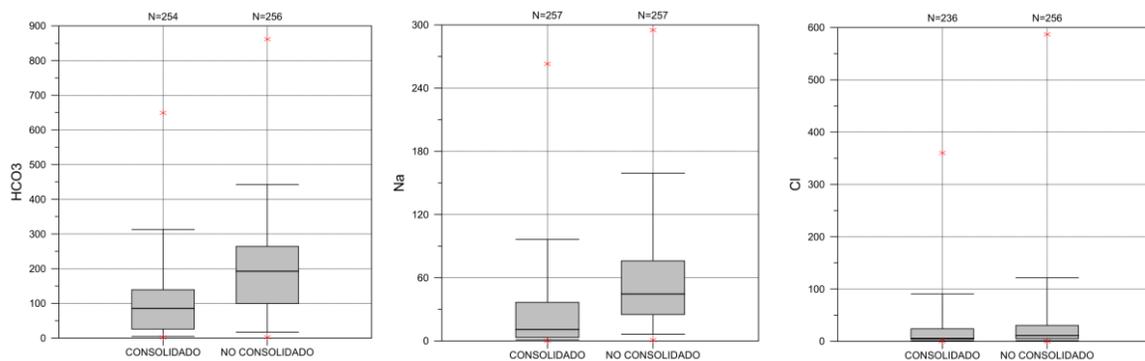


Figura 3-53 Mapa de puntos de agua agrupados en Clase A, B, C y D.

Al ser comparables los aniones y cationes mayoritarios de los depósitos consolidados y no consolidados debido a que el número de las muestras es aproximadamente el mismo, y de acuerdo a los diagramas de caja generados para cada uno de los iones mayoritarios (mg/l) (ver



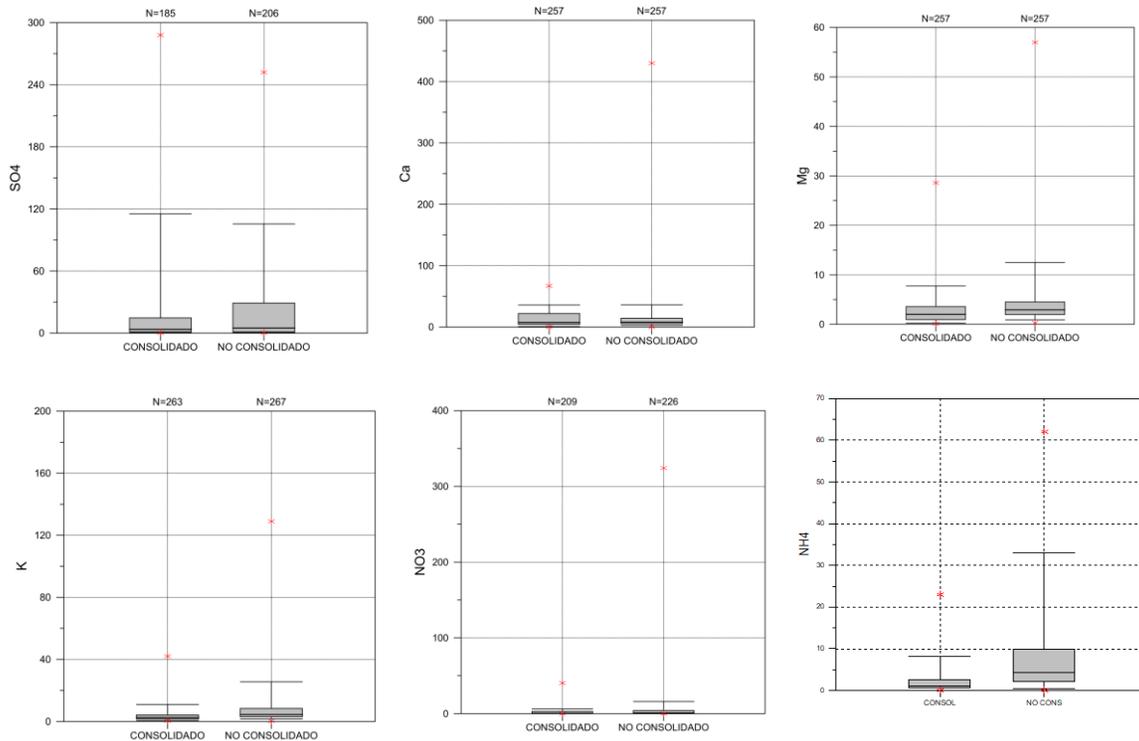
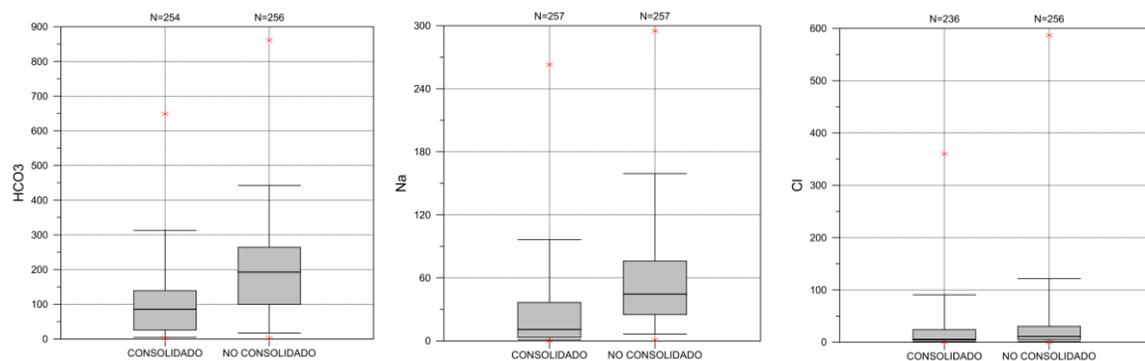


Figura 3-54), se observa un sesgo positivo de todos los iones marcado principalmente por sulfuros, bicarbonato, sodio y amonio. Estos tres últimos iones tienen sus medianas y percentiles bien diferenciados entre depósitos, donde el no consolidado toma magnitudes superiores al consolidado. Por otro lado, iones como el cloro, sulfuro, calcio, magnesio, potasio y nitrato tienen percentiles muy aproximados entre depósitos.



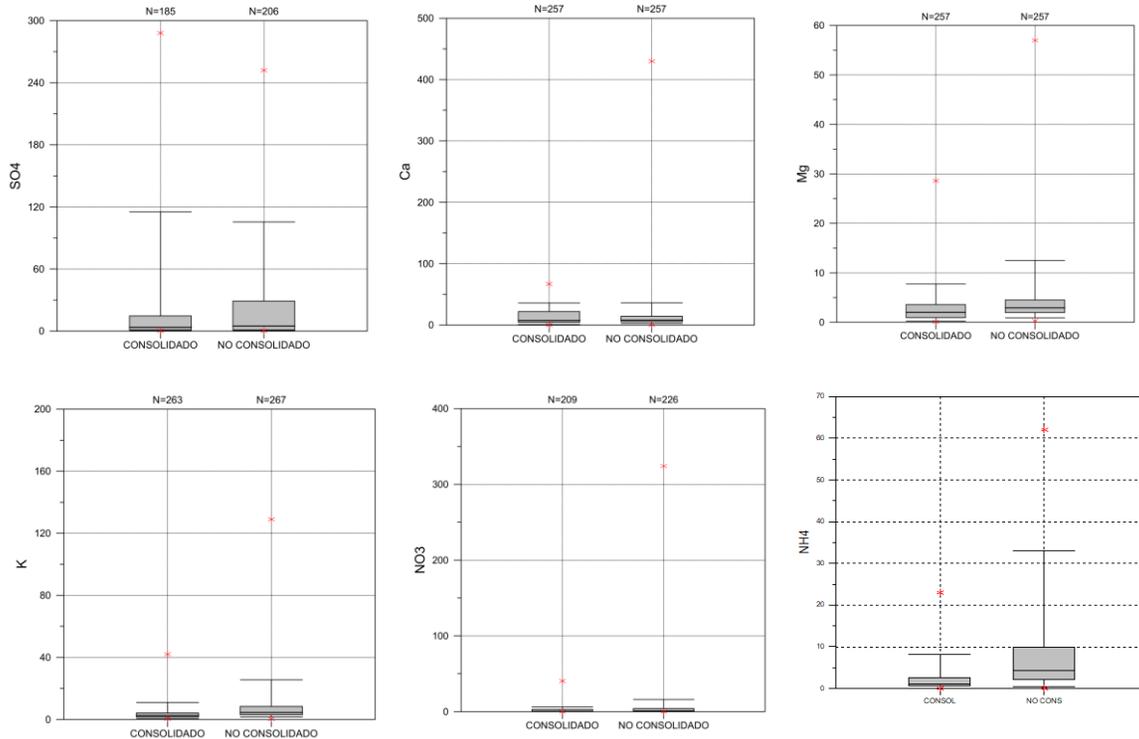


Figura 3-54. Diagramas de cajas iones mayoritarios (mg/l). Depósitos consolidados y no consolidados

Se graficaron los diagramas de Stiff tanto para los depósitos consolidados como no consolidados (Figura 3-55) con el objetivo de determinar una zonificación para las diferentes muestras de agua subterránea tomadas en la zona de estudio. Se evidencia un enriquecimiento desde las zonas de los cerros orientales hacia el centro de la cuenca. Durante este enriquecimiento se evidencian un primer sector dominado por aguas Bicarbonatadas-Sódicas y seguidamente, un segundo sector donde predominan las aguas Sulfatadas-Sódicas.

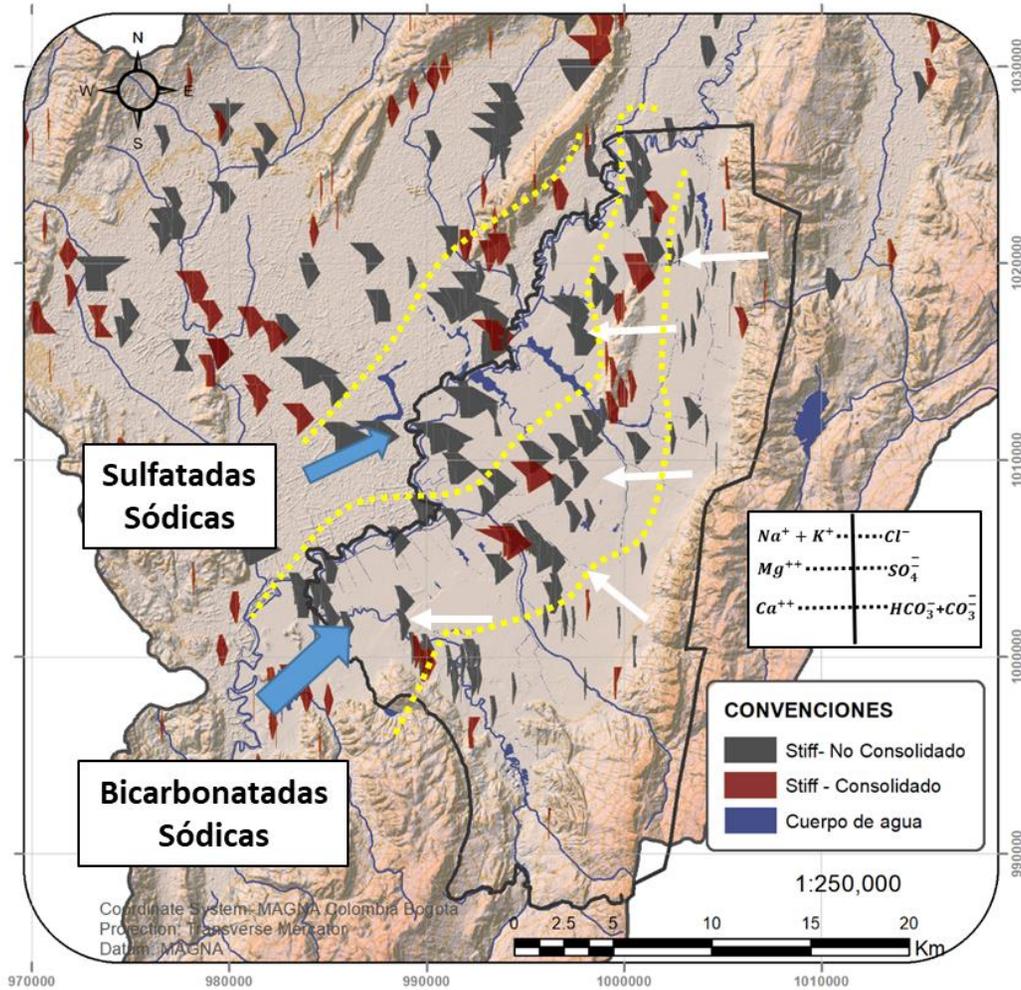
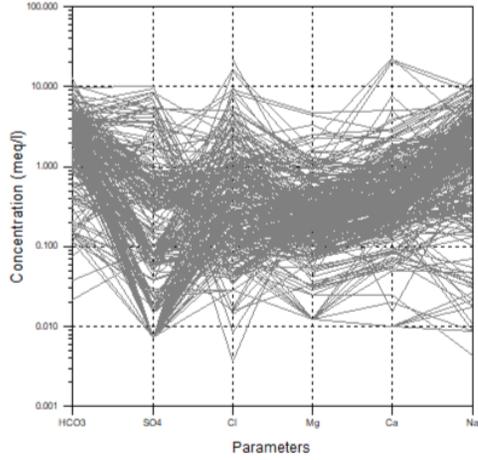
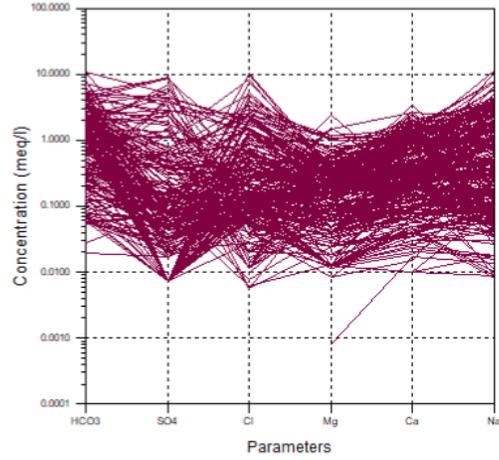


Figura 3-55. Representación gráfica de los diagramas de Stiff para los depósitos consolidados y no consolidados localizados en la zona de estudio.

Se graficaron en diagramas de Schoeller-Berkaloff para los depósitos consolidado y no consolidados (ver Figura 3-56a y Figura 3-56b), y para este último los 4 tipos de familias de aguas encontradas (ver Figura 3-57). En esta figura se puede observar que los cationes no tienen cambios significativos. En la clase C y clase D, las concentraciones en meq/l se mantienen casi en los mismos valores. En las clases A y clase B, las concentraciones de Ca son un poco más altas que las de Mg. En todas las 4 clases las concentraciones de Na son más altas y estén en el mismo rango. Por otro lado, los aniones si presentan grandes variaciones (hasta tres órdenes de magnitud) sobre todo en el sulfato el cual es el que más tiene peso en las diferenciaciones de las clases seguido por los cloruros.



(a)



(b)

Figura 3-56 Diagrama de Schoeller (a) depósito no consolidado y (b) depósito consolidado

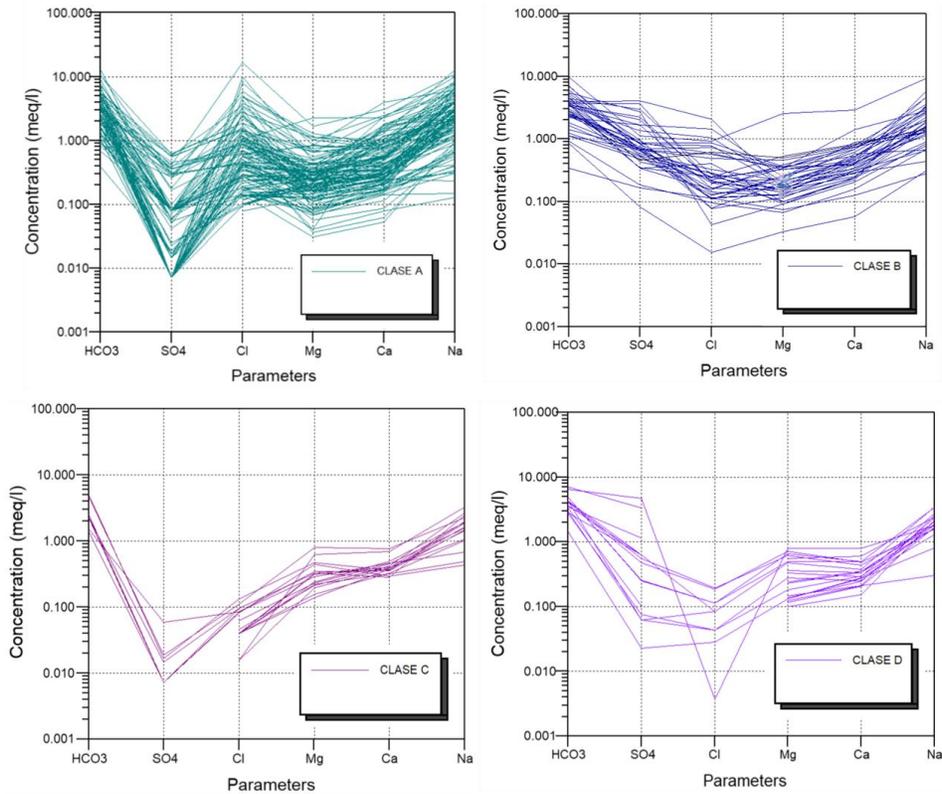


Figura 3-57. Representación de las 4 clases de agua diferenciadas mediante la clasificación mediante los diagramas de Schoeller-Berkaloff

3.3.2.6 Relaciones Iónicas

En las muestras de agua analizadas, el sodio y el calcio son los cationes dominantes, mientras que el bicarbonato es el anión dominante. La abundancia de calcio en las aguas subterráneas puede estar relacionada con la presencia de rocas carbonatadas mientras que la meteorización del carbono y silicatos puede contribuir al Ca y Mg. La disolución de calcita y dolomita puede mostrarse mediante la relación de las concentraciones de calcio y magnesio. Cuando esta relación es igual a 1 indica la disolución de rocas dolomita, mientras que una tasa mayor puede representar una mayor dominancia en la contribución de la calcita por parte de las rocas. La relación Ca/Mg mayor a 2 puede representar la disolución de minerales relacionados a silicatos en el agua subterránea.

En este sentido, el 43% de las muestras tienen una relación Ca/Mg entre 1 y 2 (ver Figura 3-58a), indicando procesos de disolución de calcita. El 45% de las muestras es mayor a 2 mostrando el efecto de los minerales silicatos que contribuyen al aumento del calcio y del magnesio en las aguas subterráneas. Por último, solo el 11% de las muestras indican la disolución de dolomita.

La disolución en las rocas carbonatadas está definida por la relación 1:2 entre el Ca/HCO₃, y una proporción equivalente a 1:1 de (Ca + Mg)/HCO₃ en el agua subterránea. Las muestras de agua ubicadas en los depósitos no consolidados muestran una tasa media de 0.45 en Ca/HCO₃, muy cercana a la relación 1:2 de rocas carbonatadas. La relación (Ca+Mg)/HCO₃ tiene una relación media de 0.93 y 0,97, para depósitos no consolidados y consolidados, respectivamente, muy cercano a la relación equivalente de 1:1, lo que representa que la mayoría de las muestras de bicarbonato está relacionada con el calcio o magnesio.

La gráfica de (Ca+Mg) - HCO₃+SO₄ (ver Figura 3-58b) esta derivada de la disolución de calcita, dolomita y yeso. Si el intercambio iónico es el proceso dominante, la tendencia de los puntos de datos es la de desplazarse hacia la derecha debido al exceso de SO₄+HCO₃. Si los puntos están por encima de la línea media, un intercambio iónico inverso fue la reacción activa por el exceso de Ca + Mg sobre el SO₄ + HCO₃. La relación promedio de (Ca+Mg)/HCO₃+SO₄ es de 0.36 y 0.64 para el no consolidado y para el consolidado, respectivamente. En este caso, son los depósitos consolidados los que se acercan a la línea de 1:1, indicando que el exceso de Ca y Mg en las muestras de agua subterránea pueden deberse a la disolución de calcita, dolomita y yeso.

La Figura 3-58c y Figura 3-58d indican que la salinidad incrementa con el decrecimiento de la Na/Cl y el incremento en Ca₂+Mg, la cual puede deberse a un intercambio iónico inverso en la meteorización en la capa de arcilla.

La Figura 3-58d muestra la influencia de la salinización debida a la mezcla del agua de mar mezclada con el agua subterránea. La relación Cl/HCO₃ versus Cl es de 83% y 70% para los depósitos no consolidados y consolidados, respectivamente, están por debajo de 0.5. lo que indica que el agua subterránea no fue afectada por aguas salinas.

En cuanto a la relación entre Na - Ca el promedio de la relación entre las concentraciones entre sodio y potasio es de 12 y 6 para el no consolidado y consolidado respectivamente. Valor muy superior a 1,

que puede representar que el sodio que se ha liberado de la disolución del silicato. La meteorización del silicato es la reacción de los minerales de feldespato con el ácido carbonatado en el agua, que es especificado por el bicarbonato como un anión dominante en el agua subterránea.

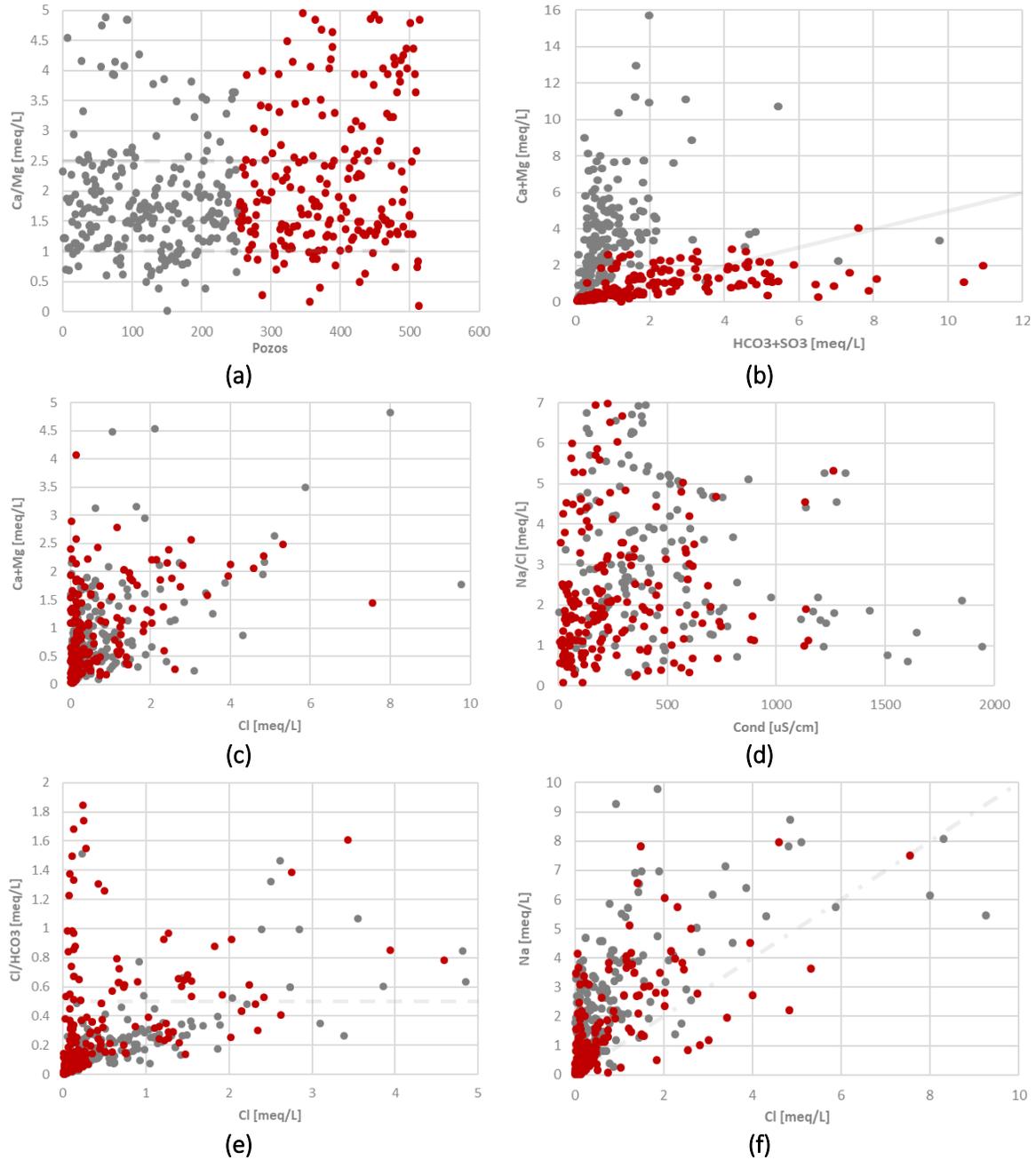


Figura 3-58 Relaciones iónicas a) Ca/Mg , b) $Ca+Mg-HCO_3+SO_4$, c) $Ca+Mg - Cl$, d) $Na/Cl - Cond$, e) $Cl/HCO_3 - Cl$, y f) $Na-Cl$

3.3.2.7 Análisis Isótopos

Se realizó el análisis de isótopos a partir de los datos compilados en la base de datos, la cual recoge todos los muestreos que se han realizado en diferentes estudios (EAAB-JICA, 2003; Ingeominas, 2001; SDA, 2013). Se cuenta con un total de 286 registros de mediciones de Oxígeno 18 (O18) y Deuterio (D), entre pozos, aljibes, manantiales, estaciones pluviométricas y ríos.

Para caracterizar la composición isotópica de las muestras respecto a la precipitación, se tomó como referencia la línea meteórica local (LML) propuesta por Rodríguez (1984) y la línea de la sabana de Bogotá (LMS) propuesta por Ingeominas (2001), las cuales son similares, con un cambio no significativo en la pendiente, como se observa en la Figura 3-59. Se incluyó la línea de evaporación de manantiales (SDA, 2013).

De la Figura 3-59, se observa una gran dispersión del contenido isotópico de los pozos que captan de los depósitos consolidados y no consolidado, con una variación del contenido de O18 (‰) entre -12 y -8, para el D(‰) entre -80 y -60. Algunos pozos presentan un comportamiento anómalo, con tendencia al enriquecimiento de Deuterio, señalados por el círculo y la flecha ascendente. Este comportamiento se observa principalmente para los pozos del depósito consolidado. En la reciente literatura (Clark, 2015) se atribuye este efecto a la presencia de CO₂ y CH₄ en el subsuelo. Explicar este fenómeno en los acuíferos de la sabana de Bogotá requiere de mayor estudio, para descartar anomalías en la toma de datos, o propagación de errores entre estudios y transcripciones.

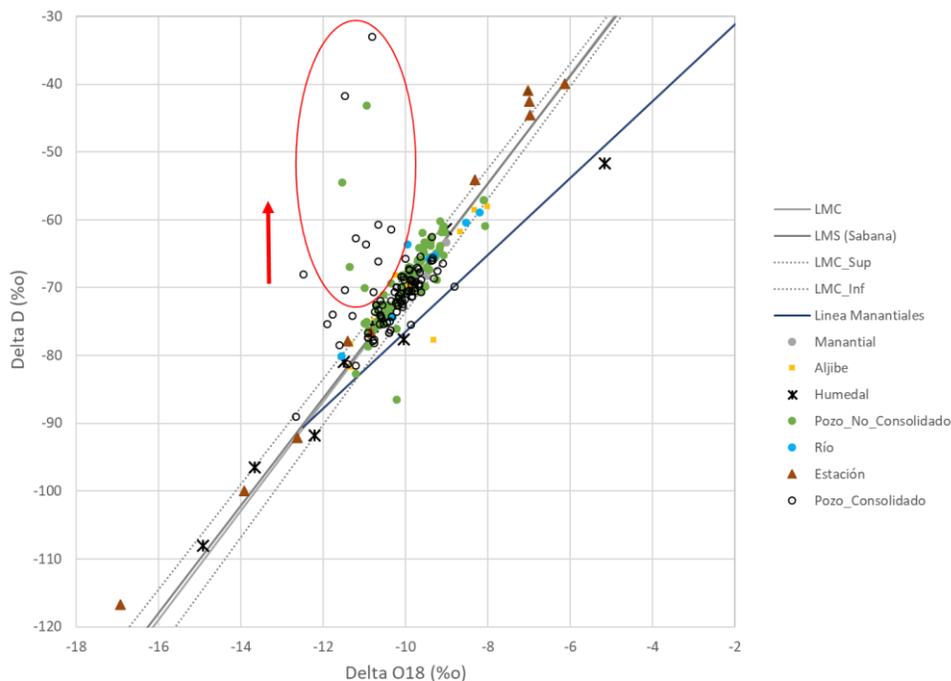


Figura 3-59 Variación altitudinal del contenido isotópico de O18 (‰) y D(‰) respecto a la precipitación

En cuanto al análisis del efecto altitudinal, se graficó el contenido de O18(‰) respecto a la altitud (m.s.n.m) de estación pluviométrica, y de la altitud de la boca del pozo (Figura 3-60). Se construyeron las líneas de tendencia entre las estaciones pluviométricas de acuerdo a los frentes de precipitación en la cuenca de la Sabana, expuestos por Ingeominas (2001). El primer frente en dirección S-N, proveniente desde el valle del Río Tunjuelo (Sur del distrito); registrada por las estaciones Los Tunjos, El Hato y El Delirio. El segundo frente, en dirección E-W, proveniente de los llanos orientales; registrada por las estaciones El Angulo, El Verjón. Y un tercer frente, con una tendencia menos marcada, sobre la sabana producto de lluvias convectivas, registradas por las estaciones Tibitoc, Santa Ana, Aeropuerto y Casablanca.

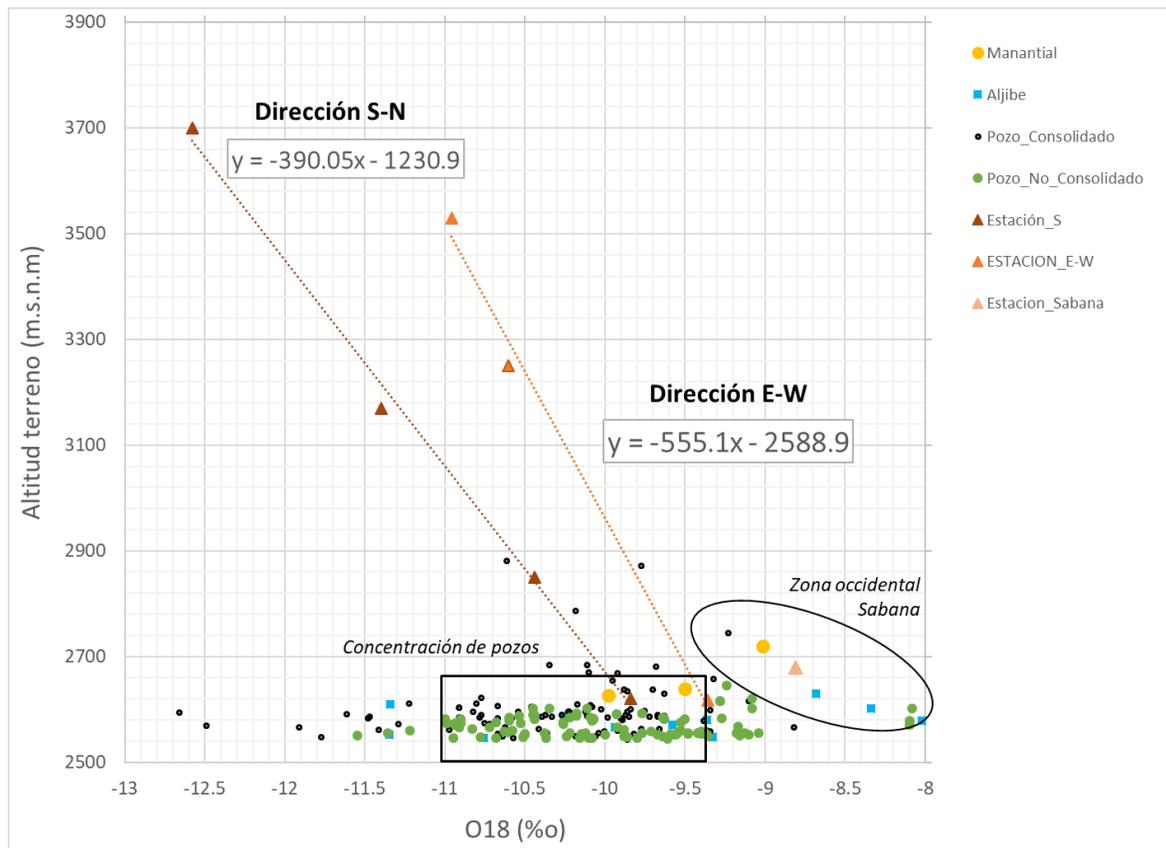


Figura 3-60 Variación altitudinal del contenido isotópico del O18 (‰)

En la Figura 3-60 se observa que no hay una diferenciación entre los pozos que captan de los depósitos consolidados y los del acuífero cuaternario (no-consolidados). Este comportamiento es reiterativo en los análisis hidroquímicos e hidráulicos. Esto obedece a que los filtros de los pozos pueden estar ubicados en ambos depósitos, o bien, el filtro de grava por lo general se encuentra en toda la longitud del pozo, permitiendo la mezcla de agua entre diferentes formaciones. Diferenciar la composición isotópica entre diferentes formaciones requiere de un muestreo fraccionado.

En el recuadro negro (Figura 3-60) con variaciones de $\delta^{18}O$ (‰) entre -11 y -9.5, se tiene la mayor concentración de pozos (consolidados y no consolidados), con una variación de la altura de recarga entre 2419 – 3059 (m.s.n.m) calculada a partir de la línea de tendencia dirección S-N, que se atribuiría a los flujos provenientes del sur. Y una variación de la altura de recarga entre 2606-3516 (m.s.n.m) referida a la línea de tendencia dirección E-W, que indicaría los flujos provenientes de la zona oriental.

Con el objetivo de correlacionar el origen de la recarga en el distrito, con la el tipo de depósito y la ubicación espacial, se sectorizaron los pozos ubicados en el área del Distrito, diferenciando la zona sur, oriente, suba y norte. Los pozos restantes localizados en la sabana, se clasificaron de acuerdo al depósito en el que captan (consolidado, no consolidado). Se graficó el contenido de $\delta^{18}O$ (‰) respecto a la profundidad del pozo (m) medida desde el nivel del terreno para medir la dispersión isotópica de acuerdo al tipo de acuífero. La relación expuesta por Clark (2015), señala que para acuíferos profundos la dispersión en el contenido isotópico debe ser menor, y aumenta a medida que se acerca a superficie, ya que se da mayor mezcla con aguas provenientes de otros sistemas u orígenes (Figura 3-61).

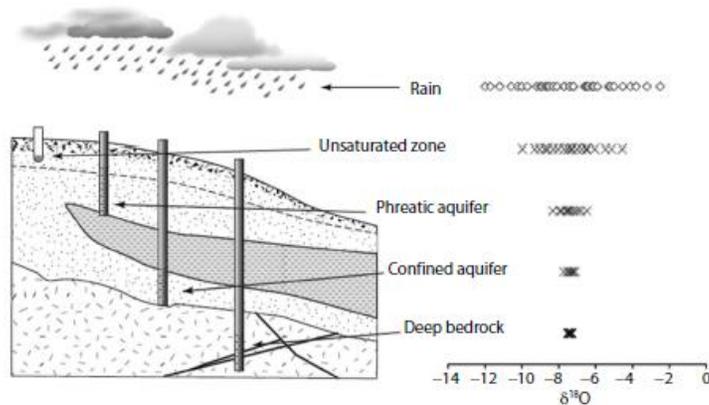


Figura 3-61 Dispersividad del isotópico del $\delta^{18}O$ (‰) respecto a la profundidad (Clark 2015)

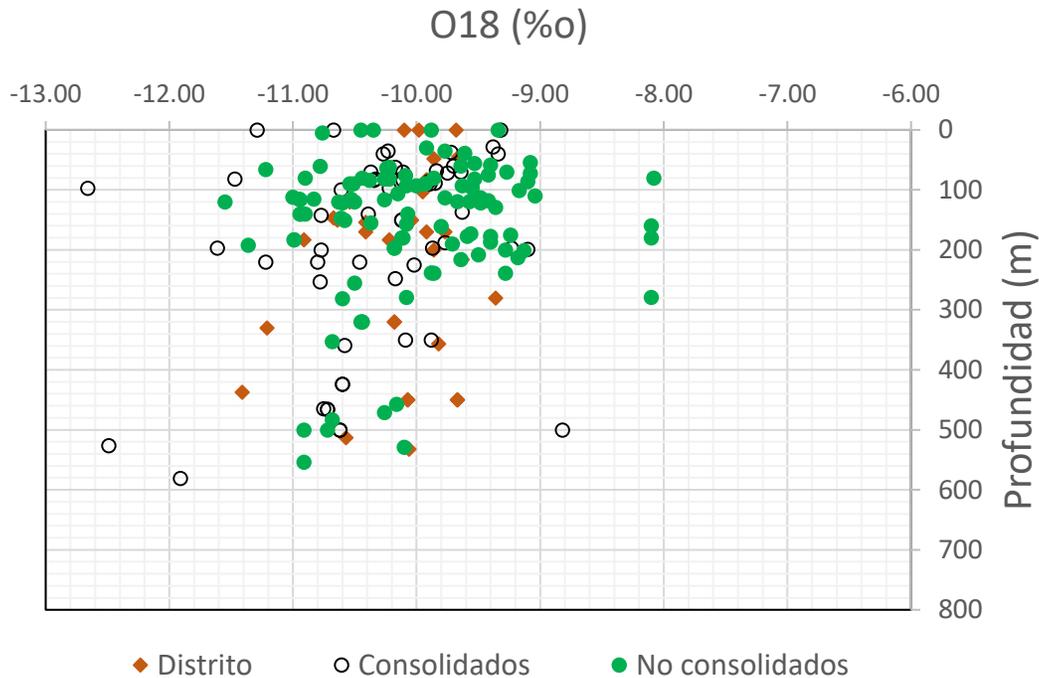


Figura 3-62 Dispersión del isotópico del O18 (‰) respecto a la profundidad en los pozos del Distrito y Sabana de Bogotá

La relación de la dispersión del contenido isotópico respecto a la profundidad en los depósitos consolidados y no consolidados (Figura 3-62), evidencia que las muestras recolectadas en los pozos provienen de mezclas de agua a diferentes alturas de recarga. No se observan diferencias entre los tipos de depósitos, ni tampoco en los pozos ubicados en el distrito. Una vez más se reiteran las afirmaciones realizadas en los diferentes análisis, una en donde se tiene una importante mezcla en los pozos y la segunda que las mezclas son debidas a flujos verticales ascendentes desde los depósitos consolidados.

3.4 MODELACIÓN REGIONAL EN ELEMENTOS ANALÍTICOS (AEM)

El método de los elementos analíticos tradicionalmente se ha usado con éxito para flujo en acuíferos simples 2D, esencialmente para modelos regionales en régimen estacionario. La reciente introducción de pasos de tiempo en diferencias finitas y fuentes de recarga espacialmente variables, así como de subdominios ha permitido extender el método a dominios multicapas, heterogéneos, anisotrópicos y en régimen transitorio (Fitts, 2010).

Este método tiene grandes bondades entre ellas la no necesidad de generar una malla estructurada. En muchos casos la propia construcción de la malla hace que el tiempo que debería ser usado en la

modelación hidrogeológica sea invertido en la construcción de la geometría. Por otro lado, la inclusión de pozos, ríos, fallas, etc., se hace de una forma muy simple. En el marco de la construcción del modelo hidrogeológico conceptual del acuífero objeto de estudio se realizó una modelación analítica regional que permite definir las condiciones de frontera del modelo y determinar la conectividad del sistema acuífero regional.

3.4.1 Modelación analítica 2D Perfil Regional

La modelación de perfiles 2D, ha sido ampliamente usada para el estudio del flujo regional de agua subterránea para una sección transversal de un modelo conceptual o matemático 3D establecido (Cardenas, 2008; Freeze & Witherspoon, 1966). Es una importante herramienta para tener un entendimiento general del movimiento del agua subterránea. Estos modelos permiten apreciar las localización y extensión de las zonas de recarga y descarga, la dirección y velocidad del flujo en cualquier punto en la región, y establecer balances de masa (Tóth, 1963).

En este sentido, la modelación analítica se inició con la construcción de dos perfiles geológicos regionales de la zona de estudio, con el fin de determinar el comportamiento a escala regional de las líneas de flujo y establecer las zonas de recarga y descargas. A partir de la simulación del tránsito de partículas, estimar de los tiempos de viaje de una partícula desde la zona de recarga hasta la zona de descarga.

Esta información es relevante para la construcción y validación del modelo hidrogeológico conceptual, ya que permite el entendimiento de las direcciones de flujo, la definición de zonas de recarga y descarga, así como establecer posibles mezclas de aguas provenientes de diferentes zonas y determinar tiempos de tránsito. De allí la importancia de realizar el modelo conceptual de forma paralela a la modelación matemática del mismo.

3.4.2 Construcción Geológica de los perfiles

Como parte del modelo geológico, se construyeron dos perfiles regionales A-A' y B-B' (Figura 3-63) con dirección E-W principalmente y con una extensión de aproximadamente 60 km. Los perfiles se realizaron a partir de la cartografía base de las planchas geológicas (227, 228, 246 y 247) a escala 1:100000 del Servicio Geológico Colombiano y con la interpretación de estudios adicionales como INGEOMINAS (2002).

Bermoudes, 2002). El ancho de brecha de falla aún no se encuentra reportado, sin embargo, en el estudio Lobo-Guerrero Uscátegui (2005), se estima el ancho de brecha de la Falla de Bogotá (longitudinal) de 10 a 20m. Para el caso de las fallas transversales se eligió asignar un ancho de 30m, dado los esfuerzos generados en estas fallas son de cizalla y su apertura es mayor. Las fallas transversales fueron representadas como subdominios, donde el ancho del polígono tiene la misma dimensión del ancho de brecha de 30m. Por tratarse de un modelo 2D, todo el dominio se representó con un ancho unitario y como un acuífero confinado.

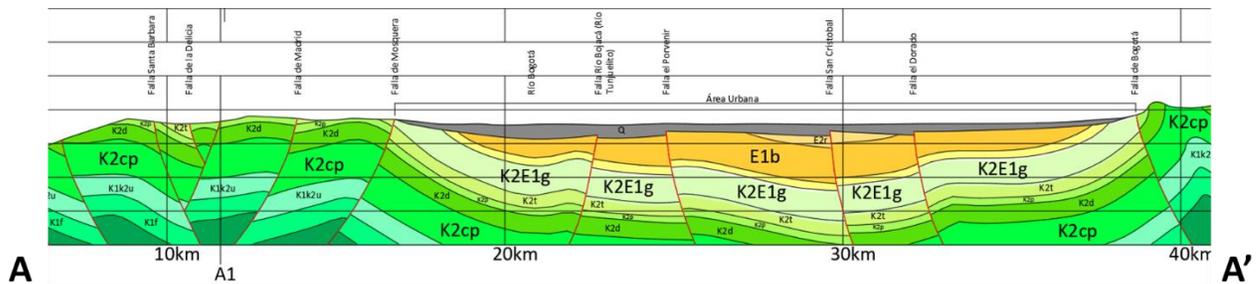


Figura 3-64. Perfil Geológico corte A-A'

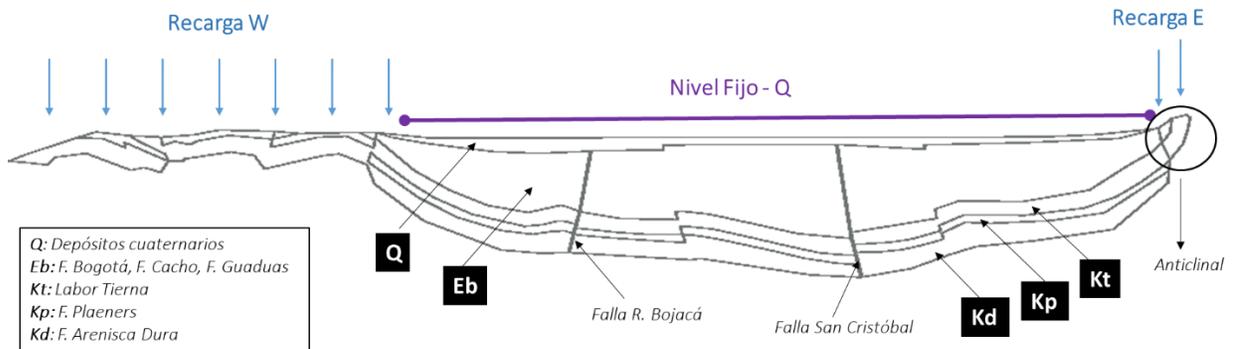


Figura 3-65. Dominio y representación del modelo analítico de flujo 2D, perfil geológico A-A'

Para el perfil B-B' (Figura 3-66) se simplificó la geología en las mismas cinco unidades del perfil A-A' (Depósitos del Neógeno-Cuaternario, Complejo Paleógeno, Formación Labor Tierna, Formación Plaeners y Formación Arenisca Dura), adicionalmente, se incluyó la Formación Une (Figura 3-67), la cual subyace de la Formación Chipaque en el anticlinal de Bogotá. Esta formación se incluyó, para analizar la potencial existencia de un flujo regional, ya que esta formación tiene una permeabilidad más alta que la formación Chipaque y está en contacto con la Formación Arenisca Dura.

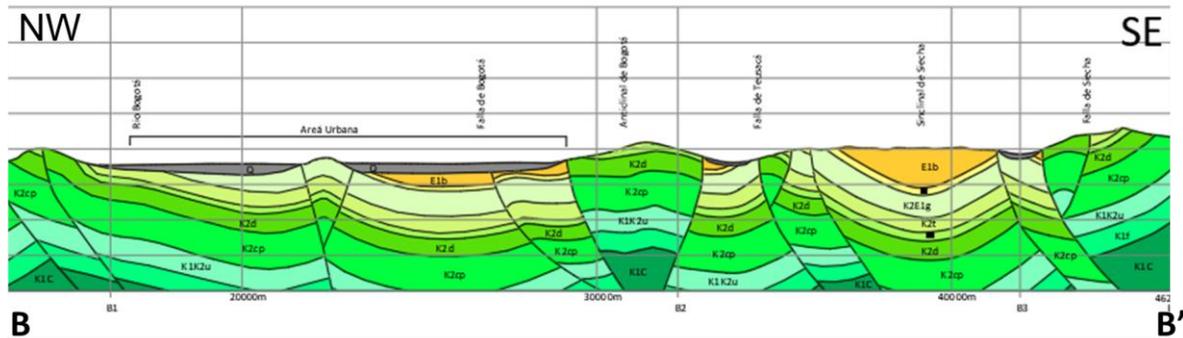


Figura 3-66. Perfil Geológico corte B-B'

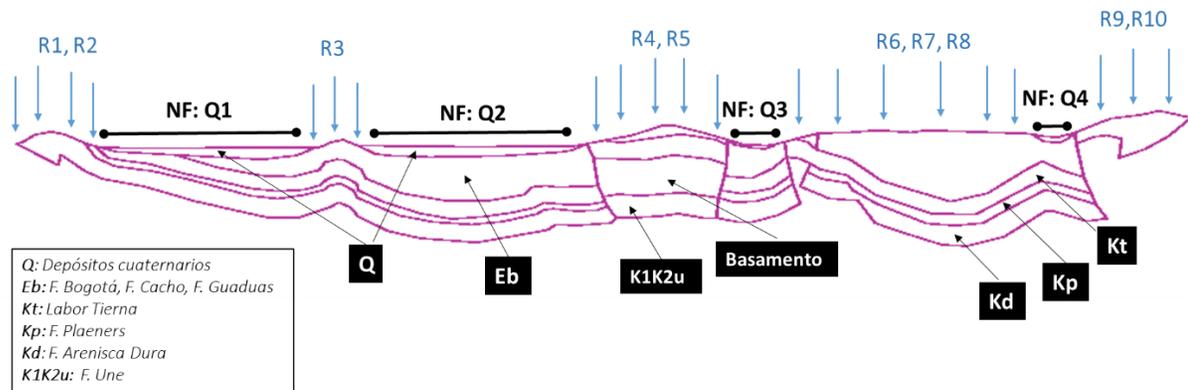


Figura 3-67. Dominio y representación del modelo analítico de flujo 2D, perfil geológico B-B'

3.4.4 Parámetros de los dominios

Los parámetros hidráulicos fueron asignados de acuerdo con lo reportado por estudios previos (CAR, 2008; Ingeominas, 1991; PNUD, DAMA, & Hidogeocol, 1999) y con los valores reportados en los pozos, de acuerdo con la formación geológica de captación.

Conductividad Hidráulica: Para los depósitos del Neógeno-Cuaternario, se consideró una anisotropía de la conductividad hidráulica horizontal (K_h) respecto de la conductividad hidráulica vertical (K_v) $K_h/K_v=10$, característica de materiales aluviales sueltos o poco consolidados, este valor se dejó constante en los depósitos ante mencionados.

Para las otras formaciones se definió un intervalo de anisotropía (k_h/k_v) entre 2 y 10, de acuerdo con lo reportado en la literatura, para materiales rocosos fracturados (Maréchal, Wyns, et al., 2004; Maréchal, Dewandel, & Subrahmanyam, 2004). En particular se asume una anisotropía de 2 dada la condición de alto fracturamiento de los depósitos no consolidados, reportados en Estudio de la Fase I del Metro de Bogotá, análisis de las líneas sísmicas. En donde se registran un espesor fracturado de hasta 350 m en los depósitos triásicos y cretácicos.

En el perfil A, una condición de anisotropía fue asignada en la zona de los cerros orientales, ante la disposición de las capas rocosas con un buzamiento regional aproximado 50° N-E, que hacen parte del anticlinal volcado de Bogotá. Esta condición

se asigna en AnaqSim con la rotación de la componente principal de la conductividad (K_h) respecto al eje x , la segunda componente (K_v) permanece siempre perpendicular a esta. Los parámetros asignados a cada subdominio se presentan para el Perfil A en la Tabla 3-22 y para el perfil B en la

Tabla 3-23.

Tabla 3-22 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil A

Formación Geológica	Dominio Anaqsim	K (m/s)	K_{h_min} (m/d)	K_{h_max} (m/d)	Anisotropía (K_h/K_v)	Pe_{min}	Pe_{max}
Depósitos Cuaternarios	1. Q	5.79E-07	0.05	0.5	10	0.05	0.10
F. Bogotá F. Cacho F. Guaduas	2. Eb	5.79E-07	0.01	0.05	2 - 10	0.05	0.07
Labor Tierna (Guadalupe) F. Arenisca Dura (Guadalupe)	3. Kd	1.16E-05	1	4	2 - 10	0.05	0.10
F. Plaeners (Guadalupe)	4. Kp	1.16E-06	0.1	0.4	2 - 10	0.05	0.10
Fallas transversales Falla R. Bojacá Falla R. San Cristóbal	5. FallasT	5.79E-05	5	5	0	0.10	-
Anticlinal (-50° a eje x)	6. Anticlinal	5.79E-06	0.500	1.0	2 - 10	0.05	0.10

Tabla 3-23 Parámetros hidráulicos de los dominios Perfil B

Formación Geológica	Dominio Anaqsim	K (m/s)	K_{h_min} (m/d)	K_{h_max} (m/d)	Anisotropía (K_h/K_v)	Pe_{min}	Pe_{max}
Depósitos Cuaternarios	1. Q	5.79E-07	0.05	0.5	10	0.05	0.10
F. Bogotá F. Cacho F. Guaduas	2. Eb	5.79E-07	0.05	0.08	2 - 10	0.05	0.07
Labor Tierna (Guadalupe) F. Arenisca Dura (Guadalupe)	3. Kd	1.16E-05	1	4	2 - 10	0.05	0.10
F. Plaeners (Guadalupe)	4. Kp	1.16E-06	0.10	0.4	2 - 10	0.05	0.10
F. Une	5. K1K2u	1.16E-07	0.01	0.1	2 - 10	0.05	0.10
Chipaqué	6. Basamento	1.16E-09	0.0001	0.0001	-	0.05	0.10

Porosidad eficaz: Se asignaron valores entre el 5% y el 10% de acuerdo con lo reportado en la literatura. Álvarez (1997), referenció un valor del 9% para la formación Arenisca de Labor, y un 5% asignado a todos los acuífero, para el cálculo de reservas. Por su parte la SDA (2013), en el cálculo de reservas del distrito, asignó un valor de rendimiento específico del 6% para el Grupo Guadalupe y del 3% para los depósitos no consolidados.

3.4.5 Condiciones de frontera

A continuación, se describen las condiciones de frontera que fueron usadas para el perfil A y el Perfil B. Los valores asignados se presentan en la Tabla 3-24 para el Perfil A y en la Tabla 3-25 para el perfil B.

No Flujo: En todo el límite inferior del modelo, en el contacto con la formación Chipaque, considerada por como un contacto impermeable que no permite el paso del agua subterránea.

Nivel Fijo: En los modelos de perfil 2D, el nivel del agua es generalmente la condición de frontera en la parte superior del modelo, también es posible establecer un flujo de recarga a lo largo de todo el nivel del agua. Sin embargo, es necesario por lo menos asignar una elevación aproximada del nivel del agua para localizar una frontera que responda a las condiciones reales, de lo contrario el modelo calculará valores de nivel freático fuera de los límites esperados.

En este sentido, en todas las líneas de fronteras externas con depósitos cuaternarios se asignó una carga hidráulica constante.

Flujo: En las zonas de pendiente, con depósitos consolidados se asignó una condición de frontera de flujo, para representar la recarga natural, calculada en la modelo hidrológica realizada en este proyecto, la cual fue descrita en la sección de hidrología.

Tabla 3-24 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil A

Geometría AnaqSim	Ubicación	Condición de frontera	Unidad	Valor min.	Valor máx.
K2E, Kp4, Eb2	Cerros Orientales, Monserrate	Flujo- Recarga	mm/año	100	200
Ktw_1, kpw_2, ktw_3, kpw4_ktw5, kpw6, kdw7, wsalida	Cerros Occidentales	Flujo- Recarga	mm/año	50	100
Q	Cuaternario	Nivel Fijo	msnm	2540	-
BASAMEMTO	No Flujo				

Se consideró una recarga mínima y una recarga máxima, el intervalo corresponde a la heterogeneidad espacial reportados en el modelo hidrológico. Se consideraron los dos escenarios, uno de baja recarga y otro de alta recarga para validar a su vez la modelación hidrológica.

Q (Perfil A) y Q1 y Q2 (Perfil B), fueron calculados a partir de la base de datos de pozos compilada en este proyecto. El promedio se realizó con el nivel freático estático para los pozos que tenían reportado este valor. Q3 se asignó el valor del nivel del agua en el Embalse de San Rafael (La Calera). Q4 nivel del agua en la quebrada Quisquiza (vertiente del Río Negro).

Tabla 3-25 Condiciones de frontera Modelo 2D, Perfil B

Geometría AnaqSim	Ubicación	Condición de frontera	Unidad	Valor min.	Valor máx.
R10, R9	Cerros Orientales Siecha	Flujo- Recarga	mm/año	80	130
R6,R7,R8	Cerros Orientales La Calera	Flujo- Recarga	mm/año	10	30
R4,R5	Cerros Orientales - Mirador	Flujo- Recarga	mm/año	30	80
R3	Cerros Suba	Flujo- Recarga	mm/año	10	10
R1,R2	Cerros Occidentales	Flujo- Recarga	mm/año	30	70
	Basamemto	No Flujo		0	-
Q4	Cuaternario _ (Quebrada Quisquiza)	Nivel Fijo	msnm	2800	-
Q3	Embalse San Rafael	Nivel Fijo	msnm	2782	-
Q2	Cuaternario _ Bogotá	Nivel Fijo	msnm	2540	-
Q1	Cuaternario _ Bogotá	Nivel Fijo	msnm	2540	-

3.4.6 Elementos del modelo

Fallas: Para la modelación analítica 2D perfil geológico A-A', se consideraron únicamente las fallas transversales F. Bojacá (Río Tunjuelo) y F. San Cristóbal, reportadas como fallas abiertas. La definición de las fallas se realizó como un dominio de mayor conductividad, con un ancho de 30m.

Pozos: En la modelación de un perfil 2D con ancho unitario asume que no hay flujo a través del ancho del perfil, por eso no es posible simular un flujo radial de un pozo de bombeo o flujo 3D alrededor de una fuente o sumidero u otros efectos de flujo 3D (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015). Por tal razón, no se incluyeron los pozos en la modelación analítica de los perfiles A y B.

3.4.7 Movimiento de partículas (Particle Tracking)

Para observar los tiempos de viaje de las zonas de recarga a la zona de descarga, identificar flujos regionales y locales, y estimar la edad del agua en los depósitos cuaternarios, se localizaron partículas en las zonas de recarga (cerros orientales y occidentales), y se simularon para diferentes tiempos de tránsito según el escenario en estudio.

3.4.8 Análisis de sensibilidad

Se realiza un análisis de sensibilidad para observar la respuesta del modelo (dirección del flujo, tiempos de tránsito, zonas de descarga y extensión de la descarga, niveles piezométricos en los cerros) ante la variación de la porosidad efectiva (parámetro importante en el transporte de partículas), conductividad hidráulica horizontal, anisotropía y valor de la recarga (Figura 3-68 y Figura 3-69). Para el análisis se generaron diferentes escenarios, para todos los casos el número y ubicación de las partículas arrojadas permaneció constante. Y se simuló un tiempo de 1000 años. Los parámetros asignados a cada escenario, son los presentados en las tablas de parámetros hidráulicos y condiciones de frontera para cada perfil (Tabla 3-23, Tabla 3-24, Tabla 3-25). En total se simularon 6 escenarios.

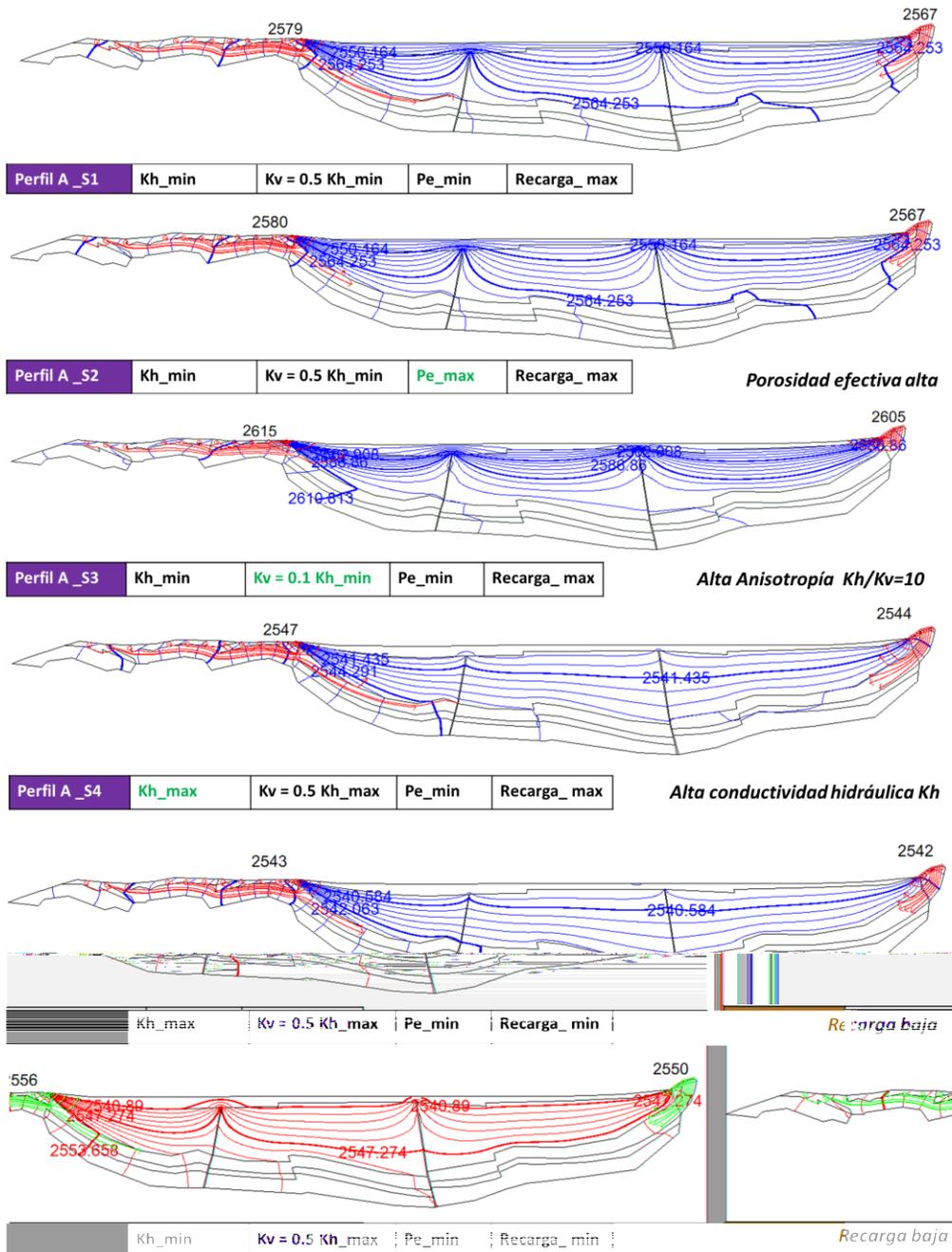


Figura 3-68 Análisis de Sensibilidad, Perfil A. Tiempo de simulación a 1000 años para todos los escenarios.

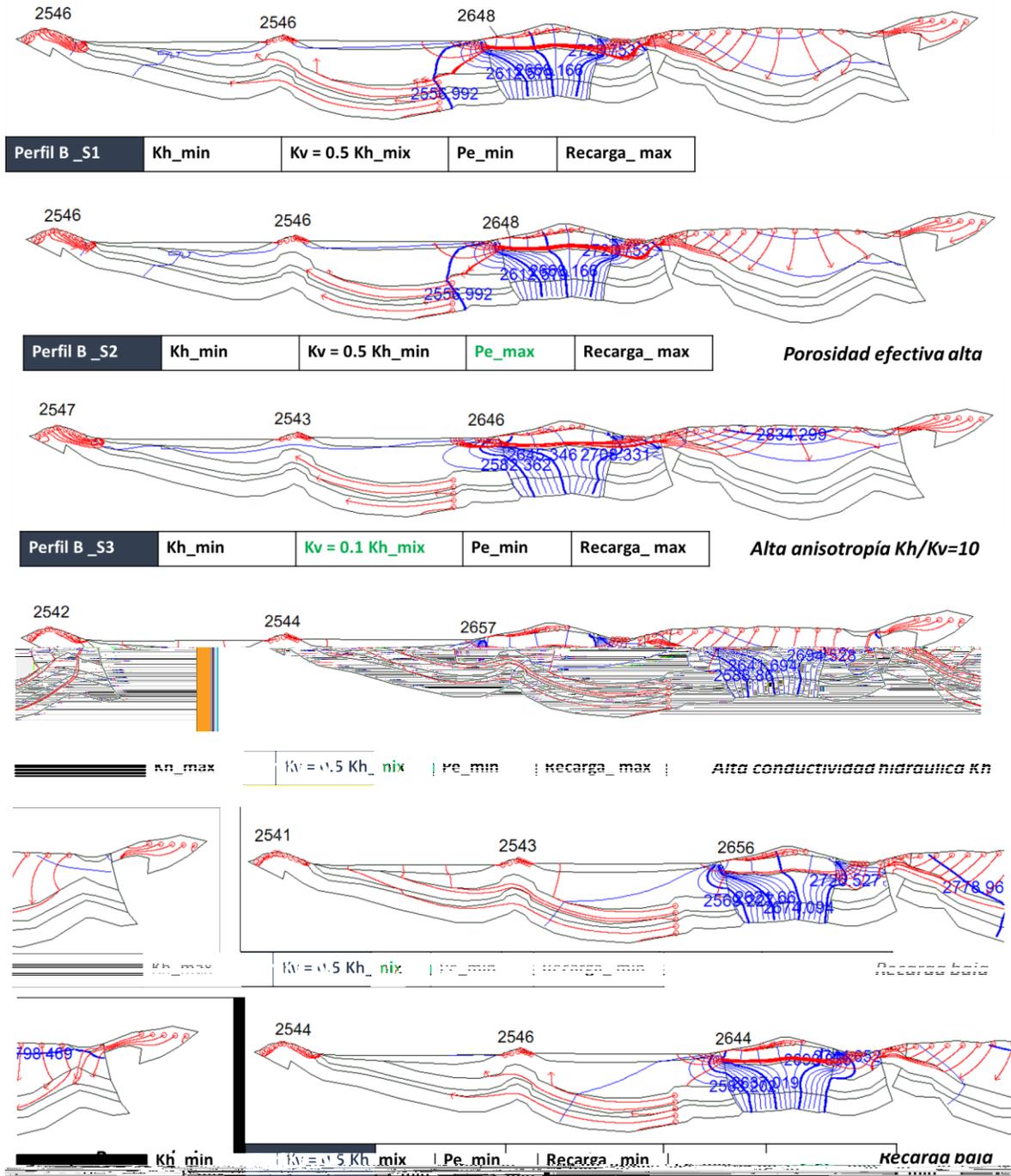


Figura 3-69 Análisis de Sensibilidad, Perfil B. Tiempo de simulación a 1000 años para todos los escenarios.

En 5.000 años, ya se diferencia con claridad los flujos locales, cercanos a las zonas de pendiente; flujos regionales, provenientes de los cerros occidentales y orientales y, flujos intermedios, que ascienden a través de las brechas de falla.

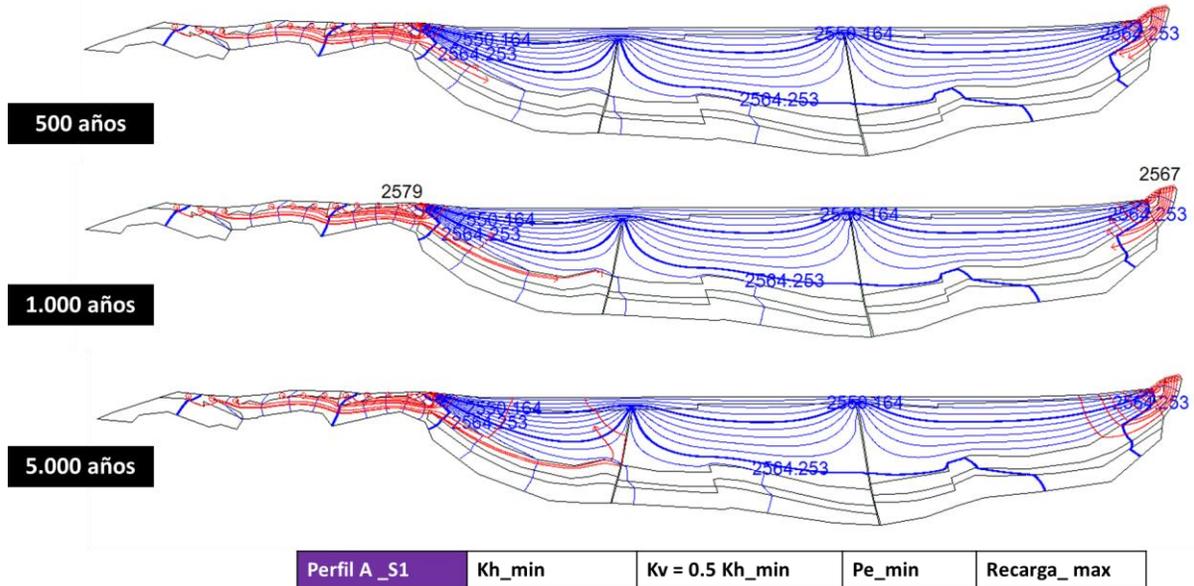


Figura 3-70 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1

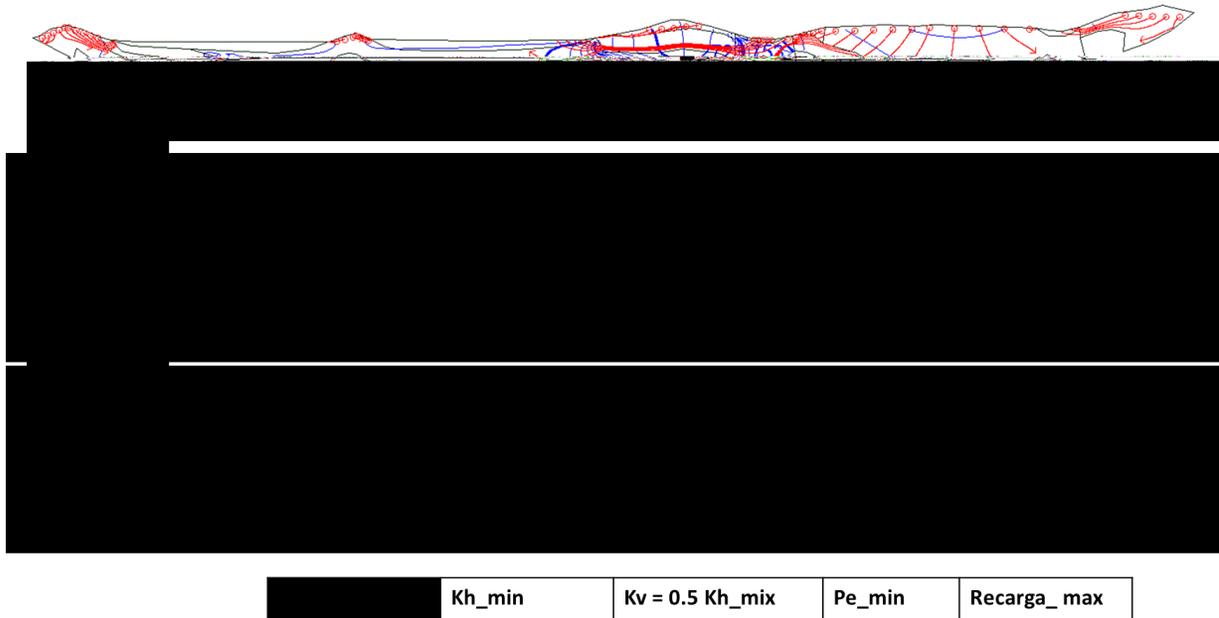


Figura 3-71 Variación de tiempos de tránsito Perfil A. Escenario S1

3.4.9 Análisis de resultados del modelo analítico regional

Zona de recarga: La construcción de los perfiles y la simulación 2D evidencia que la zona de recarga se extiende más allá de los límites del distrito tanto al oriente como al occidente, de allí la importancia de mirar un contexto regional para garantizar las condiciones de frontera para una modelación más local. Al sur de ciudad (Perfil A) la zona de recarga se extiende en el oriente hasta los cerros de Monserrate, hasta el afloramiento de la formación Chipaque, al occidente hasta la Falla Santa Bárbara. Al norte de la ciudad, la zona de recarga en el oriente se extiende hasta los cerros de Siecha, y al occidente hasta los cerros de Suba, flanco este.

Zonas de descarga: A partir del análisis de todos los escenarios analizados se distinguen las siguientes zonas de descarga: i) para el perfil A y B en todas las zonas de piedemonte, el flujo que descarga en cada zona, depende directamente de la recarga a los cerros próximos ii) para el perfil A, se da una descarga hacia el cuaternario en el contacto con las fallas transversales, en particular se tienen mayores flujos en la Falla R. Bojacá. iii) en el perfil B, se descarga en los depósitos cuaternarios del distrito, al oriente y occidente de los cerros de Suba, los flujos provienen de los cerros orientales (Siecha) con largos recorridos.

Si bien la esquematización del modelo analítico se realizó como una cuenca hidrológicamente cerrada, es decir, no se definió ninguna condición de frontera que asumiera una salida de flujo, el modelo muestra que existen zonas de descarga, principalmente en el piedemonte como flujo que descarga en el contacto con los depósitos cuaternarios.

Otra zona de descarga mostrada en el modelo analítico, Perfil B, se da en los cerros orientales (Torca) y cerros occidentales (Cota), en los depósitos consolidados, lo cual se evidencia en los mapas del Ingeominas (1991), con manantiales reportados a estas alturas.

Tiempos de tránsito: La simulación permite mostrar que se pueden tener aguas con tiempos de tránsito que van desde cientos de años a miles de años. Es evidente que la recarga en los cerros, favorece la recarga de los depósitos de pendiente, principalmente en la zona oriental del Distrito. Se tienen entonces flujos regionales, intermedios y locales, con una distribución diferente al sur y al norte de la ciudad.

Flujos verticales: Para todos los perfiles se observan flujos verticales, provenientes de la recarga en los cerros, que viajan a través de los depósitos consolidados, en especial el Grupo Guadalupe y ascienden hasta el cuaternario. Estos flujos verticales se evidencian principalmente en el Perfil A, a través de las fallas transversales

Los **parámetros más sensibles** son la conductividad hidráulica y las condiciones de recarga en la zona de los cerros, estas variables tienen importante influencia en los tiempos de tránsito de las partículas e influyen en los niveles piezométricos sobre los cerros. La conductividad hidráulica es uno de los parámetros sobre los cuales se tiene una alta incertidumbre, ya que los valores disponibles para las formaciones han sido tomados a partir de datos puntuales, o bien en las pruebas hidráulicas realizadas se capta agua de diferentes formaciones.

Si bien los análisis realizados con la modelación analítica 2D de los Perfiles A y B, permite un entendimiento general del sistema de flujo generado por la recarga natural en los cerros

3.5 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Este capítulo se exponen los principales componentes que están involucrados en el modelo conceptual y que explican los procesos y mecanismos que tienen lugar en el Acuífero Somero del Distrito Capital. En primera medida se presenta el Mapa Hidrogeológico del perímetro Urbano del Distrito Capital, con 10 perfiles hidrogeológicos en donde se describen las diferentes unidades hidrogeológicas. Se describen las zonas de recarga, tránsito y descarga, fundamentales para definir el manejo de estas áreas, y se explica la posible conexión del agua subterránea con los cuerpos de agua superficial. Así mismo, se describe la evolución natural de la calidad el agua en su tránsito por los diferentes depósitos y finalmente se presenta el esquema del Modelo Conceptual en un bloque diagrama y algunos perfiles conceptuales que permiten un mejor entendimiento de los componentes descritos.

3.5.1 Mapa Hidrogeológico

El mapa hidrogeológico se construyó a partir de la interpretación hidrogeológica dada a las diferentes formaciones geológicas. La representación está en función de la leyenda internacional para mapas hidrogeológicos propuesta por la Asociación Internacional de Hidrogeólogos (AIH, 1995). Esta representación agrupa las diferentes formaciones de acuerdo a su facilidad de movilizar y almacenar agua con el objetivo de obtener las unidades hidroestratigráficas que conforman el mapa hidrogeológico.

3.5.2 Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular

A este primer grupo pertenecen los acuíferos que están conformados por sedimentos poco a medianamente consolidados, con porosidad primaria. Está representado por:

- Restos de meteorización de areniscas del Grupo Guadalupe (Trm).
- Formación San Miguel (Qsm).
- Depósitos de pendiente (Qdp).
- Formación Tilatá (Tma).
- Formación Río Tunjuelito (Qrtsa).
- Formación Sabana (Qsa2).

3.5.3 Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas

Se incluyen en este segundo grupo a las rocas sedimentarias consolidadas que constituyen acuíferos donde el agua subterránea esta almacenada en poros, fracturas y diaclasas. Está representado por:

- Formación Cacho (Tic).
- Formación Labor y Tierna (Ksglt).
- Formación Plaeners (Ksgp).

- Formación Guaduas conjunto Inferior, medio y superior (Tkgi, Tkgm, Tkgs).
- Formación Arenisca Dura (Ksdg).
- Formación Regadera

3.5.4 Sedimentos y rocas con limitado o ningún recurso de agua subterránea

En este último grupo se encuentran aquellas rocas que, por su composición litológica de granulometría fina a muy fina, carecen de capacidad para almacenar y transportar agua subterránea en cantidad importante, de tal manera que pueda ser utilizada a través de una explotación. En el área de estudio están representados por:

- Formación Usme (Tiu).
- Formación Sabana (Qsa1).
- Formación Chía (Qch1, Qch2, Qch3)
- Formación Bogotá (Tib).
- Formación Chipaque.

3.5.5 Zonas de Recarga, Tránsito, Descarga

La Figura 3-72 presenta la distribución espacial de los caudales de extracción en la zona de estudio (delimitada con línea negra) y en la sabana de Bogotá. Con un óvalo rojo se circunscribe las zonas de máxima explotación. La extracción en la zona no consolidada, las máximas extracciones se concentran en 3 grupos. El primer grupo en el norte de la ciudad a la altura de la calle 230 con autopista y concretamente donde se encuentran los pozos del Colegio San Viator, Compensar, Andino, El Jardín. Un segundo grupo se encuentra localizado en la zona industrial entorno a la avenida Boyaca y Avenida 68. Algunos pozos de esta zona son, el pozo manufacturas Eliot, Asitex, Hilacol, Carulla. El tercer grupo está localizado al sur de la ciudad en Bosa. Algunos pozos de esta zona son Hilat, Apogeo, frigorífico Guadalupe.

Para los pozos localizados en la zona no consolidada, se tiene dos grupos principales que coinciden con los pozos de la zona norte y sur de Bogotá.

El grupo 1 y grupo 2 de la zona no consolidada coincide con las formaciones más permeables como la Tilata. Mientras que el grupo 1 de la zona consolidada tiene una alta permeabilidad debido a que por esta zona pasa la falla Bojaca, que, si bien es una falla de rumbo, limita la cuenca intramontana.

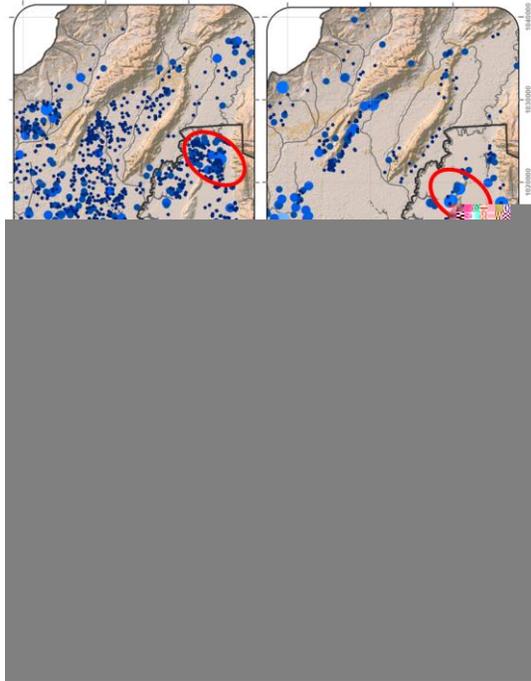


Figura 3-72. Representación espacial de los caudales de explotación en la zona de estudio.

3.5.6 Análisis de los niveles del acuífero somero

Para realizar el análisis de los niveles del acuífero somero se usaron los datos de los siguientes reportes: (SDA, 2013) (EAAB-JICA, 2009), (EAAB-JICA, 2003)(SIAM, 2006) (UNAL, 2005) (INGEOMINAS, 2002a). Con estos datos se realizó un análisis espacio-temporal del comportamiento de los niveles en la zona de estudio.

Si bien, el análisis se realizó con los niveles estáticos reportados, es de aclarar que estos pueden estar siendo subestimados conduciéndonos a interpretaciones erróneas. Normalmente, para obtener la medida de los niveles estáticos, se realiza un cese del bombeo por 24 horas luego de las cuales se procede a realizar la medida (se considera que las 24 horas son suficientes para que el nivel regrese a suposición en estado estacionario). Al tener un medio tan heterogéneo en el cual prevalecen las zonas de baja permeabilidad, esas 24 horas puede que no sean suficientes para su recuperación total. Por este motivo se iniciará a evaluar en magnitud el comportamiento de estos para luego si desarrollar la interpolación de los niveles.

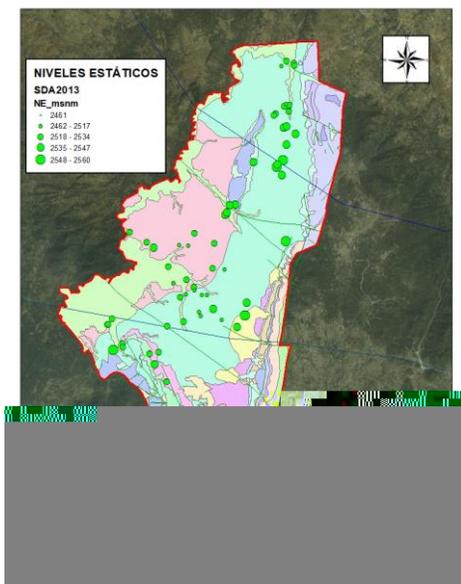
3.5.7 Análisis puntual de los niveles estáticos del acuífero somero

Se realizó la distribución espacial de los niveles estáticos para los reportes de (SDA, 2013) (EAAB-JICA, 2009), (EAAB-JICA, 2003)(SIAM, 2006) (UNAL, 2006) (INGEOMINAS, 2002a) localizados en el área de estudio y en donde sus profundidades están tanto en el consolidado como en el no consolidado. La Figura 3-73 presenta la distribución espacial de los niveles para los diferentes estudios. Por un lado, los datos de (EAAB-JICA, 2009) y (EAAB-JICA, 2003) no permiten obtener ninguna conclusión por la

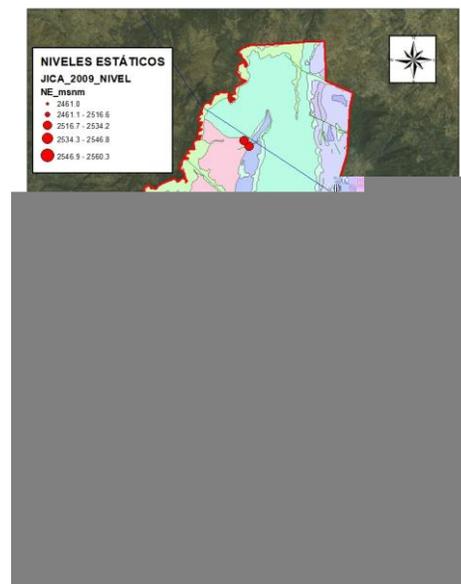
ausencia de datos. (SIAM, 2006) e (INGEOMINAS, 2002a) tienen datos, pero concentrados al noreste de la zona de estudio. Es claro que para los 4 años de diferencia que existe entre estos estudios no se tiene una evolución de los niveles.

Las campañas de (SDA, 2013) y (UNAL, 2006) por la cantidad y por la distribución espacial de los datos permitieron realizar un análisis tanto en magnitudes como en evolución temporal teniendo en cuenta los 8 años que separan estas dos campañas. La Figura 3-74 compara estas dos campañas permitiendo observar que no se ha dado un cambio significativo en los descensos y se han mantenido prácticamente constantes. Si bien, para la geología parece no existir una correlación clara entre esta y la localización de los pozos, al analizar la localización de los filtros, se deduce que los pozos se encuentran localizados principalmente en la formación Tilitá o en el grupo Guadalupe.

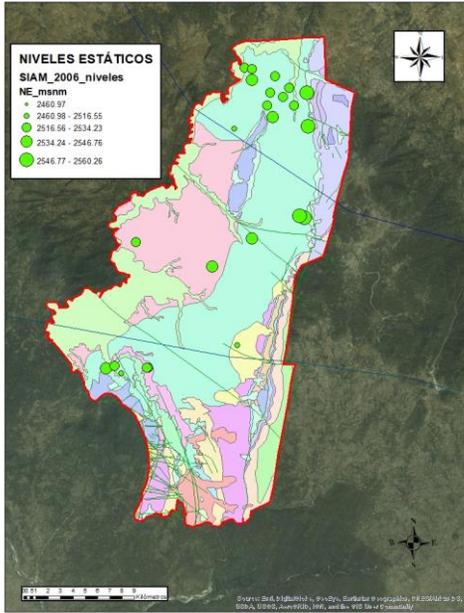
En la Figura 3-73a y Figura 3-73d, no se identifica una tendencia en magnitud en función de la geología.



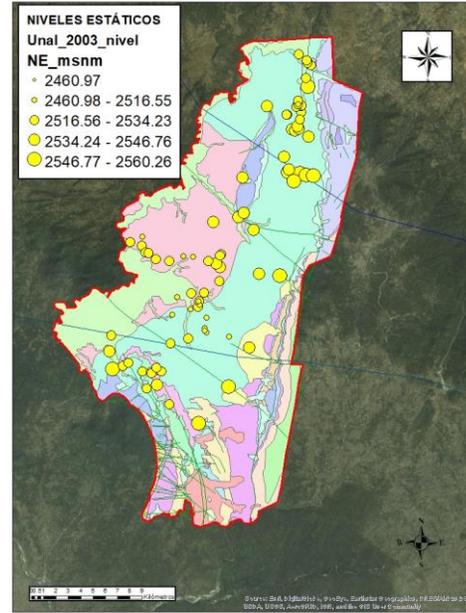
a) SDA 2013



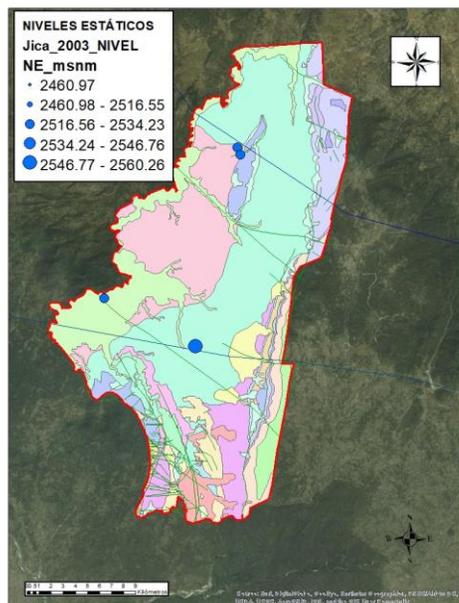
b) JICA 2009



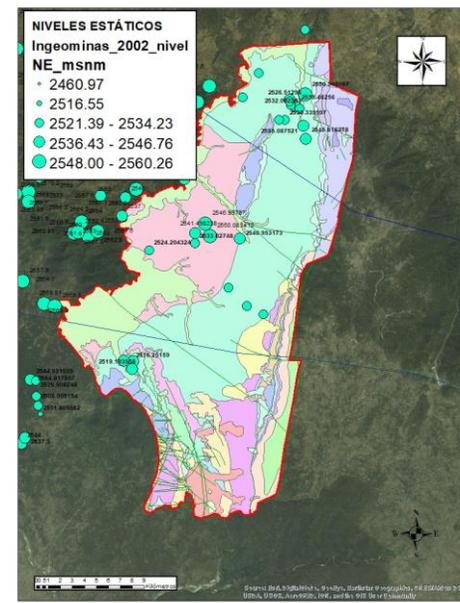
c) SIAM 2006



d) UNAL 2005



d) JICA 2003



e) INGEOMINAS 1998 - 2002

Figura 3-73. Representación especial de los niveles estáticos (msnm) consignados en los reportes (SDA 2013, JICA 2009, SIAM 2006, JICA 2003, UNAL 2003, INGEOMINAS 2002, HIDROGEOCOL 2000)

Se comparó la campaña de niveles de (SDA, 2013) y (UNAL, 2006) con el objetivo de evaluar una evolución temporal para ese periodo de 8 años (Figura 3-74). Se puede ver que durante este periodo de tiempo los niveles se han mantenido prácticamente constantes. Los menores descensos se encuentran entorno a la zona del Carmel Club (autopista norte con calle 153). Los mayores abatimientos se encuentran entre el aeropuerto, pasando por el parque Simón Bolívar y Puente Aranda y al sur de la ciudad entrno al cementerio del Apogeo.

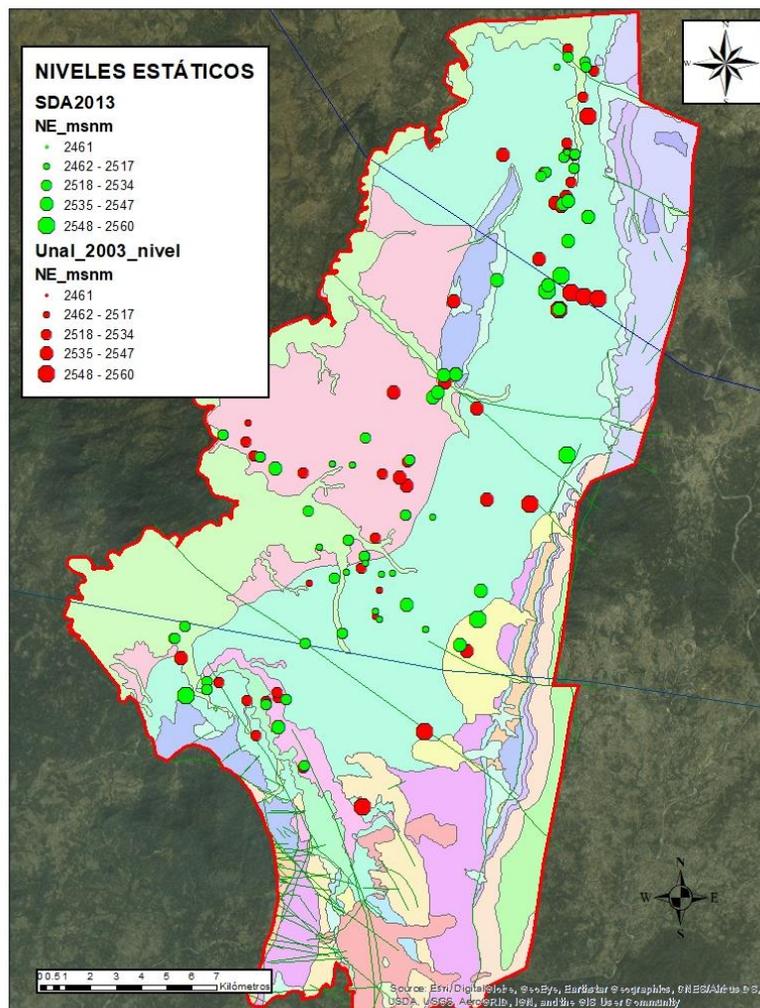


Figura 3-74. Comparación de los niveles estáticos puntuales de los reportes (SDA 2013 y, UNAL 2003).

Se realizó una interpolación de los niveles de (SDA, 2013) y (UNAL, 2006) mediante un krigado simple con la herramienta geoestadística del ArcGis (Figura 3-75). La zona sur oriental, se presenta en una tonalidad gris debido a que en esta zona no se tienen datos para la interpolación. En esta figura se evidencia lo discutido anteriormente, en donde los abatimientos más grandes se encuentran localizados en torno al área de Puente Aranda desplazándose hacia el aeropuerto El Dorado.

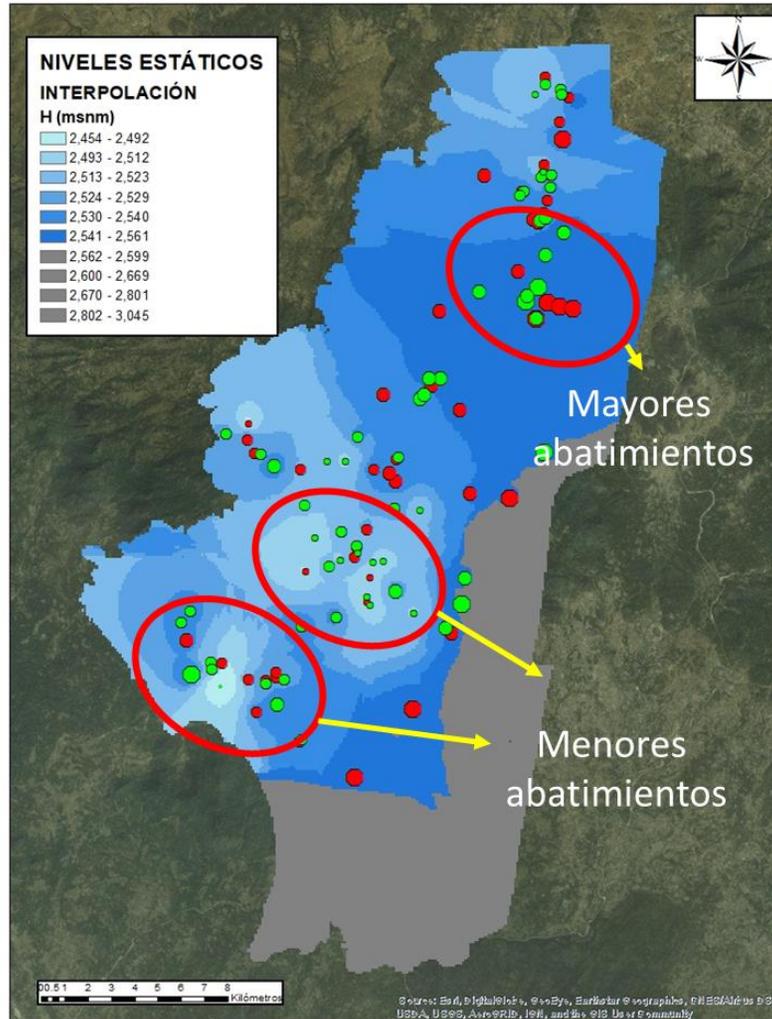


Figura 3-75. Niveles (msnm) interpolados con los datos de los reportes (SDA 2013 y, UNAL 2003) usando un krigado simple con la herramienta geoestadística de ArcGis.

3.5.8 Evolución temporal de los niveles

En función de la interpolación de los niveles (Figura 3-75), se realizó una sectorización en 4 grupos (Figura 3-76), en donde para los pozos incluidos en cada grupo, se analizó la evolución temporal del nivel.

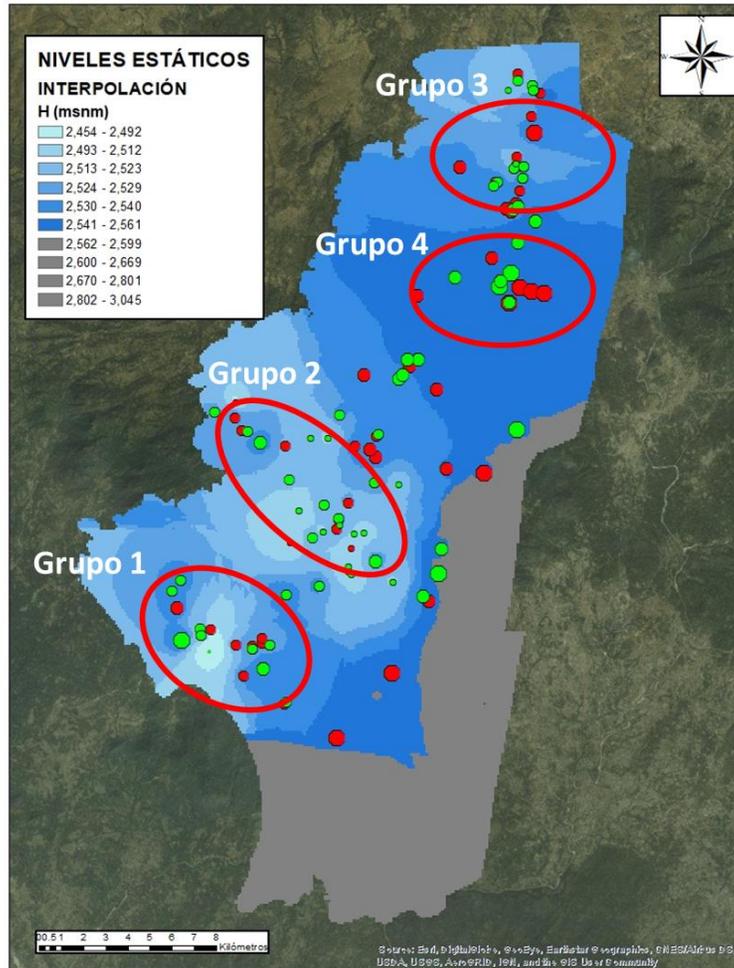


Figura 3-76. Sectorización de los niveles en función de los abatimientos. Esto se hace para realizar el análisis de la evolución temporal del nivel.

3.5.8.1 Grupo 1

La Figura 3-77 presenta para el grupo 1, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. El pozo Colcueros ha tenido un descenso de los niveles de 11m durante el periodo (1998-2011). El máximo registrado en la zona. Por otro lado, el pozo PAVCO para el mismo periodo de tiempo ha tenido una recuperación de 34.65m. El máximo registrado en la zona. La gran heterogeneidad se ve reflejada en estos dos pozos los cuales son los más cercanos y los que presentan la máxima diferencia. Con estos datos puntuales (a diferencia de los pozos mencionados anteriormente) se puede inferir que en esta zona los niveles están teniendo un comportamiento constante tendiendo a la recuperación.

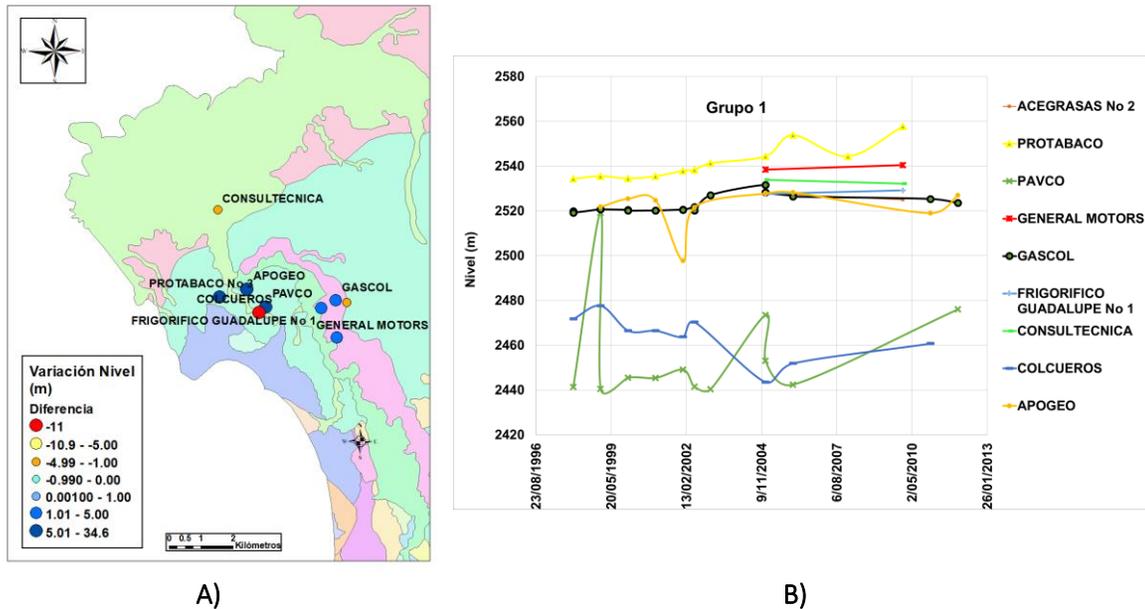


Figura 3-77. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 1.

A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.

3.5.8.2 Grupo 2

La Figura 3-78 presenta para el grupo 2, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. La tendencia general de la zona es a presentar una recuperación de los niveles. El valor máximo se presenta en el pozo Grasco con un valor de 27.61m (1998-2012). El mayor abatimiento se presenta en el pozo IMAL con 6 m (2005-2017)

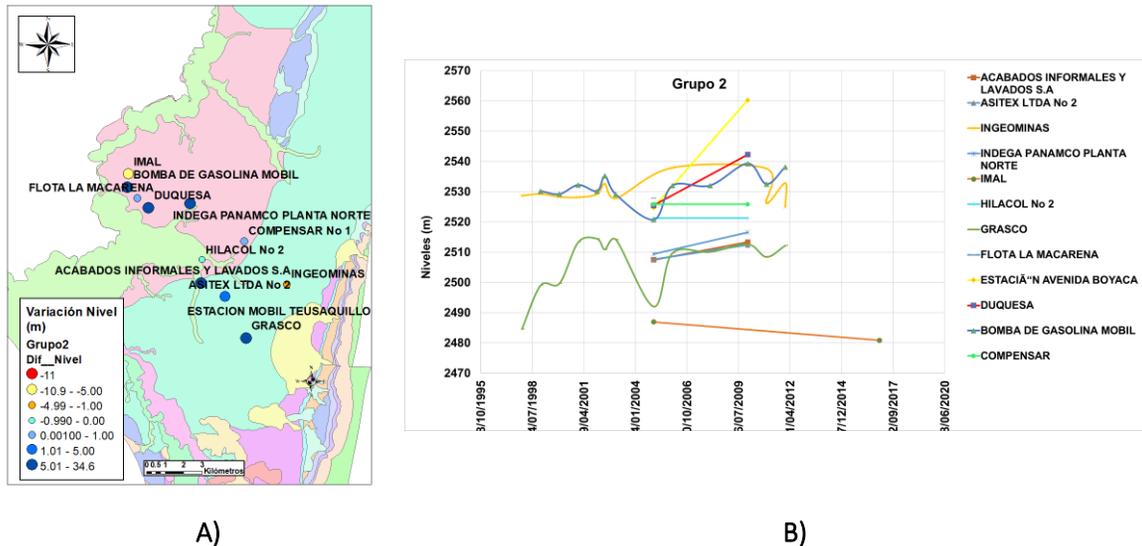


Figura 3-78. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 2.

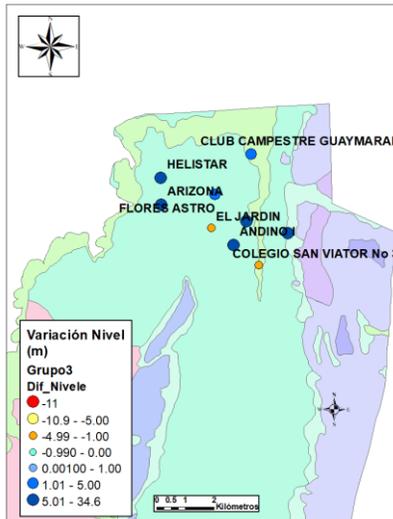
A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.

3.5.8.3 Grupo 3

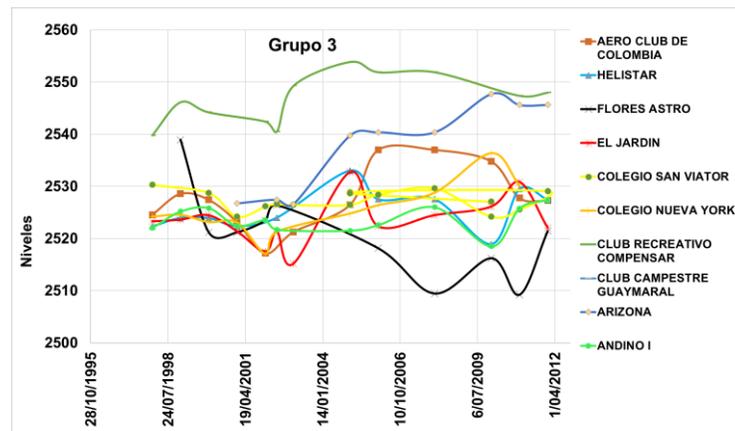
La Figura 3-79 presenta para el grupo 3, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. El máximo abatimiento se presenta en el pozo Flores Astro con un valor de 17.52m (1999-2012). Junto a este pozo se tiene el pozo el Jardín el cual también tiene un descenso de 1.6m para el mismo periodo de tiempo muestra de un cono de abatimiento en esta zona. La mayor recuperación de nivel se tiene en el pozo ARIZONA con 18.91 m (2010-2012). En una vista general se puede decir que se tiene una recuperación de los niveles hacia el norte de la ciudad.

3.5.8.4 Grupo 4

La Figura 3-80 presenta para el grupo 4, A). la localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). presenta la evolución temporal de los niveles. El máximo abatimiento se presenta en el pozo Uniagraria con un valor de 8.05m (1998-2012). La mayor recuperación de nivel se tiene en el pozo Country Club con 25.75 m (2000-2012). La distribución espacial de los niveles no permite inferir una tendencia clara de comportamiento.



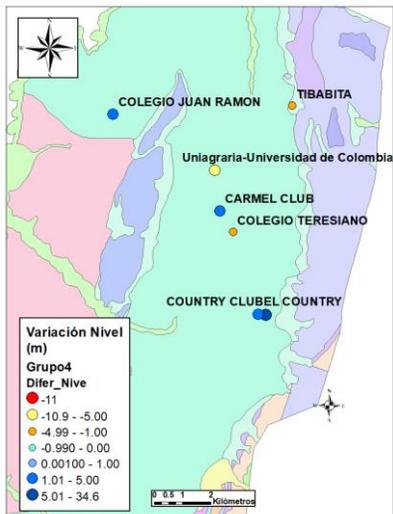
A)



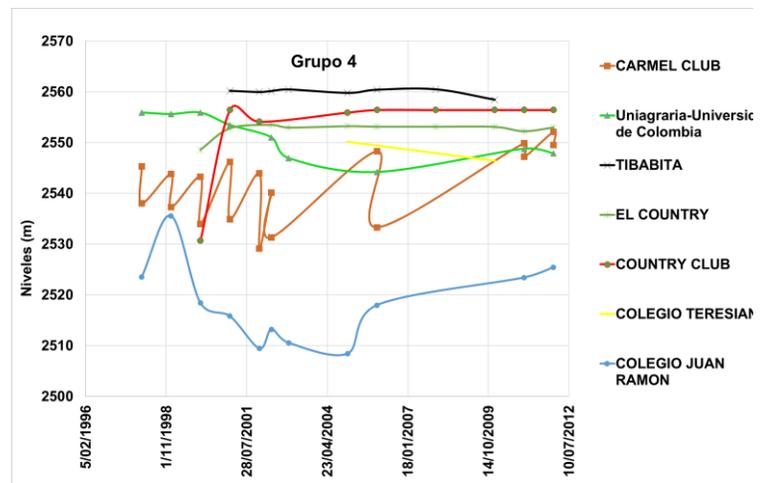
B)

Figura 3-79. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 3.

A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.



A)



B)

Figura 3-80. Localización y evolución temporal de los pozos localizados en el grupo 4.

A). Localización y el valor puntual entre la diferencia de nivel medido entre la más reciente a la más antigua, B). Evolución temporal de los niveles.

(Lobo-Guerrero, 1992b) comenta que el nivel potenciométrico del agua subterránea de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá, está descendiendo a tasas entre 3 y 5 m/año, y la razón es que se tiene una mayor extracción en comparación con la recarga. Esto proviene del estudio nacional de aguas preparado para el Departamento Nacional de Planeación, en donde se mencionaron casos de descensos del nivel en la zona industrial de Bogotá. Si bien, este estudio se realizó con datos de hasta 1992, al analizar los datos de este informe no se puede afirmar este descenso y, por el contrario, la tendencia permite vislumbrar una recuperación de los niveles.

3.5.9 Estimación de la recarga mediante el método de balance de cloruros.

Como se sabe, el cálculo de la recarga de agua al acuífero debido a la precipitación es esencial para la evaluación de las aguas subterráneas, con vistas a su conservación, explotación, gestión y consideración de su papel ambiental. Para el acuífero de Bogotá, la recarga ha sido un gran tema de debate puesto que en los diferentes modelos conceptuales se habla de que no existe una recarga (Rodriguez, C.O; Jiménez, 1986) o por el contrario donde se tienen recargas de hasta 250mm/año (Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA, 2000a)(EAAB-JICA, 2009). Estudios recientes en cuanto a hidrogeología urbana en donde se concluye que existe un aporte muy significativo a la recarga debido a las redes de acueducto y alcantarillado presentes en la ciudad (Garcia-Fresca & Sharp, 2005; Hibbs & Sharp, n.d.; Lerner, 1988; Vázquez-Suñé, Carrera, Tubau, Sánchez-Vila, & Soler, 2010). Si se analiza el caso de Bogotá, en donde las pérdidas en la red de acueducto y alcantarillado son considerables es posible tener un volumen adicional de agua que estaría entrando al sistema. Es de aclarar que este volumen es función de la resistencia vertical que produce la Formación Sabana debido a la frecuente presencia de capas arcillosas.

Como se puede leer, para este proyecto, la recarga es un fenómeno complejo que entraña una notable incertidumbre, por lo que hay que abordar su evaluación, en lo posible, mediante diversas técnicas simultáneas, lo más independientemente posible entre sí.

Entre las diversas técnicas existentes se tiene el método del balance de masa de cloruro (CMB) (Custodio, 2010). Para ello se requiere conocer la deposición atmosférica media de cloruro y la salida del suelo como recarga y escorrentía, al no tener datos de escorrentía con respecto a caudales y cloruros en las zonas altas o de piedemonte, esta no se está considerando motivo por el cual los valores estimados de recarga tienen que entenderse como límites superiores al valor de la recarga.

El balance medio plurianual es:

$$P \times Cl_p = R \times Cl_r$$

Donde P es la precipitación, R la recarga, Cl_p y Cl_r son las respectivas concentraciones de cloruro en la precipitación y en la recarga. Es también oportuno considerar que el método aplicado a la zona saturada proporciona estimativos regionales de la recarga, mientras que en la zona no saturada proporciona estimativos locales.

Los valores de la concentración de Cl^- fueron obtenidos de (Ingeominas, 2001) en el cual midieron la geoquímica del agua de lluvia en la cuenca alta del río Bogotá. Para el análisis de la información de lluvias se tomaron los datos en 8 estaciones pluviométricas con muestreos mensuales de iones

mayoritarios e isótopos estables. En este informe los análisis de lluvia se ponderaron mensualmente por el volumen para cada estación. Cabe anotar que el método se aplica a escala anual por tal motivo los valores de pp(mm) se multiplicaron por 12. Estos son presentados en la Tabla 3-26. De todas las estaciones pluviométricas, solo 4 pueden ayudar a la estimación de esta recarga (Santa Ana, El Delirio, Casa Blanca y el Verjón) por encontrarse en la zona de estudio(Figura 3-81).

Tabla 3-26. Datos de lluvia ponderada por el volumen medidos en el Cuenca alta del río Bogotá en (Ingeominas 2001). La precipitación p, se reporta en el estudio de Ingeominas como un promedio mensual.

Estaciones pluviométricas	Norte x	Este Y	Altitud (msnm)	P(mm)	Cl (mmol/l)	Cl(mg/l)
Los Tunjos	986100	966500	3700	1457	0.08	2.84
El Hato	989200	976700	3170	948	0.07	2.48
casa Blanca	990500	997400	2620	778	0.1	3.55
El Verjon	1005994	998000	3250	1493	0.06	2.13
El delirio	1002200	994300	2850	1339	0.06	2.13
El angulo	1023400	1016200	3530	2095	0.05	1.77
Tibitoc	1012786	1041991	2680	846	0.06	2.13
Santa Ana	1005300	1010500	2710	797	0.08	2.84



Figura 3-81. Localización de las estaciones pluviométricas en donde se tomaron medidas de Cl en la lluvia.

Paralelamente se analizaron los datos de cloruros medidos en los manantiales los cuales fueron presentados en (Ingeominas, 2001) y se presentan en la Tabla 3-27. Valores de cloruros medidos en los manantiales de la cuenca alta del río Bogotá presentados en Fuente: Ingeominas (2001). Estos manantiales se encuentran localizados en la cuenca alta del río Bogotá. No fue posible presentarlos en un mapa pues no se encontraron las coordenadas de estos. El valor promedio de recarga sin tener en cuenta la escorrentía es de 422mm/año. Si suponemos una escorrentía del 65% la recarga sería de 143mm/año.

Tabla 3-27. Valores de cloruros medidos en los manantiales de la cuenca alta del río Bogotá presentados en Fuente: Ingeominas (2001).

Sitio	Cl (mmol/l)	Cl(mg/l)	Recarga(mm)
Los Volc	0.13	4.6	346
Los Volc	0.16	5.7	281
CasaD.I.3	0.07	2.5	643
	0.13	4.6	346
El Cortijo	0.23	8.2	196
Aposentos	0.13	4.6	346
Molinitos	0.13	4.6	346
Sta Rosa	0.08	2.8	562
Floresta	0.06	2.1	750
Lavadero	0.11	3.9	409
El Ratón	0.15	5.3	300
Margarita	0.06	2.1	750
Lavadero	0.1	3.5	450
Pradera	0.14	5.0	321
	0.1	3.5	450
	0.14	5.0	321
San Jorge	0.07	2.5	643
	0.08	2.8	562
	0.23	8.2	196
Yerbab.1	0.11	3.9	409
	0.41	14.5	110
Quilpué	0.2	7.1	225
P.d.Buey	0.06	2.1	750
	0.13	4.6	346
	0.16	5.7	281
Miravalle	0.06	2.1	750
S.Méd	0.42	14.9	107
Caballo	0.21	7.4	214
Promedio			407

3.5.10 Balance de masa global

En esta sección se consideran varios escenarios de balance hídrico global, es decir aplicado al área de la sabana de Bogotá incluida en el modelo analítico 3D que se está construyendo. Las zonas de recarga consideradas se presentan en la Figura 3-82 abajo y consisten de: (i) el área urbana del distrito donde,

basado en los mapas presentados en la sección **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** del Sistema Hidrológico del presente reporte, se presenta una recarga potencial importante en el área urbana, (ii) el área prevalentemente rural de la sabana de Bogotá, cuyo polígono coincide con el área de la sabana de Bogotá considerada para el modelo analítico y, (iii) un polígono de recarga adicional ubicado en el valle de Tenjo donde se ha estimado un retorno de agua procedente del riego de cultivos que puede influir en el balance hídrico de la sabana de Bogotá.

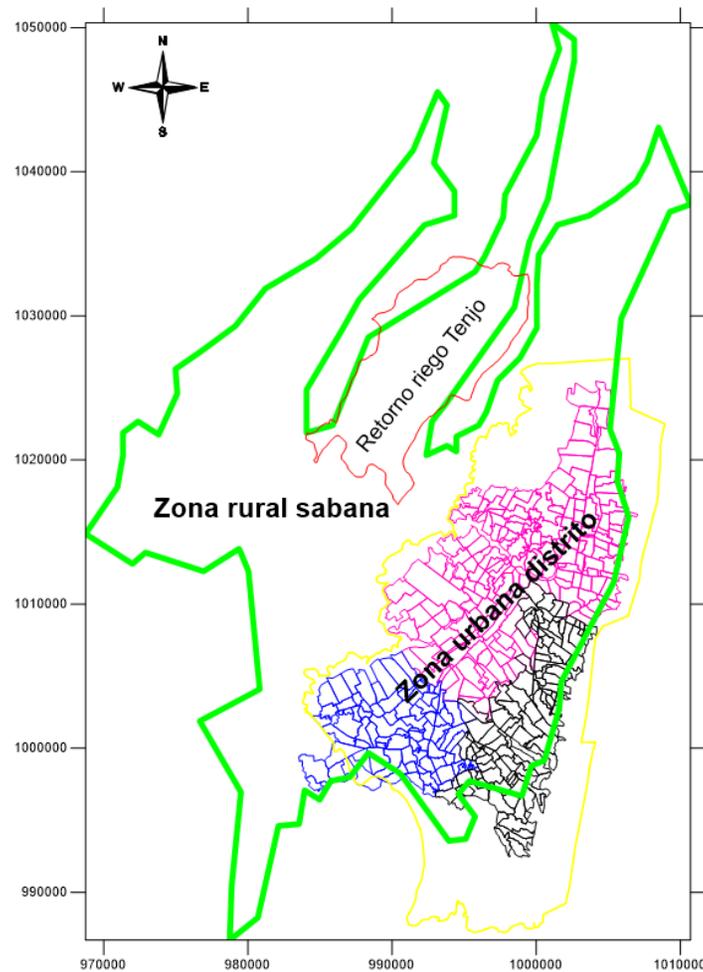


Figura 3-82 Áreas de recarga consideradas para el balance hídrico global. En amarillo el polígono del área de estudio del proyecto. En verde el polígono considerado para la estimación de la recarga rural. En rojo el polígono del retorno de agua por riego de cultivos. En rosado, azul y negro los sub-polígonos de recarga urbana, cada color representativo de una tasa de recarga diferente.

Los valores de recarga ponderados por las áreas de cada polígono y los respectivos volúmenes de agua subterránea se presentan en la Tabla 3-28.

Tabla 3-28 Escenarios de balance hídrico global. En rojo los datos que presentan mayor incertidumbre.

DATOS		ESCENARIOS DE BALANCE							
ENTRADAS	Unidad	0	1	2	3	4	5	6	7
Recarga Urbana (promedio ponderado)	mm/año	403	0	50	120	255	255	255	0
Área recarga urbana	m2	3.299E+08	3.299E+08	3.299E+08	3.299E+08	3.299E+08	3.299E+08	3.299E+08	3.299E+08
Recarga Retorno Agua de Riego	mm/año	198	198	198	198	198	198	198	198
Área cultivos retorno GW	m2	6.348E+07	6.348E+07	6.348E+07	6.348E+07	6.348E+07	6.348E+07	6.348E+07	6.348E+07
Recarga natural rural_sabana	mm/año	118	118	118	118	118	118	118	95
Área Sabana rural - recarga	m2	7.524E+08	7.52E+08						
Area Total Sabana en el Modelo	m2	1.082E+09	1.082E+09	1.082E+09	1.082E+09	1.082E+09	1.082E+09	1.082E+09	1.082E+09
Recarga Lateral desde los cerros (basado en AnAqSim - corte A-A')	m3/d	12,654	12,654	12,654	12,654	12,654	12,654	12,654	12,654
Recarga Urbana (promedio ponderado)	m3/d	364,470	0	45,192	108,461	230,481	230,481	230,481	0
Retorno Agua de Riego (promedio ponderado)	m3/d	34,436	34,436	34,436	34,436	34,436	34,436	34,436	34,436
Recarga Natural_sabana (promedio ponderado)	m3/d	243,252	243,252	243,252	243,252	243,252	243,252	243,252	195,839
Entrada (+)/salida (-) hacia/desde base modelo (basado en AnAqSim - corte A-A')	m3/d	43,336	43,336	43,336	43,336	43,336	-43,336	43,336	43,336
TOTAL ENTRADAS	m3/d	698,149	333,679	378,871	442,140	564,159	477,487	564,159	286,265
SALIDAS	Unidad	0	1	2	3	4	5	6	7
Bombeo desde el Neógeno - Cuaternario	m3/d	-237,910	-237,910	-237,910	-237,910	-237,910	-237,910	-237,910	-237,910
Bombeo desde los Depósitos Consolidados	m3/d	-264,756	-264,756	-264,756	-264,756	-264,756	-264,756	0	0
TOTAL SALIDAS	m3/d	-502,666	-502,666	-502,666	-502,666	-502,666	-502,666	-237,910	-237,910
ERROR BALANCE		28%	-51%	-33%	-14%	11%	-5%	58%	17%

En esta tabla se reportan unos campos con los valores de las entradas de agua al sistema acuífero regional considerado (varios tipos de recarga directa e indirecta), las salidas (solo bombeos desde los depósitos consolidados y no consolidados). Debido a que no se ha completado la modelación analítica del área de estudio, que es prevista para el informe de finales de diciembre como parte de los compromisos del presente convenio, a la fecha no se tiene una idea clara de la hidrodinámica del sistema y por lo tanto tampoco de sus entradas y salidas. En este sentido, el propósito de esta sección del reporte es de presentar diferentes escenarios de balance hídrico y de identificar los que arrojan resultados más confiables en términos no sólo de error sino también de plausibilidad de los datos de entrada.

Es importante aclarar que este ejercicio de balance se basa en tres importantes suposiciones, que serán revisitadas en el próximo informe final:

- El sistema sabana se considera en régimen estacionario. Aunque en el área del distrito los niveles de agua se puede estar estabilizando, en algunos sectores inclusive recuperando (ver sección de análisis de niveles del acuífero somero), este no es necesariamente el caso en la sabana centro-occidental.

- El distrito se considera hidráulicamente conectado con el resto de la sabana centro-occidental. Efectivamente esta suposición se ha comprobado con el modelo geológico 3D del distrito que muestra continuidad lateral entre los dos subdominios, relacionada con la presencia de horizontes permeables en profundidad.
- Para efectos de balance hídrico promedio en el largo plazo, en la mayoría de escenarios considerados se considera que existe cierta continuidad hidráulica también en la vertical entre los depósitos no consolidados y los depósitos consolidados. En otras palabras, los bombeos desde el Complejo Acuífero Guadalupe se estarían reflejando en el balance de aguas del sistema Neógeno-Cuaternario.

Se evaluaron 8 escenarios donde las salidas del sistema (bombeos) se consideran constantes, excepto en el escenario 7 que asume que los bombeos desde depósitos consolidados (principalmente el Complejo Acuífero Guadalupe) no influyen en el sistema suprayacente. Se analiza inicialmente un escenario base (denominado 0 en la Tabla 3-28), donde se introducen como entradas:

- (i) El promedio ponderado de la recarga urbana estimada en la sección de hidrología con base en datos de la EAAB.
- (ii) La recarga natural que ocurre en el sector centro-occidental de la sabana de Bogotá (prevalentemente rural) estimada por medio del software SWAT (Soil and Water Assessment Tool) aplicado a la sabana occidental y basado en datos topográficos, climatológicos, texturas de suelos, uso y cobertura del suelo (para este ejercicio este valor se extiende también a las partes rurales de la sabana no incluidas en este análisis con SWAT)
- (iii) El retorno de agua de riego en el municipio de Tenjo donde existen varios cultivos y se realiza un bombeo intensivo de las aguas subterráneas; este retorno se estimó con base en las demandas hídricas de los diferentes cultivos analizados que indicó que solo en el municipio de Tenjo se presentaba un exceso de agua de riego.

En los otros escenarios se variaron las variables del balance que presentan la mayor incertidumbre, a saber, la recarga urbana y las entradas/salidas desde la base del sistema sabana (en el escenario 5 se asumió que había pérdidas del Neógeno-Cuaternario hacia los depósitos consolidados).

Los resultados hasta la fecha indican que el input más importante es relacionado con las recargas areales, es decir las recargas directas aplicadas en superficie (recarga rural y urbana), cuyo volumen anual es mayor que los flujos laterales procedentes de los cerros y zonas de piedemonte, debido principalmente a la importante extensión horizontal de estas áreas. Con respecto a la entrada o salida de agua subterránea hacia o desde la base del Complejo Neógeno-Cuaternario se tiene bastante incertidumbre al respecto, y se estará investigando en detalle esta variable espacial con la ayuda de la herramienta de modelación analítica AnAqSim (Fitts, 2010).

Los escenarios en verde indican errores más aceptables (-5 a 17%) de los en amarillo, que presentan errores en el rango 28-58%. Es importante notar que el escenario 7, con error aceptable, considera que no hay conexión entre el neógeno cuaternario y los depósitos consolidados, por lo que se asignó 0 al bombeo desde los depósitos consolidados; además, se considera nula la recarga urbana, razón por la que el balance entra en el intervalo aceptable.

Se observa que variando la recarga urbana el error varía considerablemente, por lo tanto, el equipo de trabajo está estudiando la posibilidad de incorporar un modelo numérico sencillo (1D) para modelar una columna de suelo de la zona no saturada por debajo del área urbana del distrito, con el objetivo de transitar las fugas de la red de acueducto y alcantarillado en profundidad. De esta forma se pretendería estimar que porcentaje de estas fugas promedio estaría alcanzando horizontes más profundos del relleno de la sabana de Bogotá.

Para alimentar este modelo se podría hacer uso de la información litológica del Metro de Bogotá, aunque se tendrá que asumir algunos parámetros hidráulicos necesarios para la modelación de la zona no saturada. Esta idea es razonable considerando que los perfiles litológicos del Metro han indicado la presencia de varios espesores de arcilla en los depósitos fluviolacustres que pueden restringir el flujo vertical en la zona no saturada, y consecuentemente no todas las fugas de la red de la EAAB llegarían en profundidad como recarga real.

3.5.11 Conexión con cuerpos de agua superficial

El mapa de isopiezas subsuperficiales para el Distrito que se presenta en el Mapa hidrogeológico (Anexo D), construido a partir de los niveles estáticos de los pozos de monitoreo de las EDS, indica una dirección del flujo regional en sentido E-W, con tendencia hacia el centro de la cuenca, en dirección al Río Bogotá. Perfiles realizados entre los cuerpos de agua superficial, permiten inferir escenarios de conexión entre canales, ríos y humedales, o simplemente intercambios de flujo con el agua subsuperficial.

Estos escenarios son hipotéticos, pues se tiene una alta incertidumbre asociada a los datos de nivel. Por esto se recomendó realizar un levantamiento con precisión submétrica, el cual se realizará en el marco de este convenio.

3.5.12 Esquema del Modelo Conceptual

En la zona de estudio, en función de la arquitectura geológica, la hidrología, la hidráulica y la hidrogeología, se seleccionaron 10 perfiles los cuales se presentan en Figura 3-83. En función de la descripción hidrogeológica detallada en la sección 4.1 se construyeron 10 perfiles hidrogeológicos. A continuación, se describen los perfiles O-O' y J-J'.

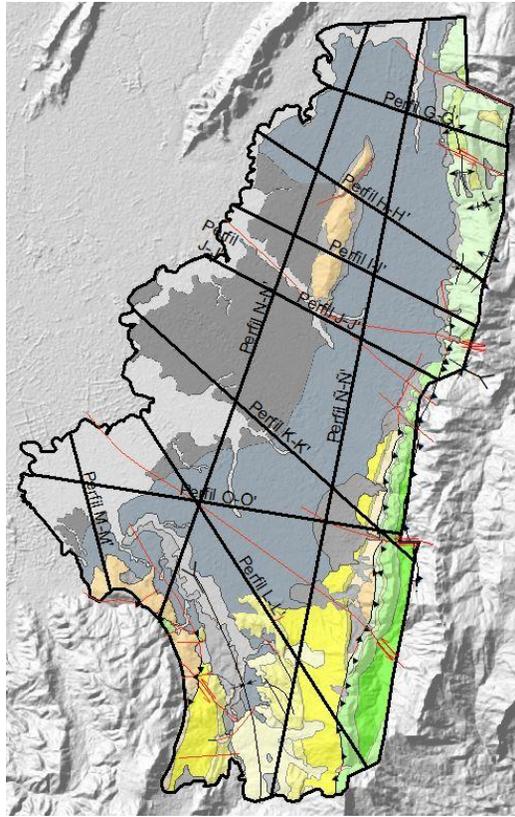


Figura 3-83. Localización de los perfiles hidrogeológicos para la zona de estudio.

El perfil O-O' (Figura 3-84) atraviesa la zona de estudio desde los cerros orientales a la altura del cerro de Monserrate hasta el occidente a San Bernardino XII-río Bogotá en Bosa. Como entradas se tiene una recarga en el pie de monte producto de la precipitación directa y escorrentía-infiltración en sectores no urbanizados, una recarga natural producto de la precipitación en la ciudad (la cual es muy baja a nula) y una recarga que percola a través de la zona no saturada producto de las pérdidas de la red de acueducto y alcantarillado. Esta última recarga se tendrá que analizar más a fondo mediante simulaciones numéricas 1D de la zona no saturada con el objetivo de cuantificar el efecto que tiene la estratificación arcillosa en el volumen de infiltración.

Una importante entrada al sistema proviene de la recarga en el piedemonte y que se desarrolla en la formación Río Tunjuelito. El agua es movilizada principalmente por la formación Sabana y la formación Subachoque. En el piedemonte de la formación Río Tunjuelito se presenta un flujo local, mientras que el flujo intermedio se desarrolla entre esta formación y la formación Sabana. El desarrollo de flujos regionales se da principalmente entre la formación Río Tunjuelito y la formación Subachoque los cuales se pueden ver afectados por las fallas transversales San Cristóbal Y Bojacá. La subdivisión de los sistemas de flujo se hace con respecto a la escala del problema analizado, en este caso el perfil O-O'. En estas zonas posiblemente se tenga la presencia de flujos verticales con su consecuente mezcla de aguas. Esta mezcla de aguas puede causar datos anómalos en cuanto a

química y puede arrojar edades del agua inconsistentes con los flujos conceptualizados. En este perfil no se tienen pozos de explotación, por este motivo no se analiza el comportamiento de los niveles piezométricos.

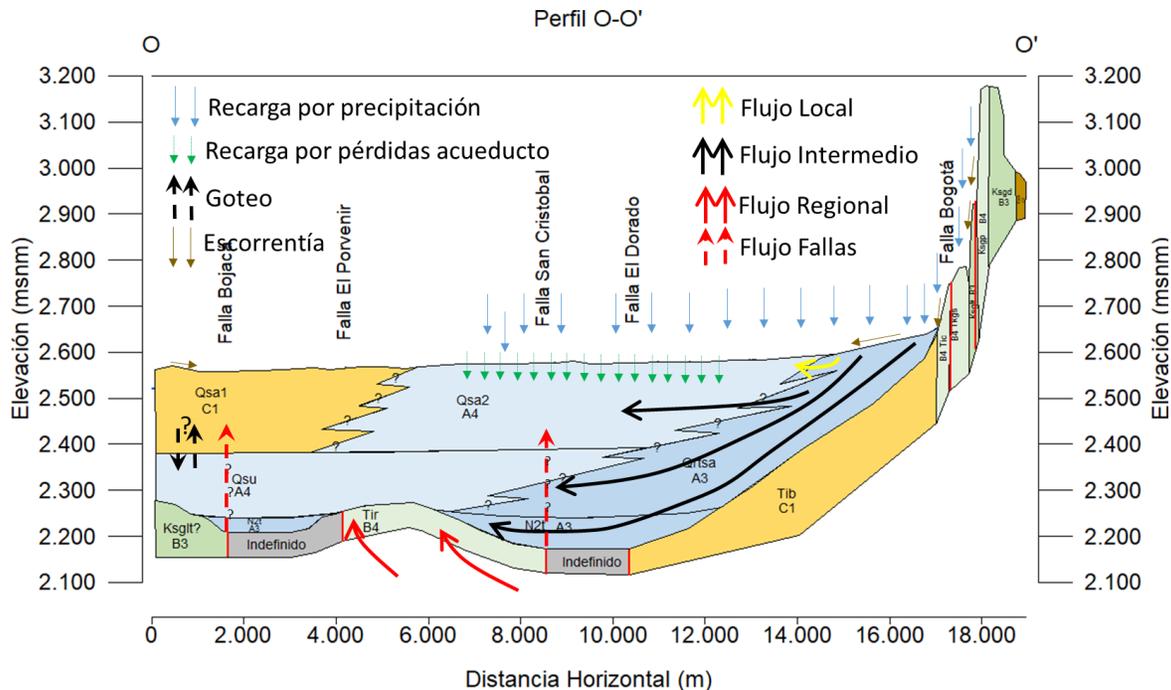


Figura 3-84 Representación gráfica del perfil hidrogeológico O-O'

El perfil J-J' (Figura 3-85) atraviesa la zona de estudio desde los cerros a la altura de los bosques de Bellavista (aprox. Calle 99 con Cr 3) hasta la sabana de Tibabuyes con el río Bogotá (aprox. Cr 150 con Calle 143). Al igual que en el perfil anterior, las entradas están dadas por la recarga natural debido a la precipitación y por las pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado. Similarmente, una entrada importante al sistema se da por el piedemonte donde se tienen flujos locales y su evidencia se ve reflejada en los pozos artesianos presentes en la zona. Los flujos intermedios se desarrollan en la formación Sabana y los flujos regionales abarcan la formación Sabana, Subachoque y Tilatá. Existe un flujo regional de poca importancia con respecto a las velocidades de Darcy que abarcan las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Guaduas y finalmente la formación Labor y Tierna. Al mismo tiempo en esta zona el intercambio vertical de agua con el sistema Neógeno-Cuaternario no es de mucha menor magnitud que el flujo subhorizontal que se desarrolla en esta zona. En este perfil se evidencia la presencia de pozos de bombeo los cuales están todos localizados en la formación Sabana (Qsa2). La formación Sabana (Qsa1) que se aflora en la parte final del perfil y que presenta una baja permeabilidad incide en que el flujo sea redireccionado hacia la formación Subachoque. El agua disponible en esta formación (Qsa1) es producto del goteo desde la formación Qsa2 y la Subachoque

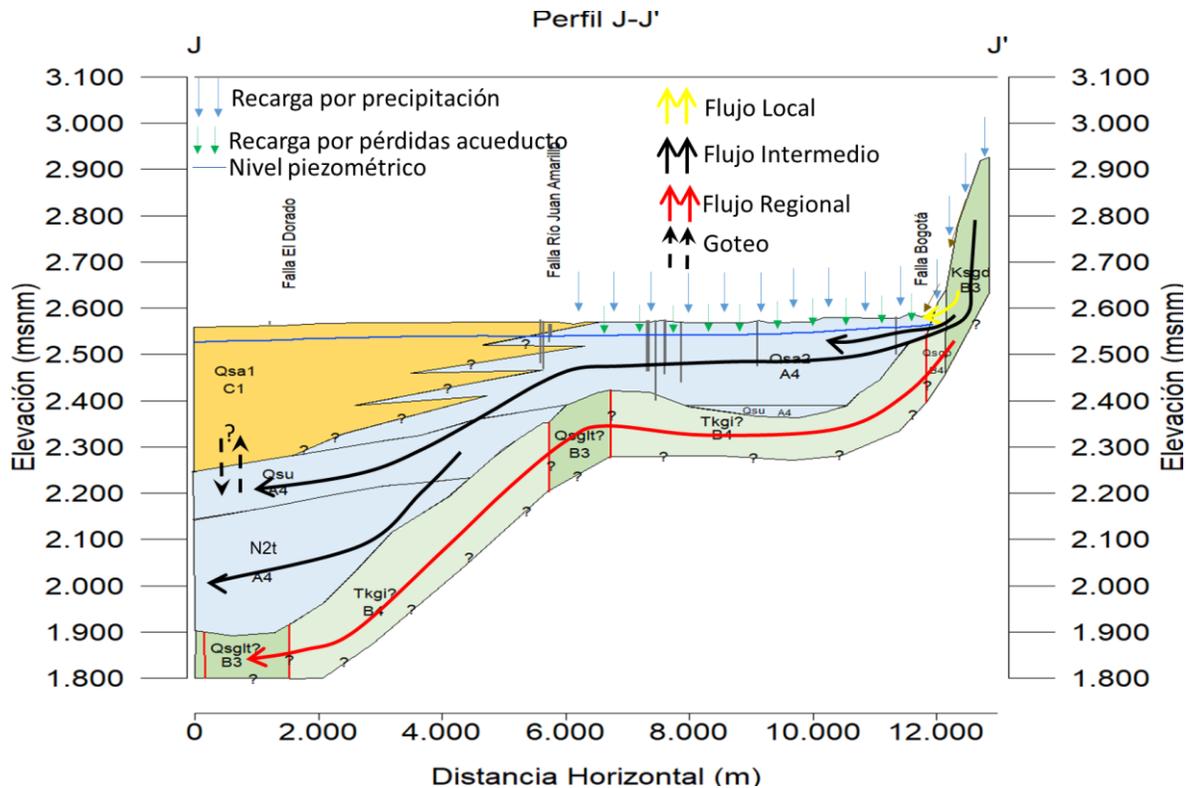


Figura 3-85. Representación gráfica del perfil hidrogeológico J-J'

Como se comentó anteriormente, se usó el software RockWorks para generar un modelo 3D geológico. Este modelo fue usado para representar esquemáticamente como es el funcionamiento hidrogeológico (entradas, salidas, almacenamientos) de la zona de estudio. El sistema hidrogeológico del distrito de Bogotá es complejo debido a su arquitectura geológica, la presencia de fallas y su régimen hidrológico. Las diferentes depositaciones de material, generaron una anisotropía muy marcada en el sentido vertical y esto se ve reflejado en la presencia de los diferentes estratos. Los cuales presentan variaciones en permeabilidades de varios órdenes de magnitud.

Con el análisis de la geología a escala regional (Para el acuífero somero) se puede intuir que la recarga en el sistema es poco probable, pero, al analizar más a detalle, se encuentra esta continuidad lateral que se desarrolla hasta los límites del distrito y que finalmente permite concluir que se tiene una presencia de lentes acuíferos. Es así, que el agua que se recarga en los cerros orientales alimenta estos lentes y son los que permiten tener un balance con las extracciones. Esto se ve reflejado en que, para el régimen de explotación actual (no se tiene certeza si las concesiones han disminuido), los niveles en la mayoría de los casos están presentando una leve recuperación. Con excepciones puntuales (descrito en el apartado 3.5.8).

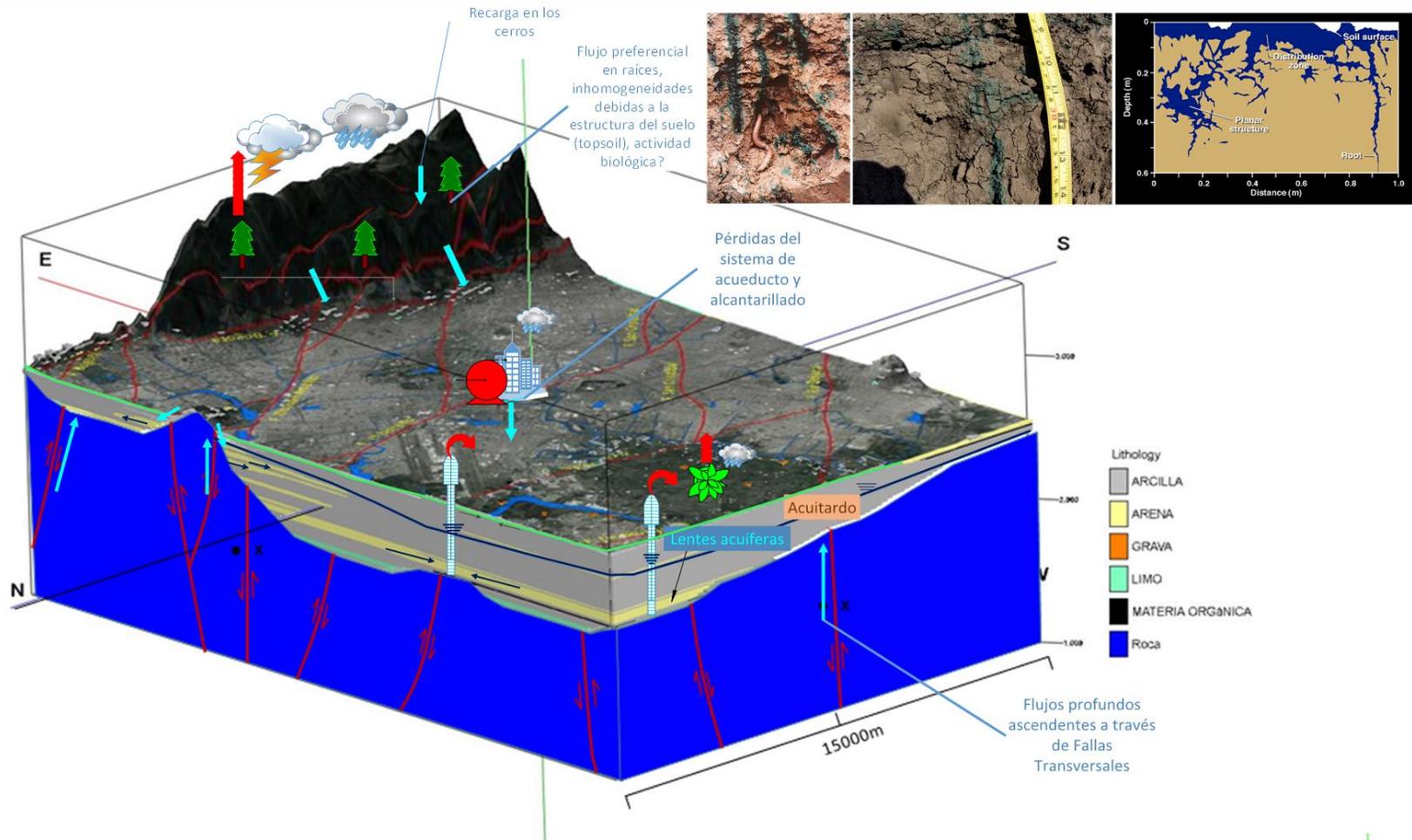


Figura 3-86. Representación gráfica del modelo hidrogeológico conceptual.

Las entradas al sistema vienen condicionadas por el régimen de precipitación y por el tipo de formación geológica presente. Las litologías que más permiten la recarga son los afloramientos de las formaciones Labor – Tierna y la formación Arenisca dura, esto, debido a su nivel de fracturamiento. La formación Sabana permite una recarga en su afloramiento y permiten un mayor tránsito del agua sin dejar de tener presente que lo hace con unas velocidades de Darcy bajas. La formación Guaduas que aflora al sur oriente del distrito permite también una recarga al sistema. A una escala local se puede decir que por su litología (mucho arcilla) la sabana presenta bajas tasas de recarga, sin embargo, a nivel regional (mirando toda la sabana), si se multiplica estas tasas por la extensión total de la sabana resulta que esta recarga se convertiría en uno de los componentes principales de la recarga asociados al sistema regional de la sabana. Esto debido a que los afloramientos de roca permeables son limitados con respecto a toda la sabana.

Si bien, en el perímetro urbano, se tiene una recarga muy baja o nula debido a la impermeabilización causada por las obras civiles, se debe analizar si existe un aporte debido a las pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado. Las pérdidas del sistema para el distrito se estiman entre 300mm/año y 600mm/año por este motivo es importante realizar un modelo 1D en donde se evalué para una estratigrafía dada cuanto volumen puede finalmente entrar al sistema como recarga.

Como salidas del modelo se tiene caudales de extracción de los pozos concesionados y una aparente pérdida potencial del sistema Neógeno-Cuaternario hacia el complejo Guadalupe, esto soportado en la aparente diferencia de niveles piezométricos. Las tendencias analizadas en el apartado 3.5.8 (aparente recuperación de niveles en algunos sectores del distrito capital), parece indicar que la recarga del sistema en estos sectores está siendo mayor a las salidas y producto de esto se está presentando una leve recuperación de los niveles (se aclara que este análisis se realiza puntualmente y con series de datos cortas en el mayor de los casos). Según las interpolaciones de niveles realizadas (Figura 3-75) la descarga se estaría dando hacia el occidente del distrito.

La presencia de fallas transversales como la falla río Bojacá y la falla San Cristóbal, pueden permitir un flujo ascendente el cual generaría una mezcla de aguas entre los flujos regionales, intermedios y locales. Este flujo ascendente es evidente en el club Los Lagartos en donde se tiene una medida anómala de temperatura.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL

- Se revisó la información disponible con el objetivo de estimar las propiedades de las diferentes formaciones geológicas. Estas se incluyen en la leyenda del mapa hidrogeológico (Anexo D).
- Con respecto a la distribución de los valores de pH en las aguas subterráneas del distrito, el valor más ácido (4.6) fue medido en el pozo Petco el cual tiene una profundidad de 115 metros, capta los depósitos no consolidados y está localizado al sur de la ciudad. Este valor no hace parte de la tendencia típica de los pozos que se encuentran alrededor de la zona donde está este pozo. El valor más básico (8.6) se localiza al nororiente de la ciudad. De nuevo, este valor no es representativo de los valores de la zona. La distribución espacial del muestreo muestra que los valores entre 5.6 a 8.5 se encuentran dispersos por todo el dominio.
- Las zonas donde se tienen los máximos descensos del nivel no presentan ninguna relación con los valores de pH, a excepción de la zona sur donde se encuentra una concentración de pH bajos.
- La temperatura del agua subterránea en el piedemonte y en la zona entorno a esta se mantiene entre los 18°C - 20°C, presentándose un aumento hacia el occidente. Esto debido a que la captación, más hacia el occidente, se hace en pozos más profundos. Al sur de la ciudad se tienen dos puntos con temperaturas altas (Carboquímica N4, 34.80C y La Fayette 27.20C). Estos puntos coinciden con las mayores explotaciones y los mayores descensos del nivel.
- Los valores de Conductividad Eléctrica (CE) son más bajos (en torno a 20μS) en las zonas de piedemonte, presentando un aumento (entorno a los 1850 μS/cm) hacia el oeste de la cuenca. Este comportamiento de la CE es típico de zonas donde el agua de recarga va teniendo un enriquecimiento producto del intercambio iónico.
- No es claro un enriquecimiento en Cl⁻ a medida que el agua subterránea va avanzando hacia el interior de la cuenca de la Sabana de Bogotá (esto bajo el supuesto que las líneas de flujo avanzan desde los cerros orientales hacia el occidente). Esta falta de enriquecimiento en la dirección del flujo sugiere que los materiales geológicos de la sabana de Bogotá no son fuentes importantes de este elemento. Es posible que los valores altos de Cloruros que se registran en las zonas de mayor explotación del recurso, estén relacionados con actividades antrópicas que están influyendo en los valores. Este fenómeno hace que se genere una especie de aleatoriedad espacial en los datos.

4.2 MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

- Las campañas de (SDA, 2013) y (UNAL, 2006) por la cantidad y por la distribución espacial de los datos permitieron realizar un análisis tanto en magnitudes como en evolución temporal teniendo en cuenta los 8 años que separan estas dos campañas. En estas dos campañas se puede observar que no se ha dado un cambio significativo en los descensos y se han mantenido prácticamente constantes.
- Los menores descensos se encuentran entorno a la zona del Carmel Club (autopista norte con calle 153). Los mayores abatimientos se encuentran entre el aeropuerto, pasando por el parque Simón Bolívar y Puente Aranda y al sur de la ciudad entorno al cementerio del Apogeo.
- Se realizó una sectorización de los niveles en función de los abatimientos con el objetivo de poder analizar para cada pozo los datos de nivel disponibles para diferentes periodos de tiempo. De la sectorización se puede concluir que en general los niveles parecen tener una recuperación. Este efecto queda enmascarado en las interpolaciones debido a que si se tiene al menos un pozo con un descenso considerable la interpretación hace pensar que es representativo de toda la zona.
- Se ha realizado una primera estimación de la recarga mediante el método del balance de Cloruros usando los datos de cloruros en los manantiales descritos en (Ingeominas, 2001) y usando las estaciones pluviométricas en las cuales se tiene medida de Cloruros y que se encuentran en la zona de estudio. Es de aclarar que en este momento se está buscando las coordenadas de esos manantiales con el objetivo de afinar los resultados. La metodología sugiere una recarga entorno a los 143mm/año. Por el momento no es posible determinar el lugar representativo de este valor debido a que no se tienen las coordenadas de los manantiales. Este es un trabajo que se está ajustando actualmente.
- El sistema hidrogeológico del distrito de Bogotá es complejo debido a su arquitectura geológica, la presencia de fallas y su régimen hidrológico. Las diferentes depositaciones de material, generaron una anisotropía muy marcada en el sentido vertical y esto se ve reflejado en la presencia de los diferentes estratos. Los cuales presentan variaciones en permeabilidades de varios órdenes de magnitud.
- Con el análisis de la geología a escala regional (para los primeros 100m) se podría inferir que la recarga en el sistema es poco probable, debido a que esta sugiere una ausencia de conectividad lateral con las zonas de piedemonte. Pero, al analizar los perfiles del metro de Bogotá se evidencia lo contrario. Se encuentra una continuidad lateral que se desarrolla hasta los límites del distrito y que finalmente permite concluir que se tiene una presencia de lentes acuíferos.
- Las entradas al sistema vienen condicionadas por el régimen de precipitación y por el tipo de formación geológica presente. Las zonas que más permiten la recarga son los afloramientos de las formaciones Labor – Tierna y la formación Arenisca dura, esto, debido a su nivel de fracturamiento. La formación Sabana permite una recarga en sus afloramientos y es la que

permite un mayor tránsito del agua sin dejar de tener presente que lo hacen con unas velocidades de Darcy bajas.

- Si bien, en el perímetro urbano, se tiene una recarga muy baja o nula debido a la impermeabilización causada por las obras civiles, se debe analizar si existe un aporte debido a las pérdidas del sistema de acueducto y alcantarillado. Las pérdidas del sistema para el distrito se estiman entre 300mm/año y 600mm/año por este motivo es importante realizar un modelo 1D en donde se evalué para una estratigrafía dada cuanto volumen puede finalmente entrar al sistema como recarga real.
- Como salidas del modelo se tiene caudales de extracción de los pozos concesionados y la descarga del sistema. Las tendencias analizadas en la sección 4.2.1, parece indicar que la recarga del sistema está siendo mayor a las salidas y producto de esto se está presentando una leve recuperación de los niveles (se aclara que este análisis se realiza puntualmente y con series de datos cortas en el mayor de los casos).
- La presencia de fallas transversales como la falla Río Bojacá y la Falla San Cristóbal, pueden permitir un flujo ascendente el cual generaría una mezcla de aguas entre los flujos regionales, intermedios y locales. Este flujo ascendente es evidente en el club Los Lagartos en donde se tiene una medida anómala de temperatura.
- Del análisis analítico 2D, se logró diferenciar que las zonas de recarga se extienden más al oriente de la divisoria de aguas oriental del Distrito, al igual que hacia el occidente. Que se tienen descargas en la zona de piedemonte (flujos locales), descargas a través de las fallas transversales hacia el Cuaternario. Que los tiempos de tránsito van desde cientos de años a miles de años. Dado lo anterior se distinguen flujos regionales, intermedios y locales, con una distribución diferente al sur y al norte de la ciudad. Se evidencia la probabilidad de flujos verticales, provenientes de la recarga en los cerros, que viajan a través de los depósitos consolidados, en especial el Grupo Guadalupe y ascienden hasta el cuaternario. Los parámetros más sensibles en el modelo son la conductividad hidráulica y las condiciones de recarga en la zona de los cerros.

4.3 INCERTIDUMBRE

- Se tiene incertidumbre asociada a la información recopilada en la base de datos de pozos en la Sabana y en el Distrito, especialmente en los atributos de profundidad de extracción (para aun mismo pozo se reportaban dos o más profundidades), caudales de extracción (gran parte reportados como el caudal concesionado), clasificación de pozos activos y no activos y ubicación de los filtros. Otro factor que agrega incertidumbre trata de la nomenclatura de los pozos ya que para varios puntos de agua no fue posible encontrar el respectivo código.
- En relación con lo dicho, se tiene incertidumbre en la estimación de la demanda. A la fecha no se tiene un inventario actualizado, que registre los pozos que se encuentran inactivos, de reportar los nuevos, y medir el caudal extraído en los pozos activos.

- Se tiene incertidumbre en la medición de los niveles estáticos, generalmente, las entidades requieren interrumpir el bombeo 24 horas antes de la medición del nivel en el pozo. En algunos casos, sin embargo, la recuperación del nivel en el pozo es lejos del 90% o 95% generalmente requerido para el registro del nivel estático y para realizar nuevas pruebas de bombeo. Por lo tanto, cuando se reporta este nivel como estático y se utiliza para realizar mapas de isopiezas, se está considerando, erróneamente, la condición pseudoestática como representativa del estado del recurso a nivel regional.
- La incertidumbre del nivel estático, también se asocia a diseño de los pozos. En el área de estudio los pozos de bombeo suelen tener grandes longitudes de la zona de respuesta, por ejemplo, en pozos de bombeo para fines productivos, que tienen como objetivo principal maximizar el caudal a extraer en el pozo, por lo que se dejan empaques de grava a lo largo de toda la longitud del pozo.
- Con respecto al balance hídrico global de la sabana de Bogotá, a la cual pertenece el área de estudio del Distrito, existen incertidumbres principalmente relacionadas con:
 - Entradas/salidas de agua subterránea desde la base del Complejo Neógeno-Cuaternario desde/hacia el complejo Paleógeno o Guadalupe.
 - Propagación de la infiltración efectiva (es decir la resta entre la infiltración en el suelo y la evapotranspiración desde el mismo) asociadas con las pérdidas de la red de acueducto y alcantarillado de Bogotá, hacia horizontes más profundos del relleno Cuaternario.
 - Incertidumbre en los volúmenes de agua bombeados del sistema, que se pueden atribuir a la falta de un inventario actualizado de captaciones en la sabana de Bogotá.
- Con la utilización de modelación analítica en 3D y modelación 1D de la zona no saturada se espera bajar los niveles de incertidumbre en los dos primeros ítems.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Acosta, J., & Ulloa, C. (2001a). Geología Plancha 227 La Mesa. Ingeominas.
- Acosta, J., & Ulloa, C. (2001b). Geología Plancha 246 Fusagasugá.
- AIH, A. I. de H. (1995). Leyenda internacional de los mapas hidrogeológicos.
- Álvarez, A. (1997). Gestion del Agua Subterranea en la Sabana de Bogota ., (22), 81–101.
- Anderson, M., Woessner, W. W., & Hunt, R. (2015). Applied Groundwater Modeling, Second Edition: Simulation of Flow and Advective Transport. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-091638-5.00001-8>
- Branquet, Y., Cheilletz, A., Cobbold, P. ., Baby, P., Laumonier, B., & Giuliani, G. (2002). Andean deformation and rift inversion, eastern edge of Cordillera Oriental (Guatèque–Medina area), Colombia. *Journal of South American Earth Sciences*, 15(4), 391–407. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(02\)00063-9](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(02)00063-9)
- CAR. (2008). PLAN DE MANEJO AMBIENTAL de agua subterránea en la sabana de Bogotá y Zona Crítica Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Cardenas, M. B. (2008). Surface water-groundwater interface geomorphology leads to scaling of residence times. *Geophysical Research Letters*, 35(8), L08402. <https://doi.org/10.1029/2008GL033753>
- Clark, I. (2015). *Groundwater Geochemistry and Isotopes*. (Taylor & Francis Group, Ed.). <https://doi.org/10.1111/gwat.12377>
- Colletta, B., Hebrard, F., Letouzey, J., Werner, P., & Rudkiewicz, J. (1990). TECTONIC STYLE AND CRUSTAL STRUCTURE OF THE EASTERN CORDILLERA (COLOMBIA) FROM A BALANCED CROSS-SECTION. In *Petroleum and tectonics in mobile belts : proceedings of the 4th IFP Exploration and Production Research Conference, held in Bordeaux, November 14-18, 1988* (pp. 81–100). Editions Technip.
- Cooper, M. A., Addison, F. T., Alvarez, R., Coral, M., Graham, R. H., Hayward, A. B., ... Taborda, A. (1995). BASIN DEVELOPMENT AND TECTONIC HISTORY OF THE LLANOS BASIN, EASTERN CORDILLERA AND MIDDLE MAGDALENA VALLEY, COLOMBIA. *AAPG Bulletin Boletín Servicio Geológico Nacional*, 79(1319).
- Corredor, V., & Terraza, R. (2015). Geología Plancha 228 Bogotá Noreste.
- EAAB-JICA. (2003). Estudio del Desarrollo Sostenible del Agua Subterránea en la Sabana de Bogotá. Bogotá.
- EAAB-JICA. (2009). Estudio de abastecimiento sostenible de agua para la ciudad de Bogotá y áreas circundantes basado en el manejo integrado de recursos hídricos en la República de Colombia.

- Fitts, C. R. (2010). Modeling aquifer systems with analytic elements and subdomains. *Water Resources Research*, 46(7), n/a-n/a. <https://doi.org/10.1029/2009WR008331>
- Freeze, R. A., & Witherspoon, P. A. (1966). Theoretical analysis of regional groundwater flow: 1. Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resources Research*, 2(4), 641–656. <https://doi.org/10.1029/WR002i004p00641>
- Helmens, K. (1990). Neogene-Quaternary geology of the high plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia : stratigraphy, paleoenvironments and landscape evolution, 202. Retrieved from <http://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783443640750/%23?l=EN>
- Helmens, K. F., & van der Hammen, T. (1994). The Pliocene and Quaternary of the high plain of Bogotá (Colombia): A history of tectonic uplift, basin development and climatic change. *Quaternary International*, 21(C), 41–61. [https://doi.org/10.1016/1040-6182\(94\)90020-5](https://doi.org/10.1016/1040-6182(94)90020-5)
- Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA. (2000a). Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C.
- Hidrogeocol Ltda, PNUD, & DAMA. (2000b). Elaboración del modelo hidrogeológico para los acuíferos de Santa Fe de Bogotá, D.C. Retrieved from http://oab.ambientebogota.gov.co/apc-aa-files/57c59a889ca266ee6533c26f970cb14a/elaboracion_del_modelo_hidrogeologico_para_los_acuiferos_de_santa_fe_de_bogota_dc.pdf
- Ingeominas. (1991). Estudio Hidrogeológico cuantitativo de la sabana de Bogotá. Mapa hidrogeológico sector Tibito-Salto de Tequendama. Bogotá.
- Ingeominas. (2001). Caracterización Geoquímica e Isotópica de los acuíferos de la Cuenca Alta Bogota. Bogotá.
- Ingeominas. (2005). Geología de la sabana de bogotá. Instituto Colombiano De Geología Y Minería Ingeominas.
- INGEOMINAS. (2002a). Modelo Hidrogeologico conceptual de la Sabana de Bogota, INGEOMINAS-OIEA COL 8019.
- INGEOMINAS. (2002b). Modelo hidrogeológico conceptual de la sabana de bogota. Recursos, Subdireccion Subsuelo, D E L Tecnicas, Aplicacion D E En, Isotopicas Aguas, L O S Estudios D E.
- Julivert, M. (1962). ESTUDIO SEDIMENTOLOGICO DE LA PARTE ALTA DE LA FORMACIÓN GUADALUPE AL E DE BOGOTÁ (CRETACICO SUPERIOR), 10, 25–54.
- Kuhry-Helmens, K. F. (1990). Neogene-Quaternary geology of the high plain of Bogotá, Eastern Cordillera, Colombia : stratigraphy, paleoenvironments and landscape evolution. J. Cramer. Retrieved from <http://www.schweizerbart.de/publications/detail/artno/064016300?l=EN>
- Lobo-Guerrero, A. (1992a). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana.
- Lobo-Guerrero, A. (1992b). Geología e Hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. Retrieved from http://www.logemin.com/eng/Download/pdf/16_Geologia_hidrogeologia_Sabana_Bogota.pdf

Lobo-Guerrero Uscátegui, A. (2005). La Falla de Bogotá en Cundinamarca.

Maréchal, J. C., Dewandel, B., & Subrahmanyam, K. (2004). Use of hydraulic tests at different scales to characterize fracture network properties in the weathered-fractured layer of a hard rock aquifer. *Water Resources Research*, 40(11), 1–17. <https://doi.org/10.1029/2004WR003137>

Maréchal, J. C., Wyns, R., Lachassagne, P., Subrahmanyam, K., Guillemin, C., Pinville, D., & Wyns, J. C. M. R. (2004). Vertical Anisotropy of Hydraulic Conductivity in the Fissured Layer of Hard-rock Aquifers due to the Geological Structure of Weathering Profiles. *Journal of the Geological Society of India*, 63(5), 545–550. [https://doi.org/10.1016/s1631-0713\(03\)00082-8](https://doi.org/10.1016/s1631-0713(03)00082-8)

Ochoa, D., Hoorn, C., Jaramillo, C., Bayona, G., Parra, M., & De La Parra, F. (2012). The final phase of tropical lowland conditions in the axial zone of the Eastern Cordillera of Colombia: Evidence from three palynological records. *Journal of South American Earth Sciences*, 39, 157–169. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.04.010>

Patiño, A., Fuquen, J., Ramos, J., Pedraza, A., Caballos, L., Pinzon, L., ... Torres, A. (2011). Geología plancha 247 Cáqueza. Escala 1:100.000.

Patiño, V., & Bermoudes, D. (2002). Fallas longitudinales y transversales en la Sabana de Bogotá, Colombia, 24(39). Retrieved from <http://revistas.uis.edu.co/index.php/revistaboletindegelogia/article/viewFile/3909/4258>

PNUD, DAMA, & Hidogeocol. (1999). Elaboracion Del Modelo Hidrogeologico Para Los Acuíferos De Santa Fe De Bogota, D.C. PNUD/COL/96/023.

Renzoni, G. (1967). GEOLOGIA DEL MACIZO DE QUETAME.

Rodriguez, C.O; Jiménez, G. (1986). Datación del agua subterránea de la sabana de Bogotá y sus implicaciones hidrogeológicas. *Geología Colombiana*, 205–218.

Sarmiento, L., Van Wess, J., & Cloetingh, S. (2006). Mesozoic transtensional basin history of the Eastern Cordillera, Colombian Andes: Inferences from tectonic models. *Journal of South American Earth Sciences*, 21(4), 383–411. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2006.07.003>

SDA. (2013). SISTEMA DE MODELAMIENTO HIDROGEOLÓGICO DEL DISTRITO CAPITAL BOGOTÁ.

SIAM. (2006). Informe Final: INCLUSIÓN DEL BALANCE HÍDRICO, IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO Y CAPACITACIÓN EN MODFLOW.

Torres, V., Vandenberghe, J., & Hooghiemstra, H. (2005). An environmental reconstruction of the sediment infill of the Bogotá basin (Colombia) during the last 3 million years from abiotic and biotic proxies. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, <https://doi.org/10.1016/j.palaeo.2005.05.005>

Tóth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research*, 68(16), 4795–4812. <https://doi.org/10.1029/JZ068i016p04795>

UNAL. (2005). BRINDAR APOYO TÉCNICO Y ACTUALIZAR HERRAMIENTAS PARA LA REGULACIÓN DEL APROVECHAMIENTO DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS EN BOGOTÁ.

van der Hammen, T., & Hooghiemstra, H. (1997). Chronostratigraphy and correlation of the Pliocene and Quaternary of Colombia. *Quaternary International*, 40(96), 81–91. [https://doi.org/10.1016/S1040-6182\(96\)00064-X](https://doi.org/10.1016/S1040-6182(96)00064-X)

Van der Hammen, T., Werner, J. H., & van Dommelen, H. (1973). Palynological record of the upheaval of the Northern Andes: A study of the pliocene and lower quaternary of the Colombian Eastern Cordillera and the early evolution of its high-Andean biota. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 16(1–2). [https://doi.org/10.1016/0034-6667\(73\)90031-6](https://doi.org/10.1016/0034-6667(73)90031-6)