

PRODUCTO 4: ANALISIS HIDROGEOLOGICO Y MODELO DE ABASTECIMIENTO ALTERNO POR EXPLOTACION DE AGUAS SUBTERRANEAS

UT GBG SABANA

CONTRATO EPC-PDA-579-2025

CONTROL DE VERSIONES

Versión	Fecha:	Descripción Modificación	Folios
0	01 de octubre de 2026	Ajuste a comentarios	243

RESPONSABLES

Aprobado por:	
ING. EUGENIA VILLEGAS BOTERO	
CC. 51.780.785	
TP. 25202-25501 CND	
DIRECTORA DE CONSULTORÍA	
Revisado por:	
ING. DIANA PATRICIA RAMÍREZ ARAGÓN	
C.C 52.769.9738	
TP. 25202-152867	
COORDINADORA DE CONSULTORÍA	

CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DEL ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO 19
2 OBJETIVOS DEL ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO 21
3 METODOLOGÍA 22
3.1 ORGANIZACIÓN DEL INFORME 22
3.2 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA 23
3.3 ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y CORTES HIDROGEOLÓGICOS A ESCALA 1:25000 23
3.3.1 Recopilación y evaluación de insumos 24
3.3.2 Homologación y correlación de unidades litoestratigráficas 24
3.3.3 Criterios de ajuste cartográfico 25
3.4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROESTRATIGRÁFICA 25
3.5 EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO CONCEPTUAL Y CUENCAS HIDROLÓGICAS 25
3.6 CONSOLIDACIÓN DEL INVENTARIO DE CAPTACIONES 26
3.7 FORMULACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARA CADA MUNICIPIO A ESCALA 1:25.000 26
3.8 DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE INTERÉS PARA EXPLORACIONES Y METODOLOGÍA 26
4 MARCO GEOLÓGICO 27
4.1 ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO 27
4.1.1 Grupo Villeta 29
4.1.2 Grupo Guadalupe 31
4.1.3 Formación Guaduas (KPgg) 32
4.1.4 Formación Cacho (Pgc) 33
4.1.5 Formación Bogotá (Pgb) 33
4.1.6 Formación Regadera (Pgr) 33
4.1.7 Depósitos de origen erosivo 34
4.1.8 Depósitos de origen aluvial y lagunar 35
4.1.9 Depósitos de origen glaciar y periglaciar 37
4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL 38
4.2.1 Secciones Geológicas Regionales 38

4.2.2 Estructuras sobresalientes en el área de estudio 47
4.2.3 Zona Oriental 49
4.2.4 Zona occidental 50
4.2.5 Estructuras del municipio de Anapoima 52
4.2.6 Estructuras del municipio de La Mesa 53
5 CARACTERIZACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA 54
5.1 MARCO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL 54
5.2 CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS 55
5.2.1 Criterios adoptados 55
5.2.2 Clasificación de las unidades del área de estudio 56
5.3 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UHG) 62
5.3.1 Complejo Acuífero de los Depósitos Inconsolidados Neógeno-Cuaternarios 62
5.3.2 Complejo Acuitardo del Paleógeno 64
5.3.3 Complejo Acuífero Guadalupe 65
5.3.4 Unidad confinante de la Formación Chipaque 66
5.3.5 Unidades del Grupo Villeta en el sector de Anapoima y La Mesa 67
5.4 CONTROL ESTRUCTURAL Y SU INFLUENCIA SOBRE LA HIDROGEOLOGÍA 68
5.5 VISIÓN REGIONAL DEL INVENTARIO DE CAPTACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA Y MONITOREO DE NIVELES 69
5.5.1 Antecedentes e Inventarios Históricos 69
5.5.2 Marco Regulatorio Actual y Estimación Técnica 69
5.5.3 Distribución Hidroestratigráfica y Territorial de las Captaciones 70
5.5.4 Concesiones y Caudales Otorgados en los Municipios del Proyecto 70
5.5.5 Monitoreo del Recurso en el Perímetro Urbano (Distrito Capital - SDA) 72
5.5.6 Red Piezométrica de la CAR Cundinamarca 73
5.5.7 Acueductos Municipales y monitoreo 73
6 COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y BALANCE HÍDRICO 74
6.1 COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y SISTEMAS DE FLUJO 74
6.2 ZONAS DE RECARGA REGIONAL Y SECTORES PRIORITARIOS 74
6.2.1 Zonas de Recarga Exterior (Acuífero Profundo / Grupo Guadalupe) 74
6.2.2 Áreas de Priorización y "Zona Crítica" Ambiental 75

6.3 MODELACIÓN DE RECARGA Y BALANCE HÍDRICO SUBTERRÁNEO 76
6.3.1 Evolución de las Metodologías de Evaluación de Recarga 76
6.3.2 Formulación Matemática del Balance en la Zona No Saturada (ZNS) 76
6.3.3 Estimación de Recarga Potencial por Unidad Geológica 76
6.3.4 Balance Hídrico Cuantitativo y Oferta Explotable por Subcuenca 77
6.4 DESCARGA Y CONSIDERACIONES DE GESTIÓN REGIONAL 78
6.4.1 Conclusiones del Comportamiento Hidrodinámico y Balance 78
7 HIDROGEOQUÍMICA 79
7.1 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE AGUA (FACIES HIDROGEOQUÍMICAS) 80
7.1.4 Implicaciones Hidrogeológicas y Riesgos de Explotación 82
7.1.5 Sistemas Hidrotermales y Flujos Profundos con Control Estructural (Sector Occidental: Tabio y Tenjo) 82
8 EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS 83
8.1 CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA 83
8.2 INVENTARIO DE CAPTACIONES 84
8.3 GEOFÍSICA APLICADA A AGUAS SUBTERRÁNEAS 84
8.3.1 Métodos basados en la resistividad eléctrica 85
8.3.2 Métodos electromagnéticos 85
8.3.3 Métodos sísmicos (velocidad / geometría) 86
9 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES POR MUNICIPIO 88
10 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE SESQUILÉ 91
10.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 91
10.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 92
10.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 94
10.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 95
10.5 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL CONVENIO EPC-CAR 99
10.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 103
11 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE TOCANCIPÁ 105
11.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 105
11.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 106
11.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 108

11.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 108
11.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 111
12 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE SOPÓ 113
12.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 113
12.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 115
12.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 116
12.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 116
12.5 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA CONVENIO EPC-CAR 119
12.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 120
13 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE CAJICÁ 122
13.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 122
13.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 124
13.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 125
13.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 125
13.5 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL CONVENIO EPC-CAR 128
13.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 129
14 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE CHÍA 132
14.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 132
14.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 134
14.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 135
14.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 136
14.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA PARA CHÍA 139
15 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE GACHANCIPÁ 142
15.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 142
15.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 144
15.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 145
15.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE GACHANCIPÁ 145
15.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA PARA GACHANCIPÁ 148
16 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE COTA 151

16.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 151
16.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 153
16.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 154
16.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 154
16.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 157
17 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE TABIO 160
17.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 160
17.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 162
17.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 163
17.4 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y MANIFESTACIONES TERMALES 164
17.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 165
17.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 167
18 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE FUNZA 171
18.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 171
18.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 173
18.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 174
18.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 175
18.5 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL CONVENIO EPC-CAR 176
18.6 INFORMACIÓN ADICIONAL 177
18.7 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 179
19 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE MADRID 181
19.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 181
19.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 183
19.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 184
19.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 185
19.5 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PROVENIENTE DEL CONVENIO EPC-CAR 186
19.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 189
20 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE FACATATIVÁ 191
20.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 191

20.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 193
20.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 194
20.4 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PROVENIENTE DEL CONVENIO EPC-CAR 195
20.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 196
20.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 199
21 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE BOJACÁ 201
21.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 201
21.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 202
21.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 203
21.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE BOJACÁ 204
21.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 206
22 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE MOSQUERA 208
22.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 208
22.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 209
22.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 210
22.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 210
22.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA DE MOSQUERA 213
23 INTEGRACIÓN REGIONAL HIDROGEOLÓGICA FUNZA – MADRID – MOSQUERA – FACATATIVÁ 215
23.1 LINEAMIENTOS PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO REGIONAL 216
24 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA CALERA 219
24.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 219
24.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 220
24.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 221
24.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA CALERA 222
24.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 225
25 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA MESA 226
25.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 226

25.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 227
25.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO 228
25.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 229
25.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA 232
26 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE ANAPOIMA 234
26.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL 234
26.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL 235
26.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIALES ACUÍFEROS . 237
26.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO 237
26.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN ADICIONAL 240
27 BIBLIOGRAFÍA 242

ANEXOS

ANEXO 1. Mapas del Servicio Geológico Colombiano

ANEXO 2. Mapas Geológico por Municipio

ANEXO 3. Perfiles geológicos por municipio

ANEXO 4. Mapas Hidrogeológico por Municipio

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Inventario de unidades geológicas presentes en el área de estudio..... 28
Tabla 2. Estructuras geológicas principales identificadas en el área de estudio..... 47
Tabla 3. Clasificación y caracterización hidrogeológica de las unidades geológicas del área de estudio. 56
Tabla 4. Concesiones de agua subterránea otorgadas por uso y municipio..... 70
Tabla 5. Promedio de caudales concedidos por tipo de uso y municipio..... 71
Tabla 6. Caudales totales concedidos por tipo de uso, municipio y régimen de bombeo. 71
Tabla 7. Estimación de la recarga potencial por unidad geológica en la zona de estudio. 77
Tabla 8. Balance hídrico subterráneo y disponibilidad por subcuencas/sectores. 77
Tabla 9. Clasificación de los sistemas acuíferos y unidades geológicas asociadas, convenciones de los mapas hidrogeológicos municipales. 88
Tabla 10. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Sesquilé..... 94
Tabla 11. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Sesquilé. 98
Tabla 12. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Tocancipá... 108
Tabla 13. Parámetros hidráulicos y unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Tocancipá. 110
Tabla 14. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Sopó..... 116
Tabla 15. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Sopó. 118
Tabla 16. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Cajicá. 125
Tabla 17. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Cajicá..... 127
Tabla 18. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Chía..... 135
Tabla 19. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Chía. 138
Tabla 20. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Gachancipá. 145
Tabla 21. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Gachancipá..... 147
Tabla 22. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Cota..... 154

Tabla 23. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Cota. 156
Tabla 24. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Tabio. 163
Tabla 25. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Tabio. 167
Tabla 26. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Funza. 174
Tabla 27. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Funza. 175
Tabla 28. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Madrid. 184
Tabla 29. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Madrid. 186
Tabla 30. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Facatativá... 194
Tabla 31. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Facatativá. 199
Tabla 32. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Bojacá. 203
Tabla 33. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Bojacá. 205
Tabla 34. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Mosquera. .. 210
Tabla 35. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Mosquera. 212
Tabla 36. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de La Calera.... 221
Tabla 37. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de La Calera. 224
Tabla 38. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de La Mesa..... 228
Tabla 39. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de La Mesa. 231
Tabla 40. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Anapoima. .. 237
Tabla 41. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Anapoima. 239

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Sección geológica 1-1'. Tomada de la sección C-C' del Mapa geológico Alto Bogotá–Sisga (Moreno, J., 2004)..... 39
Figura 2. Sección geológica 2-2'. Tomada de la sección D-D' del Mapa geológico Alto Bogotá–Sisga (Moreno, J., 2004)..... 39
Figura 3. Sección geológica 3-3'. Tomada y adaptada de la Geología de la plancha 209 Zipaquirá (INGEOMINAS, 2003)..... 41
Figura 4. Sección geológica 4-4'. Tomada y adaptada de la sección geológica A-A' del Mapa geológico del cuadrángulo K-11 Zipaquirá (INGEOMINAS, 1975). 43
Figura 5. Sección geológica 5-5'. Tomada de la sección F-F' del Mapa geológico Alto Bogotá–Sisga (Moreno, J., 2004)..... 43
Figura 6. Sección geológica 6-6'. Tomada y adaptada de la sección geológica B-B' del Mapa geológico del cuadrángulo K-11 Zipaquirá (INGEOMINAS, 1975). 45
Figura 7. Sección geológica 7-7'. Tomada y adaptada del Mapa geológico de la Sabana, (Montoya y Reyes, 2005)..... 46
Figura 8. Sección geológica 8-8'. Tomada y adaptada de la sección geológica A'-A'' de la geología de la plancha 227 La Mesa (INGEOMINAS, 1998)..... 47
Figura 9. Sección geológica 9-9'. Tomada y adaptada de la sección geológica B'-B'' de la geología de la plancha 227 La Mesa (INGEOMINAS, 1998)..... 47
Figura 10. Mapa geológico del sector de Sesquilé y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3..... 92
Figura 11. Corte geológico interpretativo del municipio de Sesquilé, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3..... 93
Figura 12. Mapa hidrogeológico del municipio de Sesquilé, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 96
Figura 13. Mapa geológico del sector de Tocancipá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3..... 106
Figura 14. Corte geológico interpretativo del municipio de Tocancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil

representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3..... 107
Figura 15. Mapa hidrogeológico del municipio de Tocancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 109
Figura 16. Mapa geológico del sector de Sopó y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3..... 114
Figura 17. Corte geológico interpretativo del municipio de Sopó, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 115
Figura 18. Mapa hidrogeológico del municipio de Sopó, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 117
Figura 19. Mapa geológico del sector de Cajicá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3..... 123
Figura 20. Corte geológico interpretativo del municipio de Cajicá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3..... 124
Figura 21. Mapa hidrogeológico del municipio de Cajicá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 127

Figura 22. Mapa geológico del sector de Chía y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 133
Figura 23. Corte geológico interpretativo del municipio de Chía, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 135
Figura 24. Mapa hidrogeológico del municipio de Chía, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 137
Figura 25. Mapa geológico del sector de Gachancipá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 143
Figura 26. Corte geológico interpretativo del municipio de Gachancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 144
Figura 27. Mapa hidrogeológico del municipio de Gachancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 146
Figura 28. Mapa geológico del sector de Cota y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 152
Figura 29. Corte geológico interpretativo del municipio de Cota, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores

interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 153
Figura 30. Mapa hidrogeológico del municipio de Cota, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 155
Figura 31. Mapa geológico del sector de Tabio y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 161
Figura 32. Corte geológico interpretativo del municipio de Tabio, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 163
Figura 33. Mapa hidrogeológico del municipio de Tabio, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 165
Figura 34. Mapa geológico del sector de Funza y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 172
Figura 35. Corte geológico interpretativo del municipio de Funza, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 173
Figura 36. Mapa hidrogeológico del municipio de Funza, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 175
Figura 37. Perfil magnetotelúrico y su interpretación geológica a lo largo del transecto suroccidente–noreste entre los municipios de Funza, Madrid y Facatativá. 177
Figura 38. Mapa geológico del sector de Madrid y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado,

conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 182
Figura 39. Detalle ampliado del mapa geológico del sector de Madrid y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 183
Figura 40. Corte geológico interpretativo del municipio de Madrid, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 184
Figura 41. Mapa hidrogeológico del municipio de Madrid, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 185
Figura 42. Mapa geológico del sector de Facatativá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 192
Figura 43. Corte geológico interpretativo del municipio de Facatativá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 194
Figura 44. Mapa hidrogeológico del municipio de Facatativá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 198
Figura 45. Mapa geológico del sector de Bojacá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 201
Figura 46. Corte geológico interpretativo del municipio de Bojacá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas,

con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 203
Figura 47. Mapa hidrogeológico del municipio de Bojacá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 205
Figura 48. Mapa geológico del sector de Mosquera y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 208
Figura 49. Corte geológico interpretativo del municipio de Mosquera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 209
Figura 50. Mapa hidrogeológico del municipio de Mosquera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 212
Figura 51. Mapa geológico del sector de La Calera y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 220
Figura 52. Corte geológico interpretativo del municipio de La Calera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 221
Figura 53. Mapa hidrogeológico del municipio de La Calera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 224

Figura 54. Mapa geológico del sector de La Mesa y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 227
Figura 55. Corte geológico interpretativo del municipio de La Mesa, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 228
Figura 56. Mapa hidrogeológico del municipio de La Mesa, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 231
Figura 57. Mapa geológico del sector de Anapoima y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3. 235
Figura 58. Corte geológico interpretativo del municipio de Anapoima, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3. 236
Figura 59. Mapa hidrogeológico del municipio de Anapoima, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4. 239

1 INTRODUCCIÓN Y ALCANCE DEL ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO

El aprovechamiento del agua subterránea en la Sabana de Bogotá cuenta con una larga trayectoria que ha sido clave para el sostenimiento territorial de la región. Lejos de ser una alternativa reciente, la extracción a través de pozos profundos ha estado históricamente ligada al despegue y fortalecimiento de sectores industriales clave, como la floricultura, la manufactura y la transformación de alimentos, además de constituir una fuente fundamental de abastecimiento para diversos acueductos municipales y veredales. Esta dependencia prolongada convierte a los acuíferos en un motor silencioso pero vital del desarrollo económico y del suministro hídrico en la Sabana, subrayando la urgencia de proteger su calidad y garantizar su recarga a futuro.

El presente documento desarrolla el Análisis Hidrogeológico y Modelo de Abastecimiento Alterno por Explotación de Aguas Subterráneas para dieciséis municipios, trece ubicados en la Sabana de Bogotá, uno en la parte alta de la Sabana y dos en otra región diferente, con el propósito de establecer el estado actual del sistema de aguas subterráneas, sus dinámicas y riesgos asociados.

Este Análisis Hidrogeológico está basado en una evaluación integral de la información hidrogeológica existente y está orientado a recomendar, para cada uno de los dieciséis municipios, exploraciones adicionales indicando el tipo de exploración y sitios recomendados de manera que cuando se programe una perforación para un pozo de agua, los resultados de ésta en términos de producción sean lo mejor posible.

Los municipios estudiados, determinados por Empresas Públicas de Cundinamarca (EPC), son los siguientes:

Sesquilé, Tocancipá, Sopó, Cajicá, Chía, Gachancipá, Cota, Tabio, Funza, Madrid, Facatativá, Mosquera, Bojacá, La Calera y finalmente La Mesa y Anapoima.

La caracterización hidrogeológica de la zona de estudio se basa en la descripción hidrogeológica elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (Bermúdez y Velandia, 2002) la cual constituyó una de las bases cartográficas y de evaluación hidrogeológica estandarizadas para el área de la Sabana de Bogotá.

Dicha caracterización se estructura a partir de la interacción de tres grandes complejos y que son descritos a continuación: El acuífero de los depósitos inconsolidados Neógeno–Cuaternario, que corresponde a una fuente de explotación de agua, recibiendo recarga directa desde la superficie y abasteciendo la mayor parte de la demanda agrícola y se encuentra parcialmente confinado por el infrayacente complejo acuitardo del Paleógeno, compuesto por arcillolitas y limolitas de baja permeabilidad que actúan como barrera vertical; el complejo del paleógeno suprayace al complejo acuífero Guadalupe, conformado por areniscas cuarzosas fracturadas y corresponde a un reservorio profundo altamente productivo, cuya dinámica depende tanto de la recarga lateral como de las condiciones estructurales de la cuenca. Los tres complejos configuran un sistema hidrogeológico regional donde los depósitos inconsolidados aportan la recarga superficial, el Paleógeno controla el confinamiento y el Guadalupe asegura la disponibilidad de agua subterránea a mayor profundidad, aunque con riesgo de sobreexplotación si no se gestiona adecuadamente.

Los municipios de Anapoima, La Mesa y parte del municipio de La Calera están compuestos por diversas unidades estratigráficas como la Formación Trinchera (Miembros El Tigre y Anapoima), la Formación Simijaca, la Formación Socotá, la Formación Capotes, la Formación Hiló, la Formación Pacho, las Formaciones Lidita superior e inferior y el Grupo Guaguaquí son consideradas como acuitardos debido a sus características litológicas, con predominio de lutitas, arcillolitas, limolitas y areniscas con abundante matriz arcillosa o cementación ferruginosa, lo cuales les confieres una baja permeabilidad y escasa capacidad de almacenamiento y transmisión de agua subterránea.

En este sentido, la exploración para pozos profundos en Anapoima y La Mesa, tiene un riesgo hidrogeológico considerablemente más alto debido al predominio de litologías finas (acuitardos/acuífugos) y la dependencia casi exclusiva de zonas de falla y/o fracturamiento que daría porosidad secundaria o se dependería de depósitos aluviales locales.

Para la elaboración del mapa de unidades hidrogeológicas y la delimitación de los complejos categorizados por Bermúdez y Velandia (2002), se empleó la base de datos en formato Excel suministrado por la Dirección Técnica Ambiental (DESCA) de la Corporación Autónoma Regional. Dicho archivo contiene parámetros de los pozos con concesiones de aguas subterráneas, incluyendo coordenadas geográficas, Formación geológica captada, profundidad de perforación, cota de elevación del terreno, entre otros datos relevantes.

Estos productos se complementaron con las características litológicas obtenidas del mapa geológico regional, lo que permitió integrar la información hidrogeológica. El resultado es el mapa hidrogeológico, en el cual se representan las unidades hidrogeológicas (complejos), sus condiciones de y la dinámica del flujo subterráneo en la zona de influencia del proyecto.

Adicionalmente, se elaboró un perfil hidrogeológico para cada municipio, trazado en sus inmediaciones, para determinar la geometría y distribución subsuperficial de los diferentes complejos hidrogeológicos. Asimismo, en la cartografía correspondiente se identificaron y delimitaron las zonas con mayor potencial hidrogeológico, orientadas a la futura localización y perforación de pozos profundos.

2 OBJETIVOS DEL ANÁLISIS HIDROGEOLÓGICO

El objetivo general del análisis hidrogeológico es evaluar la posible incorporación de pozos profundos que permitan reforzar el suministro de agua durante temporadas de sequía o restricciones de servicio en los municipios, en los cuales sea factible la construcción de los mismos, con el fin de mantener la oferta de recurso hídrico y eliminar riesgos de desabastecimiento

Objetivos específicos

- Caracterizar las unidades geológicas presentes en cada municipio y clasificarlas desde el punto de vista hidrogeológico, a partir de información secundaria, con el propósito de determinar la disposición y el potencial de los sistemas acuíferos en los 16 municipios incluidos en el proyecto.
- Compilar y analizar la información hidrogeológica existente, incluyendo inventarios de pozos, prospección geofísica, datos de calidad del agua, piezometría e hidráulica de pozos, para integrarla de manera coherente al análisis.
- Incorporar los estudios hidrogeológicos que se elaboraron como resultado de la prospección geofísica y los análisis de información secundaria en el marco del convenio interadministrativo No. CAR-CONV-INT-3121-2024, suscrito entre la CAR y EPC.
- Elaborar mapas hidrogeológicos, acompañados de perfiles hidrogeológicos de los 16 municipios de Cundinamarca, con el fin de identificar la arquitectura y el potencial de los sistemas acuíferos en el área de estudio.
- Generar Modelos Hidrogeológicos Locales para cada municipio, fundamentados en la información anterior.
- Identificar zonas que puedan ser objeto de exploraciones específicas en cada municipio y caracterizar las unidades acuíferas, su comportamiento hidrodinámico, la calidad del agua subterránea, las presiones antrópicas y los riesgos asociados, con el fin de establecer lineamientos para la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo, empleando exclusivamente información secundaria disponible.
- Definir las exploraciones adicionales requeridas en cada municipio y las áreas donde deberían ejecutarse, considerando las posibilidades de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo para el abastecimiento de los acueductos municipales.

3 METODOLOGÍA

La metodología desarrollada en el presente estudio se enmarca en los lineamientos técnicos y procedimentales establecidos para evaluaciones hidrogeológicas de carácter regional. El proceso se estructuró en fases secuenciales, tomando como punto de partida la delimitación y priorización territorial de los municipios de interés definida por Empresas Públicas de Cundinamarca (EPC). Las fases metodológicas se describen a continuación:

- **Recopilar y analizar información secundaria:** Revisar la geología regional y local, la climatología, la hidrología superficial y la información hidrogeológica disponible, incluyendo inventarios de puntos de agua, prospecciones geofísicas, pruebas de bombeo, parámetros hidráulicos e hidrogeoquímica.
- **Describir el marco geológico:** Caracterizar las litologías, formaciones, estructuras, contactos y edades, constituyendo la base geológica del estudio.
- **Caracterizar hidroestratigráfica e hidrogeológicamente las unidades existentes:** Identificar las unidades hidroestratigráficas y las Unidades Hidrogeológicas (UHG), integrando el marco estructural asociado.
- **Evaluar el balance hídrico conceptual:** Estimar las entradas al sistema (recarga por infiltración), las salidas y la variación del almacenamiento del acuífero.
- **Consolidar el inventario de captaciones:** Integrar la base de datos de pozos, aljibes, manantiales y concesiones de agua subterránea otorgadas por la autoridad ambiental, así como aquellas provenientes de otras fuentes de información.
- **Valorar la hidrogeoquímica:** Consultar y evaluar la calidad del agua subterránea y su aptitud para consumo humano conforme a la normatividad vigente.
- **Formular el modelo hidrogeológico conceptual para cada municipio a escala 1:25.000:** Representar la geometría del acuífero, la dinámica del flujo subterráneo, las zonas de recarga y descarga, los aspectos de calidad del agua y los inventarios de captaciones.
- **Determinar las áreas de interés para exploraciones y la metodología correspondiente:** Identificar, para cada municipio y según las posibilidades acuíferas, las zonas que deben explorarse, la metodología recomendada y las profundidades objetivo.

3.1 ORGANIZACIÓN DEL INFORME

El presente informe se organizó de la siguiente manera: En los capítulos 4 al 8 se trata aquella información que es de carácter regional y luego en los siguientes capítulos, del 9 hasta el 26, se presentan los modelos hidrogeológicos conceptuales de los municipios.

Los temas tratados regionalmente son:

- Marco geológico
- Caracterización Hidrogeológica e Hidroestratigráfica,
- Inventario de captaciones
- Evaluación del balance hídrico conceptual
- Hidrogeoquímica
- Exploración de Aguas Subterráneas

Después de tratar los temas regionales, se describen, para cada municipio, los modelos hidrogeológicos locales y se recomiendan las acciones a seguir para una adecuada explotación del recurso hídrico subterráneo.

Merece mención el Modelo Hidrogeológico Conceptual de la Sabana de Bogotá, elaborado por INGEOMINAS en 2002 en el marco del Proyecto de Cooperación Técnica Internacional OIEA–INGEOMINAS. Este estudio permitió precisar, con alcance regional, la estructura y dinámica del sistema hidrogeológico de la Sabana, fortaleciendo el conocimiento del recurso hídrico subterráneo. Su aporte fue fundamental para el desarrollo del presente trabajo, pues proporcionó la base conceptual y la información técnica empleada en la construcción de los modelos hidrogeológicos de cada municipio.

3.2 RECOPILACIÓN Y ANÁLISIS DE LA INFORMACIÓN SECUNDARIA

La recopilación y análisis de información secundaria se estructuró a partir de cuatro fuentes principales de datos:

- Cartografía geológica regional y local (SGC): Insumo de mayor cobertura técnica del estudio, mediante el cual se definió la distribución espacial de las unidades aflorantes, sus espesores y el marco estructural.
- Antecedentes hidrogeológicos regionales: Fundamentados en el modelo hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá (Bermúdez & Velandia, 2002) y las evaluaciones de INGEOMINAS (1995, 1996). De estos insumos se extrajo la caracterización de las Unidades Hidrogeológicas (UHG), los parámetros hidráulicos y la evolución piezométrica histórica.
- Información institucional (EPC, CAR, SGC): Integrada por cuatro insumos clave:
- La base de datos oficial de concesiones de aguas subterráneas de la Dirección Técnica Ambiental de la CAR, con coordenadas, Formación captada, profundidad de perforación y cota topográfica.
- Estudios hidrogeológicos locales procedentes del convenio CAR-CONV-INT-3121-2024, que aportan prospección geofísica, censos y propuestas para perforación de pozos.
- El informe final de la consultoría técnica, jurídica y financiera para la estructuración del Acueducto Regional de la Sabana, desarrollado por EPC en 2014.
- Los inventarios históricos de captaciones de aguas subterráneas realizados en convenio entre INGEOMINAS y la CAR entre 1985 y 1987.
- Estudios hidrogeológicos de la EAAB: Datos, registros y evaluaciones previas desarrolladas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, insumos clave debido a que la ciudad de Bogotá comparte el marco geológico, las unidades acuíferas y la dinámica del flujo subterráneo de la Sabana.

3.3 ELABORACIÓN DE LA CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA Y CORTES HIDROGEOLÓGICOS A ESCALA 1:25000

La decisión de pasar de 1:100 000 a 1:25 000 no es únicamente una preferencia metodológica. Es una condición técnica indispensable para que el estudio hidrogeológico

de los 16 municipios tenga validez, precisión y capacidad real de soporte a la planificación territorial.

A 1:100 000, la cartografía está diseñada para lectura regional. En esta escala, las unidades geológicas se generalizan, se fusionan y pierden continuidad. Pretender caracterizar acuíferos municipales con esta escala es técnicamente inviable.

Las estructuras que gobiernan el flujo subterráneo en la Sabana no se representan adecuadamente a escala 100.000 y hacen falta los cortes o secciones explicativas mostrando la dirección de las fallas, lineamientos locales, pliegues secundarios y zonas de fractura quedan suavizados o omitidos a escalas muy regionales. Sin estas estructuras, el modelo hidrogeológico queda incompleto y potencialmente errado.

Dado que el proyecto se encuentra en etapa de prefactibilidad, el nivel de certeza cartográfica es de carácter preliminar y de referencia, al estar soportado exclusivamente en fuentes secundarias oficiales. La delimitación de unidades litoestratigráficas y trazos estructurales reflejan el estado actual del conocimiento regional y requerirá fases posteriores de prospección y exploración de campo para verificar in situ y definir los contactos definitivos para el diseño de detalle

.

3.3.1 RECOPILACIÓN Y EVALUACIÓN DE INSUMOS

La información geológica proviene de productos oficiales del Servicio Geológico Colombiano (SGC), descargados del Motor de Integración de Información Científica (MIIG) y garantiza la trazabilidad de los datos empleados.

La selección de insumos empleados priorizó la escala de detalle, vigencia (SGC) y cobertura territorial sobre los municipios evaluados:

- Cartografía base principal: Mapa Geológico para Ingeniería de la Sabana de Bogotá (Padilla et al., 2004, escala 1:25.000), empleado en los sectores del área de la Sabana de Bogotá.
- Cartografía de integración: Para cubrir vacíos de información hacia las áreas periféricas y sectores sin cobertura 1:25000, se integraron el Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Montoya y Reyes, 2005, escala 1:100.000) y las planchas geológicas oficiales escala 1:100.000: Plancha 208 (Villeta), Plancha 227 (La Mesa), Plancha 228 (Santa Fe de Bogotá Noreste) y Plancha 246 (Fusagasugá).
- Insumo topográfico: Modelo Digital de Elevación (DEM) derivado del sensor ASTER (resolución 30 m), a partir del cual se modelaron sombras (hillshade), como insumo para el análisis morfológico.

3.3.2 HOMOLOGACIÓN Y CORRELACIÓN DE UNIDADES LITOESTRATIGRÁFICAS

Para el desarrollo del presente proyecto, se definió inicialmente como cartografía geológica base el Mapa Geológico para Ingeniería de la Sabana de Bogotá (Padilla et al., 2004) a escala 1:25000. No obstante, este insumo no abarca la totalidad del área del proyecto y no contiene las formaciones geológicas aflorantes en el sector suroccidental de la cordillera, particularmente las evidenciadas en los municipios de Anapoima y La Mesa.

Por este motivo, se implementó de forma complementaria el Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Montoya y Reyes, 2005, escala 1:100.000) y las planchas geológicas oficiales del sector: Plancha 208 (Villeta), Plancha 227 (La Mesa), Plancha 228 (Santa Fe de Bogotá Noreste) y Plancha 246 (Fusagasugá).

A causas de las diferencias en las nomenclaturas entre la cartografía de la Sabana y las planchas del flanco occidental, se adoptó por el tipo de nomenclatura estratigráfica del mapa regional a escala 1:100000 (Montoya y Reyes, 2005).

La cartografía integrada resultante presenta una simbología cronolitoestratigráfica de carácter mixto. Esta solución es técnicamente válida, ya que ambas convenciones provienen de los estándares oficiales avalados y publicados por el INGEOMINAS (actual Servicio Geológico Colombiano, SGC)

3.3.3 CRITERIOS DE AJUSTE CARTOGRÁFICO

Con el propósito de preservar la integridad y fidelidad de las fuentes oficiales, se mantuvieron en lo fundamental los contactos geológicos y los trazos estructurales de referencia establecidos por el Servicio Geológico Colombiano (SGC). No obstante, se realizaron modificaciones puntuales tanto en la geometría de los polígonos como en las características estructurales para adaptarlos con mayor precisión a los rasgos del relieve;

Para los ajustes realizados, se aplicaron principalmente criterios morfológicos obtenidos del Modelo Digital de Elevación (DEM) y de los modelos de sombras (*hillshade*), como la delimitación de llanuras de inundación, la identificación de escarpes morfológicos, la caracterización de zonas de acumulación y el análisis del control morfoestructural evidenciado en los patrones de drenaje.

3.4 CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA E HIDROESTRATIGRÁFICA

Las unidades hidrogeológicas (UHG) se definieron y clasificaron con los criterios del Servicio Geológico Colombiano, que combinan el tipo de porosidad, el comportamiento hidráulico, la condición de confinamiento y la continuidad espacial a la escala de trabajo. Su aplicación se detalla en el numeral de criterios adoptados del capítulo de caracterización hidroestratigráfica.

3.5 EVALUACIÓN DEL BALANCE HÍDRICO CONCEPTUAL Y CUENCAS HIDROLÓGICAS

La evaluación de la recarga hídrica en la Sabana de Bogotá ha sido abordada mediante diversos estudios institucionales que reflejan una constante evolución en las metodologías de cálculo, la precisión espacial y el grado de detalle en la zonificación del recurso. El análisis comparativo de estas investigaciones permite trazar una línea de tiempo sobre la comprensión técnica del sistema acuífero, con particular énfasis en el sector suroccidental de la cuenca.

En desarrollo de este proyecto, existe un producto específico de HIDROLOGÍA el cual contiene toda la información al respecto. En el presente informe, se trata de manera general y regional el tema.

3.6 CONSOLIDACIÓN DEL INVENTARIO DE CAPTACIONES

El inventario de captaciones de agua subterránea en la Sabana de Bogotá ha sido objeto de diversos estudios y censos a lo largo de las últimas décadas, reflejando tanto la evolución de la infraestructura de captaciones como los retos asociados al registro y control ambiental del recurso.

3.7 FORMULACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL PARA CADA MUNICIPIO A ESCALA 1:25.000

La construcción del modelo hidrogeológico conceptual a escala local (1:25.000) constituye el paso fundamental para pasar del diagnóstico regional a la toma de decisiones técnicas en la gestión y exploración del agua subterránea municipal. Mientras que los análisis de la cuenca artesiana de la Sabana de Bogotá y del flanco occidental (Grupo Villeta) ofrecen una visión sintética de los grandes sistemas de flujo y unidades hidroestratigráficas, la escala 1:25.000 permite definir con la precisión requerida la arquitectura subsuperficial, las zonas de recarga específica, las barreras o conectores estructurales y la dinámica hidrogeoquímica propia de cada territorio.

Un Mapa Hidrogeológico Municipal a escala 1:25.000, acompañado de su respectivo perfil explicativo constituye una herramienta que permite responder a los objetivos clave del estudio:

- Identificar con claridad en qué zonas del municipio no es viable realizar perforaciones por ausencia de acuíferos o por mala calidad del agua.
- Delimitar las Áreas de Interés Exploratorio, definiendo el objetivo hidrogeológico (formación objetivo), la profundidad sugerida de perforación y la metodología de prospección geofísica adecuada para maximizar el éxito técnico y los caudales de producción.

3.8 DELIMITACIÓN DE ÁREAS DE INTERÉS PARA EXPLORACIONES Y METODOLOGÍA

La delimitación de las áreas de interés exploratorio en cada uno de los dieciséis municipios se formuló a partir de la integración espacial de los modelos hidrogeológicos conceptuales a escala 1:25.000, la geología y la presión por inventario de captaciones existentes. Dichas áreas corresponden a polígonos estratégicos donde la combinación de factores geológicos (presencia de unidades acuíferas de alta transmisividad como el Grupo Guadalupe o la Formación Tilatá), estructurales (zonas de fracturamiento y cercanía a fallas conductoras) e hidrodinámicos ofrece las condiciones más favorables para la futura localización de pozos profundos de abastecimiento alterno, previa realización de estudios de detalle que se recomiendan en cada caso..

4 MARCO GEOLÓGICO

El marco geológico de la zona de estudio se presenta de manera sintetizada, orientado a la hidrogeología, enfocado en la descripción estratigráfica y estructural únicamente. Para una descripción litológica regional detallada, se remite al lector a las memorias explicativas de la cartografía geológica del Servicio Geológico Colombiano (SGC) cuya cartografía consistente en mapas regionales del área de la Sabana de Bogotá y de La Mesa y Anapoima se encuentran en el Anexo 1.

Las unidades presentes en la zona de estudio abarcan un intervalo geocronológico que se extiende desde el Cretácico Inferior hasta el Cuaternario. La secuencia estratigráfica, organizada de base a techo, inicia con las rocas del Grupo Villeta, integrado por las formaciones Trincheras, Socotá, Capotes, Hiló, Pacho, Simijaca, La Frontera y Conejo. Este grupo es suprayacido por las rocas del Grupo Guadalupe, conformado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna. Posteriormente se disponen las unidades del Paleógeno y Neógeno, representadas por las formaciones Guaduas, Cacho, Bogotá, Regadera, Tilatá y Marichuela. Finalmente, en el techo de la secuencia se reconocen depósitos cuaternarios, entre los que se incluyen las formaciones Subachoque, Río Siecha, Sabana y Chía, además de depósitos aluviales recientes, coluviales o de pendiente, fluvio-torrenciales y fluvio-glaciares (Montoya y Reyes, 2005; Acosta y Ulloa, 2001a, 2001b)

La caracterización geológica se elaboró a partir de información secundaria oficial, homologada y ajustada al área de los dieciséis municipios. Las fuentes temáticas corresponden al Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá a escala 1:100.000 y su memoria explicativa (Montoya y Reyes, 2005), al Mapa Geológico para Ingeniería de la Sabana de Bogotá a escala 1:25.000 (Padilla, Jiménez, Naranjo, Osorno y Romero, 2004) y a la cartografía geológica aplicada a la zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá (Padilla y Calderón, 2004).

Para los municipios de Anapoima y La Mesa, localizados sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental y por fuera del área cubierta por el mapa geológico de la Sabana, la descripción se sustenta en las memorias explicativas de las planchas 227 La Mesa y 246 Fusagasugá, ambas a escala 1:100.000 (Acosta y Ulloa, 2001a, 2001b). El sector nororiental se complementó con las memorias de la plancha 228 (Buitrago y Terraza, 2008; Corredor y Terraza, 2015) y el sector occidental con la memoria de la plancha 208 Villeta (Acosta y Ulloa, 2001).

4.1 ESTRATIGRAFÍA DEL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación, se describen las unidades litoestratigráficas reconocidas en el área de estudio, organizadas de base a techo. La descripción de las unidades del altiplano se sustenta en Montoya y Reyes (2005); la de las unidades del sector suroccidental, que comprende los municipios de Anapoima y La Mesa, en Acosta y Ulloa (2001a, 2001b). En la Tabla 1 se resume el inventario de unidades, su simbología, edad y espesor reportado.

Tabla 1. Inventario de unidades geológicas presentes en el área de estudio.

Unidad	Símbolo	Edad	Espesor reportado
Grupo Villeta (conjunto)	Ki–Ks	Cretácico Inferior a Superior	3.400 m (aprox.)
Formación Trincheras, Miembro El Tigre	Kitrt	Cretácico Inferior	150 a 200 m
Formación Trincheras, Miembro Anapoima	Kitra	Cretácico Inferior	200 a 250 m
Formación Socotá	Kis	Cretácico Inferior	255 m
Formación Capotes	Kic	Cretácico Inferior	550 m
Formación Hiló	Kih	Cretácico Inferior	450 m
Formación Pacho	Kslp	Cretácico Superior	30 m
Formación Simijaca	Kss	Cretácico Superior	800 m (aprox.)
Formación La Frontera	Ksf	Cretácico Superior	46 m
Formación Conejo	Kscn	Cretácico Superior	370 m (aprox.)
Formación Chipaque	Ksch	Cretácico Superior	Más de 1.000 m
Grupo Guadalupe (conjunto)	Ksg	Cretácico Superior	582 m (aprox.)
Formación Arenisca Dura	Ksgd	Cretácico Superior	407 m
Formación Plaeners	Ksgpl	Cretácico Superior	93 m
Formación Labor y Tierna	Ksglt	Cretácico Superior	245 m (aprox.)
Formación Guaduas	KPgg	Cretácico Superior a Paleógeno	1.090 m (aprox.)
Formación Cacho	Pgc	Paleógeno	172 m (aprox.)
Formación Bogotá	Pgb	Paleógeno	1.095 m (aprox.)
Formación Regadera	Pgr	Paleógeno	660 a 756 m
Formación Marichuela	N1m	Neógeno	15 a 40 m
Formación Balsillas	N2b	Neógeno	Hasta 30 m
Formación Tilatá	NgQt	Neógeno a Cuaternario	50 a 150 m
Formación Subachoque	Q1su	Cuaternario	Hasta 150 m
Formación Sabana	Q1sa	Cuaternario	Al menos 320 m
Formación Río Siecha	Q1si	Cuaternario	No reportado
Formación Mondoñedo	Q2mo	Cuaternario	Hasta 10 m
Formación Chía	Q2ch	Cuaternario	5 a 25 m
Depósitos coluviales	Qco	Cuaternario	No reportado
Depósitos aluviales	Qal	Cuaternario	No reportado
Depósitos fluvio-glaciares	Qfg	Cuaternario	No reportado

Nota. Elaboración propia a partir de Montoya y Reyes (2005) y Acosta y Ulloa (2001a, 2001b). Los espesores de las formaciones del Grupo Guadalupe provienen de secciones de referencia distintas y no son acumulativos; el espesor total del grupo, medido en su sección tipo del borde occidental de la Sabana, es de aproximadamente 582 m (Hernández, 1990). En los municipios las unidades pueden estar incompletas o ausentes, como ocurre

con las formaciones Labor y Tierna, Cacho o Guaduas, por lo que los espesores locales de las tablas municipales son menores que los regionales.

4.1.1 GRUPO VILLETA

Representa la base de la secuencia sedimentaria en el sector oriental del sistema de fallas Bituima–La Salina. Está constituido por una sucesión de lodolitas, areniscas cuarzosas, calizas, liditas y cherts negros, depositados en ambientes marinos que evolucionaron desde una plataforma mixta siliciclástica–calcárea hasta condiciones pelágicas anóxicas de aguas profundas. Su espesor total aproximado es de 3.400 metros (Acosta y Ulloa, 2001a).

4.1.1.1 FORMACIÓN TRINCHERAS

Corresponde a lodolitas y areniscas con intercalaciones calcáreas y niveles de lidita, depositadas en una plataforma mixta siliciclástica–calcárea con influencia de corrientes de surgencia. De base a techo se divide en los miembros El Tigre y Anapoima. Se presenta en los municipios de Anapoima y La Mesa (Acosta y Ulloa, 2001b).

4.1.1.1.1 *MIEMBRO EL TIGRE (KITRT)*

El Miembro El Tigre (Kitrt) corresponde a la base de la unidad y presenta un espesor aproximado de 150 a 200 metros. Está compuesto por lodolitas negras laminadas, intercaladas con areniscas cuarzosas finas y niveles calcáreos micríticos. Se reconocen además horizontes de chert negro y concreciones carbonosas. Su depósito corresponde a un ambiente de plataforma media a inferior, bajo condiciones pelágicas anóxicas con influencia de corrientes de surgencia. La laminación paralela es muy marcada y la textura pelítica homogénea, acompañada de estructuras de carga y bioturbación incipiente, rasgos útiles para interpretar la transición hacia ambientes profundos del Cretácico Inferior (Acosta y Ulloa, 2001b).

4.1.1.1.2 *MIEMBRO ANAPOIMA (KITRA)*

El Miembro Anapoima (Kitra), con un espesor estimado de 200 a 250 metros, está constituido por areniscas cuarzosas finas a medias, con cemento calcáreo y niveles intercalados de lodolitas grises. Localmente presenta estratificación cruzada y laminación ondulosa, lo que evidencia pulsos de energía moderada en el medio de depósito. Este miembro refleja un ambiente de plataforma mixta siliciclástica–calcárea, con alternancia de pulsos de alta energía y sedimentación tranquila (Acosta y Ulloa, 2001b).

4.1.1.2 FORMACIÓN SOCOTÁ (KIS)

La Formación Socotá destaca por su carácter resistente, que genera relieves positivos. Está compuesta por cuarzoarenitas de grano muy fino a medio con cemento calcáreo que corroe los granos, dispuestas en capas que varían de muy delgadas a gruesas. Estas intercalan con lodolitas calcáreas negras laminadas que contienen abundantes restos de peces y amonitas. Presenta una organización en secuencias granocrecientes con turboglifos en las bases, lo que indica un sistema de abanicos submarinos. Su espesor es de 255 metros, medido en la sección Alto Ojo de Agua, en el municipio de Quipile (Acosta y Ulloa, 2001a).

4.1.1.3 FORMACIÓN CAPOTES (KIC)

Se define por una transición litológica que inicia con lodolitas calcáreas laminadas de color negro, ricas en materia orgánica y cristales de yeso, y evoluciona hacia el techo a arcillolitas lodosas no calcáreas con laminación paralela. Incluye intercalaciones de calizas micríticas que forman concreciones de tamaños muy variables, desde pocos centímetros hasta tres metros de diámetro, asociadas a un entorno de sedimentación fina y condiciones de anoxia severa. Presenta un espesor de 550 metros, medido en la carretera Bituima–Guayabal (Acosta y Ulloa, 2001a).

4.1.1.4 FORMACIÓN HILÓ (KIH)

Su litología principal consiste en una alternancia de liditas (porcelanitas), cherts y lodolitas calcáreo-silíceas de color negro. Petrográficamente, estas rocas contienen una matriz de sílice amorfa con abundantes foraminíferos planctónicos disueltos y rellenos de calcita, además de radiolarios. Localmente presenta capas gruesas de calizas biomicríticas lenticulares y niveles de dolomita con alta porosidad intercristalina, mostrando estructuras de deslizamiento sinsedimentario (brechas). Su espesor es de 450 metros, medido en la sección Guayabal–Bituima (Acosta y Ulloa, 2001a).

4.1.1.5 FORMACIÓN PACHO (KSLP)

Consiste en una secuencia delgada de lodolitas laminadas negras que intercalan con capas de limolitas de cuarzo. Al sur de la plancha, en la región de La Mesa, estas limolitas son arcillosas y presentan fragmentos de roca sericitizados y cloritizados, organizándose en secuencias granodecrecientes con bases erosivas y moldes de bioclastos. Es una unidad de transición que muestra la influencia de aportes terrígenos de la plataforma interna. En la zona de estudio se reporta un espesor de 30 metros (Acosta y Ulloa, 2001a).

4.1.1.6 FORMACIÓN SIMIJACA (KSS)

La Formación Simijaca está compuesta principalmente por una monótona sucesión de arcillolitas y lodolitas laminadas de color negro a gris oscuro, de carácter micáceo y no calcáreo. Hacia el techo la unidad se vuelve más limosa, incorporando limolitas de cuarzo y cuarzoarenitas de grano medio con laminación ondulosa y evidencias de bioturbación, lo que refleja un incremento en el flujo de sedimentos clásticos. Presenta un espesor aproximado de 800 metros (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.1.7 FORMACIÓN LA FRONTERA (KSF)

Se compone de lodolitas calcáreas negro-parduzcas con laminación paralela, que intercalan con capas delgadas de caliza biomicrítica de geometría lenticular y niveles de chert negro con estratificación ondulosa. Es característica la presencia de concreciones micríticas de gran tamaño, superiores a un metro, y la abundancia de pirita framboidal, tanto en la matriz como en el interior de los microfósiles. Su espesor es de 46 metros, medido en la sección Río Curí, en Anolaima (Acosta y Ulloa, 2001a).

4.1.1.8 FORMACIÓN CONEJO (KSCN)

La Formación Conejo está compuesta por una sucesión de arcillolitas y lodolitas laminadas, comúnmente calcáreas y de color gris medio. Al ascender estratigráficamente, la unidad

incorpora capas de limolitas silicificadas y cuarzoarenitas de grano fino a medio con peloides fosfáticos. La laminación es frecuentemente ondulosa y discontinua, con una bioturbación marcada por el icnogénero Thalassinoides. Presenta un espesor aproximado de 370 metros en la quebrada Nemicé (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.1.9 FORMACIÓN CHIPAQUE (KSCH)

La Formación Chipaque se presenta como una extensa sucesión de rocas finas que suprayace a la Formación Une e infrayace a la Formación Arenisca Dura. En la sección de Manta, con más de 1.000 metros de espesor, se distinguen cuatro segmentos. El primero está compuesto por arcillolitas grises oscuras con abundantes micas, restos de troncos y carbón, intercaladas con areniscas muy finas y concreciones ferruginosas hacia la parte superior. El segundo corresponde a un horizonte silíceo con intercalaciones de liditas, donde son frecuentes los fósiles de amonitas, además de arcillolitas carbonosas y silíceas. El tercer segmento, de gran potencia, está dominado por paquetes arcillosos intercalados con bancos arenosos que muestran granocrecimiento y laminación ondulosa, flaser y lenticular. Finalmente, el cuarto segmento, aunque con predominio de niveles arcillosos, es el más arenoso, con intercalaciones de limolitas y areniscas en capas medias y gruesas, algunas macizas y otras con laminación flaser, además de niveles afectados por bioturbación (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.2 GRUPO GUADALUPE

El Grupo Guadalupe suprayace al Grupo Villeta y tiene un espesor aproximado de 582 metros en su sección tipo del borde occidental de la Sabana de Bogotá (Hernández, 1990). Se encuentra compuesto por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna, con un carácter netamente arenoso (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.2.1 FORMACIÓN ARENISCA DURA (KSGD)

La Formación Arenisca Dura corresponde a la base del Grupo Guadalupe y alcanza un espesor total de 407 metros en su sección oriental, donde se diferencian cuatro segmentos principales. El Segmento A, con 130 metros, inicia con 15 metros de limolitas grises y areniscas muy finas, y evoluciona hacia capas más gruesas al final del intervalo. El Segmento B, de 100 metros, está compuesto por tres intervalos en los que predominan areniscas muy finas en capas delgadas a gruesas. El Segmento C, con 95 metros, corresponde a intercalaciones de areniscas y arcillolitas. Finalmente, el Segmento D, de 97 metros, está formado por areniscas glauconíticas de grano fino en capas muy gruesas, con contactos ondulosos y frecuentes intercalaciones de arcillolitas, limolitas y liditas, que se intensifican hacia el contacto con la Formación Plaeners (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.2.2 FORMACIÓN PLAENERS (KSGPL)

La Formación Plaeners corresponde al nivel medio del Grupo Guadalupe, se dispone concordantemente sobre la Formación Arenisca Dura y es suprayacida por la Formación Labor y Tierna. Presenta un espesor total aproximado de 93 metros, subdividido en dos segmentos. El Segmento A, con 38 metros, está constituido por arcillolitas, limolitas, fosforitas y chert; inicia con arcillolitas y continúa con un intervalo de 14 metros de liditas, limolitas y chert fosfático, además de tres capas medias de fosforita. En la parte superior predominan limolitas con intercalaciones menores de chert y fosforita, en ocasiones con

altas concentraciones de fosfatos. El Segmento B, de 55 metros, está formado por intervalos de limolitas en capas medias y gruesas, con intercalaciones de areniscas limosas en capas medias; ocasionalmente aparecen capas delgadas de liditas y chert (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.2.3 FORMACIÓN LABOR Y TIERNA (KSGLT)

La Formación Arenisca Labor y Tierna corresponde al techo del Grupo Guadalupe y se puede diferenciar en dos conjuntos, Arenisca de Labor y Arenisca Tierna. La Arenisca de Labor alcanza un espesor de 177 metros en la sección tipo, iniciando con capas muy gruesas de areniscas intercaladas con delgadas capas de arcillolitas. Entre ambas unidades se reconocen 19 metros de lodolitas y arcillolitas que marcan la separación. La Arenisca Tierna, con un espesor de 49 metros, se distingue por presentar capas muy gruesas de areniscas de tamaño más grueso y textura friable (Montoya y Reyes, 2005).

El espesor total combinado de la unidad es de aproximadamente 245 metros, aunque se observan variaciones laterales: hacia el norte, en los municipios de Tausa y Guachetá, la Arenisca de Labor disminuye a 66 metros, mientras que la Arenisca Tierna aumenta hasta 65 metros en Tausa.

Litológicamente, el Segmento A (Labor) inicia con 10 metros de areniscas muy finas en capas delgadas, seguido por 6 metros de limolitas y limolitas arenosas, y un intervalo de areniscas limosas con intercalaciones de arcillolitas. La parte superior corresponde a 46 metros de cuarzoareniscas blancas muy finas, que alternan cíclicamente capas gruesas y delgadas. El Segmento B (Tierna) comienza con potentes capas de areniscas finas y muy finas con laminación ondulosa, separadas hacia arriba por capas delgadas de arcillolitas y limolitas. En los 49 metros superiores predominan areniscas blancas, finas a muy finas, friables o macizas, en bancos tabulares y levemente ondulosos, con intercalaciones de lentes de arenisca y limolitas.

4.1.3 FORMACIÓN GUADUAS (KPGG)

La Formación Guaduas suprayace al Grupo Guadalupe y sus afloramientos se extienden ampliamente en los sinclinales de la Sabana de Bogotá, como Río Frío, Neusa, Zipaquirá, Checua-Lenguazaque, Sesquilé, Sisga, Subachoque, Teusacá, Usme y Soacha. Morfológicamente se reconoce como una sucesión arcillo-arenosa con mantos de carbón que generan geoformas características: tres valles asociados a niveles arcillosos y dos relieves abruptos vinculados a niveles arenosos (Montoya y Reyes, 2005).

Se diferencian cinco segmentos en la sección de Sutatausa, que en conjunto alcanzan un espesor total cercano a 1.090 metros. El Segmento A, con 220 metros, está compuesto por arcillolitas, lodolitas y areniscas finas, con intercalaciones de mantos de carbón explotables. El Segmento B, de 30 metros, corresponde a la denominada Arenisca La Guía, formada por areniscas finas a medias con intercalaciones de limolitas y lodolitas. El Segmento C, con 250 metros, contiene varios mantos de carbón de espesores entre 40 centímetros y 3 metros, intercalados en secuencias de lodolitas y limolitas, además de nódulos de siderita. El Segmento D, el más potente con 370 metros, incluye areniscas muy finas, lodolitas abigarradas y mantos de carbón de hasta 1,80 metros, además de la Arenisca Lajosa, un conjunto arenoso destacado con estratificación paralela y conglomerados de intraclastos. Finalmente, el Segmento E, con 220 metros, está constituido por limolitas y arcillolitas en

capas gruesas de colores rojizos, verdosos y azulosos, intercaladas con areniscas cuneiformes.

4.1.4 FORMACIÓN CACHO (PGC)

La Formación Cacho presenta afloramientos en los sinclinales Sisga, Siecha, Sesquilé, Teusacá, Usme, Checua-Lenguazaque, Río Frío y Subachoque, además del anticlinal de Guatavita. Se caracteriza por una secuencia arenítica que puede presentarse como un solo paquete o como dos niveles separados por un intervalo arcillolítico. Su espesor total es de aproximadamente 172 metros y se subdivide en tres segmentos principales (Montoya y Reyes, 2005).

El Segmento A, con 77 metros, inicia con areniscas friables de grano medio en capas muy gruesas, seguido por intervalos de areniscas finas y medias, algunas cuneiformes y conglomeráticas, y termina en areniscas de grano grueso decreciente a fino. El Segmento B, de 55 metros, está compuesto por areniscas de grano medio en capas muy gruesas y bancos tabulares, ocasionalmente conglomeráticos, con intercalaciones de arcillolitas; hacia arriba predominan areniscas con laminación inclinada y cruzada asintótica. El Segmento C, de 40,6 metros, corresponde a areniscas de grano medio con decrecimiento a fino, dispuestas en capas gruesas y medias, tabulares y ocasionalmente cuneiformes, de color blanco amarillento y textura friable.

4.1.5 FORMACIÓN BOGOTÁ (PGB)

La Formación Bogotá presenta un espesor de aproximadamente 1.095 metros y se subdivide en seis segmentos con diferencias texturales. El Segmento A, con 100 metros, está compuesto por rocas de grano fino, con secuencias granocrecientes que pasan de areniscas consolidadas en la base a arcillolitas y limolitas de colores violeta y gris. El Segmento B, de 135 metros, presenta rocas más gruesas, con intervalos granodecrecientes desde areniscas friables de grano medio y fino hacia arcillolitas, mostrando estructuras internas como laminación inclinada, paralela y cruzada, además de concreciones en las arcillolitas. El Segmento C, de 270 metros, corresponde a intervalos granodecrecientes desde areniscas muy finas a limolitas, con areniscas verdes y grises de estratificación cruzada y limolitas rojas y violetas con concreciones y niveles de arcillolita negra. El Segmento D, con 195 metros, incluye dos intervalos granodecrecientes desde areniscas de grano medio a fino hacia limolitas y arcillolitas, con estratificación cruzada y paralela, bases erosivas y colores violeta a gris. El Segmento E, de 200 metros, está en gran parte cubierto, pero se reconoce una base de areniscas de grano medio a fino que decrecen hacia arcillolitas limosas, con estructuras como estratificación cruzada, laminación y canales. Finalmente, el Segmento F, de 115 metros, inicia con bancos de areniscas gruesas con lentes de gravas y contactos erosivos, seguidos por secuencias granodecrecientes desde areniscas muy finas hasta arcillolitas (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.6 FORMACIÓN REGADERA (PGR)

Está compuesta por areniscas no consolidadas de grano grueso, capas de conglomerados y niveles de arcillas rosadas y rojizas, que suprayacen a la Formación Bogotá y son cubiertas discordantemente por la Formación Usme en el sinclinal de Usme. Sus afloramientos se restringen al oriente de la Sabana, en los sinclinales de Usme y Sisga,

donde generan una morfología característica de colinas redondeadas alineadas (Montoya y Reyes, 2005).

En la sección de Usme, la Formación Regadera alcanza un espesor de más de 756,3 metros y se subdivide en tres segmentos. El primero está compuesto por areniscas de grano medio a grueso, con estratificación cruzada y gradada en la base, seguido por capas cuneiformes y finalmente areniscas finas arcillosas en la parte superior. El segundo segmento es más potente, con intercalaciones de areniscas de grano medio a gránulos y tramos cubiertos que sugieren arcillolitas. El tercero corresponde a una secuencia de arcillolitas de colores variados, intercaladas con areniscas, que culmina con capas gruesas de areniscas conglomeráticas.

En la sección del Sisga, la unidad mide unos 660 metros y se subdivide en cuatro segmentos. El primero está formado por areniscas friables muy finas en la base, que se tornan naranjas por oxidación, seguidas de areniscas finas a medias con intercalaciones de arcillolitas. El segundo es un nivel blando de 120 metros, mayormente cubierto por depósitos de pendiente. El tercero genera la topografía más abrupta, con areniscas y conglomerados explotados como material de construcción; incluye intercalaciones con estratificación cruzada y bancos macizos de areniscas friables de colores blanco, amarillo y rojo, además de conglomerados matriz-soportados. El cuarto segmento, el más extenso, está compuesto por lodolitas arenosas de colores variados, bancos de areniscas friables y conglomeráticas, y en la parte superior intercalaciones de conglomerados con guijos de chert.

4.1.7 DEPÓSITOS DE ORIGEN EROSIVO

Los depósitos de origen erosivo o denudativo en la Sabana de Bogotá agrupan materiales generados como respuesta a los procesos de plegamiento y levantamiento de la Cordillera Oriental, que modificaron la cuenca desde el Plioceno hasta el Holoceno (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.7.1 FORMACIÓN BALSILLAS (N2B)

Se distribuye en los cerros del norte de la Sabana, en Chocontá, Villapinzón, Suesca, Guasca y Neusa, y en el sureste, desde Mondoñedo hasta Bojacá. Está compuesta por arcillas, arenas, gravas y capas de ceniza volcánica, interpretadas como depósitos coluviales antiguos con abundantes aportes volcánicos que originaron paleosuelos arcillosos de halloysita bajo condiciones de clima cálido y húmedo. Localmente la formación pasa a sedimentos lacustres meteorizados con espesores de hasta 30 metros, y hacia los fondos de valle aparecen lignitas descompuestas junto con cenizas volcánicas. En algunos sectores se observa una influencia tectónica ligera.

4.1.7.2 FORMACIÓN MONDOÑEDO (Q2MO)

Aflora en regiones secas del área, especialmente al suroeste de Mosquera, cerca de Soacha, Usme, Guasca y Guatavita. Se dispone sobre depósitos plio-cuaternarios o directamente sobre el sustrato rocoso. Está compuesta por depósitos coluviales de grano fino, limos y arenas, con fragmentos subangulares de roca e intercalaciones de paleosuelos, y alcanza espesores de hasta 10 metros. Su origen corresponde

principalmente al Cuaternario tardío, durante la última glaciación y el Holoceno, aunque algunos niveles podrían pertenecer al último interglaciar.

4.1.7.3 FORMACIÓN MARICHUELA (N1M)

Corresponde a depósitos de abanicos aluviales antiguos que se desarrollaron en distintos sectores de la Sabana de Bogotá, como Usme, La Calera, Laguna del Neusa, el Sisga y la vereda Suralá. Estos abanicos se originaron a alturas entre 3.100 y 3.600 metros sobre el nivel del mar y están constituidos por gravas con clastos de tamaño hasta bloques, asociados a avalanchas torrenciales inducidas por eventos sísmicos o lluvias extremas. Morfológicamente generan lomas bajas y abanicos convexos y abruptos, de gran extensión.

Litológicamente se reconocen depósitos caóticos de bloques matriz-soportados, con clastos angulosos a redondeados de areniscas y rocas tipo plaeners, en una matriz de arena gruesa a conglomerática. Ejemplo de ello es el afloramiento de la carretera Chocontá–Cucunubá, con un espesor cercano a 40 metros. En la vereda Suralá se observa otro depósito de unos 15 metros, rojizo y gravoso, que forma una colina alargada de 5 kilómetros sobre la Formación Regadera. Estratigráficamente, la Formación Marichuela se apoya sobre rocas cretácicas y paleógenas, y se considera un depósito sinorogénico ligado al levantamiento de la Cordillera Oriental.

4.1.7.4 DEPÓSITOS COLUVIALES (QCO)

Los depósitos coluviales son acumulaciones de materiales en laderas originados por procesos locales de erosión y gravedad. Se evidencian de manera destacada en el piedemonte del flanco occidental del anticlinal de Bogotá y se presentan en diferentes formas: conos coluviales, conos de talud, lóbulos de solifluxión y flujos torrenciales; este último se diferencia como una unidad aparte de los depósitos coluviales.

Los conos coluviales y lóbulos de solifluxión tienen formas convexas, con inclinaciones suaves o abruptas, y se generan por escorrentía superficial o por el flujo lento y viscoso de suelos saturados. Su litología consiste en bloques angulares a subangulares de distintos tamaños, embebidos en una matriz arcillosa. Los conos de talud se forman al pie de escarpes, con morfología recta o convexa de longitud corta, y se originan por acumulación mecánica de bloques desprendidos por meteorización; su litología está compuesta por bloques angulares a subangulares clasto-soportados, con matriz arenosa o arcillosa.

4.1.8 DEPÓSITOS DE ORIGEN ALUVIAL Y LAGUNAR

Dentro del grupo de depósitos aluviales y lagunares que rellenan la Sabana de Bogotá se distinguen las formaciones Tilatá, Subachoque, Río Tunjuelito, Sabana y Chía. A continuación se describen las que se desarrollan en el área de estudio (Montoya y Reyes, 2005).

4.1.8.1 FORMACIÓN TILATÁ (NGQT)

La Formación Tilatá corresponde a depósitos aluviales y lacustres acumulados durante el Mioceno tardío y el Plioceno en la Sabana de Bogotá. Litológicamente está conformada por secuencias de gravas y arenas, con espesores cercanos a 80 metros en el sector occidental del sinclinal de Sisga. Se distinguen dos segmentos. El Segmento A, con un espesor de 37 metros, está dominado por arenas y gravas; en la base aparecen capas muy gruesas de

arenas de grano medio a grueso, intercaladas con gravas tanto grano-soportadas como matriz-soportadas, y hacia la parte superior se observan intercalaciones de arenas finas y muy finas en capas medias. Estas secuencias muestran estructuras como estratificación cruzada, laminación ondulosa y lentes de gravas, además de intervalos granocrecientes que pasan de arenas gruesas a gravas de guijarros de hasta 20 milímetros.

El Segmento B, con 46 metros de espesor, está compuesto por gravas muy gruesas, con clastos de tamaño guijo, cercanos a 5 centímetros, y guijarros de aproximadamente 20 centímetros, subredondeados, elongados y con imbricación. Los clastos corresponden principalmente a areniscas y liditas. Sobre estas capas se desarrollan intervalos de gravas matriz-soportadas con clastos de 2 a 4 centímetros, acompañados de lentes de arcillas y capas delgadas de arenas en forma cuneiforme.

Morfológicamente forma terrazas alomadas y abanicos explayados de varios kilómetros, con colinas redondeadas o alargadas de pendientes suaves, visibles en corredores como la vía Bogotá–Tunja. Su origen se asocia a antiguos sistemas de abanicos y planicies aluviales, muy disectados y localmente afectados por tectónica, lo que la convierte en un registro clave de la transición hacia la sedimentación continental en el Mioceno tardío–Plioceno.

4.1.8.2 FORMACIÓN SUBACHOQUE (Q1SU)

Está compuesta por depósitos cuaternarios que afloran principalmente en los flancos occidentales de los sinclinales de Subachoque y Guasca. Se encuentra suprayacida por la Formación Sabana y suprayace a la Formación Tilatá o directamente a rocas precuaternarias. Litológicamente está formada por arcillas arenosas, orgánicas y turbas-lignitas, que se alternan con arenas arcillosas y gravas. En el pozo Funza II se han registrado espesores de hasta 150 metros, con variaciones según la posición en el valle: en la parte alta predominan capas gruesas de gravas, mientras que hacia el centro y sur aparecen secuencias de arenas arcillosas con gravas intercaladas con arcillas orgánicas o ricas en turba.

4.1.8.3 FORMACIÓN SABANA (Q1SA)

La Formación Sabana es el depósito lacustre más extenso y espeso de la cuenca y aflora ampliamente en la zona plana de la Sabana de Bogotá. Está compuesta principalmente por arcillas, y hacia los márgenes de la cuenca se observan arcillas orgánicas, arenosas y niveles de turba-lignita. Su origen se relaciona con un antiguo lago que dejó extensas planicies y deltas lacustres, de aspecto aterrazado y con morfología ondulada suavemente inclinada, limitada por escarpes fluviales. En el pozo Funza II se han registrado espesores de al menos 320 metros, constituidos por arcillolitas grises con intercalaciones locales de arenas finas, niveles delgados de gravas y turbas; en los dos metros superiores aparecen suelos formados por cenizas volcánicas, evidencia de aportes volcánicos recientes. Estratigráficamente suprayace a la Formación Subachoque y se ubica en el Pleistoceno medio a tardío.

4.1.8.4 FORMACIÓN CHÍA (Q2CH)

Corresponde a depósitos fluviales recientes de grano fino que afloran a lo largo de los ríos principales de la Sabana de Bogotá, generalmente por debajo de las llanuras de inundación

actuales. Su espesor máximo es reducido, cercano a 5 metros, y está constituida principalmente por arcillas, que en algunos sectores presentan moteado gris-naranja, como en el municipio de Chía. Localmente puede contener limos y, en zonas fangosas, está compuesta por arcillas orgánicas diatomíticas. Geomorfológicamente forma terrazas fluviales planas de suave pendiente, talladas por la acción de las corrientes modernas. Estratigráficamente suprayace a los depósitos de la Formación Río Tunjuelito o a la Formación Sabana.

4.1.8.5 DEPÓSITOS ALUVIALES (QAL)

Corresponden a los depósitos generados por los cauces activos de quebradas y ríos, y se evidencian en los municipios de La Calera, Anapoima y La Mesa. Se emplea esta nomenclatura para diferenciarlos de la Formación Chía, que se desarrolla principalmente en la Sabana de Bogotá y cuyos sedimentos corresponden a materiales antiguos y estabilizados.

4.1.9 DEPÓSITOS DE ORIGEN GLACIAR Y PERIGLACIAR

4.1.9.1 FORMACIÓN RÍO SIECHA (Q1SI)

La Formación Río Siecha corresponde a depósitos periglaciares y fluvioglaciares que afloran en sectores altos de la Sabana de Bogotá, especialmente en los flancos de los sinclinales de Usme, Sisga y Río Frío, así como en los anticlinales de Soacha y Bogotá. Se disponen en forma de abanicos suavemente inclinados entre los 2.750 y 3.050 metros sobre el nivel del mar. Está compuesta por gravas con intercalaciones de arenas, arcillas orgánicas y paleosuelos húmicos, además de capas muy gruesas con bloques y fragmentos subangulares en matriz arcillosa. Estos depósitos muestran un empaquetamiento apretado y clastos mal seleccionados, lo que indica un ambiente de sedimentación de alta energía (Montoya y Reyes, 2005).

Su origen está asociado a ambientes periglaciares y fluvioglaciares, donde se reconocen abanicos de deshielo, conos y lóbulos de gelifracción, y planicies de sobrelavado glaciar. Los abanicos fluvioglaciares se formaron por corrientes torrenciales derivadas del deshielo de masas glaciares, mientras que los conos de gelifracción se originaron por la congelación y descongelación repetida de materiales superficiales. Estratigráficamente suprayace a rocas cretácicas y, en algunos sectores como el municipio de Guasca, recubre depósitos cuaternarios previos.

4.1.9.2 DEPÓSITOS FLUVIO-GLACIARES (QFG)

Se observan principalmente en el municipio de Anapoima y están constituidos por bloques y cantos angulares a subredondeados de areniscas, provenientes en su mayoría del Grupo Guadalupe–Olini, embebidos en una matriz de arena gruesa a arcilla. Geomorfológicamente corresponden a abanicos fluvioglaciares formados por corrientes torrenciales derivadas del deshielo, que transportaron clastos de gran tamaño y los acumularon en abanicos inclinados.

4.2 GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

La Sabana de Bogotá presenta una geometría estructural dominada por un sinclinorio, donde los sinclinales son amplios y continuos, mientras que los anticlinales resultan estrechos, discontinuos y fuertemente deformados por fallas de cabalgamiento longitudinales. A esta complejidad se suma el diapirismo salino, que genera rampas, desplazamientos laterales y zonas de transferencia, produciendo estructuras muy irregulares (Montoya y Reyes, 2005). Se distinguen dos estilos estructurales principales. En el flanco oriental de la Cordillera Oriental, las fallas de cabalgamiento tienen vergencia hacia el oriente, acompañadas de retrocabalgamientos menores con vergencia al occidente. En el flanco occidental predominan sistemas imbricados de cabalgamientos con vergencia hacia el occidente, controlados por fallas de dirección noroeste, como Neusa y Santa Bárbara–Facatativá, responsables de la formación de anticlinales estrechos y sinclinales amplios, posteriormente erosionados y rellenados por sedimentos cuaternarios que conforman la planicie de la Sabana.

El diapirismo de sal juega un papel clave en la complejidad estructural, especialmente en núcleos de anticlinales como Zipaquirá y Nemocón, donde provoca angostamientos y conexiones entre bloques de distintas unidades mediante fallas cortas. Fenómenos similares se observan en la serranía entre Sesquilé y La Calera, donde la actividad diapírica habría generado escamaciones de cabalgamientos y salientes hacia el oriente.

4.2.1 SECCIONES GEOLÓGICAS REGIONALES

A continuación, se hace la descripción de las principales estructuras geológicas que tienen importancia desde el punto de vista hidrogeológico, en cada una de las secciones geológicas presentadas. Las secciones se encuentran numeradas de norte a sur, y su localización se puede apreciar en el mapa geológico (plano 1). En el texto se emplea la nomenclatura estratigráfica de la Tabla 1; las figuras de las secciones conservan la simbología de la cartografía fuente.

4.2.1.1 SECCIÓN GEOLÓGICA 1-1’

En la Figura 1, se presenta la sección geológica 1-1’, localizada al norte de la zona de estudio, entre Chocontá y Villapinzón. Hacia el centro de la figura, se encuentra una pequeña estructura, llamada sinclinal de Mochilas, dentro de la cuenca del sinclinal del Sisga. Esta estructura está afectada al oriente y al occidente por un sistema de fallas, que desplazan y afectan la continuidad de las formaciones geológicas.

El Sinclinal de Mochilas, está integrado por rocas de la Formación Bogotá (Pgb), constituida predominantemente por arcillolitas con intercalaciones de areniscas, que suprayace las areniscas de la Formación Cacho (Pgc), las cuales afloran en la parte alta, al occidente del sinclinal, y se consideran de interés hidrogeológico. De acuerdo con la sección, la Formación Cacho se encuentra aproximadamente a 250 m de profundidad.

Infrayaciendo a la formación Cacho, se encuentra la Formación Guaduas (KPgg), conformada principalmente por arcillolitas, con esporádicas intercalaciones de areniscas y mantos de carbón, la cual cubre, las areniscas de la Formación Labor y Tierna (Kglt), que constituye el acuífero principal en la zona de estudio. De acuerdo con la sección geológica, la Formación Labor y Tierna se encuentra aproximadamente a 750 m de profundidad.

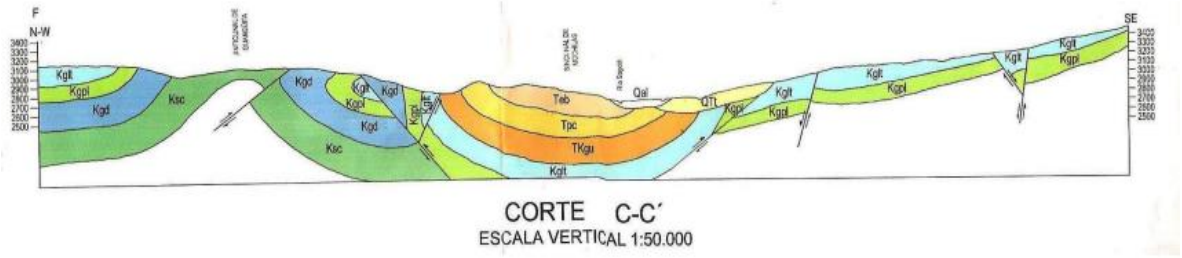


Figura 1. Sección geológica 1-1'. Tomada de la sección C-C' del Mapa geológico Alto Bogotá–Sisga (Moreno, J., 2004).

4.2.1.2 SECCIÓN GEOLÓGICA 2-2'

En la sección geológica 2 a 2", localizado al norte de Chocontá, se puede observar la cuenca del sinclinal del Sisga. El flanco oriental, está afectado por una falla inversa, que interrumpe la continuidad de las rocas, poniendo en contacto rocas del cretáceo con rocas del terciario. Al occidente, el flanco del sinclinal se encuentra afectado por un sistema de fallas, que dislocan las rocas, generando varios bloques e interrumpiendo la continuidad de las formaciones geológicas. Ver Figura 2.

En este el sector, la cuenca del sinclinal del Sisga es más amplía y en su núcleo, se encuentra la Formación Regadera (Pgr), constituida principalmente por areniscas conglomeráticas, de interés hidrogeológico en el presente estudio.

La Formación Regadera, se encuentra parcialmente cubierta por la Formación Tilatá (NgQt), y suprayace a la Formación Bogotá (Pgb). En la sección, se puede observar la continuidad de las formaciones geológicas de interés hidrogeológico, descritas en la sección anterior, tales como, la Formación Cacho y la Formación Labor y Tierna.

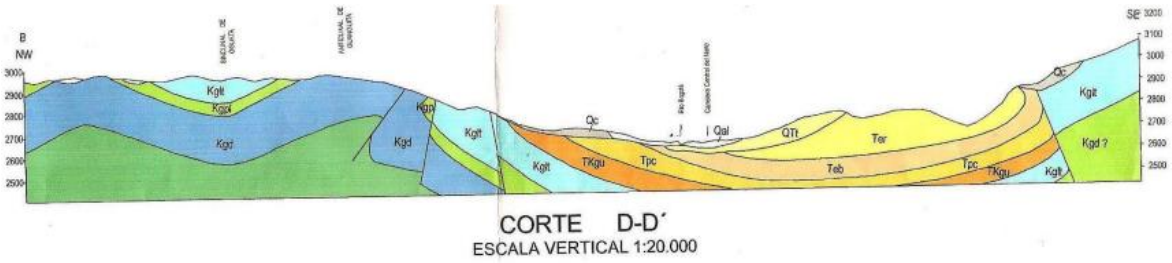


Figura 2. Sección geológica 2-2'. Tomada de la sección D-D' del Mapa geológico Alto Bogotá–Sisga (Moreno, J., 2004).

4.2.1.3 SECCIÓN GEOLÓGICA 3-3'

Se encuentra localizada al norte del embalse del Sisga (ver Figura 3). En esta sección geológica, se pueden identificar de oriente a occidente, las siguientes estructuras de interés hidrogeológico: el sinclinal del Sisga, el sinclinal de Sesquilé, el sinclinal de Suesca y el sinclinal de Checua–Lenguazaque, las cuales se describen a continuación:

- Sinclinal del Sisga

El Sinclinal del Sisga, se encuentra limitado al oriente por el anticlinal de Macheta, y al occidente por la falla y el anticlinal de Guatavita–Chocontá (al norte). El flanco oriental está

afectado por la falla de Suralá, que al igual que la falla de Chocontá, en el flanco occidental, limita la continuidad de las unidades geológicas, en especial las de interés hidrogeológico, tales como la Formación Labor y Tierna. La cuenca del sinclinal del Sisga, está conformado por una secuencia de rocas cretácicas y terciarias, entre las cuales se encuentran las siguientes formaciones de interés hidrogeológico: Regadera (Pgr), Cacho (Pgc), y la Formación Labor y Tierna (Ksglt).

Las formaciones Regadera, Cacho y Labor y Tierna, se encuentran aproximadamente a 150 m, 1100 m y 2100 m de profundidad, respectivamente, en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica.

- Sinclinal de Sesquilé

Al oriente, el Sinclinal de Sesquilé, se encuentra separado del sinclinal del Sisga, por la falla y el anticlinal de Guatavita–Chocontá (al norte); y al occidente, está limitado por el anticlinal de Sopó–Sesquilé, hacia el sur, y por el anticlinal de Suesca, hacia el norte.

El sinclinal está integrado principalmente por rocas cretácicas, debido a que las rocas del terciario fueron erosionadas en su mayoría, y solamente quedan pequeños afloramientos de las formaciones Bogotá y Cacho. En el centro del sinclinal, la Formación Guaduas (KPgg), constituida principalmente por arcillolitas, se encuentra cubriendo las areniscas de la Formación Labor y Tierna (Ksglt), que constituyen el acuífero principal.

El flanco occidental del sinclinal, se encuentra afectado por una falla de rumbo, que desplaza las rocas, sin afectar la continuidad de las mismas. La Formación Labor y Tierna, se encuentra aflorando en gran parte de este flanco. En el eje del sinclinal, se encuentra aproximadamente a 1200 m de profundidad, según la sección geológica.

- Sinclinal de Suesca

El sinclinal de Suesca, aparece como una estructura estrecha, afectada en sus dos flancos por fallas de carácter inverso, tales como, la falla de Suesca, al oriente, y falla de Nemocón al occidente, que interrumpen la continuidad de las formaciones geológicas.

El sinclinal de Suesca, está limitado al oriente por el anticlinal de Sopó–Sesquilé, el anticlinal de Suesca (al norte), y al occidente, por el anticlinal de Bogotá–Nemocón.

En este sector, se encuentran aflorando las areniscas de la Formación Labor y Tierna (Ksglt), que conforman el acuífero principal, para el presente estudio. En el eje del sinclinal, se encuentra aproximadamente a 600 m de profundidad, según la sección geológica.

- Sinclinal de Checua–Lenguazaque

Al occidente de la sección geológica 3 a 3", se encuentra el sinclinal de Checua, junto al sinclinal de Lenguazaque. El sinclinal de Lenguazaque, constituye una estructura de carácter local, que se une con el sinclinal de Checua, para formar el sinclinal de Usme–Chía–Checua, estructura de carácter regional, que se extiende hasta el sur de la ciudad de Bogotá.

Este sinclinal Checua, está delimitado al oriente por el anticlinal de Guachaneca, y al occidente por el anticlinal de Tausa y la falla de Sutatausa.

El flanco oriental del sinclinal está afectado por la falla de Cucunubá, de carácter inverso, que desplaza las unidades geológicas e interrumpe la continuidad de las rocas.

El sinclinal está integrado por una secuencia de rocas cretáceas y terciarias. En el eje del sinclinal, afloran rocas de la Formación Bogotá (Pgb), de composición predominantemente arcillosa, bajo la cual, se encuentra la Formación Cacho (Pgc), compuesta por capas de areniscas con intercalaciones de arcillolitas, le sigue en profundidad, la Formación Guaduas (KPgg), constituida principalmente por arcillolitas, con algunos niveles de areniscas y mantos de carbón. La formación Guaduas, se encuentra cubriendo las areniscas de la Formación Labor y Tierna (Ksglt), que constituyen el acuífero principal.

La Formación Labor y Tierna, se encuentra aproximadamente a 1300 m de profundidad en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica.

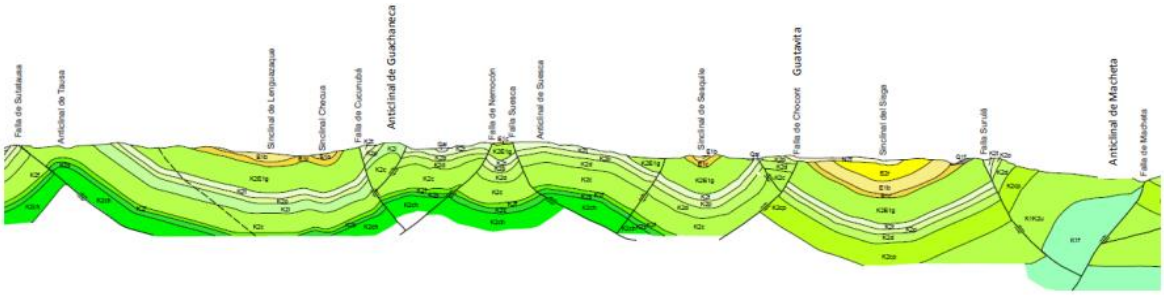


Figura 3. Sección geológica 3-3'. Tomada y adaptada de la Geología de la plancha 209 Zipaquirá (INGEOMINAS, 2003).

4.2.1.4 SECCIÓN GEOLÓGICA 4-4'

Esta sección se encuentra localizada al norte del municipio de Sesquilé, atravesando el embalse del Sisga (ver Figura 4). En la sección geológica, se muestra la continuidad de las principales estructuras de interés hidrogeológico. De oriente a occidente, se encuentran las siguientes estructuras: el sinclinal del Sisga, el sinclinal de Sesquilé, el sinclinal de Teusacá–Suesca, el sinclinal de Checua, y el sinclinal de Neusa, las cuales se describen a continuación:

- Sinclinal del Sisga:

El Sinclinal del Sisga, se encuentra limitado al oriente por el anticlinal de Macheta, y al occidente por el anticlinal de Chocontá. Los flancos, oriental y occidental están afectados por fallas de tipo inverso que interrumpen la continuidad de las unidades geológicas, entre las cuales se encuentra la Formación Guadalupe Superior (Ksgs) o Formación Labor y Tierna (en otras secciones geológicas), de interés hidrogeológico en el presente estudio.

La cuenca del sinclinal del Sisga, está conformado por una secuencia de rocas cretácicas y terciarias, entre las cuales se encuentran las formaciones Regadera (Pgr), Cacho (Pgc), y la Formación Guadalupe Superior (Ksgs), constituidas predominantemente por areniscas.

Las formaciones de interés hidrogeológico como acuíferos están representadas por la Formación Regadera, Formación Cacho y la Formación Guadalupe Superior (Formación Labor y Tierna), se encuentran aproximadamente a 100 m, 1200 m y 2200 m de profundidad, respectivamente, en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica.

- Sinclinal de Sesquilé:

El Sinclinal de Sesquilé, al oriente, se encuentra separado del sinclinal del Sisga, por el anticlinal de Chocontá y al occidente, está limitado por Anticlinal de Suesca, al norte, y por el anticlinal de Sopó–Sesquilé, hacia el sur.

La Formación Guadalupe Superior (Ksgs), que constituye la unidad de interés hidrogeológico, aflora en los dos flancos del sinclinal, y se encuentra cubierta por la Formación Guaduas (KPgg), en el eje de la estructura. La Formación Guadalupe Superior, se encuentra aproximadamente a 900 m de profundidad, en el eje del sinclinal, según la sección geológica.

- Sinclinal de Suesca:

El sinclinal de Suesca, aparece como una estructura estrecha, cuyo flanco occidental, fue afectado y cortado por la falla de Nemocón, limitando e interrumpiendo la continuidad de las formaciones geológicas.

El sinclinal de Suesca, está limitado al oriente por el Anticlinal de Suesca (anticlinal de Sopó–Sesquilé, hacia el sur), y al occidente, por el anticlinal de Nemocón. La Formación Guadalupe Superior (Ksgs), aflora en el flanco oriental, y se encuentra aproximadamente a 600 m de profundidad en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica.

- Sinclinal de Checua:

Este sinclinal, está delimitado al oriente por el anticlinal de Nemocón, y al occidente por el anticlinal de Tausa, en los cuales se encuentran depósitos de sal asociados a la Formación Chipaque.

El flanco oriental del sinclinal se encuentra invertido, y el flanco occidental está afectado por una falla local de tipo inverso, que desplaza las unidades geológicas e interrumpe la continuidad de las rocas.

El sinclinal está integrado por una secuencia de rocas cretáceas y terciarias. En el eje del sinclinal, afloran rocas de la Formación Bogotá (Pgb), de composición predominantemente arcillosa, cubriendo en algunos sectores a la Formación Cacho (Pgc), compuesta por capas de areniscas con intercalaciones de arcillolitas.

La Formación Guaduas (KPgg), compuesta de arcillolitas, niveles de areniscas y mantos de carbón, se encuentra cubriendo las areniscas del Grupo Guadalupe Superior (Ksgs), que constituye el acuífero principal. El Grupo Guadalupe Superior, se encuentra aproximadamente a 1100 m de profundidad en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica.

- Sinclinal de Neusa:

El sinclinal de Neusa, está delimitado al oriente por el anticlinal de Tausa, y por el occidente por el anticlinal de Zipaquirá. El flanco oriental está afectado por la falla de Neusa, de tipo inverso, que desplaza las unidades geológicas.

El núcleo del sinclinal, la Formación Guaduas (KPgg), se encuentra cubriendo las areniscas de la Formación Guadalupe Superior (Ksgs), que constituye la unidad de interés hidrogeológico. La Formación Guadalupe Superior, se encuentra aproximadamente a 800 m de profundidad, en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica analizada.

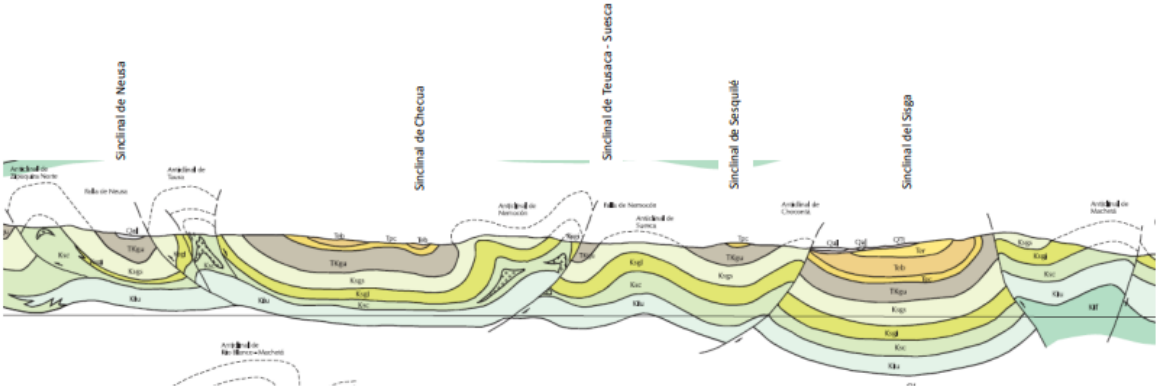


Figura 4. Sección geológica 4-4'. Tomada y adaptada de la sección geológica A-A' del Mapa geológico del cuadrángulo K-11 Zipaquirá (INGEOMINAS, 1975).

4.2.1.5 SECCIÓN GEOLÓGICA 5-5'

En la sección geológica 5 a 5" (Figura 5), localizada al sur del Embalse del Sisga, se observa la continuidad de la cuenca del sinclinal del Sisga, en esta dirección. El sinclinal está conformado por una secuencia de rocas cretácicas, conformadas por el Grupo Guadalupe (formaciones: Arenisca Dura (Kgd), Plaeners (Kgpl) y Labor y Tierna (Kglt)); rocas terciarias, conformadas por las formaciones: Guaduas (KPgg), Cacho (Pgc), Bogotá (Pgb) y Regadera (Pgr), y finalmente depósitos cuaternarios, representados por la Formación Tilatá (NgQt).

El flanco occidental del sinclinal se encuentra afectado por una falla inversa, de carácter local y de poco desplazamiento. Las formaciones de interés hidrogeológico, están conformadas por los niveles de areniscas de las formaciones Regadera, Cacho y Labor y Tierna, las cuales se encuentran aproximadamente a 200 m, 1200 m y 1600 m de profundidad, respectivamente, de acuerdo con la sección geológica.

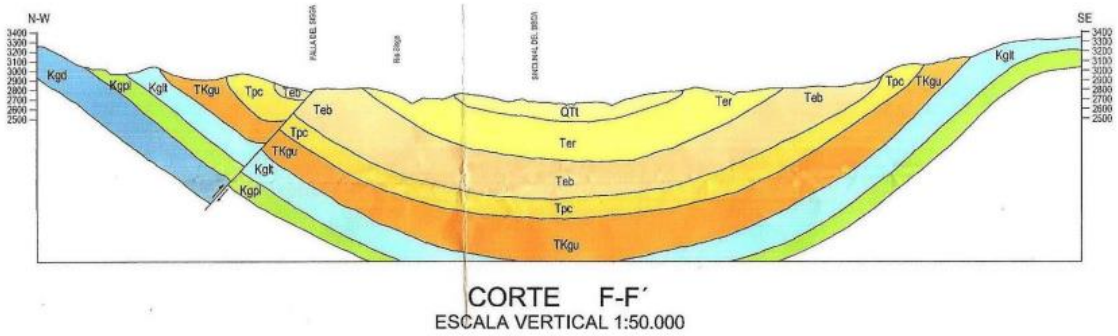


Figura 5. Sección geológica 5-5'. Tomada de la sección F-F' del Mapa geológico Alto Bogotá–Sisga (Moreno, J., 2004).

4.2.1.6 SECCIÓN GEOLÓGICA 6-6'

La sección geológica se encuentra localizada a la altura de los municipios de Tocancipá y Gachancipá, pasando por inmediaciones al municipio de Guatavita, en dirección NW–SE Figura 6.

Esta sección permite observar la continuidad hacia el sur, de las principales estructuras de interés hidrogeológico, tales como el sinclinal del Sisga, el sinclinal de Sesquilé, el sinclinal de Teusacá–Suesca, el sinclinal de Checua y el sinclinal de Neusa.

A continuación, se hace una breve descripción de las principales características de estas estructuras, de oriente a occidente:

- Sinclinal de Sesquilé:

El sinclinal de Sesquilé está delimitado al oriente por el anticlinal de Guatavita, y al occidente, por el anticlinal de Sopó–Sesquilé. El flanco oriental se encuentra afectado por la falla de Guatavita, que interrumpe la continuidad de las unidades geológicas.

La Formación Guadalupe superior (Ksgs), aflora en la parte alta del anticlinal de Sopó–Sesquilé, y se encuentra aproximadamente a 1200 m de profundidad en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica.

- Sinclinal de Teusacá–Suesca

El sinclinal está delimitado al oriente por el anticlinal de Sopó Sesquilé, y al occidente por el anticlinal de Nemocón. En el núcleo del sinclinal se encuentra la Formación Guaduas, compuesta predominantemente por arcillolitas y algunos niveles de areniscas, suprayaciendo las areniscas de la Formación Guadalupe Superior (Ksgs). La formación Guadalupe Superior (Formación Labor y Tierna), aflora hacia la parte alta del sinclinal, en los dos flancos, y se encuentra aproximadamente a 500 m de profundidad, en el eje del sinclinal.

- Sinclinal de Checua

Corresponde a una estructura limitada al oriente por el anticlinal de Nemocón, y al occidente, por el anticlinal de Tausa y la falla de Neusa. En el flanco occidental, la falla de Neusa, corta las unidades geológicas, pero no interrumpe la continuidad de la Formación Guadalupe Superior (Ksgs), que corresponde a la unidad de interés hidrogeológico.

La Formación Guadalupe Superior, aflora en la parte alta de los anticlinales que lo delimitan, y se encuentra aproximadamente a 1000 m de profundidad en el eje del sinclinal. En la interpretación del SEV 13, localizado al nororiente de Zipaquirá, se interpreta la presencia de areniscas aproximadamente a 100 m de profundidad, que pueden corresponder a capas de areniscas de la Formación Bogotá.

- Sinclinal de Neusa

Está delimitado al oriente por el anticlinal de Tausa, y al occidente por el anticlinal volcado de Zipaquirá. La continuidad de la cuenca del sinclinal de Neusa, termina al sur, en inmediaciones de Zipaquirá. En este sector el espesor de las formaciones que suprayacen a las areniscas de la Formación Guadalupe Superior (Ksgs), que corresponde a la unidad geológica de interés hidrogeológico, es mayor, razón por la cual, esta formación puede encontrarse aproximadamente a 1800 m de profundidad, en el eje del sinclinal.

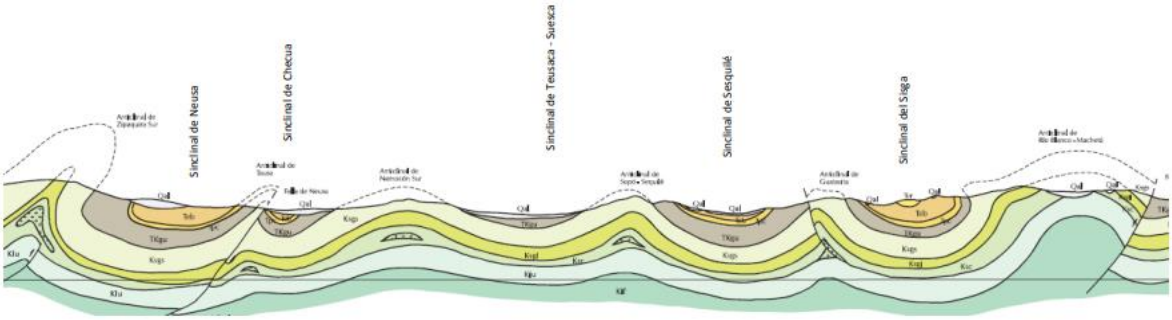


Figura 6. Sección geológica 6-6'. Tomada y adaptada de la sección geológica B-B' del Mapa geológico del cuadrángulo K-11 Zipaquirá (INGEOMINAS, 1975).

4.2.1.7 SECCIÓN GEOLÓGICA 7-7'

La sección geológica 7-7', se encuentra localizada cubriendo toda la Sabana de Bogotá, desde el límite occidental del mapa, al suroccidente del municipio de subachoque, hasta el límite oriental, al oriente de La Calera. Ver Figura 7

En esta sección geológica se pueden identificar de oriente a occidente los sinclinales de Teusacá–Suesca, Usme–Chía–Checua, Chicú–Río Frío y el de Subachoque. Al oriente de la sección, la cuenca del sinclinal del Sisga, se continúa hacia el sur, y la cuenca del sinclinal de Sesquilé, termina entre las cuencas de los sinclinales del Sisga y de Teusacá–Checua.

- Sinclinal de Teusacá–Suesca:

El sinclinal de Teusacá Suesca, está delimitado al oriente por el anticlinal de Sopó–Sesquilé, y al occidente por el anticlinal de Bogotá–Nemocón. El flanco oriental, está afectado por una serie de fallas, que generan una serie de bloques, que interrumpen la continuidad de las unidades geológicas. El flanco occidental, está afectado por una falla de tipo inverso, que desplaza, interrumpe y limita la continuidad de las formaciones geológicas, entre las cuales se encuentra la Formación Labor y Tierna (Ksglt), interés hidrogeológico para el presente estudio.

La Formación Labor y Tierna (Ksglt), aflora en el flanco occidental, en el bloquelevantado por la falla (hacia el eje del anticlinal de Bogotá), y en el bloque hundido, se encuentra aproximadamente a 1000 m de profundidad, en el eje del sinclinal, de acuerdo con la sección geológica.

- Sinclinal de Usme–Chía–Checua:

El sinclinal está delimitado al oriente por el anticlinal de Bogotá–Nemocón, y al occidente por la falla El Porvenir. En el núcleo del sinclinal, se ha depositado un gran espesor de sedimentos recientes, correspondientes a la Formación Sabana (Q1sa), los cuales reposan sobre la Formación Guaduas (KPgg).

La Formación Guaduas, se encuentra cubriendo las areniscas de la Formación Labor y Tierna (Ksglt), las cuales afloran al oriente en el anticlinal de Bogotá, y al occidente, en inmediaciones a la falla El Porvenir. La Formación Labor y Tierna, se encuentra aproximadamente a 1000 m de profundidad, en el eje del sinclinal.

- Sinclinal de Chicú–Río Frío:

El sinclinal de Chicú–Río Frío, está delimitado al oriente por la Falla de El Porvenir, y al occidente, por anticlinal de Tabio y en algunos sectores por el complejo de fallas de Subachoque. La falla de El Porvenir en el flanco oriental, y la falla de Chital, en el flanco occidental, desplazan las formaciones geológicas, interrumpiendo y limitando la continuidad de las rocas.

El sinclinal está constituido en su parte superior, por un gran espesor de sedimentos recientes, pertenecientes a la Formación Sabana (Q1sa), los cuales reposan sobre la Formación Guaduas (KPgg). La Formación Guaduas, se encuentra cubriendo las areniscas de la Formación Labor y Tierna (Ksglt). En el eje del sinclinal, la Formación Labor y Tierna, se encuentra aproximadamente a 1100 m de profundidad, de acuerdo con la sección geológica.

- Sinclinal de Subachoque:

El sinclinal de Subachoque se encuentra delimitado al oriente por anticlinal de Tabio. En el sinclinal de Subachoque, se encuentran sedimentos recientes de la Formación Subachoque, y de la Formación Tilatá (NgQt), que suprayacen a la Formación Bogotá (Pgb).

Las formaciones de interés hidrogeológico están conformadas por la Formación Cacho (Pgc) y la Formación Labor y Tierna (Ksglt), las cuales se encuentran cubiertas por la Formación Bogotá y la Formación Guaduas (KPgg), respectivamente. La Formación Cacho y la Formación Labor y Tierna, se encuentran aproximadamente a 800 m y 2000 m de profundidad, respectivamente.

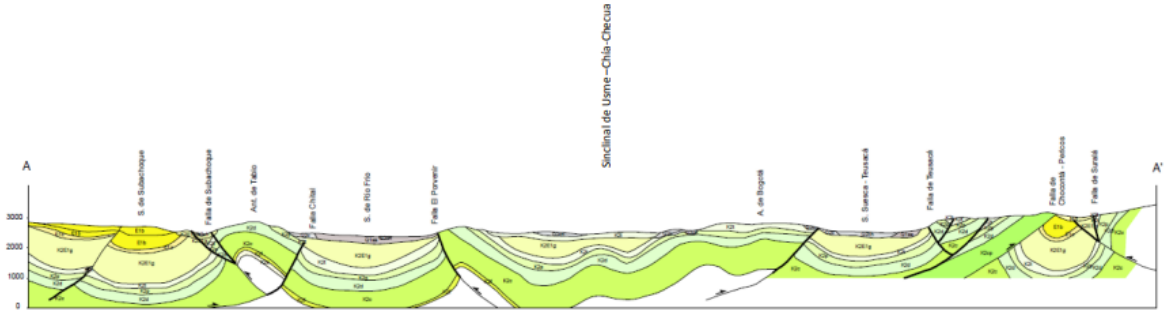


Figura 7. Sección geológica 7-7'. Tomada y adaptada del Mapa geológico de la Sabana, (Montoya y Reyes, 2005).

4.2.1.8 SECCIÓN GEOLÓGICA 8-8'

La sección geológica 8 a 8", se encuentra localizada al sur de Tenjo y al norte de El Rosal. Ver Figura 8. Esta sección permite observar la continuidad hacia el sur, de los sinclinales de Chicú–Río Frío y Subachoque. El Sinclinal de Chicú–Río Frío, está delimitado al oriente por la Falla el Porvenir, y al occidente, por anticlinal de Tabio y en algunos sectores por el complejo de fallas de Subachoque.

El esta sección, no se observa el eje del sinclinal de Chicú–Río Frío, solamente el flanco occidental del mismo, el cual está integrado por las Formaciones Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgpl), Labor y Tierna (Ksglt), y Guaduas (KPgg). Al occidente de la sección, se encuentra el sinclinal de Subachoque, el cual está delimitado al oriente por el anticlinal de Tabio, y al oriente por el anticlinal del Alto del Vino.

Los dos flancos se encuentran afectados por fallas, que desplazan e interrumpen la continuidad de las formaciones geológicas, generando a la vez, bloques independientes. La Formación Labor y Tierna (Ksglt), de interés hidrogeológico, se encuentra aproximadamente a 1700 m de profundidad, en el eje del sinclinal de Subachoque. En el SEV 19, localizado en el sinclinal de Dintel, se interpreta la presencia de areniscas, que pueden corresponder a la base Formación Guaduas, o al techo de la Formación Labor y Tierna, a una profundidad aproximada de 69 m.

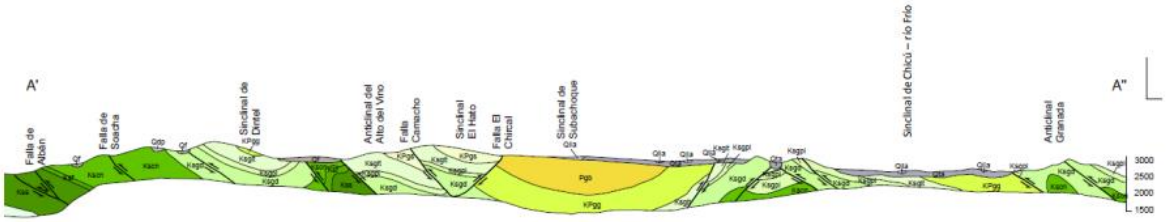


Figura 8. Sección geológica 8-8'. Tomada y adaptada de la sección geológica A'-A'' de la geología de la plancha 227 La Mesa (INGEOMINAS, 1998).

4.2.1.9 SECCIÓN GEOLÓGICA 9-9'

La sección geológica 9-9' de la Figura 9, se encuentra localizada al sur de Bojacá. En inmediaciones a Facatativá, se halla un complejo estructural integrado por una serie de fallas y plegamientos, que se continúa en dirección sur y norte del municipio. Este complejo de fallas genera una serie de bloques independientes, en los cuales no existe continuidad de las formaciones geológicas.

Los bloques están integrados principalmente por la Formación Conejo (Kscn), y el Grupo Guadalupe, integrado por las formaciones Arenisca Dura (Ksgd), Plaeners (Ksgpl) y Labor y Tierna (Ksglt).

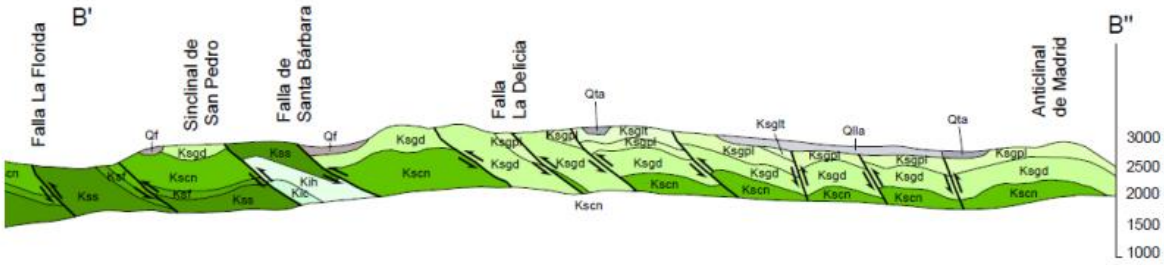


Figura 9. Sección geológica 9-9'. Tomada y adaptada de la sección geológica B'-B'' de la geología de la plancha 227 La Mesa (INGEOMINAS, 1998).

4.2.2 ESTRUCTURAS SOBRESALIENTES EN EL ÁREA DE ESTUDIO

A continuación, se listan las estructuras mas sobresalientes del área de estudio:

Tabla 2. Estructuras geológicas principales identificadas en el área de estudio.

Estructura	Tipo	Rumbo	Municipios donde se evidencia
Falla de Suralá	Inversa	NE	La Calera

Estructura	Tipo	Rumbo	Municipios donde se evidencia
Falla Chocontá–Pericos	Inversa	Variable, NE dominante	La Calera
Falla de Guatavita	Inversa	NE con rampa NW	Sector oriental
Falla El Porvenir	Inversa	N–S a NE	Cota, Tabio, Chía
Falla El Chital	Inversa a transcurrente sinestral	N50°E a N50°W	Tabio
Falla de Subachoque	Inversa	N10°E a N45°E	Madrid
Falla de Santa Bárbara	Transcurrente sinestral	SE–NW	Bojacá
Sistema de Fallas de Mondoñedo	Inversa con componente sinestral	N10°W a N40°	Bojacá
Sistema de Fallas de Facatativá	Cabalgamientos	N50°W	Facatativá
Falla del Río Bogotá	Falla de rumbo	N50°E	Anapoima
Sistema de Fallas de Quininí	Cabalgamientos imbricados	N10°E	Anapoima
Sistema de Fallas de Matarredonda	Cabalgamientos imbricados	N30°E	Anapoima
Sistema de Fallas de Anapoima	Cabalgamientos	N30°W	Anapoima
Falla de Bituima	Inversa, vergencia occidental	N20°W	La Mesa
Falla de Zaragoza	Cabalgamiento con componente sinestral	N50°W a N10°W	La Mesa
Sinclinal de Sisga	Sinclinal	NE	Sesquilé
Sinclinal de Sesquilé	Sinclinal	NE	Sesquilé
Sinclinal de Suesca–Teusacá	Sinclinal	N10°E a N40°E	La Calera, Sopó, Tocancipá, Sesquilé
Sinclinal El Dintel	Sinclinal	N10°E a N40°E	Facatativá
Sinclinal El Hato	Sinclinal	N10°E a N40°E	Facatativá
Sinclinal de Río Frío	Sinclinal	NE	Tabio
Anticlinal de Sopó–Sesquilé	Anticlinal asimétrico	NE	Tocancipá, Gachancipá, Sesquilé
Anticlinal de Bogotá	Anticlinal segmentado	N10°E a N50°E	La Calera, Chía, Sopó
Anticlinal de Tabio	Anticlinal volcado al NW	NE	Tabio
Anticlinal Alto del Vino	Anticlinal	N10°E a N40°E	Facatativá
Anticlinal de Anapoima	Anticlinorio	N–S	Anapoima
Anticlinal de Yeguas	Anticlinal simétrico	N–S	Anapoima

Nota. Elaboración propia a partir de Montoya y Reyes (2005) y Acosta y Ulloa (2001, 2001a, 2001b).

4.2.3 ZONA ORIENTAL

El sector oriental de la Sabana corresponde a la franja que se extiende desde el sinclinal de Checua hacia el oriente, incluyendo las áreas delimitadas por los ríos Bogotá y Tunjuelito.

4.2.3.1 FALLA DE SURALÁ

Corresponde a la falla más oriental de la Sabana de Bogotá y se extiende desde el Sisga hasta La Calera. Tiene dirección noreste y se inclina hacia el oriente. Su movimiento es principalmente inverso, aunque en algunos tramos parece combinarse con desplazamiento lateral. La presencia de aguas termales cercanas indica que podría tratarse de una falla profunda. En su recorrido conecta diferentes unidades, como Labor y Tierna, Plaeners y Guaduas.

4.2.3.2 FALLA CHOCONTÁ–PERICOS

Es una estructura inversa que atraviesa la Sabana desde Villapinzón hasta La Calera. Su recorrido muestra variaciones de dirección y bloques rotados, con contactos tectónicos entre varias unidades. La zona más afectada se localiza en La Calera, donde se combina con otras fallas y alcanza su mayor complejidad, siendo parte del sistema mayor de la Falla de Boyacá, lo que la integra dentro del sistema regional de cabalgamientos de la Cordillera Oriental.

4.2.3.3 FALLA DE GUATAVITA

Es una estructura inversa que atraviesa el oriente de la Sabana y controla la formación de los anticlinales de San José y Guatavita. Su trazo principal es noreste, aunque se interrumpe por un tramo noroeste que actúa como rampa lateral. En su movimiento pone en contacto unidades cretácicas como Plaeners y Arenisca Dura sobre la Formación Guaduas.

4.2.3.4 SINCLINAL DE SISGA

El Sinclinal del Sisga, con orientación noreste, es una estructura alargada del nororiente de la Sabana, en el municipio de Sesquilé, con flancos conformados por unidades paleógenas: Guaduas, Cacho, Bogotá y Regadera. Está limitado por fallas inversas que provocan inversiones de estratos y, hacia el sur, se conecta con la Falla Chocontá–Pericos.

4.2.3.5 SINCLINAL DE SESQUILÉ

Es una estructura ubicada entre Guasca y Chocontá, que atraviesa el embalse de Tominé y se reconoce claramente en el municipio de Sesquilé. Su núcleo está compuesto por depósitos cuaternarios y rocas de la Formación Bogotá, mientras que sus flancos corresponden a las formaciones Cacho y Guaduas.

4.2.3.6 SINCLINAL DE SUESCA–TEUSACÁ

Corresponde a una extensa estructura que atraviesa los municipios de La Calera, Sopó, Tocancipá y Sesquilé, con variaciones de orientación entre N10°E y N40°E. Su núcleo está compuesto por rocas de las formaciones Bogotá y Cacho, y sus flancos por la Formación Guaduas. Está limitado por fallas mayores como Nemocón, Suesca y Teusacá, que condicionan su amplitud y continuidad, mientras que en algunos sectores se ensancha por efecto de los depósitos cuaternarios.

4.2.3.7 ANTICLINAL DE SOPÓ–SESQUILÉ

En la zona de estudio se extiende por los municipios de Tocancipá, Gachancipá y Sesquilé, con núcleo de Arenisca Dura y flancos de Plaeners y Labor y Tierna. Es una estructura asimétrica, controlada por la Falla de Chocontá, que ocasiona inversiones y fragmentaciones, especialmente al sur de Sopó. Su continuidad hacia el norte podría relacionarse con el Anticlinal de Suesca.

4.2.3.8 ANTICLINAL DE BOGOTÁ

El Anticlinal de Bogotá tiene rumbo N10°E entre Bogotá y Tibitó, y cambia a N50°E en el sector de Nemocón. Se prolonga hacia Usaquén y Nemocón, formando un sistema anticlinal segmentado. Su núcleo está compuesto por rocas cretácicas y su eje cambia de dirección entre Bogotá y Nemocón. Los flancos están afectados por fallas y su segmentación se asocia al diapirismo de sal, lo que explica la complejidad tectónica en Zipaquirá y Nemocón. En el área de estudio esta estructura se evidencia de forma segmentada en los municipios de La Calera, Chía y Sopó.

4.2.4 ZONA OCCIDENTAL

La zona occidental de la Sabana de Bogotá corresponde al área comprendida al occidente del sinclinal de Checua, tomando como referencia el trazado del río Bogotá en el centro y el río Tunjuelito en el sur.

4.2.4.1 FALLA EL PORVENIR

Es una estructura inversa que se extiende desde Chía–Cota hasta Zipaquirá. Hacia el sur, bajo depósitos cuaternarios, levanta la serranía de Chía colocando la Formación Conejo sobre sedimentos recientes. Al norte afecta varias unidades cretácicas y paleógenas, aunque con menor desplazamiento, hasta quedar involucrada en el sistema de bloques fallados de Zipaquirá, controlado por diapirismo de sal. En la zona de estudio el plano de falla se evidencia en Cota y Tabio, donde el cabalgamiento coloca rocas cretácicas del Grupo Guadalupe sobre unidades más recientes.

4.2.4.2 FALLA EL CHITAL

Es una estructura inversa que bordea la serranía de Tabio–Tenjo, con variaciones de rumbo entre N50°E y N50°W. Su plano de falla coloca la Arenisca Dura sobre la Formación Guaduas y, en el norte, adquiere un carácter transcurrente sinestral vinculado a lineamientos regionales que conectan Zipaquirá con Pacho. Hacia el sur queda cubierta por depósitos cuaternarios y podría continuar hacia la Falla Mosquera. Se presenta en el

municipio de Tabio, donde expone rocas de las formaciones Conejo, Arenisca Dura y Plaeners sobre la Formación Guaduas.

4.2.4.3 FALLA DE SUBACHOQUE

Es una estructura inversa con rumbo N10°E a N45°E que limita el flanco occidental de la serranía de Tabio–Tenjo. Su plano de falla pone en contacto rocas cretácicas y paleógenas sobre la Formación Guaduas, y se prolonga bajo los depósitos cuaternarios hacia el centro de la Sabana. Además, desprende fallas secundarias que se integran con la Falla El Chital. Su trazo se evidencia en el municipio de Madrid, donde se encuentra cubierta por depósitos cuaternarios de la Formación Sabana.

4.2.4.4 SISTEMA DE FALLAS DE SOACHA

Corresponde a un conjunto de estructuras que fragmentan y levantan el bloque tectónico ubicado entre la Falla de Sibaté y el Anticlinal de Mochuelo. Se caracteriza por pliegues tumbados y discontinuos, con ejes oblicuos, y está dominado por fallas de orientación norte–sur y noroeste, entre las que sobresalen Cajitas, Sibaté y Santa Bárbara.

4.2.4.4.1 *FALLA DE SANTA BÁRBARA*

Es una estructura transcurrente sinestral que atraviesa la región de Mondoñedo y Soacha, afectando los anticlinales de Soacha y Mochuelo. Su dirección suroriente–noroeste y su relación con la Falla de Las Delicias muestran que forma parte de un sistema mayor de lineamientos que controlan la tectónica del suroccidente de la Sabana de Bogotá. Se evidencia en Bojacá, donde se presenta como una falla de cabalgamiento con dirección SE–NW que involucra las formaciones Arenisca Dura y Plaeners y materiales de la Formación Balsillas.

4.2.4.5 SISTEMA DE FALLAS DE MONDOÑEDO

Presenta un rumbo que varía entre N10°W y N40° y corresponde a un conjunto de fallas inversas con componente transcurrente sinestral, que se extienden desde Santa Bárbara hasta Bojacá. En el municipio de Bojacá afecta a las formaciones Plaeners y Balsillas; hacia el norte se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios.

4.2.4.6 SISTEMA DE FALLAS DE FACATATIVÁ

Corresponde a un conjunto de estructuras con rumbo predominante N50°W, que presentan vergencia nororiental. Estas fallas se prolongan hacia el occidente, donde terminan en frentes de cabalgamiento con dirección N10°E (Acosta y Ulloa, 2001).

4.2.4.7 SINCLINAL EL DINTEL

Se evidencia en el municipio de Facatativá y corresponde a un pliegue amplio con rumbo N10°–40°E, núcleo en rocas jóvenes y vergencia hacia el suroeste, cuya continuidad se ve controlada por los cabalgamientos regionales y culmina contra el Sistema de Fallas de Facatativá (Acosta y Ulloa, 2001). Su núcleo está compuesto por la Formación Guaduas y en algunos sectores se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios.

4.2.4.8 SINCLINAL EL HATO

Es una estructura plegada ubicada en el sector occidental de la Sabana de Bogotá, en Facatativá, asociada al sistema de cabalgamientos que limitan la serranía de Tabio–Tenjo. Corresponde a un pliegue amplio de rumbo N10°–40°E, con núcleo en la Formación Guaduas y flancos conformados por unidades del Grupo Guadalupe.

4.2.4.9 SINCLINAL DE RÍO FRÍO

Es una estructura amplia que se extiende hacia el noroccidente de la Sabana de Bogotá, con núcleo en rocas de la Formación Bogotá acompañadas por depósitos cuaternarios. En su parte central se angosta notablemente debido al control ejercido por las fallas El Porvenir y El Chital, aunque mantiene continuidad hacia el sur, donde se vincula con las serranías de Tabio–Tenjo y Chía–Cota. En el área de estudio el sinclinal se reconoce en el municipio de Tabio, donde se encuentra cubierto por sedimentos de la Formación Chía.

4.2.4.10 ANTICLINAL DE TABIO

Es una estructura mayor de la serranía de Tabio–Tenjo, segmentada por las fallas de El Chital y Subachoque. Presenta un núcleo de rocas cretácicas, Formaciones Conejo y Arenisca Dura, y flancos afectados por cabalgamientos que ponen en contacto unidades del Grupo Guadalupe con la Formación Guaduas. En el municipio de Tabio se manifiesta como un anticlinal volcado hacia el noroeste, que afecta principalmente a la Formación Conejo; los flancos corresponden a las formaciones Arenisca Dura y Plaeners, con inversión de las capas.

4.2.4.11 ANTICLINAL ALTO DEL VINO

Es un pliegue con rumbo N10°–40°E, con núcleo compuesto por la Formación Arenisca Dura y flancos cabalgados, que cabecea hacia el suroeste contra el Sistema de Fallas de Facatativá. Se presenta en el municipio de Facatativá.

4.2.5 ESTRUCTURAS DEL MUNICIPIO DE ANAPOIMA

La descripción de las estructuras del municipio de Anapoima se realiza con base en la geología estructural de la plancha 246 Fusagasugá (Acosta y Ulloa, 2001b). Las estructuras se localizan en la región central de la plancha, limitada por las fallas de Fusagasugá y Salcedo, y conforman un sistema tectónico complejo caracterizado por pliegues N–S y fallas NW–EW.

4.2.5.1 FALLA DEL RÍO BOGOTÁ

Es una estructura de rumbo N50°E que pone en contacto las rocas de la Formación Trincheras, Miembro El Tigre, con rocas de la Formación Capotes.

4.2.5.2 SISTEMA DE FALLAS DE QUININÍ

Corresponde a un conjunto de cabalgamientos imbricados de rumbo N10°E y buzamiento hacia el oriente, que generan superposición tectónica de las formaciones Hiló y Pacho.

4.2.5.3 SISTEMA DE FALLAS DE MATARREDONDA

Es un sistema imbricado de rumbo N30°E con buzamiento hacia el oriente, responsable de la repetición tectónica de la Formación Socotá.

4.2.5.4 SISTEMA DE FALLAS DE ANAPOIMA

Es un conjunto de fallas de rumbo N30°W que limitan bloques de la Formación Socotá, terminando al norte contra la Falla del Río Apulo y al sur contra el Sistema de Matarredonda. Su dinámica tectónica produce contactos cabalgantes entre las formaciones Socotá y Trincheras, Miembro El Tigre.

4.2.5.5 ANTICLINAL DE ANAPOIMA

Es una estructura plegada de gran escala localizada al norte del municipio de Anapoima, con rumbo N–S, conformada por tres anticlinales y dos sinclinales en rocas de la Formación Trincheras, Miembro El Tigre.

4.2.5.6 ANTICLINAL DE YEGUAS

Es una estructura plegada localizada al oriente del municipio de Anapoima. Corresponde a un pliegue simétrico de rumbo N–S, con núcleo compuesto por rocas de la Formación Trincheras, Miembro Anapoima, y flancos compuestos por las formaciones Socotá y Capotes, limitado al norte por la Falla del Río Bogotá y al sur por el Sistema de Fallas de Anapoima.

4.2.6 ESTRUCTURAS DEL MUNICIPIO DE LA MESA

La descripción de las estructuras geológicas de La Mesa se realiza con base en la memoria explicativa de la plancha 227 La Mesa, escala 1:100.000 (Acosta y Ulloa, 2001a).

4.2.6.1 FALLA DE BITUIMA

Es una falla inversa de rumbo N20°W y vergencia occidental, que originalmente funcionó como falla normal en el Jurásico tardío–Cretácico temprano y fue invertida durante la Orogenia Andina. Su importancia radica en los contactos tectónicos y las facies heterópicas que genera en rocas cretácicas y terciarias. En La Mesa se identifica en una franja estrecha al oeste del municipio de Bituima, donde afecta directamente a las formaciones Lidita Superior e Inferior, al Grupo Guaguaquí y a la Formación Simijaca.

4.2.6.2 FALLA DE ZARAGOZA

Es un cabalgamiento de rumbo N50°W, que varía a N10°W en el cerro Pan de Azúcar, con vergencia suroeste, y actúa como frente tectónico en Corraleja. Su geometría y las estructuras asociadas indican una componente de movimiento lateral sinestral.

5 CARACTERIZACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA

La caracterización hidroestratigráfica e hidrogeológica inicia con la caracterización geológica, la cual establece el marco físico que condiciona la ocurrencia y circulación del agua subterránea en el área de estudio. Este apartado integra el análisis del marco geológico regional y local con la clasificación de las litologías aflorantes y subsuperficiales en Unidades Hidrogeológicas (UHG), evaluando su tipo de porosidad (primaria o secundaria) y su comportamiento hidráulico. Asimismo, se sintetiza el control tectónico-estructural ejercido por las principales fallas y plegamientos sobre la geometría de los acuíferos, proporcionando una base geológica funcional para la posterior evaluación del balance hídrico y la disponibilidad de agua subterránea.

Para ello se parte de la caracterización litológica y estructural de las unidades aflorantes, se evalúa para cada una de ellas su capacidad de almacenar y transmitir agua subterránea, se establecen los parámetros hidráulicos y el comportamiento hidrodinámico del sistema, y se concluye con la valoración del potencial de abastecimiento de cada uno de los dieciséis municipios.

El área comprende dos dominios hidrogeológicos claramente diferenciados. El primero corresponde a la Sabana de Bogotá propiamente dicha, cuenca intramontana de origen tectonosedimentario que se comporta como una cuenca artesiana y agrupa la mayor parte de los municipios considerados. El segundo corresponde al sector de Anapoima y La Mesa, localizado sobre el flanco occidental de la Cordillera Oriental al oriente del sistema de fallas Bituima-La Salina, donde afloran las rocas del Grupo Villeta y donde las condiciones hidrogeológicas están gobernadas por el fracturamiento y por los depósitos recientes de los cauces activos.

5.1 MARCO HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

La Sabana de Bogotá corresponde a la cuenca alta del río Bogotá, con una extensión aproximada de 4.300 km², localizada entre los 4°30' y 5°15' de latitud norte y los 73°45' y 74°30' de longitud oeste. Morfológicamente se diferencian una zona plana con altura media de 2.550 m s.n.m., que ocupa más del 50 % del área, y una zona montañosa que alcanza cotas de 4.000 m s.n.m. Esta diferencia topográfica, superior a 1.000 m en algunos sectores, es el factor que impone el gradiente hidráulico regional y define el carácter artesiano del sistema.

La precipitación media anual oscila entre 800 mm en la parte plana y 1.500 mm en los sectores más altos, con un mínimo en el sector suroccidental entre Bojacá y Soacha, donde no supera los 600 mm anuales. La distribución está condicionada por la oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical, que genera dos épocas húmedas y dos épocas secas. El drenaje principal es el río Bogotá, con un caudal promedio anual de 27 m³/s para la cuenca alta, regulado por los embalses del Sisga, Tominé, Neusa, Muña, La Regadera y Chisacá, que suman aproximadamente 62 km² (Bermúdez y Velandia, 2002).

La estructura hidrogeológica se define como una cuenca artesiana compuesta por (Bermúdez y Velandia, 2002):

- Una cobertura, integrada por los depósitos continentales del Paleógeno y del Neógeno-Cuaternario que rellenaron la depresión, es decir, el Complejo Acuífero de los Depósitos Inconsolidados y el Complejo Acuitardo del Paleógeno.

- Un piso, constituido por las rocas del Cretácico Superior que bordean la depresión en forma de cadenas montañosas y afloran generalmente por encima de los 3.000 m. s.n.m., correspondiente al Complejo Acuífero Guadalupe y, en profundidad, a la unidad confinante de la Formación Chipaque.

La cuenca presenta un basculamiento en dirección noreste a suroeste, concordante con la orientación de los anticlinales estrechos y sinclinales amplios que caracterizan la región. La complejidad tectónica define una estructura de bloques limitados por fallas longitudinales de dirección noreste y fallas transversales de dirección noroeste, que dividen la cuenca y ocasionan desplazamiento, levantamiento y descenso relativo entre bloques. La consecuencia hidrogeológica directa es la discontinuidad lateral y vertical de las unidades hidroestratigráficas y la fuerte variabilidad del espesor del relleno, aspecto desarrollado en el aparte de control estructural.

5.2 CLASIFICACIÓN HIDROESTRATIGRÁFICA E HIDROGEOLÓGICA DE LAS UNIDADES GEOLÓGICAS

5.2.1 CRITERIOS ADOPTADOS

Para la definición, delimitación y clasificación de las Unidades Hidrogeológicas (UHG) en el presente estudio, se adoptaron los lineamientos metodológicos y criterios estandarizados por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) (anteriormente INGEOMINAS).

Bajo este esquema, una UHG no se concibe únicamente como una unidad litoestratigráfica convencional, sino como una entidad litotectónica y funcional definida por su capacidad para almacenar, transmitir o restringir el flujo del agua subterránea. La estructuración de las UHG se basó en la evaluación integrada de cuatro criterios técnicos fundamentales:

a) Criterio Litológico y Tipo de Porosidad (Naturaleza del Medio)

Evalúa las características físicas y la estructura interna del material geológico para determinar la forma en que se almacena y circula el agua:

- Porosidad Intergranular (Primaria): Asociada a depósitos cuaternarios no consolidados (aluviales, fluvioglaciares, lacustres) y formaciones neógenas semiconsolidadas (como la Formación Tilatá). El flujo de agua ocurre a través de los poros o intersticios entre los granos.
- Porosidad por Fracturamiento y Disolución (Secundaria): Característica de rocas consolidadas o duras (principalmente las areniscas del Grupo Guadalupe). El almacenamiento y la circulación del agua están controlados por el grado de diaclasamiento, fallamiento o disolución de la matriz rocosa.

b) Criterio Hidráulico y de Transmisibilidad (Comportamiento Hidrodinámico)

Clasifica los cuerpos geológicos en función de sus parámetros cuantitativos de transmisividad (T), conductividad hidráulica (K) y coeficiente de almacenamiento (S), categorizándolos formalmente en:

- Acuíferos: Formaciones con alta a moderada permeabilidad capaces de almacenar y ceder volúmenes significativos de agua para su aprovechamiento (ej. Grupo Guadalupe o Formación Tilatá; con productividad variable, la Formación Sabana).

- Acuitardos: Unidades de baja permeabilidad (ej. limos y arcillas masivas, o las formaciones Chía y Mondoñedo) que contienen agua y la transmiten muy lentamente, actuando como capas confinantes o de recarga diferida.
- Acuífugos: Formaciones impermeables (ej. lutitas masivas sin fracturar del Grupo Villeta) que no almacenan ni transmiten agua subterránea.

c) Criterio de Confinamiento y Presión Hidrostática

Establece las condiciones mecánicas del agua en el subsuelo y la relación con las capas suprayacentes y subyacentes:

- Acuífero Libre: La superficie freática se encuentra a presión atmosférica (típico de los depósitos aluviales y superficiales de la Sabana).
- Acuífero Confinado / Semiconfinado: El agua se encuentra confinada bajo presiones superiores a la atmosférica por la presencia de techos arcillosos o acuitardos (típico de niveles profundos del Grupo Guadalupe o lentejones de Tilatá).

d) Criterio de Continuidad Espacial y Mapeabilidad Regional

Responde a la representatividad cartográfica a la escala del trabajo (1:25.000 a 1:100.000). Permite la agrupación hidroestratigráfica, mediante la cual formaciones geológicas continuas con propiedades hidráulicas semejantes se consolidan en una sola UHG (por ejemplo, la integración de las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna dentro de la UHG *Complejo Acuífero Guadalupe*), considerando además las barreras o conectores impuestos por fallas y pliegues regionales.

5.2.2 CLASIFICACIÓN DE LAS UNIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Con el fin de sintetizar el comportamiento hidrogeológico del subsuelo, en la Tabla 3 se presenta la correlación e integración hidroestratigráfica de las unidades geológicas identificadas en el área de estudio. Dicha clasificación agrupa los diferentes cuerpos rocosos y depósitos superficiales en Unidades Hidrogeológicas (UHG) de acuerdo con sus propiedades hidráulicas, el tipo de porosidad dominante (primaria o secundaria), su función hidrogeológica (acuíferos o acuitardos) y la productividad esperada para el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

De acuerdo con lo anterior, se presenta la Tabla 3 que clasifica las diferentes unidades geológicas encontradas en toda el área de estudio, agrupadas cronoestratigráficamente de las mas joven a la mas antigua:

Tabla 3. Clasificación y caracterización hidrogeológica de las unidades geológicas del área de estudio.

Unidad geológica	Clasificación hidroestratigráfica	Clasificación hidrogeológica (UHG)	Porosidad dominante	Descripción hidrogeológica
Depósitos aluviales (Qal)	Acuíferos	Acuífero libre local	Primaria intergranular	Constituidos por gravas, arenas y limos heterogéneos asociados a los cauces de los ríos principales (Río Bogotá, Neusa, Teusacá). Presentan una

Unidad geológica	Clasificación hidroestratigráfica	Clasificación hidrogeológica (UHG)	Porosidad dominante	Descripción hidrogeológica
				permeabilidad de moderada a alta pero con un grosor limitado. Su productividad es variable (de baja a moderada) y están altamente influenciados por la dinámica hidrológica superficial.
Formación Chía (Q2ch)	Acuitardo somero	Acuitardo de poco espesor, sin interés como acuífero	Primaria intergranular	Cobertura somera de arcillas y limos con algunas arenas, de 5 a 25 m de espesor. Por su poco espesor y su composición no constituye un acuífero.
Depósitos fluvioglaciares (Qfg)	Acuíferos Locales de Piedemonte / Cobertura Discontinua.	Acuífero libre a semiconfinado local	Primaria intergranular	Mezcla de bloques, gravas y arenas en matriz arcillo-limosa en abanicos de piedemonte. Productividad baja a moderada y extensión espacial discontinua; funciona como zona de recarga local hacia la plana de la Sabana
Formación Río Siecha (Q1si)	Acuífero Cuaternario Continental	Acuífero libre a semiconfinado local	Primaria intergranular	Secuencias de gravas y arenas intercaladas con niveles arcillosos. Los horizontes gruesos presentan permeabilidad media a buena. Unidad clave para captación en pozos de profundidad somera a intermedia.
Formación Mondoñedo (Q2mo)	Acuitardo / Cobertura Detrítica	Acuitardo local con niveles acuíferos puntuales	Primaria intergranular	Coberturas heterogéneas de ladera, bloques y gravas en matriz arcillos. Espesor variable y extensión limitada. Funcionan como zonas de recarga e infiltración local pero con baja productividad directa.

Unidad geológica	Clasificación hidroestratigráfica	Clasificación hidrogeológica (UHG)	Porosidad dominante	Descripción hidrogeológica
Depósitos coluviales (Qco)	Acuitardo/ depósitos de ladera	Acuitardo local con niveles acuíferos puntuale	Primaria intergranular	Coberturas heterogéneas de ladera (bloques, gravas en matriz arcillosa). Espesor variable y extensión limitada. Funcionan como zonas de recarga local de alta a moderada infiltración hacia las unidades subyacentes, aunque su productividad directa es muy baja
Formación Sabana (Q1sa)	Acuífero semiconfinado multicapa	Acuífero semiconfinado de productividad variable según facies	Primaria, en lentes arenosos	Secuencia lacustre de arcillas y limos con intercalaciones de arena, limo y turba. Su comportamiento depende de los cambios de facies: hay sectores solo arcillosos y otros con arenas y limos que permiten captar caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s.
Formación Subachoque (Q1su)	Acuífero / Acuitardo Fluvio-lacustre.	Acuífero Libre a Semiconfinado Local.	Primaria intergranular	Intercalación de arenas, gravas y limos con mantos de carbón o turba. Presenta transmisividad y conductividad hidráulica moderada en sus capas arenosas, funcionando como un acuífero local de rendimiento bajo a medio en el norte y noroccidente de la Sabana.
Formación Tilatá (NgQt)	Horizonte acuífero Tilatá	Acuífero Semiconfinado a Confinado Regional (Acuífero Principal).	Primaria intergranular	Potentes secuencias de gravas, arenas gruesas y niveles de arcilla. Unidad estratégica explotada mediante pozos profundos. Productividad moderada a alta con elevada transmisividad en horizontes gruesos.

Unidad geológica	Clasificación hidroestratigráfica	Clasificación hidrogeológica (UHG)	Porosidad dominante	Descripción hidrogeológica
Formación Marichuela (N1m)	Acuífero Detrítico Continental	Acuífero libre a semiconfinado local	Primaria intergranular	Conglomerados, areniscas gruesas y arcillolitas de origen abanico-aluvial (común al sur de Bogotá/Usme). Presenta una permeabilidad media y rendimiento moderado, funcionando como acuífero en los bordes de la cuenca.
Formación Balsillas (N2b)	Acuífero Continental fluvial.	Acuífero Libre a Semiconfinado Local.	Primaria intergranular	Areniscas friables y conglomerados con intercalaciones arcillosas. Porosidad intergranular bien desarrollada con productividad baja a moderada.
Formación Regadera (Pgr)	Acuífero/acuitardo	Acuífero libre a confinado local	Mixta, Primaria por matriz arenosa friable y Secundaria por fracturamiento	Areniscas cuarzosas gruesas a conglomeráticas. Aunque localmente posee alta permeabilidad, la presencia de matriz arcillosa reduce su rendimiento en profundidad, actuando como confinante o acuífero de potencial variable.
Formación Bogotá (Pgb)	Complejo Acuitardo del Paleógeno	Acuitardo regional	Secundaria, por fracturamiento en niveles intermedios arenosos	Gruesa secuencia de arcillolitas de colores abigarrados con lentes delgados de arenisca. Sello o confinante regional entre los acuíferos de Regadera/Cacho y el Grupo Guadalupe.
Formación Cacho (Pgc)	Horizonte acuífero Cacho	Acuífero semiconfinado a confinado regional	Mixta, primaria y secundaria	Areniscas cuarzosas masivas de grano grueso a conglomerático. Acuífero de trascendencia regional con buena conductividad

Unidad geológica	Clasificación hidroestratigráfica	Clasificación hidrogeológica (UHG)	Porosidad dominante	Descripción hidrogeológica
				hidráulica y capacidad de almacenamiento.
Formación Guaduas (KPgg)	Complejo Acuitardo del Paleógeno/Cretácico	Acuitardo regional	Secundaria localizada	Areniscas cuarzosas masivas de grano medio a grueso, altamente diaclasadas. Núcleo del acuífero más productivo de la región, con altas transmisividades y caudales significativos
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Complejo Acuífero Guadalupe	Acuífero regional confinado	Secundaria por fracturamiento, con aporte primario en las areniscas friables	Areniscas cuarzosas masivas de grano medio a grueso, altamente diaclasadas. Núcleo del acuífero más productivo de la región, con altas transmisividades y caudales significativos.
Formación Plaeners (Ksgpl)	Complejo Acuífero Guadalupe	Acuífero confinado de productividad media	Secundaria, fracturamiento en liditas y chert	Intercalación de liditas, porcelanitas y arcillolitas. Las liditas fracturadas permiten la circulación y el almacenamiento del agua, con caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	Complejo Acuífero Guadalupe	Acuífero regional confinado	Secundaria por fracturamiento	Areniscas cuarzosas duras y bien cementadas. Funciona como un acuífero profundo de alto rendimiento, con flujo gobernado por la red de fracturas y fallas estructurales.
Formación Chipaque (Ksch)	Unidad confinante basal	Acuífugo, piso del sistema	Secundaria, muy limitada	Potente secuencia de lutitas, limonitas y liditas delgadas. Actúa como el límite o base impermeable inferior (sello) del sistema acuífero del Grupo Guadalupe.
Formación Conejo (Kscn)	Acuitardo regional	Acuitardo con niveles acuíferos locales	Secundaria	Calizas, chert y calizas arcillosas. Matriz impermeable; el fracturamiento localizado permite transmitir

Unidad geológica	Clasificación hidroestratigráfica	Clasificación hidrogeológica (UHG)	Porosidad dominante	Descripción hidrogeológica
				volúmenes menores de agua. Funciona como capa confinante.
Formación La Frontera (Ksf)	Acuitardo regional	Acuitardo (con transmisividad secundaria local)	Secundaria (Fracturamiento en niveles calcáreos/chérticos)	Calizas, chert y caliza arcillosa. Aunque es impermeable en matriz, el fracturamiento local puede transmitir volúmenes menores de agua, aunque generalmente se clasifica como capa confinante.
Formación Simijaca (Kss)	Grupo Villeta, sector Anapoima y La Mesa	Acuitardo regional	Secundaria	Sucesión monótona de lutitas, arcillolitas y areniscas finas (~ 800 m). Barrera hidráulica de baja permeabilidad con rendimiento marginal.
Formación Pacho (Kslp)	Grupo Villeta, sector Anapoima y La Mesa	Acuitardo-Acuífero local cuando está fracturada	Secundaria	Areniscas arcillosas e intercalaciones de lutitas. Permeabilidad media a baja, con productividad limitada a las zonas fuertemente tectonizadas.
Formación Hiló (Kih)	Grupo Villeta, sector Anapoima y La Mesa	Acuitardo con niveles acuíferos locales	Secundaria posible disolución kárstica	Lutitas fisiles con niveles de dolomitas y calizas lenticulares. Predominantemente impermeable, pero con desarrollo de acuíferos locales por disolución y fracturamiento.
Formación Capotes (Kic)	Grupo Villeta, sector Anapoima y La Mesa	Acuífugo, sello regional	Secundaria,	Lodolitas calcáreas/arcillolitas con baja permeabilidad
Formación Socotá (Kis)	Grupo Villeta, sector Anapoima y La Mesa	Acuífero local de baja a moderada productividad	Secundaria	cuarzoarenitas masivas y conglomeráticas bien cementadas. En zonas aflorantes o tectonizadas actúa como acuífero local
Formación Trincheras, Miembro	Grupo Villeta, sector Anapoima y La Mesa	Acuitardo/Acuífero local fracturado	Secundaria	Areniscas cuarzosas con cemento calcáreo intercaladas con lodolitas.

Unidad geológica	Clasificación hidroestratigráfica	Clasificación hidrogeológica (UHG)	Porosidad dominante	Descripción hidrogeológica
Anapoima (Kitra)				Comportamiento predominantemente confinante, con almacenamiento local condicionado por el fracturamiento.
Formación Trincheras, Miembro El Tigre (Kitrt)	Grupo Villeta, sector Anapoima y La Mesa	Acuífugo	Secundaria, muy limitada	Secuencia lutítica y lodolítica masiva de muy baja permeabilidad que actúa como el sello impermeable basal y piso hidrogeológico del sector

Nota. Elaboración propia a partir de la caracterización litológica y estructural de las unidades presentada en el capítulo de geología La correspondencia entre las unidades geológicas y los complejos hidrogeológicos de la cuenca sigue el esquema de Bermúdez y Velandia (2002). La clasificación de las unidades del Grupo Villeta del sector de Anapoima y La Mesa es elaboración propia, establecida con criterios litológicos y estructurales por no existir información hidráulica para ese sector.

5.3 DESCRIPCIÓN DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS (UHG)

En la Tabla 3 del numeral anterior, se evidencia que en el área existen cuatro unidades principales con capacidad acuífera de interés regional: el horizonte Tilatá y las capas arenosas del relleno cuaternario dentro de la cobertura, el horizonte Cacho dentro del complejo paleógeno, y las areniscas del Grupo Guadalupe en el piso de la cuenca. Todas las demás unidades se comportan como acuitardos o acuífugos, y su importancia radica en el control que ejercen sobre el confinamiento, la compartimentación y la protección de los acuíferos. Las posibilidades de extraerles agua dependen de porosidad secundaria únicamente, generada por fracturamiento o disolución.

5.3.1 COMPLEJO ACUÍFERO DE LOS DEPÓSITOS INCONSOLIDADOS NEÓGENO-CUATERNARIOS

Este complejo abarca la topografía plana de la cuenca y está constituido por sedimentos lacustres, aluviales, coluviales y fluvioglaciares que presentan cambios fuertes de composición litológica y facial en cortas distancias. Esta condición impide diferenciar horizontes continuos y uniformes, razón por la cual todos los depósitos se agrupan en un único complejo acuífero heterogéneo y multicapa, cuyo espesor en la parte central y más profunda supera los 500 m.

Horizonte acuífero Tilatá. Constituye la parte inferior del complejo y corresponde a depósitos fluviolacustres de gravas y arenas de diferente tamaño con arcillas, limos y materia orgánica. Aflora hasta alturas de 2.650 m s.n.m. en los bordes nororiental y noroccidental de la cuenca y se profundiza hacia su parte central, donde fue registrado a partir de los 468 m de profundidad con un espesor de 200 m (Van der Hammen, 1995). Por su génesis no forma un estrato continuo sino depósitos de canal, aislados por sedimentos

arcillosos o limosos, que guardan relación con las direcciones predominantes del flujo. Es la unidad de mejores características hidráulicas de la cobertura, con transmisividades entre 150 y 900 m²/día, conductividades hidráulicas mayores de 1 m/día y capacidades específicas entre 1 y 3 L/s/m (Bermúdez y Velandia, 2002). Los pozos que la captan en la cuenca del río Subachoque y en el norte de la cuenca artesiana, entre Briceño y Gachancipá, producen caudales de hasta 40 L/s o más.

Relleno principal de la cuenca. Suprayaciendo el horizonte Tilatá se dispone el relleno cuaternario correspondiente a las formaciones Subachoque y Sabana, que constituye el volumen dominante de la cobertura y ocupa la mayor extensión areal de la zona plana, con espesores superiores a 400 m en el sector más profundo. Su litología es predominantemente arcillosa de origen lacustre, con aumento de arenas y gravas hacia los bordes de la cuenca, lo que define una estructura lenticular. Desde el punto de vista hidrogeológico se trata de un conjunto de comportamiento dual: los niveles arcillosos restringen el flujo vertical y confinan parcialmente el sistema, mientras que las capas arenosas con lentes de grava fina constituyen el acuífero más aprovechado de la Sabana, a pesar de sus parámetros hidráulicos modestos, con transmisividades entre 3 y 60 m²/día, conductividades hidráulicas menores de 0,1 m/día, que en algunos casos alcanzan 0,5 m/día, y caudales de pozo entre 0,5 y 10 L/s (Bermúdez y Velandia, 2002).

Este mismo carácter arcilloso explica que la infiltración directa sobre la zona plana sea mínima, aspecto determinante en el balance hídrico de la cuenca.

Depósitos cuaternarios menores y unidades de piedemonte. Los depósitos aluviales activos, la Formación Chía, la Formación Río Siecha, los depósitos fluvioglaciares y los depósitos coluviales conforman acuíferos locales de extensión muy limitada y escasa importancia hidrogeológica regional, aunque pueden sostener aprovechamientos puntuales mediante aljibes. Las formaciones Balsillas, Mondoñedo y Marichuela se integran igualmente a este complejo por su posición estratigráfica y su carácter no consolidado. La Formación Marichuela, constituida por gravas con clastos hasta de tamaño bloque en matriz arenosa a conglomerática, presenta la mejor permeabilidad de este subconjunto, aunque su geometría de abanico y su fuerte disección limitan su continuidad. Las formaciones Balsillas y Mondoñedo, con predominio de arcillas, limos, cenizas volcánicas y paleosuelos, se comportan como acuitardos y favorecen la escorrentía sobre la infiltración en los sectores donde afloran.

Parámetros hidráulicos y distribución areal. En conjunto, la transmisividad del complejo varía desde 3 hasta 900 m²/día y la conductividad hidráulica desde 0,01 hasta más de 3 m/día. En la zona de almacenamiento los acuíferos son de tipo confinado a semiconfinado, con coeficientes de almacenamiento entre $1x10^{-3}$ y $1x10^{-7}$ (Bermúdez y Velandia, 2002).

La distribución de estos parámetros no es homogénea. Los depósitos de la parte occidental de la cuenca, limitada por la Falla de Madrid y correspondiente a las subcuencas de los ríos Bojacá y Subachoque, son notablemente menos permeables: las transmisividades no superan 10 m²/día, las conductividades hidráulicas son del orden de 0,01 m/día y las capacidades específicas son menores de 0,1 L/s/m, valores que califican estos acuíferos como pobres. Hacia el oriente se observa un incremento paulatino, alcanzando en el valle del río Bogotá transmisividades de hasta 100 m²/día, con valores comunes entre 30 y 60 m²/día, conductividades hidráulicas entre 0,1 y 0,5 m/día y capacidades específicas entre 0,2 y 0,6 L/s/m. El mismo comportamiento se presenta en la parte sur y suroriental de la

cuenca. En consecuencia, las mejores posibilidades de la cobertura se concentran a lo largo del borde oriental de la cuenca artesiana y en los canales de la Formación Tilatá.

Espesores. El espesor total del complejo responde directamente a la estructura de bloques. Se identifican zonas con más de 500 m en la parte central de la cuenca, sector Funza, y en sectores de los valles de los ríos Subachoque, Chicú y Teusacá. El máximo abatimiento se detectó entre los cerros de Cota y Tabio-Tenjo, a lo largo de la cuenca del río Chicú, con espesores superiores a 450 m, correspondientes a la profundidad máxima de exploración por geoeléctrica. El sector oriental presenta la menor oscilación, entre 100 y 200 m (Bermúdez y Velandia, 2002).

Relación con las unidades infrayacentes. El contacto con el Complejo Acuitardo del Paleógeno se restringe al sector oriental de la Sabana, limitado por la Falla El Dorado y al suroriente por la Falla San Cristóbal, además de las partes altas de las cuencas de los ríos Subachoque y Frío. En la parte occidental y suroccidental el complejo de depósitos inconsolidados suprayace directamente al Complejo Acuífero Guadalupe, situación de particular importancia porque implica el contacto hidráulico directo entre la cobertura y el piso de la cuenca. En la parte central se presentan altos paleotopográficos de rocas cretácicas, uno en dirección suroeste siguiendo la serranía de Tabio-Tenjo y otro transversal, uniendo el límite sur de los cerros de Cota con dicha serranía, sectores donde el Guadalupe se encuentra a menor profundidad bajo la cobertera.

5.3.2 COMPLEJO ACUITARDO DEL PALEÓGENO

Infrayaciendo el complejo de depósitos inconsolidados se dispone una secuencia de rocas predominantemente arcillosas que conforma el Complejo Acuitardo del Paleógeno, dentro del cual se distinguen unidades poco permeables y un horizonte acuífero de interés.

La Formación Regadera, pese a su composición predominantemente arenosa, no presenta interés hidrogeológico como acuífero debido a la abundante matriz arcillosa que rellena sus areniscas. Su papel hidrogeológico es el de unidad confinante que, por efecto del fracturamiento, puede contribuir a la relación hidráulica entre horizontes acuíferos. En el área de estudio sus afloramientos se restringen al oriente de la Sabana, en el sinclinal del Sisga, con expresión en Sesquilé.

La Formación Bogotá constituye el acuitardo regional más extenso del complejo, con espesores que pueden variar entre 400 y 750 m (Acosta et al., 1997). Algunos de sus niveles de areniscas, en particular los de los segmentos con areniscas de grano medio y estratificación cruzada, son productores de agua, aunque forman acuíferos limitados en área y profundidad. En el área de estudio conforma el núcleo de los sinclinales de Sisga, Sesquilé, Suesca-Teusacá y Río Frío, con expresión en Sesquilé, Sopó, Tocancipá, La Calera y Tabio.

La Formación Cacho constituye el horizonte acuífero de mayor interés dentro del complejo. Está formada por areniscas cuarzosas friables de grano medio a conglomerático, que conservan buena porosidad primaria y se encuentran adicionalmente fracturadas. Sus areniscas son de alta permeabilidad, con transmisividad promedio de 200 m²/día que alcanza 450 m²/día en algunos casos y conductividad hidráulica entre 0,3 y 3 m/día. El horizonte es de tipo confinado, al estar cubierto en la mayor parte del área por depósitos arcillosos, y la producción de los pozos varía entre 0,5 y 20 L/s (INGEOMINAS, 1995). Dentro del área de estudio aflora en los sinclinales de Sisga, Sesquilé y Teusacá y en el

anticlinal de Guatavita, con expresión en Sesquilé, Sopó, Tocancipá, Gachancipá y La Calera. Su explotación exige especial cuidado, dado que su recarga depende de las estrechas franjas de afloramiento en el borde oriental de la cuenca.

La Formación Guaduas representa la base del complejo y se comporta como acuitardo. Está constituida predominantemente por arcillolitas y limolitas intercaladas con estratos de areniscas y mantos de carbón, en la cual las areniscas tienen un papel secundario por su espesor limitado y su discontinuidad lateral. Su espesor es variable, del orden de 300 m en la parte nororiental de la cuenca y hasta 600 a 1.000 m en otros sectores (Acosta et al., 1997). En el área de estudio conforma el núcleo de los sinclinales El Dintel y El Hato en Facatativá y los flancos de los sinclinales de Sesquilé y Suesca-Teusacá, y se encuentra en contacto tectónico con unidades del Grupo Guadalupe a través de las fallas El Porvenir, El Chital, Subachoque y Guatavita. Estos contactos por cabalgamiento, que superponen rocas permeables sobre rocas impermeables, constituyen elementos de compartimentación hidráulica de primer orden.

Regionalmente, el techo del complejo corresponde a la Formación Usme, horizonte poco permeable con espesor entre 150 y 300 m, cuyos afloramientos se restringen al sinclinal de Usme-Tunjuelito, por fuera del área de estudio.

Debido al cambio en las condiciones de depositación, la heterogeneidad de facies y los accidentes tectónicos, las unidades de este complejo no tienen continuidad lateral ni vertical. Estudios geofísicos con profundidades de exploración de 500 a 600 m y perforaciones de pozos permitieron establecer que el complejo está limitado por fallas que restringen su extensión areal a los bordes oriental y noroccidental de la cuenca artesiana, y que está ausente en la parte central y occidental. Únicamente las formaciones Guaduas y Bogotá presentan extensión regional. En términos generales, los niveles de areniscas de las formaciones Bogotá y Guaduas presentan transmisividades inferiores a 5 m²/día y capacidades específicas menores de 0,05 L/s/m, y los caudales de los pozos que los captan pocas veces superan 1 L/s (INGEOMINAS, 1995).

5.3.3 COMPLEJO ACUÍFERO GUADALUPE

Este complejo está integrado por las formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna, y constituye la unidad hidrogeológica de mayor importancia regional. Está compuesto principalmente por areniscas cuarzosas que alternan con liditas, limolitas y arcillolitas, con un espesor máximo reportado de 950 m en el conjunto de la Sabana.

Los niveles productores corresponden a las areniscas de las partes inferior y superior del complejo. Las areniscas de la parte inferior, correspondientes a la Formación Arenisca Dura, son finas y compactas, por lo cual su porosidad primaria es reducida. Las de la parte superior, correspondientes a la Arenisca de Labor y sobre todo a la Arenisca Tierna, presentan granulometría variada de arenas hasta gravas finas y textura friable, lo que les confiere mejores condiciones de almacenamiento. La Formación Plaeners, intermedia entre ambas, está constituida por liditas, arcillolitas y limolitas silíceas; sus liditas fracturadas le dan un comportamiento de acuífero confinado de productividad media, con caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s, menor que el de las dos unidades arenosas entre las que se encuentra.

El elemento determinante del comportamiento de este complejo es el fracturamiento. Todos los estratos se encuentran afectados en alto grado por fracturas de diferente orden que

aumentan la capacidad de almacenamiento por porosidad secundaria, incrementan la permeabilidad y facilitan la relación hidráulica entre las areniscas superiores e inferiores, integrando el conjunto en un único complejo acuífero regional. Por esta razón, la separación que impone la Formación Plaeners es efectiva a escala de capa pero no a escala regional.

Los parámetros hidráulicos reflejan esta heterogeneidad y anisotropía: transmisividades entre 5 y 600 m²/día, conductividades hidráulicas entre 0,02 y 2,0 m/día, capacidades específicas entre 0,05 y 5,5 L/s/m y coeficientes de almacenamiento más comunes entre $1x10^{-4}$ y $1x10^{-7}$, valores propios de un acuífero confinado (Bermúdez y Velandia, 2002). La conductividad hidráulica depende en alto grado de la densidad del fracturamiento, y se considera que con la profundidad las aperturas de las fracturas tienden a disminuir, lo cual reduce la permeabilidad.

El rendimiento individual de los pozos es en promedio de 20 a 25 L/s, con casos de caudales bajos inferiores a 2 L/s atribuibles a la disminución local de la densidad de fracturamiento, y con pozos en la zona de Madrid que producen entre 70 y 80 L/s. Los pozos productivos se ubican en zonas cercanas a los afloramientos, donde el espesor de los depósitos suprayacentes es inferior a 150 m, y sobre la franja del paleorrelieve alto de dirección noreste. Su localización está asociada en la mayoría de los casos a fallas y lineamientos, observándose un aumento de la conductividad hidráulica y de la capacidad específica en estas zonas y, de manera particular, en las intersecciones de fallas. Este criterio constituye la principal guía de exploración para el complejo.

Dentro del área de estudio el complejo aflora en la serranía de Tabio-Tenjo, en el núcleo y flancos del Anticlinal de Tabio segmentado por las fallas de El Chital y Subachoque; en la serranía de Chía-Cota, donde la Falla El Porvenir cabalga rocas del Grupo Guadalupe sobre unidades más recientes en Cota y Tabio; en el Anticlinal de Sopó-Sesquilé, con núcleo de Arenisca Dura y flancos de Plaeners y Labor y Tierna en Tocancipá, Gachancipá y Sesquilé; en el Anticlinal de Bogotá, expresado de forma segmentada en La Calera, Chía y Sopó; en el Anticlinal Alto del Vino en Facatativá; y en el sector de Bojacá, donde la Falla de Santa Bárbara afecta las formaciones Arenisca Dura y Plaeners. Estos mismos sectores constituyen las zonas de recarga exterior del sistema.

5.3.4 UNIDAD CONFINANTE DE LA FORMACIÓN CHIPAQUE

La Formación Chipaque, redefinida por Renzoni (1968), constituida por lutitas grises oscuras a negras, carbonáceas, piritosas y laminadas, con intercalaciones de calizas arenáceas y areniscas cuarzosas de grano muy fino depositadas en un ambiente marino somero de aguas tranquilas con circulación restringida (Caro et al., 1996), carece de importancia hidrogeológica en el área debido a su carácter poco permeable. Su caracterización precisa se dificulta porque se encuentra a grandes profundidades, posiblemente superiores a 1 o 2 km, y aflora únicamente en la parte central de algunos anticlinales. En el modelo hidrogeológico se considera unidad confinante que hace parte del piso de la cuenca artesiana y que impide la continuidad del flujo hacia unidades más profundas. Al norte del área se conocen ejemplos de aprovechamiento puntual de esta unidad, asociados a sus intercalaciones arenosas.

5.3.5 UNIDADES DEL GRUPO VILLETA EN EL SECTOR DE ANAPOIMA Y LA MESA

El sector de Anapoima y La Mesa se localiza por fuera de la cuenca artesiana y presenta un esquema hidrogeológico completamente distinto, gobernado por una sucesión de más de 3.000 m de rocas de grano fino con muy baja permeabilidad primaria, afectada por un sistema tectónico complejo de pliegues de dirección norte-sur y fallas de dirección noroeste a este-oeste, entre las que se cuentan los sistemas de Quininí, Matarredonda y Anapoima y las fallas del Río Bogotá, Bituima y Zaragoza (Acosta y Ulloa, 2001; INGEOMINAS, Plancha 227 La Mesa).

El comportamiento hidrogeológico de este sector puede sintetizarse así:

- Las formaciones Capotes y el Miembro El Tigre de la Formación Trincheras, constituidas por lodolitas calcáreas y arcillolitas laminadas ricas en materia orgánica, con cristales de yeso y niveles de chert, constituyen unidades acuífugas y actúan como los sellos regionales del sector.
- Las formaciones Simijaca, Pacho y La Frontera, con sucesiones monótonas de arcillolitas, lodolitas y limolitas, se comportan como acuitardos. La Formación Simijaca, con 800 m de espesor, representa la barrera hidráulica de mayor entidad del conjunto.
- La Formación Conejo, aunque dominada por arcillolitas y lodolitas, incorpora hacia el techo limolitas silicificadas y cuarzoarenitas de grano fino a medio que pueden albergar acuíferos locales cuando se encuentran fracturadas.
- La Formación Hiló presenta la particularidad de contener niveles de dolomita con alta porosidad intercristalina, además de calizas biomicríticas lenticulares y brechas de deslizamiento sinsedimentario. Estos rasgos permiten el desarrollo de acuíferos locales por disolución y fracturamiento, de extensión reducida pero de interés para abastecimientos puntuales.
- Las cuarzoarenitas de la Formación Socotá y las areniscas cuarzosas del Miembro Anapoima de la Formación Trincheras constituyen los mejores niveles almacenadores del sector. Su cemento calcáreo reduce la porosidad primaria, por lo cual su capacidad depende esencialmente del fracturamiento y de su posición respecto de las estructuras. La repetición tectónica de la Formación Socotá por el sistema imbricado de Matarredonda incrementa localmente su espesor aparente y, con ello, su interés hidrogeológico.
- Los depósitos aluviales de los cauces activos y los depósitos fluvioglaciares reconocidos en el sector conforman los únicos acuíferos libres de porosidad primaria, de extensión limitada a las llanuras de inundación y a los abanicos, y son los de aprovechamiento más inmediato.

En este sector la exploración de aguas subterráneas debe orientarse a las zonas de intersección de fallas y a las charnelas de los anticlinales de Anapoima y Yeguas, donde el fracturamiento por flexión es máximo y donde afloran los niveles arenosos y dolomíticos señalados. Dado que no se dispone de pruebas de bombeo para este sector, las productividades indicadas corresponden a una valoración cualitativa derivada de la litología y del marco estructural.

5.4 CONTROL ESTRUCTURAL Y SU INFLUENCIA SOBRE LA HIDROGEOLOGÍA

Las fallas longitudinales, caracterizadas como fallas inversas y de cabalgamiento con vergencia al sureste y al noroeste, pueden actuar como barreras o sellos, aislando las zonas de recarga. Las fallas transversales, en cambio, se consideran generalmente de carácter distensivo, lo que las convierte en conductoras eficientes y propicias para la recarga de acuíferos, especialmente en zonas de intenso fracturamiento (Gómez, 1985, 1991; Reyes, 1993). El caso de los Cerros Orientales ilustra ambos comportamientos: la Falla de Bogotá, longitudinal, actuaría como barrera para la recarga de los acuíferos de los depósitos inconsolidados, mientras que la recarga se produciría a lo largo de las fallas transversales que afectan los cerros.

Aplicado al área de estudio, este esquema permite establecer las siguientes relaciones:

- La interacción de los movimientos de las fallas hacia el sureste y el noroeste conformó las alturas y depresiones topográficas longitudinales de la Sabana y propició el máximo abatimiento entre los cerros de Cota y Tabio-Tenjo, a lo largo de la cuenca del río Chicú, con espesores superiores a 450 m. Las cuencas de los ríos Subachoque, Frío, Bogotá y Teusacá corresponden igualmente a depresiones tectónicas, con rellenos de menor profundidad.
- Las fallas que delimitan longitudinalmente la serranía de Tabio-Tenjo continúan hacia el sur bajo la cobertera, como las fallas de Madrid y Mosquera, conformando cuñas donde las unidades del Cretácico y del Paleógeno se detectan a diferentes profundidades. Entre las fallas de Mosquera y El Porvenir se mantiene el comportamiento de la cuenca del río Chicú, lo que explica los máximos espesores de inconsolidados encontrados bajo Funza.
- Las fallas El Porvenir, con expresión en Cota y Tabio, y El Chital segmentan el bloque de la serranía de Tabio-Tenjo y controlan el angostamiento del Sinclinal de Río Frío, condicionando la geometría del relleno en ese sector.
- La denominada Falla Facatativá constituye el límite transversal entre dominios de espesor contrastante de depósitos inconsolidados, del orden de 300 m al sur y superiores a 500 m al norte.
- La Falla de Subachoque, con expresión en Madrid, pone en contacto rocas cretácicas y paleógenas sobre la Formación Guaduas y se prolonga bajo los depósitos cuaternarios hacia el centro de la Sabana.
- La Falla de Suralá, la más oriental de la Sabana entre el Sisga y La Calera, pone en contacto las formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Guaduas y presenta manifestaciones termales que evidencian circulación profunda.

El esquema tectónico orienta directamente la exploración de aguas subterráneas, en la medida en que permite diferenciar bloques donde es probable encontrar el Complejo Acuífero Guadalupe o el horizonte acuífero Cacho bajo los inconsolidados, frente a bloques donde subyacen las arcillolitas y limolitas de las formaciones Guaduas y Bogotá. Los altos paleotopográficos de rocas cretácicas identificados en la parte central de la cuenca corresponden a los sectores donde el Guadalupe se encuentra a menor profundidad y donde, en consecuencia, resulta más viable su captación.

5.5 VISIÓN REGIONAL DEL INVENTARIO DE CAPTACIONES DE AGUA SUBTERRÁNEA Y MONITOREO DE NIVELES

El agua subterránea constituye uno de los recursos hídricos más estratégicos para el desarrollo socioeconómico, agroindustrial y ambiental de la Sabana de Bogotá. Debido al crecimiento demográfico, la expansión urbana y la intensa actividad agrícola, particularmente los sectores floricultor y agropecuario, la presión sobre los acuíferos de la cuenca alta del río Bogotá se ha incrementado significativamente en las últimas décadas.

El inventario de captaciones representa el pilar fundamental para cuantificar el volumen de extracción, diagnosticar el estado del recurso y construir el modelo numérico y de gestión hidrogeológica de la región. El objetivo principal de este apartado es identificar y caracterizar las obras de captación existentes (pozos profundos, aljibes y manantiales) registradas ante las autoridades ambientales competentes (CAR y Secretaría Distrital de Ambiente, SDA).

5.5.1 ANTECEDENTES E INVENTARIOS HISTÓRICOS

El inventario de captaciones de agua subterránea en la Sabana de Bogotá ha sido objeto de diversos censos a lo largo de las últimas décadas, reflejando la evolución de la infraestructura de extracción y los retos de formalización ambiental:

- Estudio INGEOMINAS y CAR (1985): En la zona centro-occidental de la Sabana se inventariaron 2.007 puntos de agua (1.508 pozos profundos, 379 aljibes y 120 manantiales).
- Estudio INGEOMINAS y CAR (1987): En el sector sur de Bogotá (municipios de Bosa, Soacha y Sibaté, por fuera de los 16 municipios objeto de este estudio), se identificaron 1.200 puntos de agua.
- Estudio JICA, CAR y DAMA (1994): Corresponde a uno de los censos más exhaustivos realizados en la región, consolidando un inventario total de 7.081 pozos profundos.
- Estudios hidrogeológicos EPC-CAR (2026) convenio CAR-CONV-INT-3121-2024: Corresponden a unos estudios locales enfocados principalmente a estudios geofísicos, pero incluyen también geología, inventarios de captaciones en las áreas exploradas, así como datos hidrogeológicos adicionales en algunos casos. Esta información se tratará en los numerales correspondientes a los municipios en donde se realizaron.

5.5.2 MARCO REGULATORIO ACTUAL Y ESTIMACIÓN TÉCNICA

En el ámbito regulatorio actual, la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) reporta un listado de 1.545 pozos concesionados. No obstante, las cifras del registro ambiental consolidado alcanzan 2.480 pozos, reconociéndose oficialmente que el número real de puntos de extracción en operación supera esta cantidad debido a captaciones no formalizadas o inactivas.

Dada la variabilidad entre los censos históricos, las bases de datos regulatorias y los registros georreferenciados, se establece una cifra de aproximadamente 5.000 pozos como promedio operativo para los análisis hidrogeológicos regionales. Este valor técnico permite conciliar las discrepancias entre:

1. Los 2.480 pozos registrados formalmente ante la CAR.
2. Los 5.160 pozos que cuentan con ubicación espacial o antecedente en el registro ambiental.
3. Los 7.081 pozos contabilizados en el censo global de JICA (1994).

Uno de los mayores retos para consolidar una red de monitoreo eficiente es que de un universo estimado de 5.000 a 7.000 pozos en operación en la Sabana de Bogotá pues solo cerca de 1.545 pozos cuentan con concesión de aguas vigente, lo que deja un alto porcentaje de extracciones por fuera del control piezométrico oficial.

5.5.3 Distribución Hidroestratigráfica y Territorial de las Captaciones

A partir de la correlación de pozos con información hidrogeológica detallada, la extracción por unidad acuífera se distribuye de la siguiente manera:

- Depósitos Cuaternarios (Acuífero Somero / Formaciones Sabana y Tilatá): Concentran cerca del 93% de las perforaciones y representan el 78% del volumen total extraído. Son captaciones de profundidad somera a intermedia (< 150 m), de fácil perforación, pero expuestas a mayor riesgo de contaminación antrópica y sobreexplotación.
- Formaciones del Cretácico (Acuífero Profundo / Grupo Guadalupe): Albergan el $3{,}7\%$ de los pozos, pero aportan cerca del 19% del volumen total captado gracias a sus elevados caudales específicos y presiones artesianas. Superan los 200 a 500 m de profundidad y constituyen la principal reserva hídrica estratégica regional.
- Formaciones del Terciario (Formaciones Cacho y Guaduas): Corresponden al $2{,}2\%$ de los pozos y representan el 3% de la extracción total, funcionando mayoritariamente como unidades semiconfinantes o de aporte local.

La densidad de perforaciones presenta tres núcleos de alta concentración hidrogeológica:

1. Subcuenca del Río Chicú (Tabio, Tenjo, Cota): Alta densidad de pozos profundos destinados prioritariamente a la floricultura de exportación.
2. Subcuenca del Río Subachoque (Subachoque, Madrid): Presión intensiva sobre los acuíferos cuaternario y cretácico superficial para riego agrícola y agroindustria.
3. Borde Centro-Occidental y Sur de Bogotá D.C. (Engativá, Fontibón, Bosa, Soacha): Concentración de captaciones industriales y de uso doméstico o comercial sustitutivo.

5.5.4 Concesiones y Caudales Otorgados en los Municipios del Proyecto

A continuación, se presentan las estructuras tabulares que sintetizan la distribución territorial y sectorial del aprovechamiento de aguas subterráneas en los municipios de interés:

Tabla 4. Concesiones de agua subterránea otorgadas por uso y municipio.

Municipio	Uso Agropecuario	Uso Doméstico	Uso Industrial	Uso Recreativo	Total Concesiones
Anapoima	4	5	0	1	**10**
Bojacá	12	3	0	0	**15**
Cajicá	57	3	18	2	**80**
Chía	64	3	3	0	**70**
Cota	60	27	13	0	**100**

Municipio	Uso Agropecuario	Uso Doméstico	Uso Industrial	Uso Recreativo	Total Concesiones
Facatativá	62	19	7	0	**88**
Funza	47	8	4	0	**59**
Gachancipá	51	5	4	0	**60**
La Calera	5	5	1	0	**11**
La Mesa	0	0	1	0	**1**
Madrid	80	18	4	0	**102**
Mosquera	9	6	8	0	**23**
Sesquilé	12	1	3	0	**16**
Sopó	36	9	16	0	**61**
Tabio	22	2	1	0	**25**
Tocancipá	55	9	21	0	**85**

Nota. Elaborada a partir de los inventarios oficiales de la CAR suministrados por EPC.

Tabla 5. Promedio de caudales concedidos por tipo de uso y municipio.

Municipio	Caudal Promedio (L/s) Uso Agropecuario	Caudal Promedio (L/s) Uso Doméstico	Caudal Promedio (L/s) Uso Industrial	Caudal Promedio (L/s) Uso Recreativo
Anapoima	0,30	0,45	0,00	0,25
Bojacá	2,66	7,60	0,00	0,00
Cajicá	0,42	2,14	1,89	0,055
Chía	1,21	1,28	0,09	0,00
Cota	0,63	3,11	4,38	0,00
Facatativá	1,06	7,61	5,05	0,00
Funza	2,70	13,99	4,50	0,00
Gachancipá	1,01	4,00	9,41	0,00
La Calera	1,29	1,54	3,23	0,00
La Mesa	0,00	0,00	0,04	0,00
Madrid	2,54	12,42	1,58	0,00
Mosquera	2,72	12,94	2,38	0,00
Sesquilé	1,95	0,02	67,27	0,00
Sopó	1,49	1,42	5,47	0,00
Tabio	0,49	0,02	1,26	0,00
Tocancipá	1,69	6,02	3,20	0,00

Nota. Elaborada a partir de inventarios de la CAR suministrados por EPC.

Tabla 6. Caudales totales concedidos por tipo de uso, municipio y régimen de bombeo.

Municipio	Caudal Total (L/s) Uso Agropecuario	Caudal Total (L/s) Uso Doméstico	Caudal Total (L/s) Uso Industrial	Caudal Total (L/s) Uso Recreativo	Caudal Total Concedido (L/s)
Anapoima	1,200	2,260	0,000	0,250	**3,710**
Bojacá	32,000	22,800	0,000	0,000	**54,800**
Cajicá	23,916	6,420	34,030	0,011	**64,377**

Municipio	Caudal Total (L/s) Uso Agropecuario	Caudal Total (L/s) Uso Doméstico	Caudal Total (L/s) Uso Industrial	Caudal Total (L/s) Uso Recreativo	Caudal Total Concedido (L/s)
Chía	77,510	3,840	0,270	0,000	**81,620**
Cota	37,886	83,942	57,013	0,000	**178,841**
Facatativá	65,994	144,560	35,380	0,000	**245,934**
Funza	127,120	111,910	18,010	0,000	**257,040**
Gachancipá	51,880	20,040	37,660	0,000	**109,580**
La Calera	6,467	7,716	3,230	0,000	**17,413**
La Mesa	0,000	0,000	0,040	0,000	**0,040**
Madrid	203,310	223,610	6,328	0,000	**433,248**
Mosquera	24,524	77,680	19,075	0,000	**121,279**
Sesquilé	23,460	0,020	201,820	0,000	**225,300**
Sopó	53,980	12,741	87,554	0,000	**154,275**
Tabio	10,860	0,040	1,260	0,000	**12,160**
Tocancipá	93,120	54,212	137,670	0,000	**285,002**

Nota. Elaborada a partir de los inventarios de la CAR suministrados por EPC.

5.5.5 MONITOREO DEL RECURSO EN EL PERÍMETRO URBANO (DISTRITO CAPITAL - SDA)

Complementariamente, al evaluar el comportamiento del agua subterránea en Bogotá D.C. (entidad territorial que comparte las mismas Unidades Hidrogeológicas con la Sabana), el informe ambiental de la Secretaría Distrital de Ambiente (SDA, diciembre de 2024 y actualización 2025) señala lo siguiente:

"Los pozos captan de las Unidades Hidrogeológicas Acuífero Formación Sabana, Acuífero Formación Tilatá, Acuitardo Formación Usme, Acuitardo Formación Bogotá, Acuitardo Formación Subachoque, Acuífero Formación Regadera y Acuífero Formación Labor y Tierna del Grupo Guadalupe. La Red de Monitoreo de Aguas Subterráneas (RMAS) cuenta con 27 pozos, de los cuales 11 captan de los paquetes arenosos de la Formación Sabana, 4 de la Formación Labor y Tierna, 3 de Labor y Tierna y Plaeners, 1 de Usme y Regadera, 3 de la Formación Tilatá, 1 de Sabana y Labor y Tierna, 1 de Subachoque y Tilatá y 3 de las formaciones Sabana y Tilatá."

El reporte enfatiza las limitaciones operativas de la red de monitoreo:

- Estado en 2024: De los 27 dispositivos instalados en 2020, solo 17 transmitían información en tiempo real. Siete pozos presentaban baterías descargadas, dos mostraban fallas de conexión y uno no permitía la descarga de datos por abandono del predio.
- Estado en 2025: La operatividad descendió a 14 pozos con transmisión activa, incrementándose a 11 los equipos con baterías descargadas.

Esta situación evidencia que, incluso dentro del perímetro urbano de la capital, el monitoreo continuo de niveles piezométricos y calidad del agua subterránea presenta deficiencias logísticas y de mantenimiento, constituyendo una debilidad para la gestión integral del recurso a escala regional.

5.5.6 RED PIEZOMÉTRICA DE LA CAR CUNDINAMARCA

Históricamente la CAR ha contado con una red de monitoreo directo de niveles bastante limitada (alrededor de 15 pozos piezométricos activos distribuidos en puntos estratégicos de la cuenca alta del río Bogotá) y la CAR inició un proyecto de expansión para incorporar 29 nuevos pozos piezométricos, con el fin de robustecer el seguimiento continuo del nivel estático/dinámico, la transmisividad y la recarga de los acuíferos en la Sabana de Bogotá.

Bajo el marco del Decreto 0545 de mayo de 2026, la CAR activó una auditoría y plan de evaluación de acuíferos para blindar las zonas de recarga del Grupo Guadalupe y de los depósitos inconsolidados como medida estratégica frente a temporadas secas prolongadas.

5.5.7 ACUEDUCTOS MUNICIPALES Y MONITOREO

En los acueductos municipales (ej. Facatativá, Funza, Madrid, Tocancipá, Cota, Sopó) el monitoreo de niveles no responde a una red integrada o de datos abiertos, sino al seguimiento individual que cada empresa prestadora o usuario privado realiza sobre sus pozos concesionados, principalmente mediante lecturas de nivel estático y dinámico durante las rutinas de bombeo para el reporte de cumplimiento ambiental ante la CAR o cuando hay visitas de dicha entidad.

6 COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y BALANCE HÍDRICO

El comportamiento hidrodinámico de la Sabana de Bogotá y los sectores aledaños responde al gradiente hidráulico regional impuesto por la diferencia topográfica, superior a 1.000 m, entre los bordes montañosos y el plano de la cuenca, configurando un sistema de circulación subterránea de carácter artesiano. El flujo se desplaza desde las zonas de recarga perimetrales y de piedemonte hacia las zonas de almacenamiento en el relleno inconsolidado neógeno-cuaternario y el piso cretácico, para finalmente converger hacia los ejes de drenaje principal (río Bogotá y sus afluentes) y las zonas de descarga piezométrica.

6.1 COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y SISTEMAS DE FLUJO

Las diferencias topográficas entre la zona plana y las áreas montañosas generan, dentro del Complejo Acuífero Guadalupe, sistemas de agua subterránea bajo alta presión piezométrica. Estas presiones favorecen la alimentación adicional de los horizontes acuíferos del Paleógeno y de los niveles inferiores del complejo Neógeno-Cuaternario mediante ventanas hidrogeológicas tectónicas asociadas a fallas y zonas de fracturamiento.

La presencia de fuentes termominerales vinculadas a estructuras como la Falla de |Suralá constituye evidencia de flujos ascendentes profundos. En la cobertura de la cuenca se distinguen dos sistemas de flujo vertical:

- **Flujo descendente:** Se desarrolla en los bordes de la cuenca y zonas de piedemonte, impulsado por la infiltración directa de lluvia y escorrentía.
- **Flujo ascendente:** Se origina en las cuarzoarenitas profundas del Grupo Guadalupe y migra hacia la cobertura inconsolidada.

La modelación hidrodinámica regional (Bermúdez, 2000) indica que la recarga procedente de las cadenas montañosas aporta cerca del 30% de las entradas del balance, mientras que la alimentación ascendente desde el Grupo Guadalupe contribuye aproximadamente con el 10%. Aunque en la década de 1940 existía un régimen artesiano surgente en los pozos del centro de la cuenca (Diezemann, 1949), la intensificación del bombeo ha revertido este comportamiento en diversos sectores.

6.2 ZONAS DE RECARGA REGIONAL Y SECTORES PRIORITARIOS

La alimentación de los sistemas acuíferos se produce a través de dos esquemas hidrogeológicos diferenciados: recarga exterior (rocas consolidadas del piso) e interior/piedemonte (cobertura inconsolidada):

6.2.1 ZONAS DE RECARGA EXTERIOR (ACUÍFERO PROFUNDO / GRUPO GUADALUPE)

Las cadenas montañosas donde afloran las rocas del Complejo Acuífero Guadalupe (Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd)) constituyen la zona de recarga exterior, con una extensión aproximada de 1.000 km^2. En ella, la recarga ocurre por infiltración directa de las precipitaciones, por aporte de las corrientes superficiales y por condensación de vapor de agua en las fisuras de las rocas (Klimochkin, 1974; Trombe, 1988). La alta densidad de diaclasamiento y el fallamiento distensivo transversal (NW-SE) permiten la infiltración profunda en los siguientes sectores:

- Serranía de Tabio-Tenjo: Afloramientos del Anticlinal de Tabio. Constituye una de las estructuras de recarga más estratégicas, regulada por el control tectónico de las fallas El Chital y Subachoque.
- Serranía de Chía-Cota: Bloque afectado por la Falla El Porvenir, donde las unidades del Guadalupe alimentan tanto los niveles profundos como, por contacto hidráulico directo, el relleno inconsolidado de la cuenca del río Chicú.
- Borde Oriental y Anticlinal de Bogotá: Franja continua de afloramientos en La Calera, Sopó, Tocancipá y Sesquilé, así como en los Cerros Orientales del Distrito Capital.
- Anticlinales de Sopó-Sesquilé y Alto del Vino (Facatativá–Bojacá): Estructuras antiformales con núcleos de Arenisca Dura (Ksgd) que actúan como focos de infiltración hacia los bordes nororiental y occidental.

1.2.2 Zonas de Recarga Interior y Piedemontes (Acuífero Somero / Neógeno-Cuaternario)

Se localizan dentro de los límites de la cobertura inconsolidada de la cuenca artesiana. Las condiciones más favorables para la infiltración se presentan en las franjas de abanico aluvial y coberturas detríticas bordeantes (~ 500 km^2), donde afloran los depósitos más permeables del Complejo Neógeno-Cuaternario y los horizontes acuíferos del Paleógeno:

- Abanicos de Piedemonte y Depósitos Fluvioglaciares (Qfg, Qco): Franjas de alta permeabilidad ubicadas al pie de las serranías de Tabio, Tenjo, Cota, Subachoque y Cogua, que actúan como zonas de recarga preferencial e infiltración rápida hacia el plano de la Sabana.
- Valle del Río Subachoque y Canales de la Formación Tilatá (NgQt): Sectores donde la masa arcillosa pierde espesor o presenta mayor proporción de lentes arenosos y conglomeráticos (Subachoque, Madrid, Briceño y Gachancipá), favoreciendo la recarga por goteo o *leakage*.

La mayor parte de la superficie plana (~ 1.000 km^2) está cubierta por los niveles arcillosos de la Formación Sabana (Q1sa), los cuales restringen la infiltración directa a valores mínimos estimados históricamente en 23.400 m^3/año (INGEOMINAS, 1995). Una segunda fuente de recarga interior es la infiltración desde corrientes superficiales por encima de la cota 2.600 m s.n.m., dado que en la parte plana los cauces son poco profundos (5 a 8 m) y se encuentran desconectados hidráulicamente de los horizontes acuíferos principales. Los embalses (62 km^2) aportan volúmenes mínimos al sistema por estar asentados sobre sedimentos paleógenos de baja permeabilidad (Bermúdez y Velandia, 2002).

6.2.2 Áreas de Priorización y "Zona Crítica" Ambiental

En concordancia con los marcos de regulación ambiental de la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) (Acuerdos CAR 31 de 2005, 04 y 29 de 2006, y articulación con el Decreto 0545 de 2026), la recarga se encuentra fuertemente presionada en tres sectores prioritarios clasificados como Zona Crítica:

- Subcuenca del Río Chicú (Tabio, Tenjo, Cota): Sector de máxima demanda piezométrica por la alta densidad de pozos florícolas e industriales.
- Subcuenca del Río Subachoque (Subachoque, Madrid): Zona de alta tasa de extracción e interacción hidráulica directa entre acuíferos cuaternarios y cretácicos.

- Sector Funza–Mosquera–Bojacá: Zona de gran espesor de relleno donde la recarga directa se halla restringida por el predominio arcilloso de la Formación Sabana, incrementando su vulnerabilidad al abatimiento de niveles.

6.3 MODELACIÓN DE RECARGA Y BALANCE HÍDRICO SUBTERRÁNEO

6.3.1 EVOLUCIÓN DE LAS METODOLOGÍAS DE EVALUACIÓN DE RECARGA

La evaluación de la recarga hídrica en la Sabana de Bogotá ha sido abordada mediante diversos estudios institucionales que reflejan la evolución del modelo conceptual regional:

- Evaluación Inicial (Molano y Ulloa, 1987): Desarrollado por INGEOMINAS (Informe 2738), fundamentó su análisis en el balance hídrico superficial e identificó elevadas tasas de recarga en los sectores de Subachoque y Bojacá.
- Consolidación Conceptual (CAR y SGC, 2002 a 2005): Refinó la geometría de las unidades hidrogeológicas, confirmando los flancos occidental y suroccidental como las principales zonas de recarga.
- Integración de Presión Antrópica (CAR y JICA, 2002 a 2010): Articuló la oferta de recarga con la demanda de explotación, identificando focos de sobreexplotación local.
- Modelación Numérica (SGC y CAR, 2010 a 2020): Implementó modelos numéricos de flujo con mayor resolución espacial, evaluando el impacto de la expansión urbana y el cambio en la cobertura del suelo sobre la percolación efectiva.

6.3.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL BALANCE EN LA ZONA NO SATURADA (ZNS)

El proceso de percolación profunda ocurre únicamente cuando la lámina de agua infiltrada satisface el déficit de humedad del suelo, alcanzando el umbral de capacidad de campo, y cubre la demanda evapotranspirativa de la vegetación. La recarga potencial (R_p) se calcula como:

$$R_p = P_i - ETR - \Delta HS$$

Donde:

- R_p: Recarga potencial de agua subterránea (mm/mes).
- Pi: Precipitación efectiva que infiltra en la superficie (mm/mes).
- ETR: Evapotranspiración real del sistema suelo-planta (mm/mes).
- ΔHS: Variación en la reserva de humedad del suelo (mm).

La determinación de la Evapotranspiración Potencial (ETP) y Real (ETR) constituye la principal fuente de incertidumbre del balance, debido a la dispersión entre métodos empíricos (Penman-Monteith, Hargreaves, Thornthwaite) y la limitación de registros meteorológicos completos (radiación, viento, humedad) en las estaciones del IDEAM/CAR.

6.3.3 ESTIMACIÓN DE RECARGA POTENCIAL POR UNIDAD GEOLÓGICA

En la Tabla 7 se presentan los resultados modelados de la recarga potencial desagregada por unidad geológica presente en el área de interés hidrogeológico de la Sabana de Bogotá.

Tabla 7. Estimación de la recarga potencial por unidad geológica en la zona de estudio.

Código Cartográfico	Unidad Geológica / Formación Homologada	Recarga Potencial (m3/año)	Porcentaje del Total (%)
Kscn	Formación Conejo	808.241,65	5,98%
Q1si	Formación Río Siecha	183.842,78	1,36%
Ksglt	Formación Labor y Tierna (Grupo Guadalupe)	2.456.542,63	18,16%
Qco	Depósitos Coluviales de Ladera	369.012,99	2,73%
Q2ch	Formación Chía	2.222.062,85	16,43%
NgQt	Formación Tilatá	593.035,30	4,38%
Ksgpl	Formación Plaeners (Grupo Guadalupe)	740.286,57	5,47%
Pgc	Formación Cacho	389.211,99	2,88%
Ksgd	Formación Arenisca Dura (Grupo Guadalupe)	1.167.412,46	8,63%
KPgg	Formación Guaduas	829.157,04	6,13%
Pgb	Formación Bogotá	524.186,09	3,88%
Pgr	Formación Regadera	360.037,66	2,66%
Q1sa	Formación Sabana	2.612.931,40	19,32%
N1m	Formación Marichuela	35.206,50	0,26%
Ksch	Formación Chipaque	140.052,05	1,04%
Q1tu	Depósitos de Turba / Lacustres	13.042,62	0,10%
Ksf	Formación La Frontera	9.510,20	0,07%
Q1su	Formación Subachoque	70.037,56	0,52%

Nota. Elaboración propia a partir del procesamiento de balances hídricos de suelo ajustados por unidad geológica.

6.3.4 BALANCE HÍDRICO CUANTITATIVO Y OFERTA EXPLOTABLE POR SUBCUENCA

Para la gestión sustentable y la prevención de la minería del agua, la Oferta Explotable Sustentable (O_{exp}) se fijó como un máximo del 40% al 50% de la recarga natural total, reservando el porcentaje restante para el sostenimiento del flujo base de los ríos (caudal ecológico) y la prevención de procesos de subsidencia por desecación de arcillas.

El análisis de la presión por extracción frente a la oferta explotable se resume mediante el Índice de Extracción de Agua Subterránea ($IEAS = \frac{Q_{ext}}{R_{nat}} \times 100$):

Tabla 8. Balance hídrico subterráneo y disponibilidad por subcuencas/sectores.

Subcuenca / Sector	Área (km2)	Recarga Natural Rnat (L/s)	Oferta Explotable Oexp (L/s)	Extracción Estimada Qext (L/s)	Balance Neto Disponible (L/s)	Índice IEAS (%)	Diagnóstico de Presión
Subcuenca Río Chicú	135	320,0	144,0	280,5	**-136,5**	87,7%	**Sobreexplotado (Déficit)**

Subcuenca / Sector	Área (km2)	Recarga Natural Rnat (L/s)	Oferta Explotable Oexp (L/s)	Extracción Estimada Qext (L/s)	Balance Neto Disponible (L/s)	Índice IEAS (%)	Diagnóstico de Presión
Subcuenca Río Subachoque	380	680,0	306,0	445,2	**-139,2**	65,5%	**Estrés Alto (Déficit)**
Subcuenca Río Frío - Cajicá	210	410,0	184,5	165,0	**+19,5**	40,2%	**Equilibrio Crítico**
Subcuenca Río Teusacá - La Calera	290	580,0	261,0	35,0	**+226,0**	6,0%	**Superávit / Potencial**
Sector Nororiental (Sopó-Tocancipá-Sesquilé)	420	850,0	382,5	398,0	**-15,5**	46,8%	**Presión Moderada a Alta**
Sector Sur-Occidental (Facatativá-Bojacá-Mosquera)	310	390,0	175,5	312,0	**-136,5**	80,0%	**Sobreexplotado (Déficit)**
Sector Anapoima, La Mesa (Grupo Villeta)	180	95,0	38,0	3,8	**+34,2**	4,0%	**Bajo aprovechamiento (Local)**

6.4 DESCARGA Y CONSIDERACIONES DE GESTIÓN REGIONAL

La descarga natural de las aguas subterráneas ocurre a través de manantiales y, en forma limitada temporal y arealmente, hacia las corrientes superficiales en las zonas de piedemonte. A esta descarga natural se suma actualmente la extracción por bombeo (Qext), que constituye la principal salida del sistema y ha alterado el esquema hidrodinámico original de la cuenca.

6.4.1 CONCLUSIONES DEL COMPORTAMIENTO HIDRODINÁMICO Y BALANCE

Déficit en núcleos de explotación: Chicú, Subachoque y Facatativá-Mosquera presentan IEAS > 65%, con extracción superior a la oferta explotable. No es viable otorgar nuevas concesiones masivas sin profundizar el descenso piezométrico.

Reserva estratégica en el acuífero profundo Guadalupe: Las mejores posibilidades de captación adicional se ubican en las zonas de recarga y bloques estructurales del sector nororiental (Sesquilé, Tocancipá, Sopó) y la subcuenca del río Teusacá (La Calera), donde existe superávit hídrico y mejor calidad de agua.

Necesidad de gestión integrada: La presión antrópica exige fortalecer la protección de zonas de recarga, controlar la expansión urbana y ajustar los caudales concesionados para evitar subsidencia y deterioro del sistema artesiano.

7 HIDROGEOQUÍMICA

La composición química de las aguas subterráneas en la Sabana de Bogotá es el resultado de una interacción continua y prolongada entre el agua infiltrada, la matriz rocosa y las diferentes capas del suelo a lo largo de las trayectorias de flujo subterráneo. Tal como se ha mencionado, la cuenca de la Sabana está conformada por una gruesa capa de sedimentos modernos (de origen lacustre, fluvial y del Paleógeno-Neógeno) asentada sobre una potente secuencia de rocas sedimentarias de origen marino y continental correspondientes al período Cretácico. Esta variada constitución de materiales condiciona la calidad y el tipo de minerales disueltos en el agua en cada sector de la región.

Desde la perspectiva de la química del agua, la Sabana se divide en dos grandes sistemas acuíferos:

- Acuífero Cretácico (Grupo Guadalupe): Compuesto principalmente por areniscas duras de grano fino a grueso y rocas silíceas. Constituye la reserva más importante a nivel regional y produce agua de excelente calidad, muy poco mineralizada en sus zonas de origen debido a la alta resistencia de sus rocas a la disolución.
- Acuíferos Paleógenos a Cuaternarios (Formaciones Cacho, Guaduas, Tilatá y Depósitos de la Cuenca Plana): Conformados por alternancias de arcillas, limos, gravas, arenas sueltas y mantos orgánicos de turba. El agua en estos niveles presenta un recorrido más lento y un contacto directo con materia orgánica y minerales más solubles, lo que altera significativamente sus características químicas, aumentando la presencia de sales disueltas y metales.

La transformación del agua a medida que transita bajo el suelo de la Sabana responde a tres mecanismos geoquímicos principales:

a) Meteorización y Disolución Mineral

Cuando la lluvia se infiltra en los Cerros Orientales y occidentales, entra en contacto con las cuarzolitas y areniscas del Grupo Guadalupe. Al ser minerales muy estables, la disolución es mínima, lo que mantiene una concentración sumamente baja de sólidos disueltos. Por el contrario, cuando el agua atraviesa sectores con presencia de materiales arcillosos, yesos o niveles calcáreos intercalados, disuelve minerales ricos en calcio, magnesio y carbonatos, aumentando la dureza y la alcalinidad del recurso.

b) Intercambio Catiónico Natural

A medida que el agua subterránea avanza desde las zonas altas de recarga en las montañas hacia las zonas bajas y planas del valle del río Bogotá, entra en contacto prolongado con las arcillas de la Sabana. En este trayecto, la matriz edáfica absorbe de forma natural los iones de calcio disueltos en el agua y libera a cambio iones de sodio. Este proceso ablanda el agua químicamente, pero incrementa de manera gradual su contenido de sodio a lo largo de su recorrido regional.

c) Condición Redox y Presencia de Materia Orgánica

La cuenca plana de la Sabana alberga importantes antiguos depósitos lacustres ricos en madera fósil, vegetales en descomposición y mantos de turba. El contacto del agua con estos materiales consume el oxígeno disuelto, creando ambientes anóxicos o reductores. Bajo estas condiciones sin oxígeno, los minerales de hierro y manganeso presentes en las

arcillas se vuelven solubles y pasan al agua. Asimismo, la descomposición orgánica puede generar la presencia natural de dióxido de carbono libre y pequeños rastros de gas metano disuelto en los pozos someros.

7.1 CLASIFICACIÓN Y TIPOS DE AGUA (FACIES HIDROGEOQUÍMICAS)

El análisis de las muestras extraídas de pozos, aljibes y manantiales en la región permite agrupar el agua en tres grandes familias o tipos químicos:

Agua Bicarbonatada Cálcica

Es el agua característica de las zonas de recarga directa, localizada en los cerros orientales, las zonas altas cordilleranas y los afloramientos de roca del Grupo Guadalupe. Se define como un agua muy joven, de baja mineralización, baja conductividad eléctrica y poca concentración de sales. Es la fuente de mayor pureza natural de la cuenca.

Agua Bicarbonatada Sódica

Se encuentra en la cuenca media y en la franja plana de la Sabana, correspondiente a pozos de profundidad intermedia y profunda que captan de las Formaciones Cacho y Tilatá. Es un agua que ya ha completado un trayecto amplio bajo tierra; ha perdido parte de su calcio original por el intercambio con las arcillas y se ha enriquecido con sodio y bicarbonatos, presentando una alcalinidad moderada a alta.

Agua Clorurada o Sulfatada Sódica

Aparece en sectores puntuales de la cuenca plana, en áreas de descarga profunda o en zonas bajo la influencia directa de las formaciones salinas del norte de la Sabana (como Zipaquirá, Nemocón y Sesquilé). Presenta un marcado incremento en la conductividad y en las concentraciones de sal (cloruros y sulfatos), resultado del lavado de depósitos evaporíticos o de una lenta circulación en el subsuelo.

7.1.1 EVOLUCIÓN QUÍMICA REGIONAL DEL AGUA

La composición del agua en la Sabana de Bogotá sigue un patrón claro de evolución desde las montañas hasta el centro del valle:

Fase Inicial (Montañas y Cerros): El agua recién infiltrada es ligera, poco mineralizada y dominada por calcio y bicarbonatos.

Fase Intermedia (Piedemontes y Valles Altos): El agua comienza a interactuar con los suelos agrícolas y sedimentos del valle, incrementando progresivamente su nivel de sodio por intercambio con las arcillas.

Fase Final (Centro de la Sabana y Eje del Río Bogotá): En las zonas más llanas, el agua ha acumulado la mayor cantidad de sólidos disueltos, mostrando mayores niveles de sodio, sulfatos y cloruros, acentuados en algunos casos por la evapotranspiración en capas muy superficiales.

7.1.2 APTITUD Y CALIDAD DEL AGUA PARA DIVERSOS USOS

En cuanto al Abastecimiento para consumo humano, podemos decir lo siguiente:

Hierro y Manganeso: En pozos que captan agua de los depósitos superficiales y de la Formación Tilatá, es muy común encontrar concentraciones elevadas de hierro y

manganeso. Si bien esto obedece a un proceso puramente natural derivado de la falta de oxígeno en las capas de arcilla y turba, hace necesario implementar sistemas convencionales de aireación y filtración previa para su uso potable.

Vulnerabilidad por Nitratos: En las zonas donde se explotan aljibes o pozos poco profundos cerca de zonas agrícolas intensivas o áreas urbanizadas sin alcantarillado, se detecta el riesgo de infiltración de nitratos, lo que requiere un control microbiológico y químico constante en las captaciones someras.

Por otra parte, en cuanto al uso en agricultura y floricultura, se conoce lo siguiente:

El sector floricultor y agropecuario de la Sabana requiere un agua de características químicas muy exigentes para evitar la acumulación de sales en el suelo o daños en los sistemas de riego por goteo.

Los pozos profundos construidos en las areniscas del Grupo Guadalupe ofrecen un agua excelente para el riego, con muy bajo riesgo de dañar la estructura física del suelo. No obstante, en las zonas donde domina el agua de tipo bicarbonatada sódica, se debe monitorear la relación entre el sodio, el calcio y el magnesio para evitar que el suelo pierda permeabilidad o se vuelva compacto a largo plazo.

7.1.3 ANOMALÍAS HIDROGEOQUÍMICAS ESPECIALES: SALINIDAD Y TERMALISMO

En el sector norte y nororiental de la cuenca artesiana, la hidroquímica del agua subterránea se encuentra fuertemente influenciada por la presencia de masas halotectónicas (diapiros de sal) e intercalaciones evaporíticas asociadas a secuencias Cretácico-Paleógenas (principalmente dentro de la Formación Chipaque y horizontes de la Formación Bogotá).

Mecanismos Tectónicos y de Salinización: La reactivación tectónica de fallas inversas y el ascenso diapírico de la sal han puesto en contacto directo bloques de evaporitas masivas con los sistemas de flujo subterráneo local y regional. El agua de infiltración y de recarga profunda circula a través de planos de falla, zonas de cizalla y redes de fracturas asociadas a las estructuras de Zipaquirá, Nemocón y Sesquilé. Este contacto genera un proceso acelerado de disolución halítica (NaCl) y halitosis-yesífera ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$), lo que incrementa exponencialmente la carga iónica del fluido y transforma radicalmente las facies bicarbonatadas en facies Cloruradas Sódicas ($Cl^- - Na^+$) de extrema mineralización.

Caracterización Fisicoquímica e Impacto en la Calidad del Agua:

- **Conductividad Eléctrica (CE) y Sólidos Disueltos Totales (TDS):** En las áreas de influencia directa de los diapiros, los valores de conductividad eléctrica se elevan desde los rangos normales de la Sabana ($200 - 800$ μS/cm) a valores desfavorables que oscilan entre 5.000 μS/cm y más de 20.000 μS/cm, alcanzando concentraciones de TDS superiores a los 10.000 mg/L.
- **Iones Mayoritarios:** Las concentraciones de cloruro (Cl^-) y sodio (Na^+) superan por varios órdenes de magnitud los límites máximos admisibles fijados por la normatividad para agua potable (Resolución 2115 de 2007) y para uso en riego agrícola. Adicionalmente, se registran incrementos secundarios en sulfatos (SO_4^{2-}), calcio (Ca^{2+}) y boro (B).

7.1.4 IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS Y RIESGOS DE EXPLOTACIÓN

Estas fuentes salobres y manantiales salinos actúan como una barrera química de calidad en la franja septentrional. La extracción intensiva mediante pozos profundos en acuíferos adyacentes de agua dulce (como las areniscas del Grupo Guadalupe o los horizontes del Neógeno-Cuaternario) genera conos de abatimiento que alteran los gradientes hidráulicos naturales. Este fenómeno induce la migración lateral o ascendente de la cuña salina hacia los campos de captación agrícolas y de abastecimiento público. Por lo tanto, se requiere la delimitación de zonas de exclusión de bombeo y un monitoreo piezométrico e iónico continuo para prevenir la salinización irreversible de los acuíferos dulceacuícolas.

7.1.5 SISTEMAS HIDROTERMALES Y FLUJOS PROFUNDOS CON CONTROL ESTRUCTURAL (SECTOR OCCIDENTAL: TABIO Y TENJO)

En la margen occidental de la cuenca, específicamente en las estribaciones de la Serranía de Tabio-Tenjo (e.g., Santuario de Agua y Termales El Zipa), se manifiesta una anomalía hidrotermal asociada al gradiente geotérmico regional y a la presencia de fallamiento profundo.

A diferencia de la recarga somera de respuesta rápida, estas surgencias térmicas forman parte de un circuito de flujo regional profundo. El agua meteórica se infiltra en las zonas de recarga de mayor elevación topográfica en los flancos montañosos y desciende a profundidades estimadas entre 1.500 m y 2.500 m a través de los sistemas de fracturas del Grupo Guadalupe. A esas profundidades, el fluido se calienta por efecto del gradiente geotérmico normal a subnormal de la cuenca. Posteriormente, el agua asciende de manera rápida hacia la superficie impulsada por carga hidráulica y canalizada por discontinuidades tectónicas de alto ángulo, como los trazos e intersecciones de las fallas El Chital, Subachoque y alineamientos transversales distensivos, evitando un enfriamiento significativo durante su trayecto ascendente.

Se puede hablar de Indicadores Geotérmicos como son la Temperatura puesto que las aguas emergen a la superficie con temperaturas que varían entre $28°$C y $38°$C (varios grados por encima de la temperatura media ambiental de la zona, la cual ronda los $13°$C – $14°$C).

Por otra parte, hidroquímicamente corresponden a aguas Bicarbonatadas Sódicas a Cálcico-Magnesianas, de mineralización moderada a media (CE entre 1.000 y 2.500 μS/cm). Su huella geoquímica se caracteriza por la presencia de sílice disuelta (SiO_2), trazadores de interacción agua-roca a alta temperatura como litio (Li), rubidio (Rb) y estroncio (Sr), contenidos bajos de sulfatos, y emanaciones de gas radón (Rn^{222}) y dióxido de carbono (CO_2) libre disuelto.

Es importante entender que este sistema evidencia la conectividad hidráulica vertical que ejercen las estructuras de falla sobre los acuíferos profundos del Grupo Guadalupe. Las fuentes térmicas no solo representan un recurso de alto valor recreativo, médico-terapéutico y turístico, sino que constituyen puntos de descarga natural de flujos regionales, cuyo caudal y temperatura sirven como indicadores de la estabilidad hidrodinámica del piso cretácico en el borde occidental de la Sabana.

8 EXPLORACIÓN DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

La exploración de aguas subterráneas requiere la integración de tres actividades fundamentales: Cartografía Geológica, Inventario de Captaciones y Geofísica Aplicada. Cada una aporta información clave para la construcción del modelo hidrogeológico detallado y para la definición de zonas potenciales de aprovechamiento

La integración de la cartografía geológica, el inventario de captaciones y la geofísica permite construir un modelo hidrogeológico robusto, identificar zonas de potencial aprovechamiento y orientar la perforación de pozos con mayor certeza técnica. Estas actividades constituyen la base para la evaluación de disponibilidad, gestión del recurso y planificación de futuras intervenciones.

En este capítulo se describen los objetivos, procedimientos y productos esperados de cada actividad, así como las zonas que se recomiendan en cada municipio del área de estudio y las actividades requeridas.

8.1 CARTOGRAFÍA GEOLÓGICA

La cartografía geológica constituye el punto de partida para cualquier estudio hidrogeológico, pues permite comprender la arquitectura del subsuelo, la distribución de litologías y las estructuras que controlan la circulación del agua subterránea.

Se recopila y analiza la información disponible a escala regional y local, incluyendo mapas geológicos oficiales (escalas 1:25.000 a 1:100.000), estudios previos de perforación, registros litológicos y datos hidrogeológicos históricos., imágenes satelitales, fotointerpretación y modelos digitales de elevación, información estructural y geomorfológica relevante para la dinámica del acuífero.

Esta revisión permite identificar vacíos de información y orientar el trabajo de campo.

El trabajo de campo se enfoca en zonas estratégicas para caracterizar: litologías y contactos geológicos, estructuras mayores y menores: fallas, fracturas, pliegues y zonas de cizalla, evidencias de permeabilidad secundaria (fracturamiento, diaclasas, zonas alteradas), unidades acuíferas y acuitardos, diferenciando materiales porosidad primaria vs. Secundaria, manifestaciones superficiales de agua subterránea: manantiales, humedales, y zonas de recarga.

Se registran mediciones estructurales, descripciones litológicas y observaciones hidrogeológicas.

Con la información recopilada se construye un modelo conceptual inicial, que incluye, delimitación de acuíferos libres, semiconfinados y confinados, identificación de zonas de recarga y descarga, evaluación de la conectividad hidráulica entre unidades y geometría preliminar de los cuerpos acuíferos y estructuras controlantes.

Los productos esperados de la Geología son:Mapa geológico actualizado a escala 1:10000 y mejor a escala 1:5000 dependiendo del área a explorar, Mapa de unidades hidrogeológicas a la misma escala complementados ambos mapas con Secciones geológicas interpretativas y finalmente un Modelo conceptual hidrogeológico preliminar.

8.2 INVENTARIO DE CAPTACIONES

El inventario de captaciones permite evaluar el estado de explotación del recurso, la presión sobre el acuífero y la calidad de la información disponible. Incluye pozos profundos, pozos someros, aljibes, manantiales y otras estructuras de captación.

En primer lugar se realiza la identificación de captaciones mediante consulta a entidades ambientales, empresas de servicios, comunidades locales recorridos por el área de estudio.

El inventario debe incluir georreferenciación con GPS de precisión, clasificación por tipo de captación: pozo profundo, pozo artesanal, aljibe, manantial, galería filtrante.

Para cada captación se levanta una ficha técnica que incluye:

- Profundidad total, diámetro, tipo de entubado y filtros.
- Método de perforación y año de construcción.
- Caudal explotado, nivel estático y nivel dinámico.
- Estado físico del pozo: integridad del entubado, presencia de sedimentos, corrosión o fallas.
- Medición de niveles freáticos (piezometría puntual).
- Identificación del acuífero explotado y su relación con las unidades geológicas.
- Evaluación de interferencias entre pozos cercanos y densidad de captaciones.
- Calidad del agua en campo:Conductividad eléctrica, pH, temperatura y turbidez.
- Potenciales fuentes de contaminación.
- Variabilidad espacial de la calidad del agua subterránea.

Los productos esperados del Inventario son: Mapa de captaciones y distribución espacial, Base de datos estructurada de pozos y manantiales, Evaluación de presión sobre el acuífero e Insumos para el modelo hidrogeológico y para la planificación de la geofísica.

8.3 GEOFÍSICA APLICADA A AGUAS SUBTERRÁNEAS

La geofísica permite obtener información indirecta del subsuelo, complementando la cartografía y el inventario. Su objetivo es definir la geometría del acuífero, su espesor, continuidad y zonas de saturación.

Los métodos geofísicos, o métodos indirectos de exploración, han sido de amplia utilización para explorar aguas subterráneas y consisten en medir propiedades físicas del subsuelo para, una vez, conocidas, se obtengan resultados que permitan encontrar un objetivo específico.

La exploración de aguas subterráneas hoy día combina métodos eléctricos y electromagnéticos para identificar zonas saturadas, y métodos sísmicos y potenciales para definir la arquitectura geológica que controla el flujo. La integración de ERT/TDEM/AMT con sísmica es hoy la estrategia más robusta para reducir ambigüedad y obtener modelos hidrogeológicos confiables.

Algo muy importante a tener en cuenta con el uso de los métodos geofísicos es que todos requieren una buena correlación con la geología local. Ninguno tiene una respuesta única y el proceso de interpretación no puede reducirse simplemente a usar un software.

Veamos los métodos más utilizados:

8.3.1 MÉTODOS BASADOS EN LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA

Están basados en medir la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo porque el agua subterránea (especialmente si es mineralizada) reduce la resistividad, mientras que rocas secas o arcillas pueden aumentar o disminuir según su mineralogía y esta condición permite encontrar zonas con probabilidad de tener agua. Hay dos métodos de este tipo: El sondeo Eléctrico Vertical y la Tomografía Eléctrica.

SEV, Sondeo Eléctrico Vertical (VES)

- Profundidad típica de exploración: 30 a 150 m
- Resolución: alta en los primeros metros
- Ventajas: económico, rápido, ideal para ubicar pozos y definir el nivel saturado.
- Limitaciones: ambigüedad litológica; menor desempeño en medios heterogéneos.
- Aplicaciones: espesor de acuíferos someros, detección de arcillas, variación del nivel freático.

Tomografía Eléctrica (ERT)

- Profundidad típica: 20 a 200 m
- Resolución: muy alta lateral y vertical
- Ventajas: imagen 2D/3D del acuífero; excelente para identificar paleocanales, zonas fracturadas y variaciones de saturación.
- Limitaciones: requiere mayor logística y tiempo de adquisición.
- Aplicaciones: caracterización detallada de acuíferos, estudios de recarga, monitoreo de intrusión salina.

8.3.2 MÉTODOS ELECTROMAGNÉTICOS

Están basados en medir la respuesta del subsuelo a campos electromagnéticos naturales o artificiales y permiten penetraciones mayores que los métodos eléctricos y reducen ambigüedad en medios complejos.

Son tres métodos los que se emplean:

EM de dominio temporal (TDEM)

- Profundidad típica: 100 a 300 m
- Resolución: media-alta
- Ventajas: buena penetración; útil para acuíferos intermedios; menos afectado por heterogeneidad superficial.
- Limitaciones: requiere espacio para la bobina transmisora.

- Aplicaciones: detección de acuíferos confinados, interfaces agua dulce–salada.

AMT, Audio-Magnetotelúrico

- Profundidad típica: 200 a 1000 m
- Resolución: media
- Ventajas: excelente compromiso entre profundidad y detalle; útil en ambientes volcánicos o fracturados.
- Limitaciones: sensible al ruido cultural.
- Aplicaciones: acuíferos medianos, paleocanales profundos, estructuras que controlan flujo.

MT, Magnetotelúrico clásico

- Profundidad típica: 1 a 10 km
- Resolución: baja-media
- Ventajas: ideal para modelos hidrogeológicos regionales.
- Limitaciones: poca resolución somera; no sirve para ubicar pozos.
- Aplicaciones: cuencas sedimentarias profundas, fallas regionales, recarga profunda.

8.3.3 MÉTODOS SÍSMICOS (VELOCIDAD / GEOMETRÍA)

Los métodos sísmicos miden la velocidad de ondas sísmicas y por diferencia de esa propiedad se puede llegar a conocer la geometría de estratos. No encuentran agua pero sí son muy útiles porque permiten definir la arquitectura del acuífero; en particular en zonas con roca permiten conocer fallas, pliegues y estructuras en general.

. ***Sísmica de refracción***

- Profundidad típica: 20 a 100 m
- Resolución: media
- Aplicaciones: espesor de suelos, profundidad a roca, zonas fracturadas.

. Sísmica de reflexión

- Profundidad típica: 50 a 300 m (alta resolución), >1 km (convencional)
- Resolución: muy alta
- Aplicaciones: paleocanales, geometría de acuíferos, fallas, contactos litológicos.
- Complemento: se integra con métodos eléctricos/EM para identificar zonas saturadas.

Métodos potenciales (gravimetría y magnetometría)

Estos métodos miden las variaciones de densidad (gravimetría) y susceptibilidad magnética (magnetometría) y, al igual que la sísmica, detectan estructuras que controlan la presencia de agua, pero no el agua directamente.

Gravimetría

- Profundidad típica: cientos de metros
- Aplicaciones: cuencas sedimentarias, espesores de relleno, zonas de baja densidad asociadas a paleocanales.

Magnetometría

- Profundidad típica: variable (decenas a cientos de metros)
- Aplicaciones: detección de estructuras geológicas, fracturas, contactos; útil en ambientes volcánicos.

De la geofísica se espera obtener los siguientes productos: Secciones geofísicas interpretadas, Mapas de resistividad/conductividad, Modelos hidrogeofísicos integrados. Y finalmente con esta información se logra la actualización del modelo conceptual hidrogeológico.

9 MODELOS HIDROGEOLÓGICOS CONCEPTUALES POR MUNICIPIO

Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación simplificada del funcionamiento del agua subterránea en un territorio. Se construye integrando la geología de superficie y del subsuelo, la estructura, la información de pozos, la geofísica y los parámetros hidráulicos disponibles, y permite establecer qué unidades actúan como acuíferos o como acuitardos, dónde se produce la recarga, cómo circula el agua y dónde descarga. Es la base para planificar captaciones, delimitar zonas de protección y, en una etapa posterior, construir modelos numéricos.

Para cada uno de los 16 municipios el modelo se presenta en el mismo orden: marco geológico local, marco hidroestructural a partir de un perfil interpretado, caracterización hidrogeológica de las unidades, descripción del modelo con su mapa hidrogeológico y tabla de parámetros, y programa de exploración complementaria. Los mapas hidrogeológicos municipales se elaboraron a escala 1:25.000 sobre la cartografía geológica ajustada y muestran las unidades acuíferas y acuitardos, los pozos inventariados y las direcciones de flujo interpretadas.

A partir de la evaluación y caracterización de las unidades geológicas que se identificaron dentro del área de influencia, se realizó una caracterización de las unidades hidrogeológicas existentes en la zona, desde el punto de vista de su capacidad para almacenar y permitir el flujo de agua subterránea, con el fin de identificar la presencia de acuíferos de acuerdo con su potencial y diferenciarlos de las unidades impermeables conforme la metodología de zonas hidrogeológicas homogéneas de Colombia utilizada por el INGEOMINAS, actualmente, Servicio Geológico Colombiano.

La información derivada del convenio CAR-CONV-INT-3121-2024 solo está disponible para Sesquilé, Sopó, Cajicá, Funza, Madrid y Facatativá, por lo que la sección correspondiente se incluye únicamente en esos municipios. La calidad del agua subterránea se analiza de manera regional en el capítulo de hidrogeoquímica y solo se amplía en Tabio, por la presencia de manifestaciones termales.

Sobre las bases geológicas a escala 1:25.000 se prepararon los mapas hidrogeológicos de cada uno de los 16 municipios. Las convenciones utilizadas se indican en la Tabla 9.

Tabla 9. Clasificación de los sistemas acuíferos y unidades geológicas asociadas, convenciones de los mapas hidrogeológicos municipales.

Sistema Acuífero	Características de los acuíferos		Unidad Geológica
A. Sedimentos y rocas con flujo esencialmente intergranular			
A1	Acuíferos de alta productividad, capacidad específica entre 2,0 y 5,0 L/s/m	Sistemas acuíferos continuos de extensión regional depositados en ambiente fluvial y lacustre conformado sedimentos no consolidados que desarrollan acuíferos de tipo libre a	Depósitos cuaternarios, Arenisca Tierna, Formación Cacho

Sistema Acuífero	Características de los acuíferos		Unidad Geológica
		semiconfinado almacenando aguas recomendables para cualquier uso.	
A2	Acuíferos de mediana productividad, capacidad entre 1,0 y 2,0 L/s/m	Sistemas acuíferos continuos de extensión local y regional conformados por Depósitos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial, lacustre o rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial que desarrollan acuíferos generalmente semiconfinados a confinados	Depósitos coluviales, Formación Regadera
B. Rocas con flujo esencialmente a través de fracturas (Rocas fracturadas y/o Carstificadas)			
B1	Acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 1,0 y 2,0 L/s/m	Sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional, conformada por rocas sedimentarias clásticas de edades cretácica y paleozoica, depositadas en ambiente marino. Acuíferos confinados con aguas recomendables para cualquier uso.	Arenisca Labor, Arenisca Dura.
B2	Acuíferos de mediana productividad, capacidad específica entre 0,05 y 1,0 L/s/m	Sistemas acuíferos discontinuos de extensión regional, conformados por rocas sedimentarias clásticas de edades cretácica y paleozoica, depositadas en ambiente marino. Acuíferos confinados con aguas	Formación Plaeners

Sistema Acuífero	Características de los acuíferos		Unidad Geológica
		recomendables para cualquier uso.	
C. Sedimentos y rocas con limitados recursos de aguas subterráneas			
C1	Acuíferos con muy baja productividad, capacidad específica promedio menor de 0,05 L/s/m. Acuitardos	Complejo de rocas sedimentarias poco consolidadas a muy consolidadas de origen continental y marino. que en ocasiones almacenan aguas que requieren tratamiento para su uso. En este caso los rellenos de origen antrópico consolidados, ya sea por acción mecánica durante su depósito o por asentamiento.	Formación Usme, Formación Bogotá, Formación Guaduas, Formación Chipaque.

10 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE SESQUILÉ

El municipio de Sesquilé se localiza en la provincia de Almeidas (departamento de Cundinamarca), sobre la cuenca alta del río Bogotá. Presenta una topografía montañosa y de valle interandino con altitudes que oscilan entre los 2.550 y 3.200 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío, con temperaturas promedio de 12 °C a 14 °C y un régimen pluviométrico bimodal con precipitación media anual entre 800 y 1.100 mm, caracterizado por periodos de heladas y eventos de sequía estacional.

10.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El territorio de Sesquilé está estructurado por una secuencia sedimentaria que abarca desde el Cretácico Superior hasta el Paleógeno, cubierta discordantemente por depósitos inconsolidados del Neógeno y Cuaternario:

- Depósitos Fluvio Torrenciales y Cenozoicos (Qtf, NgQt): Gravas, arenas, limos y arcillas de la Formación Tilatá (NgQt) y rellenos fluvio-torrenciales recientes (Qtf) emplazados en valles y terrazas.
- Secuencia Paleógena, Formaciones Bogotá (Pgb), Cacho (Pgc) y Guaduas (KPgg): Formada por mantos de arcillolitas, lutitas, limolitas y capas de carbón (KPgg), intercaladas con potentes niveles de areniscas de grano medio a grueso (Pgc).
- Secuencia Cretácica (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl), Arenisca Dura (Ksgd) y Conejo (Kscn). Consiste en una alternancia de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, limolitas silíceas (liditas) y lutitas oscuras basales.

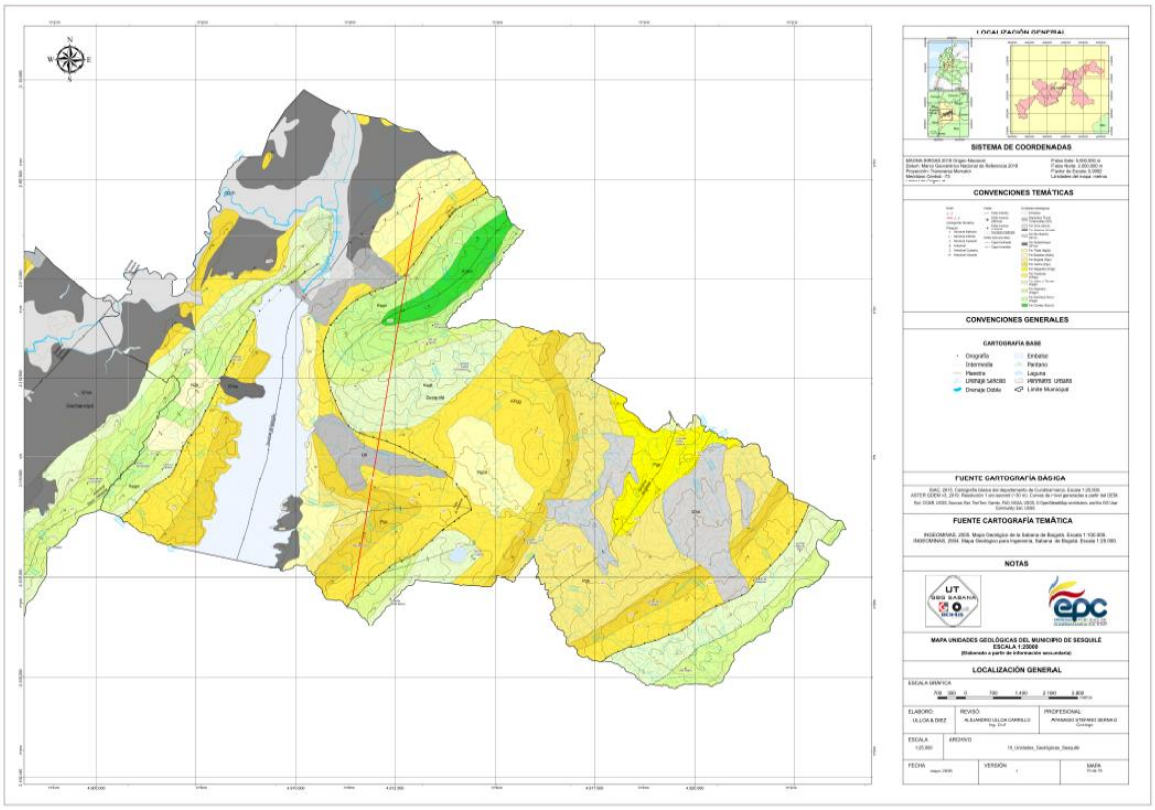


Figura 10. Mapa geológico del sector de Sesquilé y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

10.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

El marco estructural se define a partir del siguiente corte geológico que representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades.

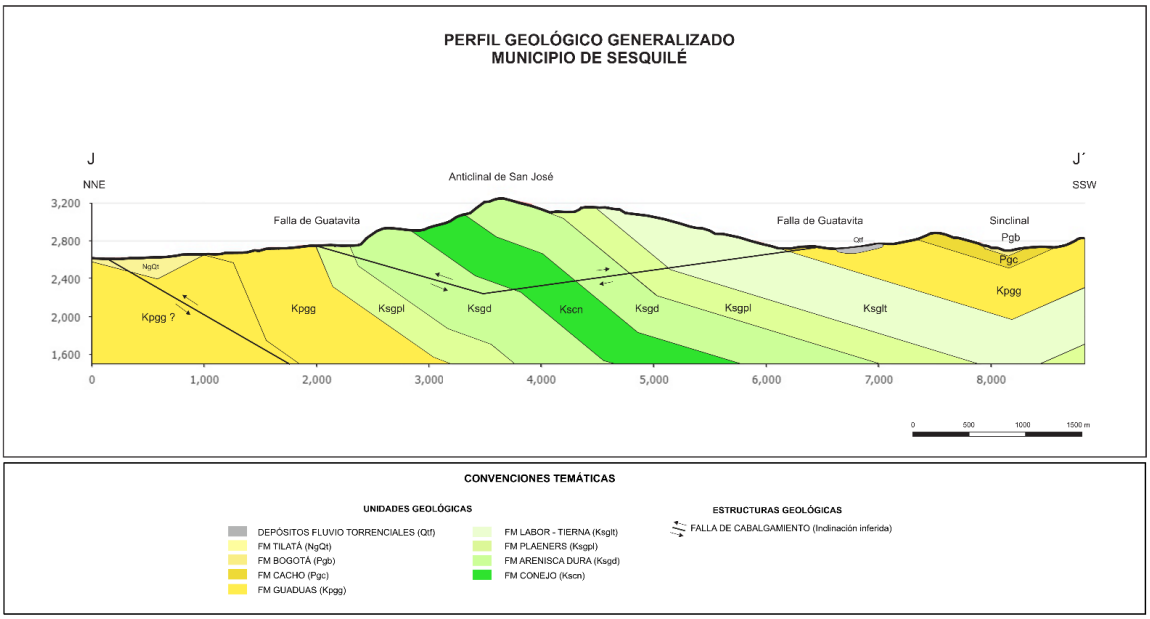


Figura 11. Corte geológico interpretativo del municipio de Sesquilé, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

El comportamiento del agua subterránea en el municipio de Sesquilé está determinado por la configuración estructural y litológica del subsuelo, evidenciada en el perfil geológico interpretativo J–J'. Esta estructura controla la distribución de permeabilidades, la conectividad entre unidades y los posibles corredores de flujo, elementos fundamentales para la gestión del recurso hídrico en el territorio.

El sistema hidroestructural está dominado por la presencia del Anticlinal de San José y un sinclinal asociado, cuya geometría define zonas de recarga, tránsito y almacenamiento. En los flancos del anticlinal, las unidades permeables afloran o quedan someras, favoreciendo la recarga local y la infiltración hacia niveles más profundos. Por el contrario, el sinclinal constituye una zona de acumulación potencial, donde las unidades arenosas y conglomeráticas (Ksgd, Ksgpl, Ksglt, Kpgb, Kpgpg) pueden almacenar volúmenes significativos de agua subterránea, actuando como reservorios naturales.

Las unidades de baja permeabilidad, particularmente las formaciones arcillosas y limosas (Pgb, Pgc, Ngtb), funcionan como barreras hidráulicas, segmentando el flujo y creando compartimentos hidrogeológicos. Esta compartimentación es relevante para la gestión del recurso, pues implica que la disponibilidad de agua subterránea puede variar de manera marcada entre sectores, aun a distancias relativamente cortas.

La Falla de Guatavita, interpretada como una estructura de cabalgamiento, constituye un elemento hidroestructural crítico. Su presencia puede generar discontinuidades en la conectividad entre unidades permeables, afectando la transmisión del flujo subterráneo. Dependiendo del grado de fracturación asociado, la falla puede comportarse como una

barrera parcial o como un corredor de conducción preferencial. Para la gestión hídrica, esto implica la necesidad de considerar la falla como un límite hidrogeológico potencial en la evaluación de captaciones, perforaciones y modelaciones de flujo.

La interacción entre pliegues y fallas genera gradientes hidráulicos controlados estructuralmente, con flujos dirigidos desde las zonas elevadas del anticlinal hacia los núcleos sinclinales. Este patrón sugiere que los sectores deprimidos del sinclinal pueden constituirse en zonas prioritarias para la explotación sostenible, mientras que los flancos anticlinales deben considerarse áreas clave para la protección de recarga y la regulación del uso del suelo.

En síntesis, el marco hidroestructural de Sesquilé revela un sistema segmentado y estructuralmente condicionado, donde la disponibilidad y vulnerabilidad del agua subterránea dependen de la geometría de pliegues, la continuidad de unidades permeables y la presencia de fallas. Esta interpretación proporciona una base técnica para orientar decisiones de planificación, delimitación de áreas de protección, evaluación de captaciones y diseño de estrategias de gestión integral del recurso hídrico en el municipio.

10.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

Las unidades litogeológicas de Sesquilé presentan un comportamiento dual: un dominio con porosidad primaria/secundaria de alta a media productividad en secuencias arenosas y un dominio impermeable/acuitardo en secuencias pelíticas.

Tabla 10. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Sesquilé.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado (m)	Permeabilidad / Productividad Hidráulica
Depósitos Fluvio-Torrenciales / Tilatá (Qtf, NgQt)	Gravas, arenas, limos y matrices arcillosas.	Acuífero, porosidad primaria; libre a semiconfinado	10 – 40 m	Media a Alta en horizontes granulares. Excelente recarga directa e infiltración.
Formación Cacho (Pgc)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad mixta; semiconfinado a confinado	50 – 100 m	Alta. Excelente potencial hidrogeológico y elevada transmisividad en estructuras sinclinales.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	Areniscas cuarzosas, liditas, cherts y limolitas silíceas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 400 m	Alta a Media. Controlada por la densidad de fracturamiento, diaclasado y sistemas de falla.
Formaciones Bogotá y	Arcillolitas, lutitas y lodolitas con capas delgadas	Acuitardo, porosidad secundaria	> 300 m	Muy Baja. Actúan como capas confinantes horizontales y

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado (m)	Permeabilidad / Productividad Hidráulica
Guaduas (Pgb, KPgg)	de arenisca y carbón.	limitada; capa confinante		barreras impermeables.
Formación Conejo (Kscn)	Lutitas y limolitas oscuras laminadas.	Acuitardo con acuíferos locales, porosidad secundaria; base del sistema	> 200 m	Baja a Muy Baja. Constituye la base impermeable del sistema hidrogeológico.

10.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelo conceptual hidrogeológico del municipio de Sesquilé se construye a partir de la interpretación del perfil geológico J–J' y del mapa hidrogeológico elaborado para el área de estudio (Figura 12), donde la estructura plegada, la distribución litológica y la presencia de fallas determinan la forma en que el agua subterránea se infiltra, circula, se almacena y descarga en el territorio.

El mapa hidrogeológico permite visualizar la distribución espacial de las unidades permeables y de baja permeabilidad, así como la relación entre estas y los elementos estructurales mayores, proporcionando una base cartográfica esencial para comprender el funcionamiento del sistema acuífero. En él se identifican zonas con mayor potencial de recarga, sectores de acumulación y áreas donde la estructura geológica condiciona la conectividad hidráulica.

La representación temática muestra claramente la alternancia entre unidades arenosas y conglomeráticas, que actúan como cuerpos permeables, y unidades arcillosas y limosas que funcionan como acuitardos, segmentando el sistema en compartimentos hidrogeológicos con comportamientos diferenciados.

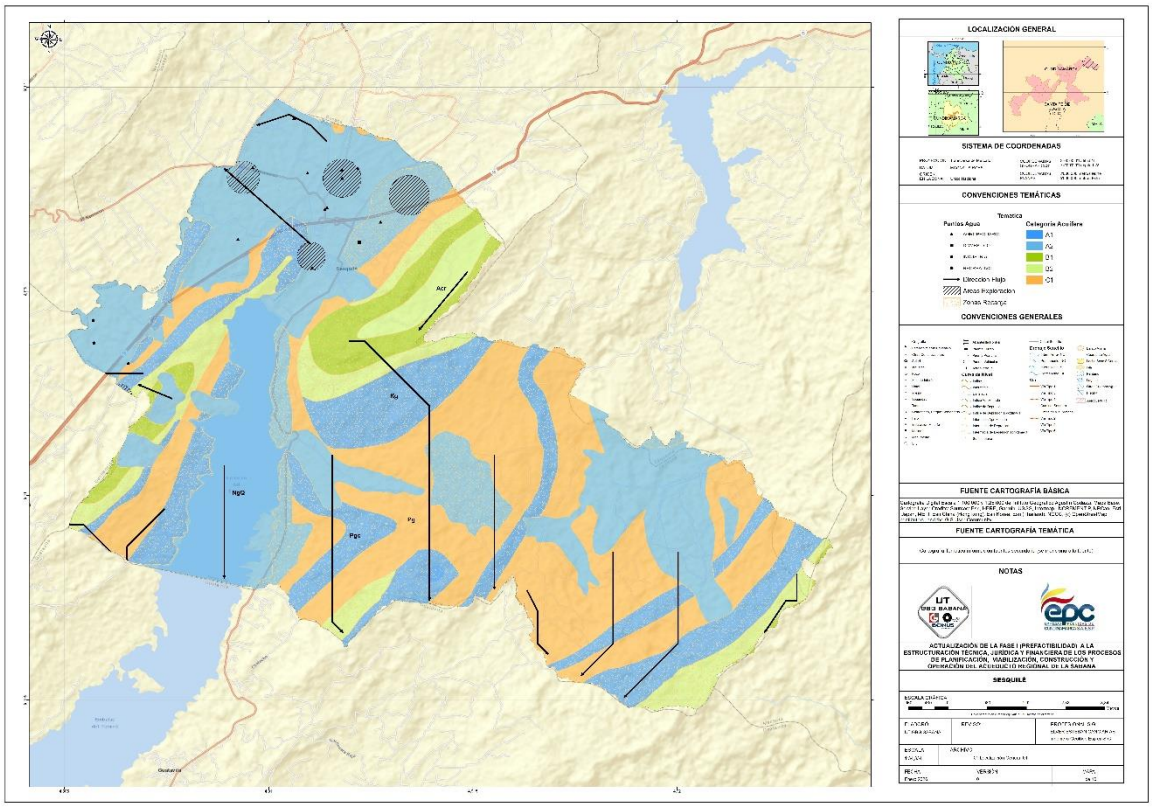


Figura 12. Mapa hidrogeológico del municipio de Sesquilé, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

La presencia del Anticlinal de San José, visible tanto en el perfil como en la distribución espacial del mapa hidrogeológico, constituye uno de los elementos estructurales más influyentes en la dinámica del flujo subterráneo. En los flancos del anticlinal, donde las unidades permeables afloran o se encuentran a poca profundidad, se favorece la infiltración y la recarga, convirtiendo estas zonas en áreas críticas para la conservación del recurso hídrico.

El mapa hidrogeológico confirma que estos sectores presentan mayor permeabilidad superficial y conectividad vertical, lo que los convierte en puntos estratégicos para la protección de recarga. La elevación estructural del anticlinal induce gradientes hidráulicos descendentes que dirigen el flujo hacia los sectores deprimidos del sinclinal adyacente, donde las unidades permeables quedan confinadas y pueden desarrollar un mayor espesor saturado.

En el mapa, estas zonas sinclinales se reconocen como áreas de acumulación natural, con mayor continuidad lateral de las unidades arenosas y conglomeráticas, lo que incrementa su potencial como reservorios de agua subterránea.

La Falla de Guatavita, representada en el mapa hidrogeológico como una estructura lineal que segmenta el territorio, introduce una discontinuidad mayor en el sistema hidrogeológico.

Su influencia puede manifestarse como una barrera parcial al flujo, si el plano de falla contiene material cataclástico o arcilloso, o como un corredor preferencial si el fallamiento ha generado fracturación intensa.

El mapa permite identificar la relación entre la traza de la falla y la distribución de unidades permeables, evidenciando sectores donde la conectividad hidráulica puede verse interrumpida o desviada. En términos de gestión hídrica, esta falla debe ser tratada como un límite hidrogeológico en la planificación de pozos, perforaciones y obras de captación, evitando suposiciones de continuidad hidráulica que no correspondan con la realidad estructural. La segmentación inducida por la falla puede generar diferencias significativas en la disponibilidad del recurso entre sectores relativamente cercanos, lo que exige una gestión basada en la comprensión detallada de la estructura.

La dinámica del flujo subterráneo en Sesquilé responde a la interacción entre litología, estructura y topografía, elementos que el mapa hidrogeológico sintetiza espacialmente. La recarga se concentra en zonas elevadas, especialmente en los flancos del anticlinal y en áreas donde los suelos presentan buena permeabilidad. Desde allí, el agua se desplaza hacia los sectores sinclinales, siguiendo trayectorias controladas por la geometría de los pliegues y por la presencia de acuitardos que desvían o confinan el flujo.

Las descargas se producen en quebradas, manantiales y zonas donde las unidades permeables afloran o son interceptadas por la red de drenaje superficial, elementos que también se identifican en el mapa hidrogeológico mediante la superposición de drenajes y unidades permeables. Este comportamiento estructuralmente condicionado implica que la disponibilidad del recurso hídrico subterráneo no es homogénea en el territorio, sino que depende de la continuidad de las unidades permeables, la presencia de acuitardos y la influencia de las fallas.

En conjunto, la integración del mapa hidrogeológico con el perfil geológico permite construir un modelo conceptual robusto, donde el sistema acuífero de Sesquilé se revela como complejo, segmentado y altamente dependiente de la estructura geológica.

La gestión del recurso hídrico debe considerar esta segmentación para evitar sobreexplotaciones locales, proteger las zonas de recarga y orientar las captaciones hacia sectores donde la acumulación natural del agua subterránea sea más favorable.

La comprensión de la estructura plegada, la influencia de la Falla de Guatavita y la distribución de unidades permeables y acuitardos proporciona una base sólida para la planificación territorial, la evaluación de la disponibilidad hídrica y la implementación de estrategias de protección y uso sostenible del agua subterránea en el municipio.

El mapa hidrogeológico, al sintetizar espacialmente estos elementos, se convierte en una herramienta fundamental para la toma de decisiones y para la gestión integral del recurso hídrico en Sesquilé.

La caracterización hidrogeológica del municipio de Sesquilé requiere contar con parámetros hidráulicos representativos que permitan evaluar el comportamiento de las distintas unidades del subsuelo frente al almacenamiento y transmisión del agua subterránea.

Con este propósito, se presenta a continuación una tabla que reúne valores típicos y orientativos de conductividad hidráulica, transmisividad, coeficientes de almacenamiento y rendimientos esperados en pozos para las principales unidades hidroestratigráficas

presentes en el área. Estos rangos se basan en información regional disponible para la Sabana de Bogotá y en la respuesta hidráulica conocida de las formaciones que afloran en Sesquilé, ajustados a su contexto estructural y litológico.

La Tabla 11 constituye un insumo para la interpretación del sistema acuífero, pues permite diferenciar unidades de alta permeabilidad y potencial productivo, como los cuerpos arenosos y fracturados del Grupo Guadalupe, de unidades de baja permeabilidad que actúan como acuitardos y condicionan la compartimentación del flujo.

Asimismo, los valores orientativos de rendimiento en pozos facilitan la estimación preliminar de la disponibilidad hídrica y la identificación de sectores con mayor aptitud para captaciones subterráneas. En conjunto, esta información complementa el modelo conceptual hidrogeológico y proporciona una base cuantitativa para la planificación, evaluación y gestión sostenible del recurso hídrico en Sesquilé.

Tabla 11. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Sesquilé.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente de Almacenamiento S / Porosidad Eficaz Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Fluvio-Torrenciales y Tilatá (Qal, Qt, NgQt)	$1{,}0 - 15{,}0$	$10 - 150$	S_y: 0,05 – 0,15(Acuífero libre)	1,0 – 5,0 L/s(Aljibes y pozos someros)	Porosidad intergranular. Alta variabilidad por contenido de matriz arcillosa. Recarga directa inmediata.
Formación Cacho (Pgc)	$0{,}5 - 5{,}0$	$30 - 250$	S: 10^{-4} – 10^{-3}(Semiconfinado/Confinado)	5,0 – 15,0 L/s	Porosidad primaria permeable. Areniscas cuarzosas de grano medio-grueso de alta transmisividad.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	0,1 – 2,5*(Matriz)* $> 5{,}0$*(Zonas fracturadas)*	20 – 300*(Llegando a > 500 en trazas de falla)*	S: 10^{-5} – 10^{-3}(Acuífero confinado/fracturado)	8,0 – 25,0 L/s	Porosidad secundaria dominante (fisurado/fracturado por tectonismo). Principal objetivo para pozos profundos.
Formaciones Bogotá y Guaduas (Pgb, KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	S: 10^{-5} – 10^{-4}	< 0,5 L/s(Muy escaso)	Comportamiento de acuitardo a acuífugo. Actúa como sello impermeable y capa confinante superior.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente de Almacenamiento S / Porosidad Eficaz Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Conejo (Kscn)	$< 10^{-4}$	< 1	N/A	Nulo a muy bajo	Acuitardo basal impermeable. Constituye el sello inferior del sistema Guadalupe

10.5 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL CONVENIO EPC-CAR

El documento CONCEPTO TÉCNICO MUNICIPIO DE SESQUILÉ PTAR 1 presenta la evaluación hidrogeológica del predio PTAR-1 en Sesquilé, realizada en el marco del Convenio CAR-3121-2024.

El predio se ubica sobre depósitos cuaternarios de Terraza Alta, en la zona central del Sinclinal de Sesquilé y muy próximo al sistema de fallas Chocontá–Pericos, lo que condiciona la presencia de unidades acuíferas semiconfinadas y confinadas. La geología regional está dominada por secuencias sedimentarias del Cretácico y el Terciario, entre ellas las formaciones Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas, Bogotá y Tilatá, además de depósitos cuaternarios de terraza y aluviales. En el sector del predio, las unidades Tilatá, Cacho y Labor y Tierna se comportan como acuíferos semiconfinados y confinados, con recarga en los flancos del sinclinal donde estas unidades afloran.

El inventario hidrogeológico municipal indica la existencia de 50 pozos, de los cuales el 46% están en uso y el 18% abandonados, además de 114 nacimientos utilizados principalmente para consumo doméstico y ganadería. La CAR registra 16 concesiones de aguas subterráneas en Sesquilé, de las cuales el 75% corresponden a uso agropecuario, lo que evidencia una presión significativa sobre el recurso subterráneo. Cerca del predio se identificó una captación activa (Expediente 60521), ubicada a 13,63 metros, con un pozo de 135 metros de profundidad y caudal de 3 L/s, lo que confirma la presencia de un acuífero profundo productivo y la necesidad de considerar interferencias hidráulicas. El documento señala que este pozo “alcanza una cota de perforación de 135 metros, indicando una potencial intercepción de un nivel acuífero confinado o semiconfinado”.

La caracterización geofísica previa, basada en perfiles de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), muestra variabilidad lateral y vertical de resistividades, con materiales permeables y semipermeables alternados hasta profundidades superiores a 300 metros. Los perfiles SE-1 y SE-2 evidencian discontinuidades laterales y cambios litológicos que afectan la continuidad del acuífero, con resistividades que oscilan entre 9 y 625 ohm·m en los primeros metros y entre 10 y 411 ohm·m en niveles más profundos.

Los dos sondeos magnetotelúricos (MT1 y MT2) realizados en el predio permiten definir cuatro unidades geoeléctricas principales. La unidad H1, superficial, presenta resistividades entre 60 y 80 ohm·m y corresponde a gravas, arenas y limos semipermeables; el documento indica que “esta unidad es semipermeable y está conformada por variaciones laterales de gravas y arenas y limos”. La unidad H2, entre aproximadamente 100 y 400 metros, muestra resistividades entre 80 y 300 ohm·m y se interpreta como areniscas conglomeráticas y

limolíticas, constituyendo el acuífero semiconfinado principal. La unidad H3, entre 400 y 600 metros, presenta resistividades más altas (300 a 800 ohm·m) y corresponde a areniscas menos fracturadas, con menor permeabilidad. Finalmente, la unidad H4, por debajo de 600 metros, exhibe resistividades superiores a 800 ohm·m y representa areniscas compactas de baja permeabilidad, asociadas a un acuífero profundo confinado.

La integración de la geología, los SEV y los MT permite establecer un modelo conceptual donde el predio presenta un nivel somero de baja continuidad hidrogeológica, un acuífero intermedio entre 100 y 400 metros con mayor potencial de explotación y un acuífero profundo más compacto y confinado. El documento concluye que “el área del predio PTAR-1 tiene potencial hidrogeológico”, aunque enfatiza que los métodos geofísicos entregan información indirecta y deben complementarse con perforación exploratoria y geofísica de pozo para definir con precisión la ubicación de filtros y la geometría del acuífero.

También se conoció el documento CONCEPTO TÉCNICO MUNICIPIO DE SESQUILÉ PTAR 2 que presenta la evaluación hidrogeológica del predio PTAR-2 en Sesquilé, desarrollado dentro del Convenio CAR-3121-2024.

El predio se ubica sobre depósitos cuaternarios de Terraza Alta (Qta), muy próximo al eje del Sinclinal de Sesquilé y al sistema de fallas Chocontá–Pericos, lo que condiciona la geometría del subsuelo y la presencia de unidades sedimentarias del Grupo Guadalupe y Tilatá. La geología regional está compuesta por secuencias del Cretácico superior y depósitos cuaternarios, incluyendo las formaciones Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas, Bogotá y Tilatá, además de depósitos aluviales y coluviales. En el sector del predio, las unidades Tilatá, Cacho y Labor y Tierna se comportan como acuíferos semiconfinados y confinados, con recarga en los flancos del sinclinal donde estas unidades afloran.

El inventario municipal y las concesiones de la CAR son los mismos descritos para el predio PTAR 1. La captación más cercana es la misma (Expediente 60521), ubicada a 13,63 metros del predio, con un pozo de 135 metros de profundidad y caudal de 3 L/s, lo que confirma la presencia de un nivel acuífero profundo en la zona. El documento señala que este pozo “alcanza una cota de perforación de 135 metros, indicando una potencial intercepción de un nivel acuífero confinado o semiconfinado”.

Los perfiles geoeléctricos SE-1 y SE-2 muestran variabilidad lateral y vertical de resistividades hasta profundidades superiores a 300 metros, con alternancia de materiales permeables y menos permeables. Sin embargo, esta variabilidad no se traduce en la presencia clara de un acuífero continuo en el predio PTAR-2, a diferencia de lo observado en PTAR-1.

Los dos sondeos magnetotelúricos (MT1 y MT2) realizados en el predio permiten definir cuatro unidades geoeléctricas, pero con características que indican baja permeabilidad y predominio de areniscas compactas. En el MT1, la unidad H1 presenta resistividades superiores a 10.000 ohm·m, interpretadas como materiales superficiales secos; la unidad H2 muestra resistividades también mayores a 10.000 ohm·m, asociadas a areniscas fracturadas con un espesor aproximado de 300 metros; las unidades H3 y H4 presentan resistividades entre 500 y más de 2.000 ohm·m, correspondientes a areniscas finas compactas. En el MT2, las resistividades son igualmente altas: H1 entre 800 y 1000 ohm·m,

H2 entre 1000 y 2000 ohm·m, H3 entre 2000 y 5000 ohm·m y H4 superiores a 5000 ohm·m, todas asociadas a areniscas muy compactas de baja permeabilidad.

La interpretación conjunta de los SEV y los MT indica que el predio PTAR-2 presenta depósitos cuaternarios hasta aproximadamente 100 metros de profundidad, seguidos por areniscas fracturadas localmente en el sector del MT1, pero sin continuidad lateral suficiente para constituir un acuífero explotable. Por debajo de los 600 metros predominan areniscas finas compactas, de baja permeabilidad. El documento concluye que “el área del predio PTAR-2 no se considera con Potencial Hidrogeológico ya que sólo se encontró fracturamiento muy local en el sondeo MT2”.

En síntesis, aunque el predio se encuentra en una zona estructuralmente favorable para la presencia de acuíferos regionales, los resultados específicos de los sondeos MT y la información geoeléctrica indican que PTAR-2 no presenta un acuífero con continuidad, espesor ni permeabilidad suficiente para ser considerado de potencial hidrogeológico, a diferencia del predio PTAR-1.

El modelo conceptual hidrogeológico integrado para el municipio de Sesquilé se apoya en la configuración estructural sinclinal y en la presencia de unidades sedimentarias del Grupo Guadalupe y Tilatá, sobre las cuales se disponen depósitos cuaternarios de terraza y aluviales.

El municipio se encuentra sobre estructuras sinclinales y anticlinales, con fallas inversas NE–SW (Sinclinal de Suesca, Sinclinal de Sesquilé, Falla Chocontá–Pericos, Falla de Guatavita), que controlan la geometría de los acuíferos y la recarga lateral. En este contexto, las formaciones Tilatá, Cacho y Labor y Tierna se comportan como acuíferos semiconfinados a confinados: “Las areniscas y conglomerados de la Formación Tilatá (NgQt) se comportan como acuíferos semiconfinados… Los niveles areníticos de las Formaciones Cacho y Labor y Tierna se comportan como acuíferos confinados, cuya recarga se presenta hacia los flancos Oeste y Este de la estructura, donde estas unidades afloran.”

Sobre estos acuíferos regionales se apoyan los depósitos de Terraza Alta (Qta) y aluviales, que conforman un nivel somero de baja a media permeabilidad, con fuerte variabilidad lateral y vertical. Los perfiles geoeléctricos SE-1 y SE-2 muestran resistividades muy contrastantes en los primeros 100 a 150 m, evidenciando cambios litológicos rápidos y discontinuidades, lo que se traduce en acuíferos locales poco continuos y alta heterogeneidad hidráulica.

En el conjunto del municipio se han inventariado 50 pozos y 114 nacimientos, con un uso dominante doméstico y ganadero, y 16 concesiones de aguas subterráneas, de las cuales el 75 % son agropecuarias: “La CAR cuenta con 16 concesiones… se identificó que el 75% de ellas fueron destinadas a uso agropecuario… destacando el rol preponderante del sector agropecuario en la explotación y manejo del recurso subterráneo.” Esto configura un sistema donde el agua subterránea es un recurso clave, sometido a presión creciente, especialmente en las zonas de terraza y piedemonte.

En el plano conceptual, el sistema hidrogeológico de Sesquilé puede entenderse como un conjunto de acuíferos estratificados:

(1) un nivel somero cuaternario (Qta, Qal, Qc), de comportamiento libre a semiconfinado, con recarga directa por infiltración de lluvia y retornos de riego, y descarga hacia nacimientos, quebradas y el río Bogotá;

(2) un acuífero intermedio semiconfinado en Tilatá (areniscas conglomeráticas y limos arenosos), con recarga lateral en los flancos del sinclinal y captaciones profundas (como el expediente 60521, pozo de 135 m y 3 L/s), que constituye el principal reservorio explotable; y

(3) acuíferos confinados más profundos en las areniscas del Grupo Guadalupe (Cacho, Labor y Tierna, Arenisca Dura), de mayor continuidad regional pero menor accesibilidad y con permeabilidades controladas por fracturamiento. La presencia de fallas inversas y pliegues genera zonas de mayor fracturamiento y permeabilidad (ventanas hidráulicas) y otras de cierre estructural, condicionando la distribución de transmisividades y la respuesta a la explotación.

Dentro de este marco regional, los predios PTAR-1 y PTAR-2 representan dos situaciones contrastantes que ayudan a afinar el modelo conceptual. En PTAR-1, los sondeos magnetotelúricos definen cuatro unidades geoeléctricas, con una unidad H1 semipermeable (gravas, arenas y limos) y una unidad H2 (80 a 300 ohm·m) asociada a areniscas conglomeráticas y limolíticas entre ~100 y 400 m, que se interpreta como el acuífero principal semiconfinado bajo el predio: “Los perfiles 1D de los MTs 1 y 2… se definen en 4 unidades geoeléctricas… Unidad H1… variaciones laterales de gravas y arenas y limos… por debajo se describen areniscas conglomeráticas hasta 400 m.”

Esto, sumado a la presencia cercana de un pozo profundo productivo, lleva a concluir que PTAR-1 se ubica sobre un tramo del sinclinal donde el acuífero intermedio tiene espesor, continuidad y permeabilidad suficientes para ser considerado de potencial hidrogeológico.

En contraste, en PTAR-2 los MT muestran resistividades muy altas en todas las unidades (H1 >10.000 ohm·m, H2 también >10.000 ohm·m, H3 y H4 entre cientos y miles de ohm·m), asociadas a materiales superficiales secos y areniscas compactas de baja permeabilidad. El documento indica que “Unidad H1… valores altos de resistividad (sobre los 10000 Ohm.m), se presume que esta unidad corresponde a materiales superficiales secos”, y concluye que “el área del predio PTAR-2 no se considera con Potencial Hidrogeológico ya que sólo se encontró fracturamiento muy local en el sondeo MT2.”

Esto sugiere que, aunque el marco estructural es el mismo, la posición específica del predio respecto al sinclinal, la presencia de zonas de compactación y la ausencia de fracturamiento significativo hacen que el acuífero intermedio no sea explotable allí.

El modelo conceptual integrado para Sesquilé, entonces, reconoce un sistema de acuíferos controlado por la estructura sinclinal y las unidades Tilatá–Guadalupe, con recarga en flancos y descarga en nacimientos y cauces, sometido a presión por usos agropecuarios y domésticos, y con una marcada heterogeneidad espacial: sectores como PTAR-1, donde el acuífero semiconfinado es viable para captación, y otros como PTAR-2, donde predominan areniscas compactas de alta resistividad y baja permeabilidad. Esta visión integrada es la base para definir zonas de potencial, restricciones de explotación, ubicación óptima de nuevas captaciones y criterios de protección del recurso subterráneo en el municipio.

10.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

Con base en el modelo conceptual hidrogeológico integrado del municipio de Sesquilé, el cual evidencia una marcada heterogeneidad espacial en la continuidad, permeabilidad y profundidad de los acuíferos, se formula un Programa de Exploración Complementaria orientado a reducir la incertidumbre en las zonas de mayor potencial y evitar inversiones en sectores donde la geofísica ya demuestra ausencia de unidades acuíferas explotables. Este programa se enfoca en consolidar información directa del subsuelo, validar las interpretaciones estructurales y delimitar con precisión los corredores hidrogeológicos activos dentro del sinclinal de Sesquilé.

El modelo conceptual indica que los acuíferos semiconfinados y confinados se desarrollan principalmente en las unidades Tilatá, Cacho y Labor y Tierna, con recarga en los flancos del sinclinal y continuidad lateral variable. Los sondeos magnetotelúricos realizados en los predios PTAR-1 y PTAR-2 confirman esta heterogeneidad: mientras en PTAR-1 se identifican areniscas conglomeráticas permeables entre 100 y 400 m (“por debajo se describen areniscas conglomeráticas hasta 400 m”), en PTAR-2 predominan areniscas compactas de resistividad muy alta, sin continuidad hidráulica (“no se considera potencial hidrogeológico ya que sólo se encontró fracturamiento muy local”). Por ello, el programa se orienta a los sectores donde el modelo conceptual y la evidencia geofísica indican mayor viabilidad hidrogeológica.

En primera instancia, se recomienda realizar una geología detallada de campo a escala 1:10.000 o mayor, focalizada en los flancos occidental y oriental del sinclinal, donde las unidades permeables del Grupo Guadalupe y Tilatá afloran o se aproximan a superficie.

Este levantamiento permitirá verificar contactos litológicos, continuidad de areniscas permeables, zonas de fracturamiento asociadas a lineamientos estructurales y la influencia de la Falla de Guatavita en la conectividad hidráulica regional. La geología detallada será clave para discriminar sectores con potencial real frente a zonas compactas sin interés hidrogeológico, como las observadas en PTAR-2.

De manera complementaria, se desarrollará un inventario exhaustivo de captaciones, nacimientos y pozos profundos, priorizando la caracterización de puntos que ya demuestran productividad, como el expediente 60521, cuyo pozo de 135 m “indica una potencial intercepción de un nivel acuífero confinado o semiconfinado”. Este inventario permitirá identificar zonas de descarga, evaluar la interacción entre aguas superficiales y subterráneas y delimitar áreas de protección y restricción para futuras obras.

Con base en la geología y el inventario, se propone ejecutar levantamientos geofísicos mediante métodos magnetotelúricos y sísmica de reflexión en los sectores donde el modelo conceptual indica mayor continuidad lateral de unidades permeables. Estos métodos permitirán estimar espesores saturados, geometría de los acuíferos semiconfinados, presencia de acuitardos y localización de discontinuidades estructurales que actúan como corredores preferenciales de flujo. Se evitará la aplicación de geofísica en zonas donde los MT ya demostraron ausencia de acuífero, optimizando recursos y aumentando la eficiencia del programa.

Finalmente, dependiendo de la respuesta geofísica y de la caracterización estructural, se recomienda avanzar hacia perforaciones exploratorias someras y profundas en los sitios con mayor potencial hidrogeológico. Estas perforaciones permitirán obtener perfiles

litológicos directos, niveles freáticos, parámetros hidráulicos in situ mediante ensayos de permeabilidad y pruebas de bombeo, así como muestras para análisis hidroquímicos que permitan evaluar la calidad del recurso y su vulnerabilidad.

Los puntos sugeridos para perforación incluyen:

(i) el tramo sur del lineamiento estructural donde las areniscas del Guadalupe presentan mayor fracturación y continuidad;

(ii) el sector nororiental en la transición Ksglt–Ksgn, donde se observa curvatura estructural y potencial de recarga lateral; y

(iii) el flanco occidental del sinclinal, donde las unidades permeables muestran mayor espesor saturado y conectividad hidráulica comprobada por captaciones existentes.

La ejecución de este programa permitirá consolidar un modelo hidrogeológico de alta resolución, optimizar la gestión del recurso hídrico subterráneo y orientar decisiones de planificación, captación y protección ambiental en el municipio de Sesquilé, priorizando las zonas con potencial real y descartando aquellas donde la geología y la geofísica ya demostraron ausencia de acuífero explotable.

11 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE TOCANCIPÁ

El municipio de Tocancipá se localiza en la provincia Sabana Centro (departamento de Cundinamarca), en el sector septentrional de la Sabana de Bogotá sobre la cuenca media-alta del río Bogotá. Presenta una topografía plana en su zona central de valle interandino que contrasta con franjas montañosas en sus márgenes oriental y occidental, con altitudes que oscilan entre los 2.550 y 2.900 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío y seco a moderadamente húmedo, con temperaturas promedio entre 12 °C y 14 °C y una precipitación media anual de 700 a 900 mm con régimen bimodal.

11.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El área de Tocancipá está conformada por una amplia cuenca de relleno lacustre y aluvial del Cuaternario que reposa sobre un zócalo sedimentario plegado del Cretácico Superior y Paleógeno:

- Depósitos Cuaternarios, Formación Sabana (Q1sa) y Formación Chía (Q2ch): Potente relleno fluvio-lacustre compuesto por arcillas, limos, turbas y lentículas continentales de arenas y gravas de baja a media consolidación en el valle plano.
- Secuencia del Cretácico Superior / Maastrichtiano, Formación Guaduas (KPgg): Compuesta por una alternancia de arcillolitas, lutitas y lodolitas grises a oscuras con intercalaciones de mantos de carbón y niveles delgados de areniscas finas.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt) y Plaeners (Ksgpl). Consiste en una sucesión de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, capas silíceas (liditas) y limolitas altamente diaclasadas.

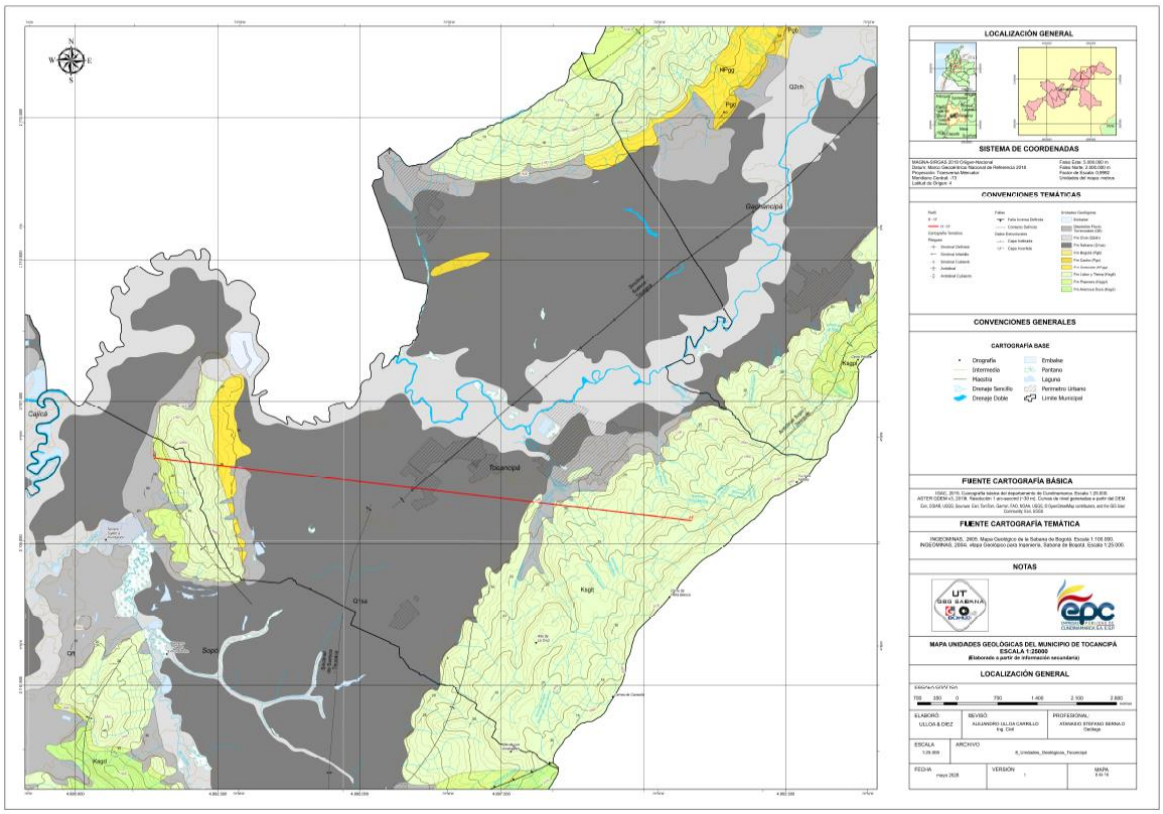


Figura 13. Mapa geológico del sector de Tocancipá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

11.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

El marco estructural se define a partir del siguiente corte geológico que representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos

inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades.

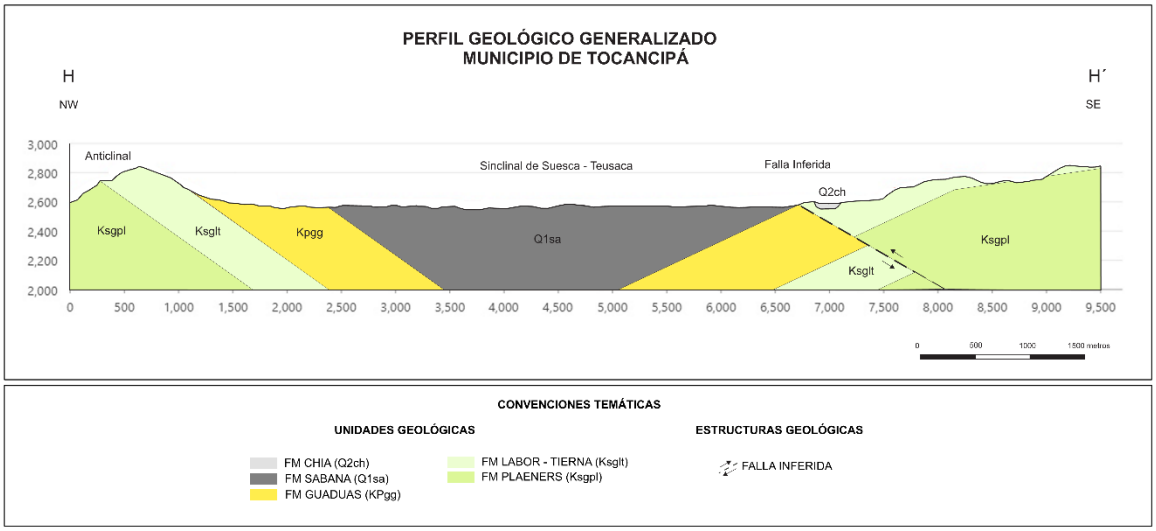


Figura 14. Corte geológico interpretativo del municipio de Tocancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

La geometría hidrogeológica profunda de Tocancipá está dominada por una amplia cuenca de tipo Sinclinal (Sinclinal de Suesca–Teusacá) flanqueada por estructuras anticlinales y fallamiento inverso.

En el Perfil Geológico Generalizado $H - H'$ (extensión aproximada de 9,5 km orientado de NW a SE, cotas 2.000 a 2.800 m s. n. m.), se diferencian los siguientes dominios hidroestructurales:

- Sector Noroccidental (NW, 0 a 2,5 km): Corresponde al flanco oriental de una estructura Anticlinal donde afloran las unidades duras del Grupo Guadalupe (Formación Plaeners (Ksgpl) y Labor y Tierna (Ksglt)). Esta franja montañosa actúa como una zona preferencial de recarga directa.
- Sector Central (2,5 a 6,5 km): Eje del Sinclinal de Suesca–Teusacá. Constituye una profunda depresión tectónica donde el zócalo de baja permeabilidad de la Formación Guaduas (KPgg) se halla sepultado por el potente paquete arcilloso de la Formación Sabana (Q1sa), un acuífero semiconfinado de productividad variable que, junto con la Formación Guaduas, confina los acuíferos cretácicos subyacentes.
- Sector Sudoriental (SE, 6,5 a 9,5 km): Presenta el flanco ascendente del sinclinal interrumpido por una Falla Inferida de tipo cabalgamiento (alrededor del km 7,5). Esta falla yuxtapone los niveles de la Formación Labor y Tierna (Ksglt) sobre sí mismos y sobre la Formación Plaeners (Ksgpl), controlando el flujo subterráneo lateral y creando sectores de alta porosidad secundaria. Localmente se observan rellenamientos de la Formación Chía (Q2ch) sobre la escotadura topográfica.

11.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Tocancipá se divide entre un acuífero poroso somero de bajo a moderado rendimiento y acuíferos fisurados/fracturados profundos de alta productividad condicionados por la cobertura arcillosa.

Tabla 12. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Tocancipá.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Formación Sabana / Chía (Q1sa, Q2ch)	Arcillas, limos, turbas y lentes delgados de arena/grava.	Acuífero semiconfinado de productividad variable, porosidad primaria; comportamiento variable según facies. La Formación Chía es una cobertura delgada sin interés como acuífero	> 100 m en el centro de la cuenca	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s.
Formación Guaduas (KPgg)	Arcillolitas, lutitas y lodolitas con capas de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	200 – 400 m	**Muy Baja**. Actúa como barrera impermeable superior del Grupo Guadalupe.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	80 – 150 m	**Alta**. Unidad acuífera principal de elevada transmisividad y excelente rendimiento en pozos.
Formación Plaeners (Ksgpl)	Liditas, cherts y limolitas silíceas fracturadas.	Acuífero confinado de productividad media, porosidad secundaria (liditas fracturadas)	Hasta 93 m	**Media.** Liditas fracturadas; caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.

11.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El sistema hidrogeológico de Tocancipá se desarrolla en torno a la estructura sinclinal profunda y la cobertura cuaternaria impermeable. La recarga se concentra en los flancos montañosos del anticlinal noroccidental, donde las areniscas del Grupo Guadalupe afloran y presentan fracturación intensa. Desde estas zonas, el flujo subterráneo se dirige hacia el eje sinclinal, donde las unidades permeables quedan confinadas bajo la Formación Guaduas y la Formación Sabana.

La presencia de la falla inferida en el sector sudoriental introduce una discontinuidad que puede comportarse como corredor preferencial de flujo, aumentando la transmisividad local y generando sectores de mayor productividad.

En contraste, la cobertura cuaternaria del valle central actúa como acuitardo, limitando la recarga vertical y segmentando el sistema.

El comportamiento dual del sistema, acuífero somero poroso y acuífero profundo fisurado, implica que la disponibilidad hídrica depende de la estructura y de la continuidad de las unidades permeables. Las zonas más favorables para captación profunda se ubican en los flancos del sinclinal y en sectores influenciados por la falla, mientras que las captaciones someras deben concentrarse en lentes arenosos dentro de la Formación Sabana.

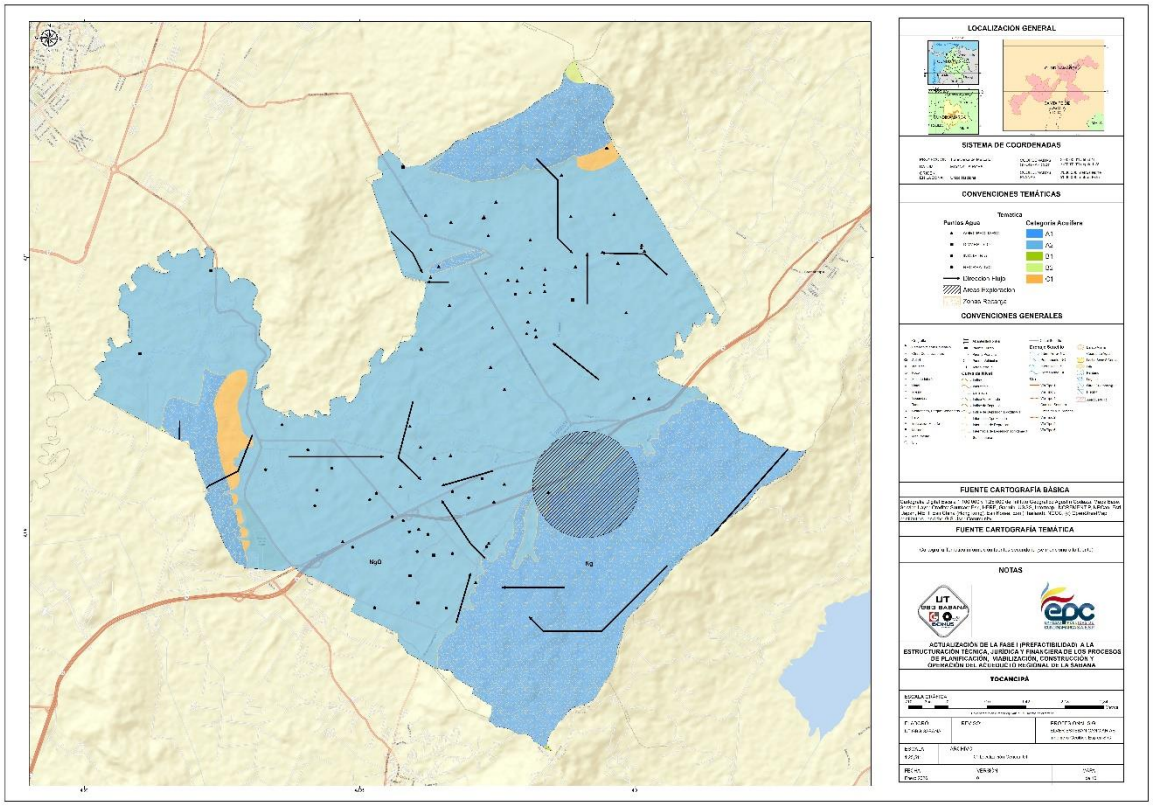


Figura 15. Mapa hidrogeológico del municipio de Tocancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

La Figura 15 presenta el Mapa Hidrogeológico del municipio de Tocancipá, elaborado a partir de la ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá y de la interpretación estructural del Sinclinal Suesca–Teusacá. En esta representación se sintetiza la distribución espacial de las unidades hidroestratigráficas, su relación con la estructura plegada regional y los elementos geomorfológicos que condicionan la circulación del agua subterránea.

El mapa permite identificar con claridad la amplia cobertura cuaternaria del valle central, conformada por las Formaciones Sabana (Q1sa) y Chía (Q2ch), caracterizadas por arcillas, limos, turbas y lentes de arena que se comportan como un acuífero semiconfinado de productividad variable según los cambios de facies. En contraste, los flancos montañosos oriental y occidental muestran afloramientos del Grupo Guadalupe (Formaciones Labor y Tierna y Plaeners), unidades arenosas y silíceas altamente fracturadas que constituyen los acuíferos profundos de mayor productividad en el municipio.

La Figura 15 también evidencia la presencia de estructuras mayores, como el flanco anticlinal noroccidental, que funciona como zona preferencial de recarga, y la falla inferida de tipo cabalgamiento en el sector sudoriental, la cual yuxtapone niveles permeables y genera zonas de porosidad secundaria elevada. Estos elementos estructurales controlan la conectividad hidráulica y definen corredores preferenciales de flujo subterráneo.

La superposición de la red de drenaje superficial sobre las unidades hidrogeológicas permite identificar sectores de descarga natural, manantiales y zonas donde la interacción entre aguas superficiales y subterráneas es más marcada. Asimismo, la distribución de las unidades permeables y acuitardos en el mapa facilita la delimitación de áreas de recarga, zonas de confinamiento y sectores con potencial para captaciones profundas.

La Tabla 13 presenta los rangos orientativos de conductividad hidráulica (K), transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) y rendimientos típicos en pozos (Q) para las principales unidades hidroestratigráficas del municipio de Tocancipá. Los valores se basan en información regional de la Sabana de Bogotá, estudios hidrogeológicos previos y el comportamiento esperado de las unidades litológicas en el contexto estructural del Sinclinal Suesca–Teusacá.

Tabla 13. Parámetros hidráulicos y unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Tocancipá.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Clasificación Hidrogeológica	Espesor Esperado (m)	Conductividad K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Potencial y Rendimiento (Q)
Formaciones Sabana y Chía (Q1sa, Q2ch)	Arcillas, limos, turbas e intercalaciones de arena/grava.	Acuífero semiconfinado de productividad variable, porosidad primaria; comportamiento variable según facies. La Formación Chía es una cobertura delgada sin interés como acuífero	> 100 m	$0{,}01 – 0{,}8$ *(general)* $1{,}0 – 5{,}0$ *(lentes de arena)*	$1{,}0 – 25$	S_y: 0,0 – 0,05	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s.
Formación Guaduas (KPgg)	Arcillolitas, lutitas y lodolitas con mantos de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	200 – 400 m	$10^{-5} – 10^{-2}$	< 5	S: 10^{-} – 10^{-}	**Muy Baja / Impermeable.** Protege y confina las unidades inferiores.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Clasificación Hidrogeológica	Espesor Esperado (m)	Conductividad K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Potencial y Rendimiento (Q)
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	80 – 150 m	$1{,}0 - 8{,}0$	$50 - 400$	$S: 10^{-} - 10^{-}$	**Alta (Principal reservorio).** Excelente transmisividad y calidad. $Q: 10{,}0 - 30{,}0$ L/s.
Formación Plaeners (Ksgpl)	Liditas, cherts y limolitas silíceas fracturadas.	Acuífero confinado de productividad media, porosidad secundaria (liditas fracturadas)	Hasta 93 m	$0{,}5 - 4{,}0$			**Media.** Liditas fracturadas; caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.

11.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

Como complemento al modelo hidrogeológico conceptual, se propone un programa de exploración orientado a validar la presencia, continuidad y productividad de los acuíferos profundos del Grupo Guadalupe y de los acuíferos someros cuaternarios, así como a precisar la influencia de la estructura sinclinal y de las fallas inversas en la circulación del agua subterránea.

En primer lugar, se recomienda realizar una geología detallada de campo a escala 10.000 o mayor si se puede, enfocada en la verificación de contactos litológicos, continuidad de las unidades arenosas del Grupo Guadalupe y caracterización de zonas de fracturamiento asociadas a lineamientos estructurales. Este levantamiento permitirá precisar la geometría local de los flancos anticlinales y sinclinales, así como la influencia de la Falla de Guatavita en la conectividad hidráulica.

De manera complementaria, se desarrollará un inventario exhaustivo de captaciones y manantiales, registrando su ubicación, caudal, estacionalidad, tipo de surgencia y vulnerabilidad frente a actividades antrópicas. Esta información es esencial para identificar zonas de descarga, evaluar la interacción entre aguas superficiales y subterráneas y establecer restricciones para futuras obras o intervenciones en el territorio.

Adicionalmente a lo anterior, se sugiera hacer lo siguiente:

Zona A, flanco noroccidental / borde de afloramiento Pozos de captación directa para interceptar las areniscas de Labor y Tierna (Ksglt) en condición de acuífero libre fracturado, a profundidades moderadas (100 a 200 m). En esta zona se recomienda:

- Geología detallada de campo para cartografiar contactos y zonas de fracturamiento.
- Sondeos exploratorios y pruebas de bombeo de corta y larga duración para estimar K, T y S.

Zona B, sector central / eje del sinclinal Perforaciones de alta profundidad (>350 m) dirigidas a captar el reservorio del Grupo Guadalupe bajo la cobertura confinante de la Formación Guaduas. En este dominio se sugiere:

- Levantamientos geofísicos (Magnetometría y Sísmica de Reflexión) para definir espesores de Guaduas y posición del techo del Guadalupe.
- Ensayos hidráulicos en pozos profundos para evaluar el comportamiento confinado y la respuesta a explotación sostenida.

Zona C, flanco sudoriental / trazas de falla inversa Sondeos orientados a evaluar la zona de deformación alrededor del km 7,5, con el objetivo de captar aguas en la zona de alta porosidad secundaria generada por el cabalgamiento. Se recomienda:

- Perfilaje geofísico en pozo (eléctrico, gamma) y pruebas de bombeo escalonadas para caracterizar la conectividad de las fracturas.
- Monitoreo piezométrico para evaluar gradientes y posible comportamiento de corredor preferencial de flujo.

Con la ejecución de estas actividades, el municipio de Tocancipá dispondrá de un modelo hidrogeológico validado en campo, con zonas de captación priorizadas y criterios técnicos claros para la gestión sostenible del recurso subterráneo.

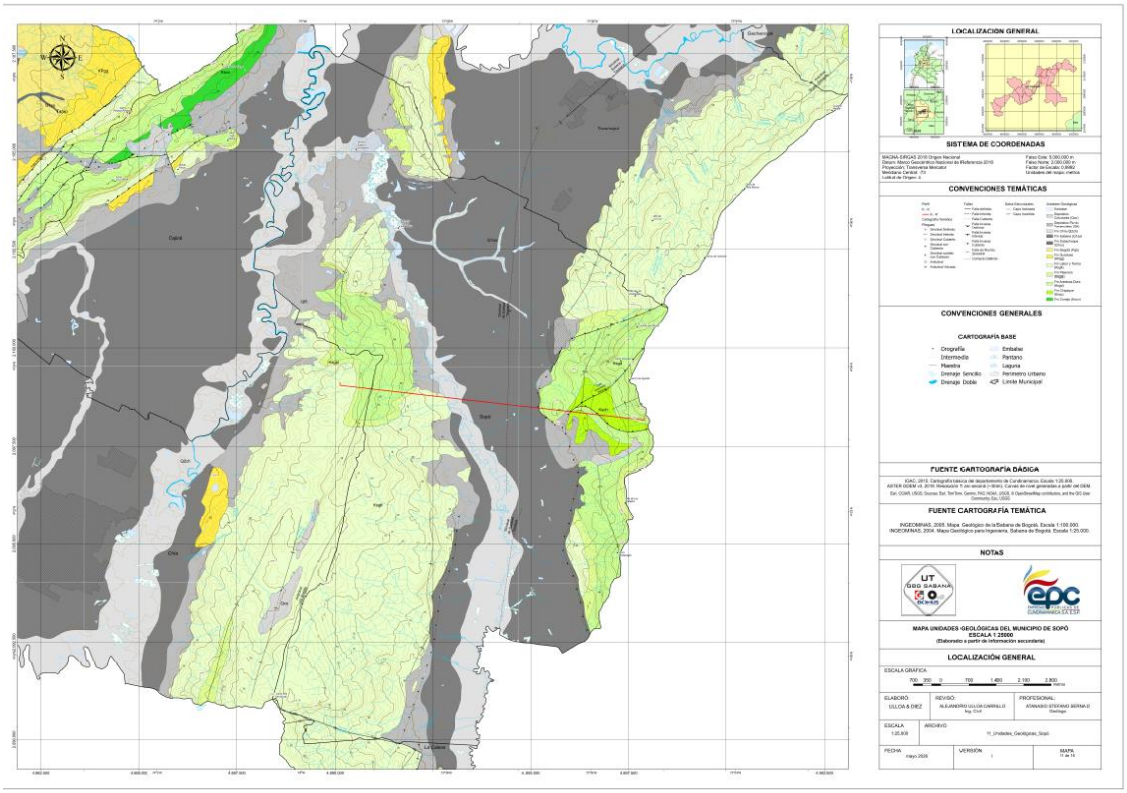
12 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE SOPÓ

El municipio de Sopó se localiza en la provincia Sabana Centro (departamento de Cundinamarca), sobre la cuenca media del río Bogotá y la subcuenca del río Teusacá. Presenta un relieve compuesto por un valle plano fluvio-lacustre en la franja central flanqueado por altos topográficos y serranías en sus extremos oriental y occidental, con altitudes que oscilan entre los 2.550 y 3.000 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío y seco a moderadamente húmedo, con temperaturas promedio entre 12 °C y 14 °C y una precipitación media anual de 750 a 950 mm con régimen bimodal.

12.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La secuencia estratigráfica expuesta y subsuperficial abarca unidades comprendidas desde el Cretácico Superior hasta el Cuaternario:

- Depósitos Inconsolidados Neógeno-Cuaternarios, Formaciones Sabana (Q1sa), Tilatá (NgQt) y Aluviales (Qal): Relleno heterogéneo constituido por arcillas lacustres, limos, gravas, arenas y niveles de turba en el valle central del río Bogotá y la cuenca del Teusacá.
- Secuencia Paleógena, Formaciones Bogotá (Pgb), Cacho (Pgc) y Guaduas (KPgg): Potente conjunto lutítico y pelítico con capas de carbón (KPgg, Pgb), intercalado con bancos permeables de areniscas cuarzosas de ambiente fluvio-deltaico de la Formación Cacho (Pgc).
- Secuencia Cretácica Superior (Grupo Guadalupe (Ksg)): Aflora ampliamente en los escarpes orientales (Cerro Pionono). Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd), compuestas por areniscas cuarzosas masivas, liditas silíceas y cherts altamente fracturados.



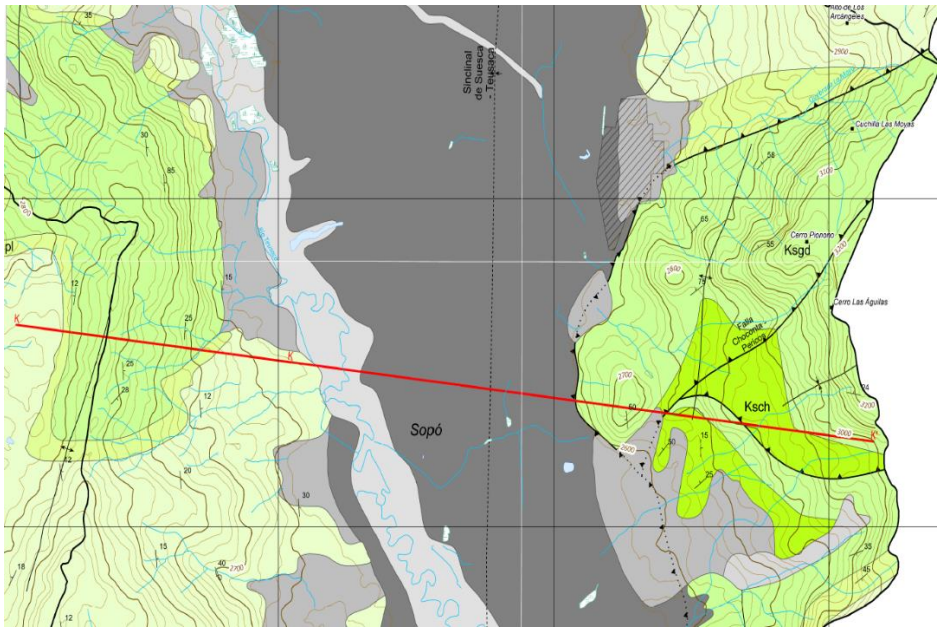


Figura 16. Mapa geológico del sector de Sopó y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

12.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

El control hidrogeológico está gobernado por el Sinclinal de Teusacá–Sopó y el Anticlinal del Cerro Pionono, afectados por fallas de cabalgamiento inversas N-S a NNE-SSW:

1. Sector Oriental (Cerro Pionono, flanco levantado): Constituye una potente estructura anticlinal donde afloran las areniscas cuarzosas fracturadas y liditas del Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd). Representa la zona principal de recarga autóctona regional, donde la alta densidad de fracturamiento facilita la infiltración profunda.
2. Depresión Sinclinal Central (Valle de Sopó–Teusacá): Zona tectónicamente deprimida donde la Formación Cacho (Pgc) y el Grupo Guadalupe quedan confinados bajo los potentes paquetes arcillosos de Guaduas (KPgg), Bogotá (Pgb) y la Formación Sabana (Q1sa). Genera un reservorio confinado a artesiano de gran interés para perforación profunda.
3. Sistemas de Fallas Inversas (Falla de Sopó / Chocontá): Trazas con vergencia oriental/occidental que comprimen el paquete sedimentario, generando tramos de intensa permeabilidad secundaria en zonas de daño o actuando como barreras hidráulicas transversales contra el flujo regional.

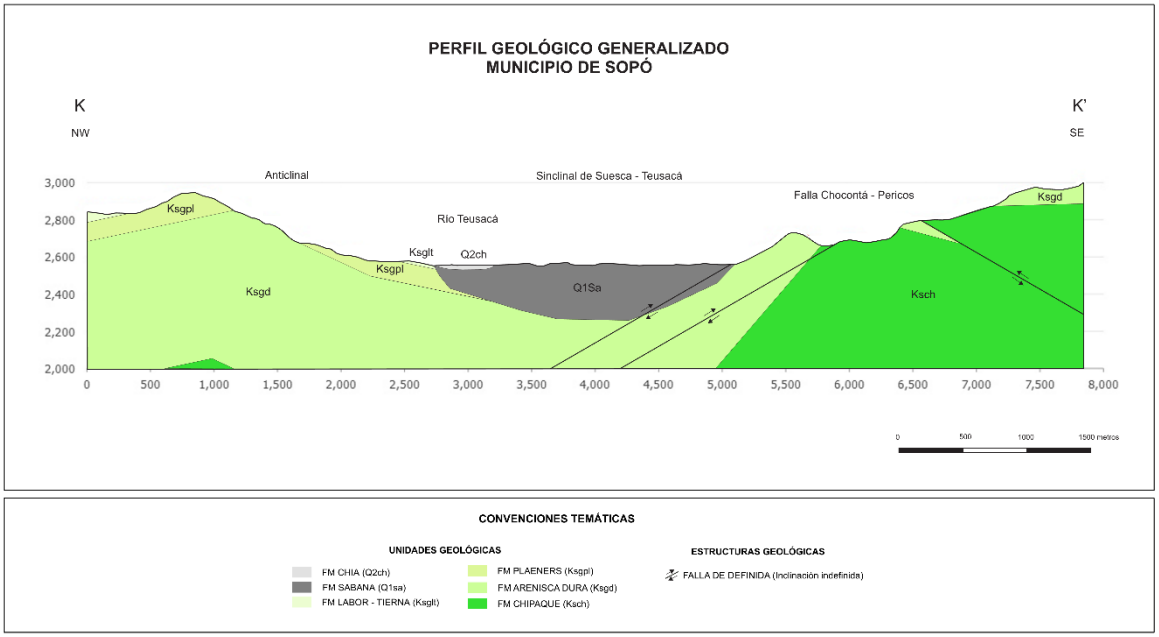


Figura 17. Corte geológico interpretativo del municipio de Sopó, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

12.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El municipio de Sopó cuenta con un sistema acuífero multicapa, diferenciando niveles porosos someros de productividad baja a moderada y potentes acuíferos fisurados profundos.

Tabla 14. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Sopó.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Formación Sabana / Chía (Q1sa, Q2ch)	Arcillas plásticas, limos, turbas y lentes delgados de arena/grava.	Acuífero semiconfinado de productividad variable, porosidad primaria; comportamiento variable según facies. La Formación Chía es una cobertura delgada sin interés como acuífero	> 80 m en el eje del valle	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s.
Formación Labor y Tierna / Plaeners (Ksglt, Ksgpl)	Areniscas cuarzosas, liditas, cherts y limolitas silíceas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	100 – 250 m	Alta a Media. Elevada porosidad secundaria por diaclasado y alto rendimiento.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso de alta compactación.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 300 m	Alta. Principal unidad reservorio del municipio, de gran extensión y capacidad de almacenamiento.
Formación Chipaque (Ksch)	Lutitas y lodolitas oscuras laminadas.	Acuífugo; piso del sistema	> 400 m	Muy Baja. Actúa como barrera impermeable inferior del sistema.

12.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelo hidrogeológico del municipio de Sopó se construye a partir de la integración del marco geológico local, la configuración estructural del Sinclinal Teusacá–Sopó y del Anticlinal del Cerro Pionono, así como de la distribución de unidades permeables e impermeables que controlan la circulación del agua subterránea en el territorio. Este modelo permite comprender la dinámica de recarga, almacenamiento y descarga del sistema acuífero multicapa que caracteriza la región.

El sistema hidrogeológico está dominado por dos grandes dominios: (i) un acuífero somero poroso, alojado en los depósitos cuaternarios de la Formación Sabana y Chía, y (ii) un acuífero profundo fisurado, alojado en las areniscas cuarzosas del Grupo Guadalupe. La

cobertura arcillosa de las Formaciones Bogotá y Guaduas actúa como un potente acuitardo que confina los acuíferos profundos y segmenta el flujo regional

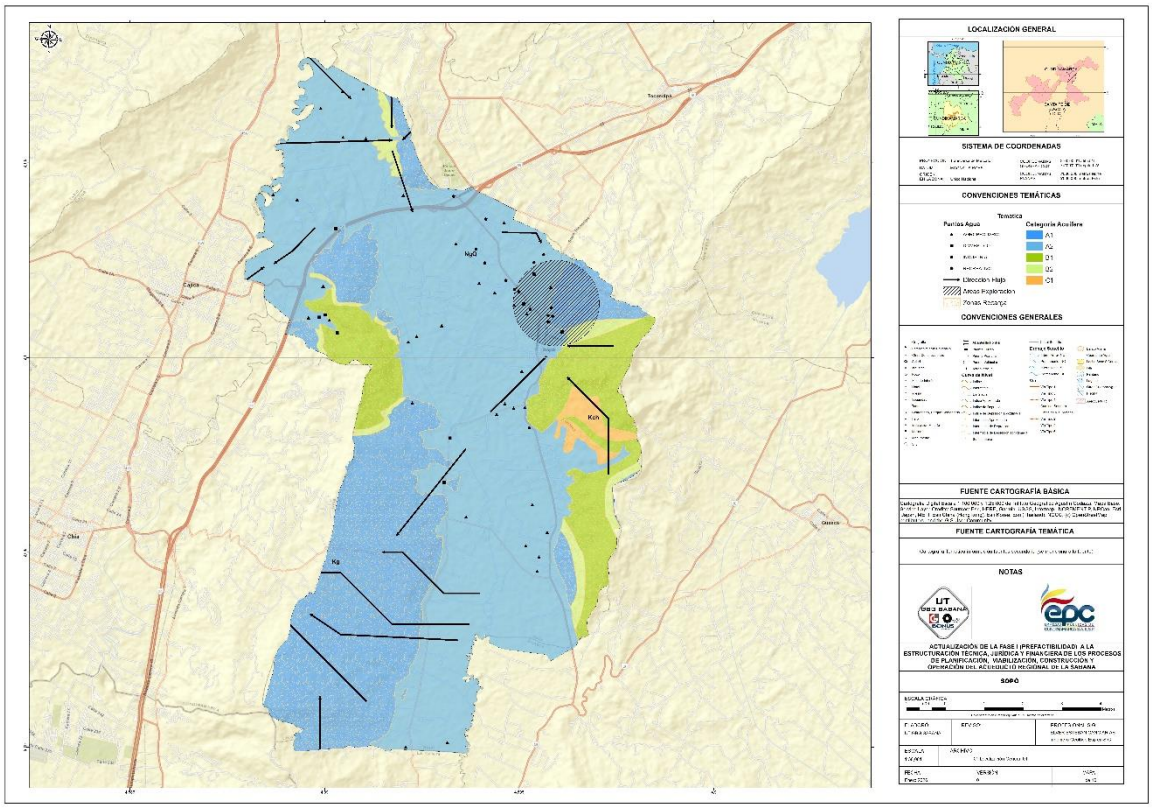


Figura 18. Mapa hidrogeológico del municipio de Sopó, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

En el flanco oriental, el Anticlinal del Cerro Pionono expone las areniscas fracturadas de Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura, constituyendo la principal zona de recarga autóctona del sistema. La elevada densidad de fracturamiento y la topografía montañosa favorecen la infiltración profunda y la alimentación directa del acuífero fisurado. Desde esta zona elevada, el flujo subterráneo se dirige hacia el valle central siguiendo gradientes hidráulicos controlados por la estructura plegada.

La depresión sinclinal central, correspondiente al valle de Sopó–Teusacá, funciona como una zona de acumulación y confinamiento. Aquí, las unidades permeables del Grupo Guadalupe y los bancos arenosos de la Formación Cacho quedan sepultados bajo espesores significativos de arcillolitas y lutitas de Guaduas y Bogotá, así como bajo el relleno lacustre de la Formación Sabana. Este arreglo estratigráfico genera un acuífero profundo confinado a artesiano, con potencial para captaciones de alto rendimiento mediante perforaciones profundas.

El sistema está además influenciado por fallas inversas de rumbo N–S a NNE–SSW, entre ellas la Falla de Sopó / Chocontá, que introducen discontinuidades en la conectividad

hidráulica. En algunos sectores, estas fallas generan zonas de daño con fracturación intensa y permeabilidad secundaria elevada, actuando como corredores preferenciales de flujo. En otros casos, la presencia de material cataclástico puede comportarse como barrera hidráulica, segmentando el sistema y generando diferencias de nivel piezométrico entre bloques estructurales.

La interacción entre litología, estructura y topografía determina un flujo subterráneo que se inicia en las zonas elevadas del Cerro Pionono, desciende hacia el valle central y descarga en sectores donde las unidades permeables afloran o son interceptadas por la red de drenaje superficial del río Teusacá y sus tributarios. Los manantiales presentes en las laderas y escarpes corresponden a puntos de descarga local del acuífero profundo o a surgencias someras asociadas a lentes arenosos dentro de la Formación Sabana.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Sopó revela un sistema multicapa, segmentado y estructuralmente controlado, donde la disponibilidad hídrica depende de la continuidad de las unidades permeables, la presencia de acuitardos y la influencia de fallas inversas. Este modelo constituye la base para la planificación de captaciones, la protección de zonas de recarga y la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo en el municipio.

La Tabla 15 presenta los rangos orientativos de conductividad hidráulica (K), transmisividad (T), coeficiente de almacenamiento (S) y rendimientos típicos en pozos (Q) para las principales unidades hidroestratigráficas del municipio de Tocancipá. Los valores se basan en información regional de la Sabana de Bogotá, estudios hidrogeológicos previos y el comportamiento esperado de las unidades litológicas

Tabla 15. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Sopó.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Cuaternarios / Tilatá (Qal, Q1sa, NgQt)	$0{,}05 - 2{,}0$*(matriz)* $2{,}0 - 10{,}0$*(gravas/arenas)*	$5 - 80$	S_y: $0{,}03 - 0{,}10$	$0{,}5 - 3{,}0$ L/s	Alta heterogeneidad lateral. Vulnerable a la desecación y contaminación somera.
Formación Cacho (Pgc)	$0{,}8 - 6{,}0$	$40 - 220$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$4{,}0 - 12{,}0$ L/s	Porosidad intergranular primaria. Elevada transmisividad en el eje del sinclinal.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	$0{,}1 - 3{,}0$*(matriz)* $> 6{,}0$*(zona fracturada)*	$30 - 350$*(> 500 en fallas)*	$10^{-5} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 25{,}0$ L/s	Porosidad secundaria tectónica. Principal objetivo para el acueducto municipal e industrias.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formaciones Bogotá y Guaduas (Pgb, KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	$10^{-5} - 10^{-4}$		

12.5 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA CONVENIO EPC-CAR

La evaluación hidrogeológica realizada en los predios *El Bosque* y *Planta de Tratamiento de Agua Potable* del municipio de Sopó, en el marco del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024, permitió validar y complementar el modelo hidrogeológico conceptual mediante la integración de información geológica, estructural, geoeléctrica, magnetotelúrica y litológica proveniente de pozos existentes.

Los resultados confirman la presencia de un sistema acuífero multicapa, donde un acuífero somero poroso de baja productividad se superpone a un acuífero profundo fisurado de alta transmisividad, controlado por la estructura sinclinal Teusacá–Sopó y por fallas inversas de rumbo norte–sur.

La geología regional está dominada por unidades sedimentarias del Cretácico Superior al Cuaternario. La Formación Chipaque constituye el acuitardo basal, mientras que la Formación Guaduas actúa como sello regional que confina los acuíferos profundos.

La Formación Cacho aporta niveles arenosos permeables intermedios, y el Grupo Guadalupe, conformado por las Formaciones Arenisca Dura, Plaeners y Labor y Tierna, representa el principal acuífero profundo del municipio, caracterizado por areniscas cuarzosas masivas y liditas fracturadas. Sobre estas unidades descansa un paquete cuaternario heterogéneo (Sabana, Tilatá y depósitos aluviales) compuesto por arcillas, limos, arenas y gravas, que conforma el acuífero somero de baja a moderada productividad.

El marco estructural está controlado por el Sinclinal Teusacá–Sopó y los anticlinales de Sopó, Bogotá y Los Puentes, todos afectados por fallas inversas que generan zonas de fracturamiento y discontinuidades hidráulicas. Estas estructuras segmentan el flujo subterráneo y condicionan la distribución de permeabilidades, creando dominios donde el acuífero profundo del Guadalupe queda confinado bajo espesores significativos de las Formaciones Bogotá y Guaduas, mientras que en los flancos anticlinales aflora fracturado y constituye la principal zona de recarga autóctona.

La integración de perfiles geoeléctricos del SGC (1996), perfiles de la CAR (2018) y tres sondeos magnetotelúricos adquiridos en 2025 permitió caracterizar la estratigrafía eléctrica del subsuelo y validar la geometría hidrogeológica. Los resultados muestran que el Cuaternario presenta espesores variables entre 12 y 120 metros, con resistividades entre 11 y 110 ohm·m, suprayaciendo las Formaciones Bogotá y Cacho, cuyos espesores oscilan entre 30 y 170 metros y presentan resistividades entre 12 y 117 ohm·m. Por debajo se identifica la Formación Guaduas con resistividades de 14 a 35 ohm·m, seguida por la Formación Labor y Tierna, cuya respuesta eléctrica (47 a 523 ohm·m) confirma la presencia de areniscas cuarzosas fracturadas de alta permeabilidad. Los perfiles geofísicos evidencian variaciones laterales importantes y resaltan la necesidad de calibrar la

interpretación con litologías de pozos, dado el principio de no unicidad inherente a los métodos SEV y MT.

La correlación litológica de perforaciones cercanas a los sondeos MT confirma la presencia de dos horizontes principales: un nivel somero compuesto por arcillas y limos con intercalaciones arenosas, y un nivel más profundo dominado por arenas con capas delgadas de limos y arcillas. Este arreglo estratigráfico coincide con la presencia de un acuífero poroso somero y un acuífero arenoso intermedio antes de alcanzar el acuífero profundo del Guadalupe.

El inventario de pozos del POMCA Río Bogotá (2019) registra 167 puntos, de los cuales el 41% se encuentran en uso, el 14% abandonados y el 16% secos. La CAR reporta 58 concesiones de aguas subterráneas en Sopó: 49 captan el Cuaternario y 9 el Grupo Guadalupe, con predominio de usos agropecuarios, domésticos e industriales. Los parámetros hidráulicos revisados en 24 pozos de Sopó y 4 de Tocancipá muestran valores de conductividad hidráulica menores a 1 m/día en sectores someros y cercanos a los MT, mientras que los valores más altos se concentran hacia el norte del municipio, donde los pozos alcanzan mayores profundidades y captan unidades fracturadas del Guadalupe. El valor más bajo registrado corresponde al pozo Hacienda El Edén (0,051 m/día), lo que confirma la heterogeneidad del sistema y la influencia de la estructura en la productividad.

Los tres sondeos magnetotelúricos adquiridos (MT1, MT2, MT3) permitieron identificar contrastes de resistividad que corroboran la presencia del paquete cuaternario somero, la secuencia Bogotá–Cacho, el acuitardo de Guaduas y el acuífero profundo del Grupo Guadalupe. En conjunto, los resultados geofísicos y litológicos validan el modelo hidrogeológico conceptual del municipio: Sopó posee un sistema multicapa donde la disponibilidad hídrica depende de la continuidad de las unidades permeables, la presencia de acuitardos y la influencia de fallas inversas. Las zonas de mayor potencial hídrico se ubican en los flancos anticlinales y en sectores donde las fallas generan porosidad secundaria, mientras que el valle central presenta baja permeabilidad y alta variabilidad litológica. Esta validación constituye un soporte técnico fundamental para la planificación de captaciones, la protección de zonas de recarga y la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo en el municipio de Sopó.

12.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

Con base en la validación geofísica y litológica realizada en el marco del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024, se propone un Programa de Exploración Complementaria orientado a reducir la incertidumbre del modelo hidrogeológico del municipio de Sopó y a precisar la continuidad, profundidad y productividad de los acuíferos someros e intermedios, así como del acuífero profundo del Grupo Guadalupe.

Este programa se fundamenta en los espesores reales identificados mediante perfiles SEV, magnetotelúrica y litología de pozos, así como en la distribución espacial de la conductividad hidráulica.

En primera instancia, se recomienda desarrollar una geología detallada de campo en los flancos del Anticlinal del Cerro Pionono y del Anticlinal de Los Puentes, donde afloran las areniscas cuarzosas fracturadas de Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura. La cartografía debe enfocarse en zonas de fracturamiento, lineamientos estructurales y contactos litológicos que controlan la recarga profunda. La evidencia magnetotelúrica

confirma que estas unidades presentan resistividades elevadas (47 a 523 ohm·m), coherentes con areniscas fracturadas de alta permeabilidad, por lo que esta zona constituye el principal objetivo para captaciones de alta productividad.

De manera complementaria, se propone actualizar y densificar el inventario de captaciones y manantiales en el valle de Sopó–Teusacá, donde los perfiles geofísicos muestran espesores variables del Cuaternario entre 12 y 120 metros y resistividades entre 11 y 110 ohm·m. Este dominio presenta acuíferos porosos someros de baja productividad y alta variabilidad lateral, lo que hace necesario identificar pozos secos, obstruidos y en uso, así como evaluar la interacción entre aguas superficiales y subterráneas. La información de concesiones indica que el 84% de las captaciones actuales explotan el Cuaternario, por lo que es fundamental evaluar su sostenibilidad.

Con base en los resultados geológicos y del inventario, se recomienda ejecutar levantamientos geofísicos complementarios, especialmente perfiles de resistividad eléctrica y sísmica de reflexión, orientados a delimitar con mayor precisión los espesores de las Formaciones Bogotá (30 a 90 m) y Cacho (85 a 170 m), así como la profundidad del techo de la Formación Guaduas (120 a 500 m). Estos métodos permitirán ubicar con mayor exactitud los puntos de perforación profunda y complementar la información magnetotelúrica existente, que ya evidencia la presencia de estas unidades y su comportamiento como acuitardos regionales.

Finalmente, se propone avanzar hacia perforaciones exploratorias someras e intermedias y perforaciones profundas en tres zonas prioritarias del municipio:

Zona A, flanco oriental (Cerro Pionono): Perforaciones de 150 a 250 m para interceptar las areniscas fracturadas del Grupo Guadalupe en condición de acuífero libre a semiconfinado. Esta zona presenta los mejores valores de conductividad hidráulica del municipio y constituye la principal área de recarga profunda. Se esperan caudales elevados y buena transmisividad.

Zona B, depresión sinclinal central (valle de Sopó–Teusacá): Perforaciones profundas entre 350 y 500 m, considerando los espesores reales de Bogotá, Cacho y Guaduas antes de alcanzar el acuífero profundo del Guadalupe. Este dominio presenta condiciones de confinamiento y potencial artesiano, pero también valores de conductividad hidráulica menores a 1 m/día en sectores cercanos a los sondeos MT, por lo que la ubicación de los puntos debe ser cuidadosamente evaluada.

Zona C, sectores afectados por fallas inversas (Sopó–Chocontá y La Merced): Sondeos orientados a evaluar zonas de daño estructural donde la fracturación incrementa la permeabilidad secundaria. La evidencia geofísica confirma contrastes de resistividad asociados a estas estructuras, por lo que se espera variabilidad lateral en parámetros hidráulicos y potencial para captaciones profundas de buen rendimiento.

Las perforaciones deberán incluir perfilaje geofísico en pozo, ensayos de permeabilidad, pruebas de bombeo escalonadas y análisis hidroquímicos para diferenciar aguas someras y profundas, evaluar mezclas y determinar la calidad del recurso. La ejecución de este programa permitirá consolidar un modelo hidrogeológico de mayor precisión, optimizar la gestión del recurso hídrico subterráneo y orientar decisiones de captación, protección de zonas de recarga y planificación territorial en el municipio de Sopó.

13 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE CAJICÁ

El municipio de Cajicá se ubica en la provincia Sabana Centro (departamento de Cundinamarca), sobre la cuenca alta del río Bogotá. Presenta una morfología de cuenca plana interandina en su sector central y suavemente inclinada hacia las laderas de cerros tutelares en su sector oriental (como el Cerro Cruz Verde), con altitudes que oscilan entre los 2.550 y cerca de los 3.000 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío y seco a moderadamente húmedo, con una temperatura media anual de 13 °C a 14 °C y precipitación entre 700 y 900 mm distribuidos en un régimen bimodal.

13.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La estratigrafía local está dominada por secuencias sedimentarias del Cretácico Superior al Paleógeno, afectadas por cabalgamientos y cubiertas discontinuamente por depósitos inconsolidados del Cuaternario:

- Depósitos Coluviales y Cuaternarios (Qco): Coberturas detríticas no consolidadas compuestas por bloques, gravas, arenas y matrices lutítico-arcillosas localizadas de forma lenticular sobre las laderas.
- Secuencia Maastrichtiana a Paleógena, Formación Guaduas (KPgg): Integrada por un paquete monótono de arcillolitas, lutitas y lodolitas grises a oscuras con intercalaciones delgadas de areniscas y estratos de carbón.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Conformada por las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a alternancias de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, liditas, cherts y limolitas silíceas.
- Secuencia del Cretácico Inferior a Superior, Formación Conejo (Kscn): Conjunto laminado de lutitas, lodolitas y limolitas oscuras que aflora intercalado por repetición tectónica.

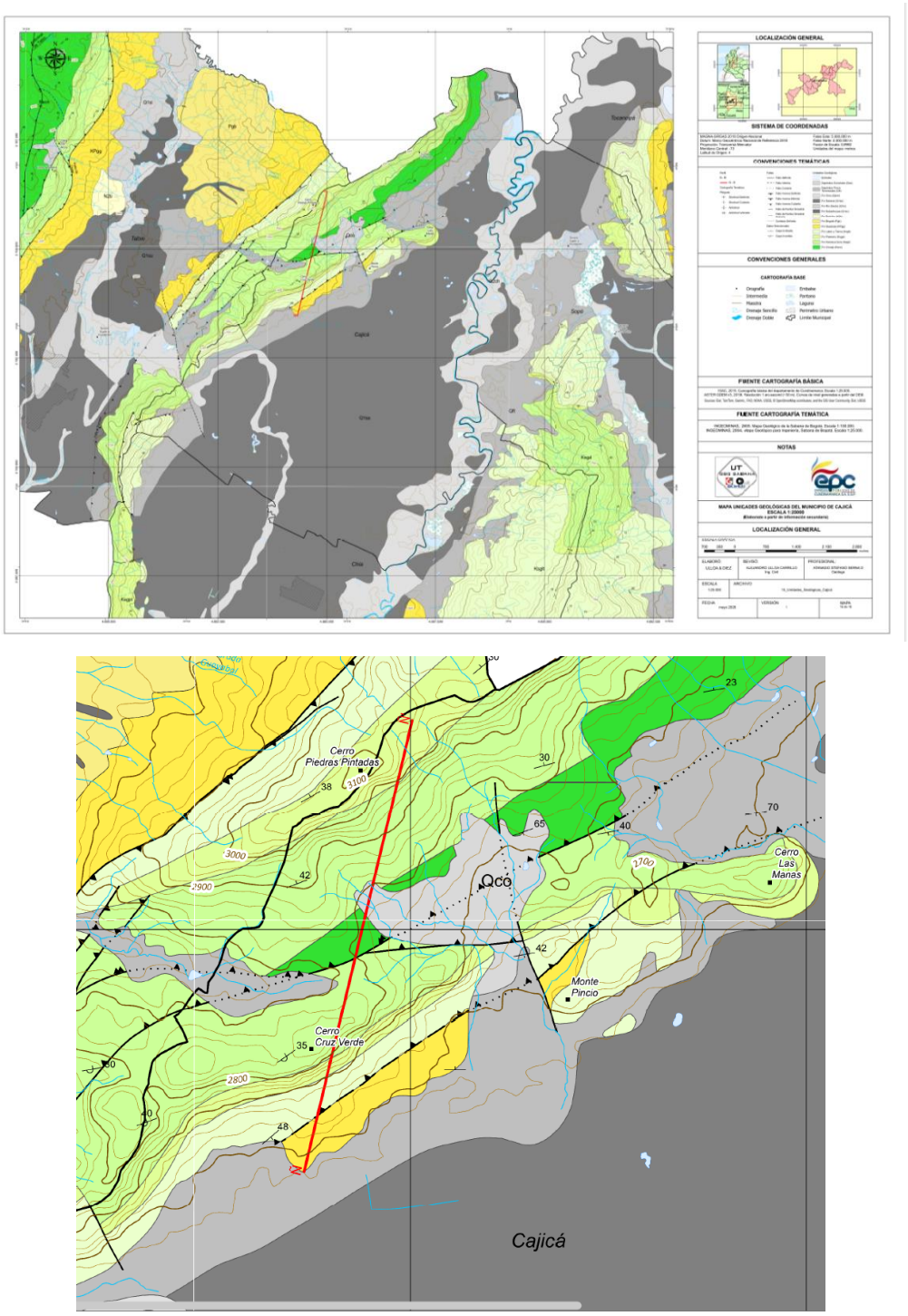


Figura 19. Mapa geológico del sector de Cajicá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

13.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría del subsuelo de Cajicá se caracteriza por una disposición monoclinal fuertemente afectada por un sistema de Falla de Cabalgamiento Inferida de rumbo aproximado SSW a NNE.

En el Perfil Geológico Generalizado $\tilde{N} - \tilde{N}'$ (extensión aproximada de 3,0 km con orientación SSW a NNE, cotas 2.000 a 3.000 m s. n. m.), se observan las siguientes relaciones tectono-estratigráficas:

- Sector Suroccidental (SSW, 0 a 1,0 km): Presencia del bloque infrayacente ocupado por la Formación Guaduas (KPgg), el cual es cortado y sobrecabalgado por una Falla Inferida inclinada suavemente hacia el NNE/NE. Sobre la traza de la falla se observa un reducido escama de la Formación Labor y Tierna (Ksglt).
- Bloque Cabalgante Central (1,0 a 1,7 km): Corresponde al bloque superior montante formado por la Formación Arenisca Dura (Ksgd) que engloba o aprisiona un potente paquete de la Formación Conejo (Kscn). La intensa cizalla en esta zona favorece el fracturamiento secundario en los niveles duros de Ksgd.
- Sector Nor-Noreste (NNE, 1,7 a 3,0 km): Aflora la Formación Arenisca Dura (Ksgd) sobre la cual yace en concordancia estratigráfica la Formación Plaeners (Ksgpl), conformando las cotas más altas del relieve (Cerro Cruz Verde, ~3.000 m s. n. m.). En la escotadura del relieve (km 1,8) se aprecian coberturas de Depósitos Coluviales (Qco).

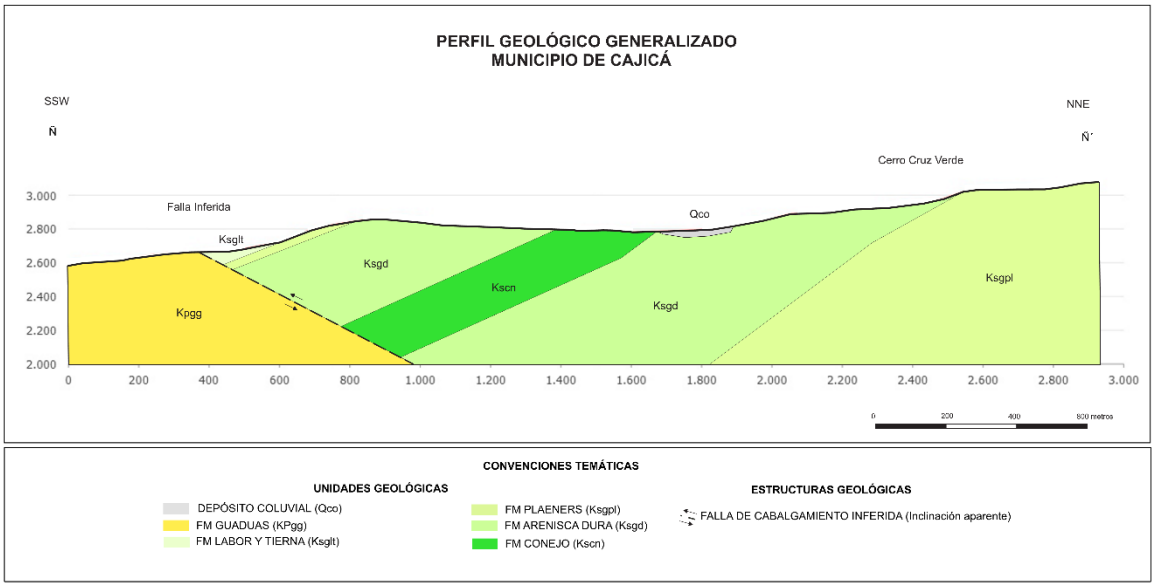


Figura 20. Corte geológico interpretativo del municipio de Cajicá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

13.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Cajicá exhibe una clara distinción entre unidades de muy baja permeabilidad (sellos/acuitardos) y unidades rocosas de alta capacidad de transmisión por permeabilidad secundaria.

Tabla 16. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Cajicá.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Depósitos Coluviales (Qco)	Bloques, gravas y arenas en matriz limosa/arcillosa.	Acuitardo local, porosidad primaria; libre	Localizado (5 – 15 m)	**Baja a Media**. Rendimiento local condicionado a temporadas de lluvia.
Formación Guaduas (KPgg)	Arcillolitas, lutitas y mantos de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	> 200 m	**Muy Baja**. Impermeable; limita el flujo subterráneo vertical.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas granulares.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	Retazo tectónico delgado	**Media a Alta**. Buen reservorio pero de extensión limitada en el corte.
Formación Arenisca Dura / Plaeners (Ksgd, Ksgpl)	Areniscas cuarzosas gruesas, liditas y limolitas silíceas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 300 m	**Alta**. Acuífero fisurado de gran transmisividad y rendimiento en zonas fracturadas.
Formación Conejo (Kscn)	Lutitas y lodolitas oscuras laminadas.	Acuitardo con acuíferos locales, porosidad secundaria; base del sistema	Intercalado tectónicamente	**Baja a Muy Baja**. Actúa como barrera o sello dentro del bloque de Ksgd.

13.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelo hidrogeológico del municipio de Cajicá se estructura a partir de la interacción entre su marco estratigráfico cretácico–paleógeno, la configuración tectónica de cabalgamientos inferidos y la presencia de coberturas cuaternarias discontinuas que controlan la infiltración, la recarga y la circulación del agua subterránea. La disposición de las unidades litoestratigráficas y su grado de fracturamiento determinan la existencia de dos sistemas contrastantes: un conjunto de acuíferos fisurados profundos asociados al Grupo

Guadalupe y un sistema somero poroso de baja continuidad ligado a depósitos coluviales y cuaternarios.

En términos geomorfológicos, Cajicá corresponde a una cuenca interandina plana en su sector central, con inclinación suave hacia los cerros tutelares del oriente, particularmente el Cerro Cruz Verde, donde afloran las unidades arenosas más competentes del Grupo Guadalupe. Esta configuración topográfica favorece la recarga en los flancos elevados y la descarga en el valle central, donde se concentran los nacimientos y zonas de saturación somera.

La arquitectura hidrogeológica está fuertemente condicionada por una estructura monoclinal afectada por un sistema de Falla de Cabalgamiento Inferida con rumbo SSW–NNE. En el sector suroccidental, la Formación Guaduas (KPgg), compuesta por arcillolitas y lutitas, actúa como un acuitardo regional que limita el flujo vertical y constituye el basamento hidrogeológico del sistema. Sobre ella cabalga un retazo tectónico de la Formación Labor y Tierna (Ksglt), cuya naturaleza arenosa granular le confiere permeabilidad secundaria, aunque su extensión es reducida. Hacia el centro del perfil, la Formación Arenisca Dura (Ksgd) conforma el bloque cabalgante principal, aprisionando un paquete tectónicamente repetido de la Formación Conejo (Kscn), la cual funciona como sello interno. La intensa cizalla en este bloque genera fracturamiento secundario en Ksgd, incrementando su transmisividad y convirtiéndola en el acuífero profundo más importante del municipio. En el sector nororiental, la continuidad estratigráfica entre Arenisca Dura (Ksgd) y Plaeners (Ksgpl) conforma las cotas más elevadas del relieve y constituye la principal zona de recarga del sistema fisurado.

Sobre este marco estructural se disponen coberturas coluviales y cuaternarias (Qco), de espesor reducido y distribución lenticular, que conforman acuíferos porosos someros de baja productividad, con respuesta directa a la estacionalidad de lluvias. Estos depósitos permiten la infiltración inicial, pero su capacidad de almacenamiento es limitada y su continuidad lateral es baja, por lo que no constituyen un acuífero municipal significativo.

La integración de las unidades hidrogeológicas permite reconocer tres niveles funcionales dentro del sistema: (i) un nivel somero poroso, discontinuo y de baja permeabilidad, restringido a depósitos coluviales y cuaternarios; (ii) un nivel intermedio de permeabilidad moderada asociado a retazos tectónicos de Labor y Tierna (Ksglt), cuya productividad depende del grado de fracturamiento; y (iii) un acuífero profundo fisurado de alta transmisividad, desarrollado en las areniscas cuarzosas de Arenisca Dura y Plaeners (Ksgd–Ksgpl), que constituye el principal reservorio subterráneo del municipio. La Formación Conejo (Kscn) y la Formación Guaduas (KPgg) actúan como acuitardos regionales, segmentando verticalmente el flujo y confinando los niveles permeables superiores.

El flujo subterráneo se organiza desde las zonas de recarga ubicadas en los flancos nororientales y orientales del municipio, donde las unidades permeables del Grupo Guadalupe afloran y presentan mayor fracturamiento, hacia el valle central, donde se concentran las zonas de descarga natural. La presencia de fallas inferidas y variaciones en el buzamiento genera corredores preferenciales de flujo y zonas de cierre hidráulico, lo que explica la heterogeneidad espacial en la productividad de pozos y nacimientos.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Cajicá describe un sistema dominado por acuíferos fisurados profundos de alta capacidad de transmisión, confinados por unidades

arcillosas y lodolíticas, y complementado por acuíferos someros de baja continuidad. Esta configuración es coherente con la geología regional de la Sabana de Bogotá y constituye la base para la planificación de captaciones, la evaluación de disponibilidad hídrica y la gestión sostenible del recurso subterráneo en el municipio.

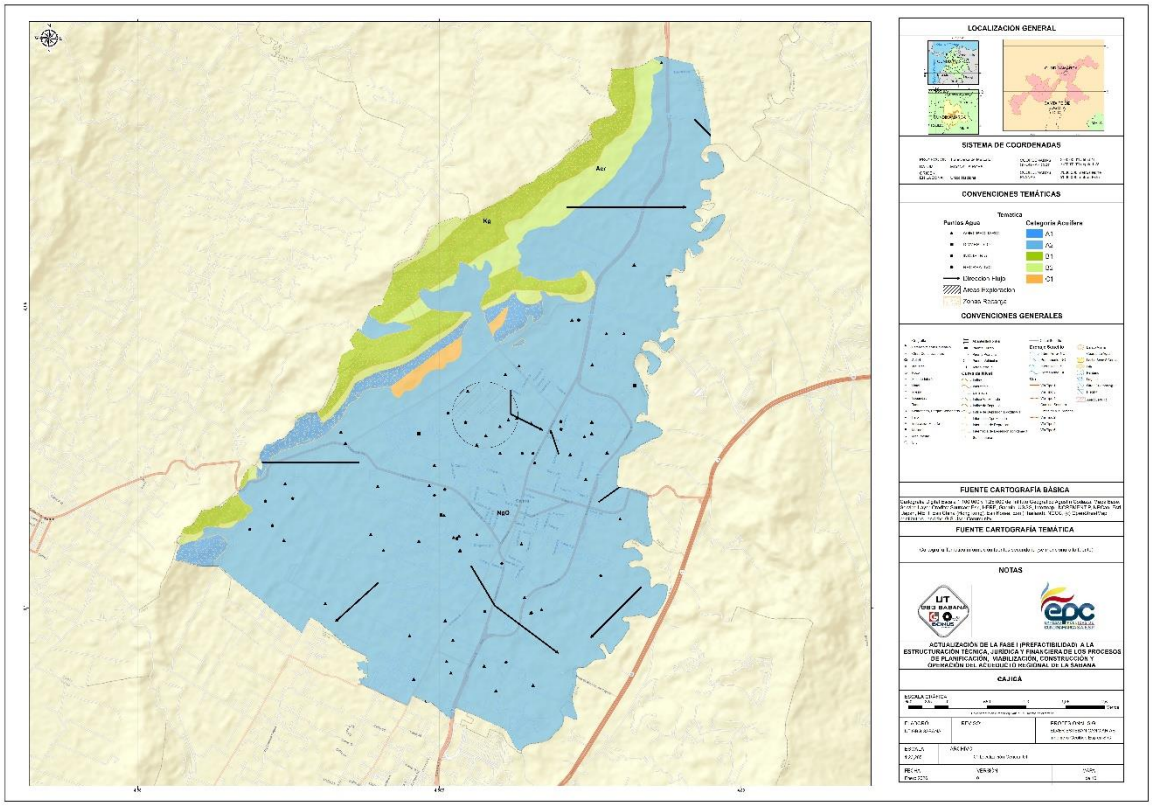


Figura 21. Mapa hidrogeológico del municipio de Cajicá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 17. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Cajicá.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Coluviales (Qc)	$0{,}1 - 2{,}0$	$1 - 15$	S_y: $0{,}02 - 0{,}08$	$0{,}2 - 1{,}0$ L/s	Acuíferos colgados y coluvios de ladera. Alta dependencia estacional.
Formación Guaduas (KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	S: $10^{-5} - 10^{-4}$	$< 0{,}5$ L/s	Sello impermeabilizante regional que confina los niveles inferiores de Guadalupe.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	$0{,}8 - 4{,}0$	$20 - 150$	$S: 10^{-4} - 10^{-3}$	3,0 – 10,0 L/s	Buena transmisividad intergranular/fisurada, limitada por su espesor tectónico.
Formación Arenisca Dura / Plaeners (Ksgd, Ksgpl)	0,1 – 2,5*(matriz)* > 6,0*(fracturas)*	$30 - 300$*(> 400 en brecha de falla)*	$S: 10^{-5} - 10^{-3}$	8,0 – 25,0 L/s	Reservorio fracturado principal. Elevado rendimiento favorecido por diaclasado tectónico.
Formación Conejo (Kscn)	$< 10^{-4}$	< 1	N/A	Nulo a muy bajo	Acuitardo tectónico intercalado que interrumpe la continuidad hidráulica.

13.5 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL CONVENIO EPC-CAR

Los dos estudios realizados en Cajicá, Predio Champiñón y Predio Escuela Quebrada del Campo, se desarrollan dentro del Convenio CAR-3121-2024 y comparten el mismo marco geológico regional: una secuencia sedimentaria del Cretácico superior al Cuaternario, afectada por fallas inversas (El Porvenir, Zipaquirá) y pliegues suaves con rumbo NE–SW.

Ambos predios se ubican sobre Depósitos de Terraza Alta (Qta), que constituyen el relleno cuaternario de la Sabana de Bogotá, y están delimitados por estructuras mayores que controlan la geometría del subsuelo y la profundidad de las unidades permeables del Grupo Guadalupe.

En ambos estudios se confirma que el relleno cuaternario tiene espesores entre 100 y 130 m, bajo los cuales infrayacen las arcillolitas y lodolitas de la Formación Guaduas, con espesores aproximados de 250 m, actuando como un acuitardo regional. Por debajo de Guaduas se encuentran las areniscas del Grupo Guadalupe, que constituyen el acuífero profundo más importante del municipio. Los documentos señalan que “las rocas del Grupo Guadalupe se encuentran a profundidades de 100 metros… hacia el norte del sondeo MT”, mientras que hacia el sur y suroccidente se profundizan hasta 350 a 450 m, con menor plegamiento.

Los perfiles del estudio SGC-1996, utilizados en ambos predios, muestran que la profundidad del acuífero profundo aumenta hacia el sur y suroccidente, lo que coincide con la ubicación de los predios evaluados. En Champiñón, el sondeo MT se ubica a 300 a 350 m de los perfiles y confirma que las areniscas del Guadalupe se encuentran por debajo de los 100 m. En Escuela Quebrada del Campo, el sondeo MT se ubica más lejos (750 a 1980 m de los perfiles), pero la interpretación es coherente: el acuífero profundo se encuentra entre 100 y 450 m, dependiendo de la posición respecto a la Falla de Zipaquirá y el Anticlinal de Bogotá.

El inventario hidrogeológico del POMCA evidencia que Cajicá tiene 284 puntos de agua, de los cuales 132 pozos están en uso y 99 abandonados, sin presencia de aljibes ni manantiales. La explotación se concentra en los depósitos cuaternarios y en pozos profundos de 70 a 140 m, con caudales entre 0,1 y 3 L/s en Qta y hasta 4 L/s en Labor y Tierna. Las concesiones cercanas a ambos predios muestran caudales bajos (≤1 L/s) y litologías dominadas por arenas, arcillas y limos hasta ~100 m, seguidas por areniscas finas del Guadalupe, lo que confirma la presencia de un acuífero profundo pero con acceso limitado por la profundidad y la presencia del acuitardo Guaduas.

En síntesis, los dos estudios concluyen que los predios Champiñón y Escuela Quebrada del Campo se encuentran sobre un sistema hidrogeológico dominado por depósitos cuaternarios de baja permeabilidad y por un acuífero profundo fisurado del Grupo Guadalupe, cuya profundidad varía entre 100 y 450 m según la posición estructural. El acuífero profundo existe, pero su accesibilidad es limitada y su explotación requiere perforaciones profundas y pruebas hidráulicas específicas. Ambos estudios coinciden en que el potencial hidrogeológico es moderado a bajo en los niveles someros, y dependiente del acceso al acuífero profundo en los niveles mayores.

13.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El modelo hidrogeológico de Cajicá se consolida como un sistema estratificado y estructuralmente controlado, donde la circulación subterránea depende de la interacción entre los depósitos cuaternarios de terraza, las unidades arcillosas de la Formación Guaduas y los acuíferos fisurados profundos del Grupo Guadalupe. Los dos estudios recientes, Predio Champiñón y Predio Escuela Quebrada del Campo, permiten refinar la geometría del subsuelo y confirmar la profundidad y continuidad de las unidades acuíferas regionales.

En ambos predios del convenio EPC-CAR se verificó que el relleno cuaternario (Qta) presenta espesores entre 100 y 130 m, compuesto por arenas, limos y arcillas de baja permeabilidad. Los documentos señalan que “el Perfil A-A’ presenta en profundidad el relleno cuaternario con un espesor de 100 metros aproximadamente”, lo cual coincide con la interpretación regional previa. Este nivel constituye un acuífero somero poroso, discontinuo y con productividad limitada, dependiente de la estacionalidad y de la presencia de lentes arenosas locales.

Por debajo del relleno cuaternario infrayace la Formación Guaduas (KPgg), con espesores cercanos a 250 m, caracterizada por arcillolitas y lodolitas que actúan como un acuitardo regional. Ambos estudios confirman su rol como sello hidrogeológico: “infrayacen rocas de la Formación Guaduas con un espesor aproximado de 250 metros”, restringiendo el flujo vertical y confinando los niveles permeables superiores. Esta unidad segmenta el sistema y explica la baja productividad de pozos que no alcanzan las areniscas profundas

.

El acuífero profundo principal se desarrolla en las areniscas cuarzosas del Grupo Guadalupe (Ksgd, Ksgpl, Ksglt), cuya profundidad varía según la posición estructural. En Champiñón, las areniscas del Guadalupe se encuentran “por debajo de los 100 metros”, mientras que en Escuela Quebrada del Campo se profundizan progresivamente hacia el sur y suroccidente, alcanzando 350 a 450 m. Esta variación confirma que el acuífero

fisurado profundo no es homogéneo: su accesibilidad depende del plegamiento y del cabalgamiento asociado a las fallas de Zipaquirá y El Porvenir.

La estructura regional, pliegues suaves NE–SW y fallas inversas, controla la geometría del acuífero profundo. En sectores donde el plegamiento es intenso, las areniscas presentan mayor fracturamiento y, por ende, mayor transmisividad. En zonas donde el plegamiento se atenúa, la permeabilidad disminuye. Los estudios indican que “hacia el sur… el plegamiento se atenúa”, lo que implica menor permeabilidad secundaria y menor rendimiento potencial.

Este modelo confirma que el potencial hidrogeológico de Cajicá depende principalmente del acceso al acuífero profundo del Grupo Guadalupe, cuya explotación requiere perforaciones profundas y pruebas hidráulicas específicas.

Con el fin de reducir la incertidumbre del modelo hidrogeológico y optimizar la identificación de zonas con potencial real de captación, se propone un Programa de Exploración Complementaria orientado a validar la geometría del acuífero profundo, caracterizar la continuidad de las unidades permeables y precisar la influencia estructural de las fallas de Zipaquirá y El Porvenir.

El programa se estructura en cuatro componentes:

Geología detallada de campo (escala 1:10.000 o mayor)

Se realizará un levantamiento geológico focalizado en los sectores donde los estudios Champiñón y Escuela Quebrada del Campo indican variación en la profundidad del Grupo Guadalupe. Este levantamiento permitirá:

- Verificar contactos litológicos y continuidad de las areniscas permeables.
- Identificar zonas de fracturamiento asociadas a fallas inversas.
- Precisar la geometría del sinclinal y del anticlinal de Bogotá.
- Delimitar áreas donde el acuífero profundo se encuentra a menor profundidad (100 a 200 m).

Inventario ampliado de captaciones y pozos profundos

Se actualizará el inventario del POMCA, incorporando:

- Profundidad real de pozos existentes.
- Caudales de explotación y estacionalidad.
- Litologías reportadas en perforaciones.
- Estado administrativo y técnico de concesiones cercanas. Los estudios muestran que “las concesiones cercanas presentan profundidades entre 70 y 140 m”, lo cual es clave para identificar corredores hidráulicos activos.

Geofísica aplicada (SEV + sísmica de reflexión)

Se ejecutarán perfiles geoeléctricos y sísmicos en zonas donde el modelo indica mayor potencial:

- Sectores donde el Grupo Guadalupe se encuentra a 100 a 200 m (norte de Champiñón).
- Zonas donde el plegamiento se atenúa y las areniscas presentan continuidad lateral (sur de Escuela Quebrada del Campo).

- Áreas próximas a la Falla de Zipaquirá, donde el fracturamiento puede aumentar la transmisividad. La geofísica permitirá estimar espesores saturados, continuidad de unidades permeables y presencia de acuitardos.

Perforaciones exploratorias someras y profundas

Con base en la geología y la geofísica, se recomienda perforar en tres zonas:

(i) Sector norte de Champiñón, donde el acuífero profundo se encuentra a ~100 m.

(ii) (ii) Sector central entre Champiñón y Escuela Quebrada del Campo, donde la profundidad del acuífero varía entre 250 a 350 m.

(iii) (iii) Sector sur-occidental, donde el plegamiento se atenúa y las areniscas del Guadalupe muestran mayor continuidad.

Las perforaciones permitirán obtener:

- Perfiles litológicos directos.
- Niveles freáticos y gradientes hidráulicos.
- Ensayos de permeabilidad y pruebas de bombeo.
- Muestras para análisis hidroquímicos y trazadores.

14 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE CHÍA

El municipio de Chía se sitúa en la provincia Sabana Centro (departamento de Cundinamarca), en el sector central de la Sabana de Bogotá sobre la cuenca del río Bogotá y su confluencia con el río Frío. Presenta una amplia topografía plana de cuenca lacustre en su zona central que contrasta con elevaciones montañosas en sus bordes oriental (Cerro de La Valvanera) y occidental, con altitudes que van desde los 2.550 hasta los 2.900 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío, con una temperatura media anual de 13 °C a 14 °C y precipitación media entre 700 y 900 mm distribuidos en un régimen bimodal.

14.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La secuencia estratigráfica de Chía está compuesta por un espeso depósito de relleno fluvio-lacustre cuaternario que ocupa el plano de inundación del río Bogotá, reposando sobre un basamento sedimentario plegado y fallado de edad Cretácica a Paleógena:

- Depósitos Cuaternarios, Formación Sabana (Q1sa), Formación Chía (Q2ch) y Depósitos Fluvio Torrenciales (Qtf): Complejo paquete arcilloso, limoso y turboso de origen lacustre que rellena la planicie central, con delgadas lentejones limosos/arenosos, bordeado por abanicos fluvio-torrenciales al pie de las laderas.
- Secuencia Maastrichtiana a Paleógena, Formación Guaduas (KPgg): Formada por una alternancia de arcillolitas, lutitas y lodolitas oscuras con delgados niveles de areniscas y capas de carbón.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a alternancias de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, liditas silíceas y limolitas altamente diaclasadas.
- Secuencia del Cretácico Inferior a Superior, Formación Conejo (Kscn): Conjunto lutítico y lodolítico basal de muy baja permeabilidad.

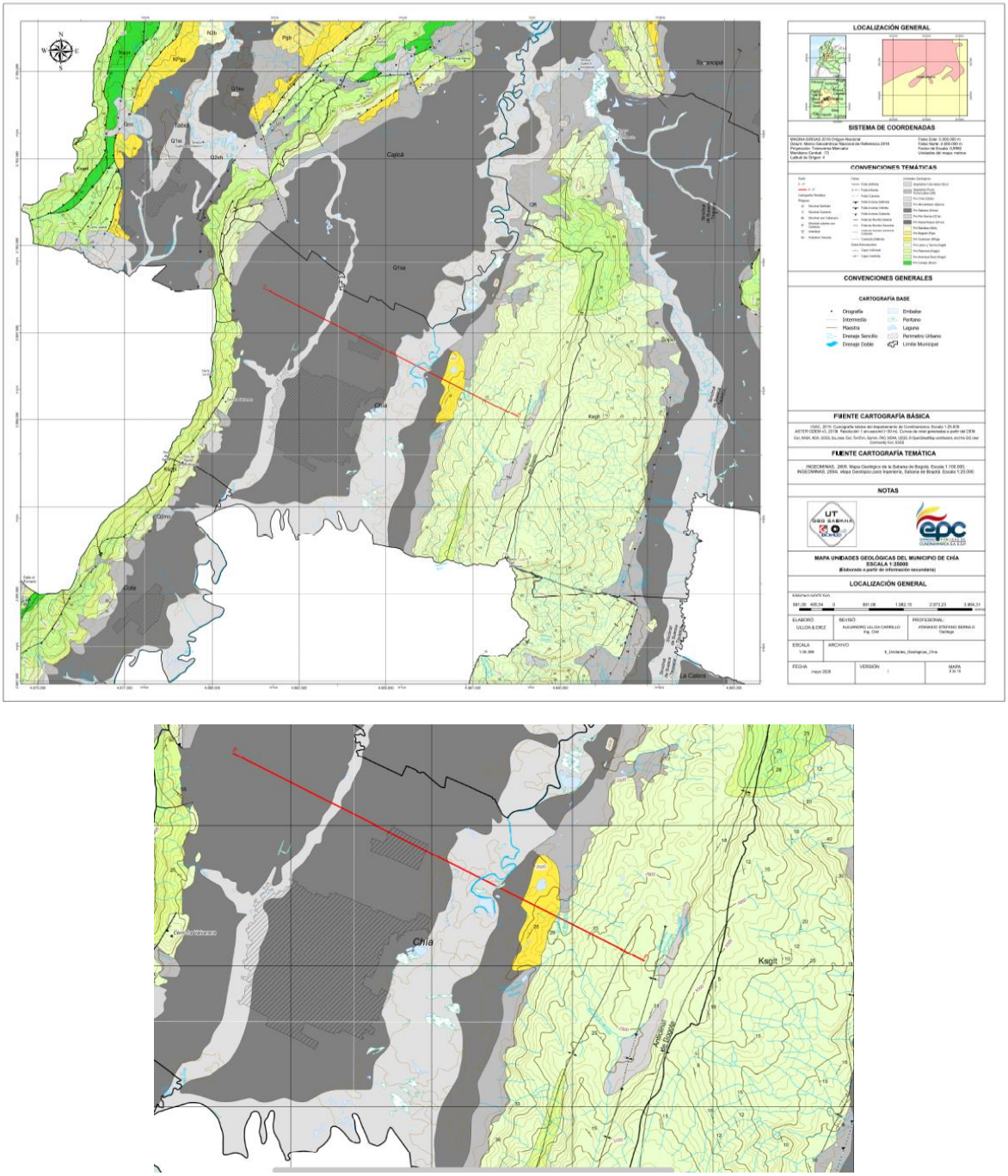


Figura 22. Mapa geológico del sector de Chía y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

14.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La arquitectura del subsuelo de Chía está gobernada por la gran depresión tectónica del Sinclinal de la Sabana, flanqueada por un bloque levantado en el sector oriental (Anticlinal) y afectada por un sistema de Falla Definida (Inclinación indefinida) en el margen noroccidental.

En el Perfil Geológico Generalizado $F - F'$ (extensión aproximada de 9,5 km orientado de NW a SE, cotas 2.000 a 3.000 m s. n. m.), se diferencian las siguientes zonas estructurales:

- Sector Noroccidental (NW, 0 a 2,0 km): Corresponde a la ladera occidental recortada por una Falla Definida que yuxtapone paquetes de la Formación Conejo (Kscn) y del Grupo Guadalupe (Ksgd, Ksgpl, Ksglt) que se hunden bajo los Depósitos Fluvio Torrenciales (Qtf) hacia el plano de la cuenca.
- Cuenca Central (2,0 a 6,5 km): Núcleo del Sinclinal ocupado por el espeso paquete arcilloso de baja permeabilidad de la Formación Sabana (Q1sa) e intercalaciones de la Formación Chía (Q2ch) en la franja del río Bogotá. Esta capa arcillosa alcanza espesores superiores a 100 m, sellando los niveles Cretácicos subyacentes.
- Sector Suroriental (SE, 6,5 a 9,5 km): Flanco ascendente de la estructura Anticlinal (Cerro de La Valvanera) donde se observa la secuencia del Cretácico inclinándose suavemente hacia la cuenca central. La Formación Guaduas (KPgg) aflora en el pie de monte, mientras que la Formación Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd) emergen en las cotas superiores (2.800 a 2.900 m s. n. m.), formando la principal franja de recarga.

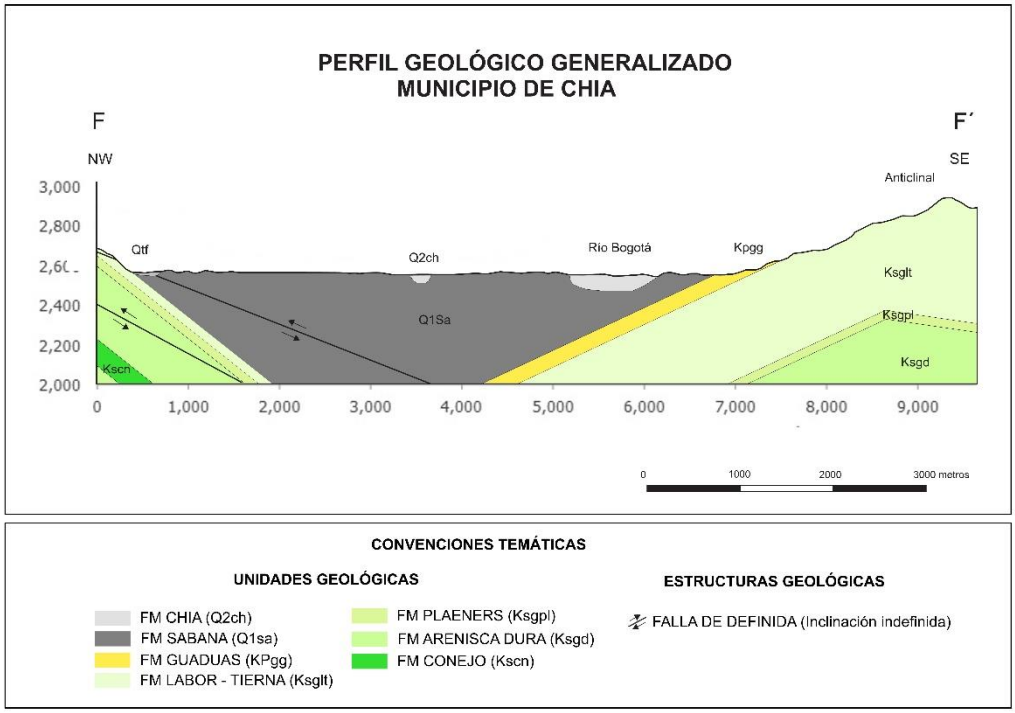


Figura 23. Corte geológico interpretativo del municipio de Chía, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

14.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Chía presenta un comportamiento dual con un acuífero poroso somero de muy bajo rendimiento en la zona plana y un acuífero fisurado profundo confinado de alta productividad dentro del Grupo Guadalupe.

Tabla 18. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Chía.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Formación Sabana / Chía / Fluvio Torrencial (Q1sa, Q2ch, Qtf)	Arcillas plásticas, limos, turbas y lentículas de arena/grava.	Acuífero semiconfinado de productividad variable, porosidad primaria; comportamiento variable según facies. La Formación Chía es una cobertura	> 100 m en el centro de la cuenca	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s. Los depósitos Qtf presentan

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
		delgada sin interés como acuífero		permeabilidad moderada.
Formación Guaduas (KPgg)	Arcillolitas, lodolitas y capas de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	150 – 300 m	**Muy Baja**. Actúa como barrera impermeable sobre el Grupo Guadalupe.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	80 – 120 m	**Alta**. Acuífero de excelente transmisividad y elevados caudales de explotación.
Formación Plaeners (Ksgpl)	Liditas, cherts y limolitas silíceas fracturadas.	Acuífero confinado de productividad media, porosidad secundaria (liditas fracturadas)	Hasta 93 m	**Media.** Liditas fracturadas; caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	Areniscas cuarzosas masivas y gruesas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 250 m	**Alta**. Reservorio profundo estratégico de gran volumen.
Formación Conejo (Kscn)	Lutitas y lodolitas oscuras laminadas.	Acuitardo con acuíferos locales, porosidad secundaria; base del sistema	N.D.	**Muy Baja**. Sello impermeable basal en el sector NW.

14.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelo hidrogeológico del municipio de Chía se estructura sobre la gran depresión tectónica del Sinclinal de la Sabana, cuyo núcleo está ocupado por un espeso paquete de sedimentos cuaternarios de origen lacustre y fluviotorrencial, que se comportan como un acuífero semiconfinado de productividad variable y confinan las unidades permeables del Cretácico.

Esta configuración genera un sistema hidrogeológico dual: un acuífero somero poroso de baja productividad en la planicie central y un acuífero profundo fisurado de alta transmisividad en los flancos montañosos, especialmente hacia el oriente, donde afloran las areniscas del Grupo Guadalupe.

La zona plana central del municipio está conformada por depósitos arcillosos, limosos y turbosos pertenecientes a la Formación Sabana (Q1sa) y la Formación Chía (Q2ch), con espesores superiores a los 100 metros. Estos materiales presentan permeabilidad muy baja y comportamiento semiconfinado a acuitardo, limitando la infiltración y restringiendo la circulación subterránea.

La presencia de lentículas arenosas y niveles fluvio-torrenciales (Qtf) en los bordes de la cuenca permite la existencia de pequeños acuíferos locales, pero su continuidad lateral es reducida y su rendimiento depende de la estacionalidad de lluvias.

Bajo este relleno cuaternario se encuentra la Formación Guaduas (KPgg), compuesta por arcillolitas, lutitas y lodolitas con capas de carbón, que actúa como un acuitardo regional. Su espesor, entre 150 y 300 metros, constituye una barrera hidráulica que confina los acuíferos profundos del Grupo Guadalupe y limita el flujo vertical entre los niveles someros y los niveles cretácicos. Esta unidad es clave para la compartimentación del sistema y explica la ausencia de pozos de alta productividad en la zona plana central.

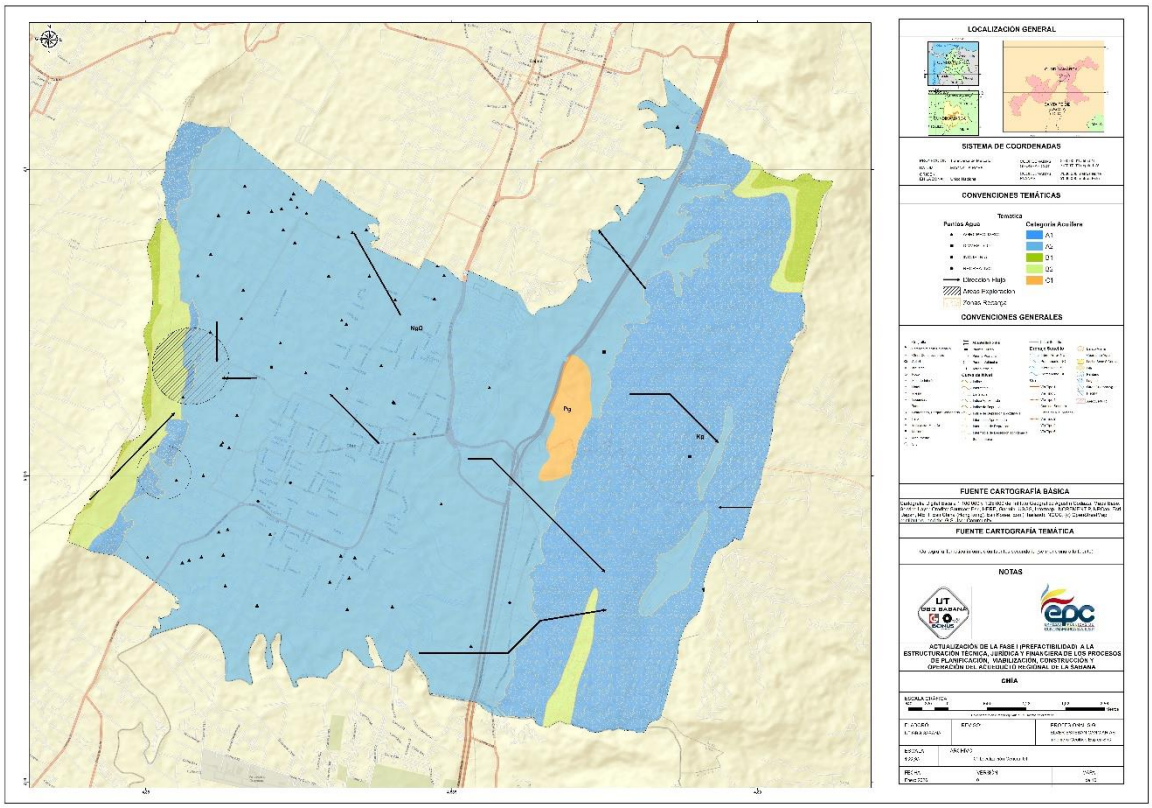


Figura 24. Mapa hidrogeológico del municipio de Chía, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

El acuífero profundo principal se desarrolla en las areniscas cuarzosas de las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd), pertenecientes al Grupo Guadalupe. Estas unidades afloran en el flanco suroriental del municipio, particularmente

en el Cerro de La Valvanera, donde constituyen la principal zona de recarga. Su naturaleza granular y su alto grado de fracturamiento tectónico les confiere una transmisividad elevada, con espesores que superan los 250 metros en el caso de la Arenisca Dura.

En estas zonas montañosas, el acuífero profundo puede comportarse como libre o semiconfinado, dependiendo del grado de fracturamiento y de la presencia de retazos tectónicos de la Formación Labor y Tierna.

La Formación Conejo (Kscn), compuesta por lutitas y lodolitas oscuras laminadas, constituye el sello basal del sistema en el sector noroccidental. Su baja permeabilidad impide la circulación profunda y delimita el espesor efectivo del acuífero fisurado.

La arquitectura hidroestructural del municipio está controlada por la inclinación suave de las unidades hacia el centro del sinclinal y por la presencia de fallas definidas en el margen noroccidental, que yuxtaponen paquetes del Grupo Guadalupe y la Formación Conejo bajo los depósitos cuaternarios. Esta configuración genera variaciones en la profundidad del acuífero profundo: en el sector noroccidental, las areniscas del Guadalupe se hunden bajo los depósitos fluvio-torrenciales; en la cuenca central permanecen confinadas bajo el espeso paquete arcilloso; y en el sector suroriental emergen en superficie, constituyendo la franja de recarga más importante del municipio.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Chía describe un sistema compuesto por:

1. Acuífero somero poroso (Q1sa, Q2ch, Qtf): discontinuo, de baja permeabilidad y limitado a zonas de borde.
2. Acuitardo regional (KPgg): unidad arcillosa que confina el sistema y restringe el flujo vertical.
3. Acuífero profundo fisurado (Ksglt, Ksgpl, Ksgd): unidad de alta transmisividad, con recarga en el flanco suroriental y potencial de explotación elevado.
4. Sello basal (Kscn): unidad lutítica de muy baja permeabilidad que delimita el sistema profundo.

Este modelo confirma que el potencial hidrogeológico de Chía se concentra en los flancos montañosos del suroriente, donde las areniscas del Grupo Guadalupe afloran y presentan mayor fracturamiento, mientras que la planicie central constituye una zona de baja productividad debido al espeso paquete arcilloso cuaternario y al acuitardo de la Formación Guaduas.

Tabla 19. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Chía.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Sabana / Chía / Fluvio-Torrencial (Q1sa, Q2ch, Qtf)	$0{,}01 - 0{,}8$*(matriz)* $1{,}0 - 5{,}0$*(lentes/abanicos)*	$1 - 25$	S_y: $0{,}01 - 0{,}06$	$0{,}5 - 2{,}5$ L/s	Predominio arcilloso lacustre con lentes lenticulares. Acuífero semiconfinado de productividad variable,

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
					condicionado a los cambios de facies.
Formación Guaduas (KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	$S: 10^{-5} - 10^{-4}$	$< 0{,}5$ L/s	Capa confinante continua de baja conductividad vertical.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	$1{,}0 - 8{,}0$	$50 - 400$	$S: 10^{-4} - 10^{-3}$	$10{,}0 - 30{,}0$ L/s	Acuífero poroso/fisurado de excelente respuesta hidráulica y alto potencial.
Formación Plaeners (Ksgpl)	$0{,}5 - 4{,}0$	$20 - 180$	$S: 10^{-4} - 10^{-3}$	Hasta 5 L/s	Permeabilidad por fracturamiento tectónico diaclasado en niveles silíceos.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $> 5{,}0$*(fracturas)*	$30 - 350$	$S: 10^{-5} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 25{,}0$ L/s	Potente reservorio profundo. Gran capacidad de almacenamiento regional.
Formación Conejo (Kscn)	$< 10^{-4}$	< 1	N/A	Nulo a muy bajo	Base o sello impermeable regional.

14.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA PARA CHÍA

Con base en el modelo hidrogeológico integrado de Chía, el cual evidencia un sistema dual compuesto por un acuífero somero poroso de baja productividad en la planicie central y un acuífero profundo fisurado de alta transmisividad en los flancos montañosos del suroriente, se formula un Programa de Exploración Complementaria orientado a reducir la incertidumbre en la geometría del subsuelo, delimitar zonas de recarga y descarga, y precisar la continuidad de las unidades permeables del Grupo Guadalupe. Este programa busca fortalecer la caracterización hidrogeológica municipal y orientar la planificación de captaciones futuras bajo criterios de sostenibilidad y protección del recurso.

La presencia de un espeso paquete arcilloso cuaternario (>100 m) en la cuenca central, junto con el acuitardo regional de la Formación Guaduas (150 a 300 m), limita la explotación en la zona plana y concentra el potencial hidrogeológico en los flancos del Cerro de La Valvanera y en las transiciones estructurales donde afloran las areniscas del Grupo Guadalupe. Por ello, el programa se focaliza en estas áreas, donde la permeabilidad secundaria por fracturamiento es mayor y la recarga es más eficiente.

Geología detallada de campo (escala 1:10.000 o mayor)

Se propone realizar un levantamiento geológico detallado en los sectores surorientales y noroccidentales del municipio, donde el modelo hidroestructural indica variaciones en el buzamiento y presencia de fallas definidas. Este levantamiento permitirá:

- Verificar la continuidad de las areniscas permeables del Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd).
- Identificar zonas de fracturamiento asociadas a la Falla Definida del margen noroccidental y al flanco ascendente del Anticlinal de La Valvanera.
- Precisar la geometría del contacto entre los depósitos cuaternarios y las unidades cretácicas subyacentes.
- Delimitar áreas de recarga efectiva en las cotas altas (2.800 a 2.900 m s. n. m.).

Este componente es esencial para discriminar sectores con potencial real frente a zonas donde el espeso paquete arcilloso cuaternario actúa como acuitardo.

Inventario ampliado de captaciones y puntos de agua

Se actualizará y complementará el inventario del POMCA del río Bogotá, incorporando:

- Profundidad real de pozos existentes y su litología reportada.
- Caudales de explotación y variabilidad estacional.
- Estado administrativo y técnico de concesiones vigentes.
- Identificación de pozos que interceptan unidades del Grupo Guadalupe.

El inventario permitirá reconocer corredores hidráulicos activos y zonas donde la explotación ha sido históricamente viable, así como áreas donde la presencia de arcillas lacustres limita la productividad.

Geofísica aplicada (SEV, sísmica de reflexión y magnetotelúrica)

Se recomienda ejecutar campañas geofísicas en zonas estratégicas del municipio, especialmente:

- Flanco suroriental (Cerro de La Valvanera): donde afloran las areniscas permeables y se concentra la recarga.
- Transición cuenca–ladera (2,0 a 6,5 km del perfil F–F'): para delimitar el espesor del paquete arcilloso cuaternario y la profundidad del acuitardo Guaduas.
- Margen noroccidental: donde la Falla Definida yuxtapone unidades permeables y sellos, generando posibles ventanas hidráulicas.

Los métodos geofísicos permitirán:

- Estimar espesores saturados y continuidad lateral de las unidades permeables.
- Identificar acuitardos y discontinuidades estructurales.

La magnetotelúrica es especialmente útil para caracterizar la geometría profunda del sinclinal y la presencia de unidades de alta resistividad asociadas a areniscas compactas.

Perforaciones exploratorias someras y profundas

Con base en la geología y la geofísica, se recomienda ejecutar perforaciones exploratorias en tres zonas:

(i) Zona de recarga suroriental (Cerro de La Valvanera)

Donde las areniscas del Grupo Guadalupe afloran y presentan fracturamiento intenso. Objetivo: caracterizar el acuífero libre/fisurado y evaluar su transmisividad.

(ii) Transición cuenca–ladera (sector SE del perfil F–F')

Donde el espesor del paquete arcilloso disminuye y la Formación Guaduas se encuentra a menor profundidad. Objetivo: evaluar la posibilidad de interceptar niveles permeables intermedios.

(iii) Margen noroccidental (zona de influencia de la Falla Definida)

Donde la yuxtaposición tectónica puede generar ventanas hidráulicas. Objetivo: verificar la presencia de areniscas permeables a profundidades menores.

Las perforaciones deberán incluir:

- Registro litológico continuo.
- Ensayos de permeabilidad (slug tests, Lefranc).
- Pruebas de bombeo para estimar transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
- Muestreo hidroquímico para evaluar calidad y origen del agua.

Integración y actualización del modelo hidrogeológico

Los resultados obtenidos permitirán:

- Refinar la geometría del acuífero profundo fisurado.
- Delimitar zonas de recarga y descarga.
- Establecer áreas de protección y restricciones para captaciones.
- Optimizar la planificación hídrica municipal y la gestión del recurso subterráneo.

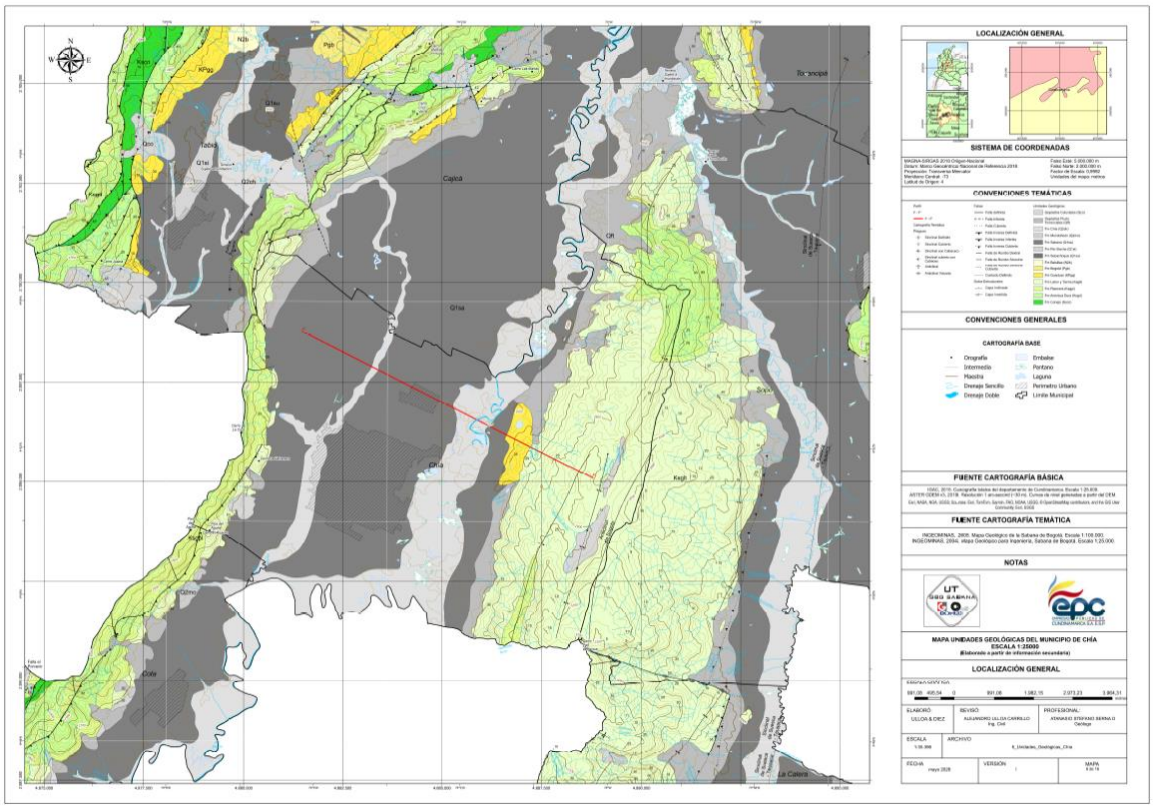
15 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE GACHANCIPÁ

El municipio de Gachancipá se ubica en la provincia Sabana Centro (departamento de Cundinamarca), sobre el tramo septentrional del valle alto del río Bogotá. Su territorio combina un amplio plano fluvio-lacustre central con un relieve montuoso en sus márgenes oriental y occidental, con altitudes que oscilan entre los 2.560 y los 3.100 m s. n. m. Su clima es frío, con temperaturas promedio de 12 °C a 14 °C y una precipitación media anual de 700 a 900 mm distribuida en un régimen bimodal.

15.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La secuencia estratigráfica de Gachancipá abarca un completo registro sedimentario desde el Cretácico Superior hasta el Paleógeno, cubierto en el eje del valle por un espeso relleno cuaternario:

- Depósitos Cuaternarios, Formación Sabana (Q1sa) y Formación Chía (Q2ch): Depósitos inconsolidados a semiconsolidados planos conformados por arcillas, limos, turbas y lentículas continentales de arenas/gravas en el cauce del río Bogotá.
- Secuencia Paleógena, Formaciones Bogotá (Pgb) y Cacho (Pgc): Integrada por mantos de arcillolitas y lutitas rojas a grises (Pgb) que descansan sobre areniscas cuarzosas granulares de grano medio a grueso (Pgc).
- Secuencia Maastrichtiana, Formación Guaduas (KPgg): Alternancia de arcillolitas, lodolitas y lutitas oscuras con mantos de carbón e intercalaciones delgadas de areniscas.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a una sucesión gruesa de areniscas cuarzosas, liditas, cherts y limolitas silíceas.



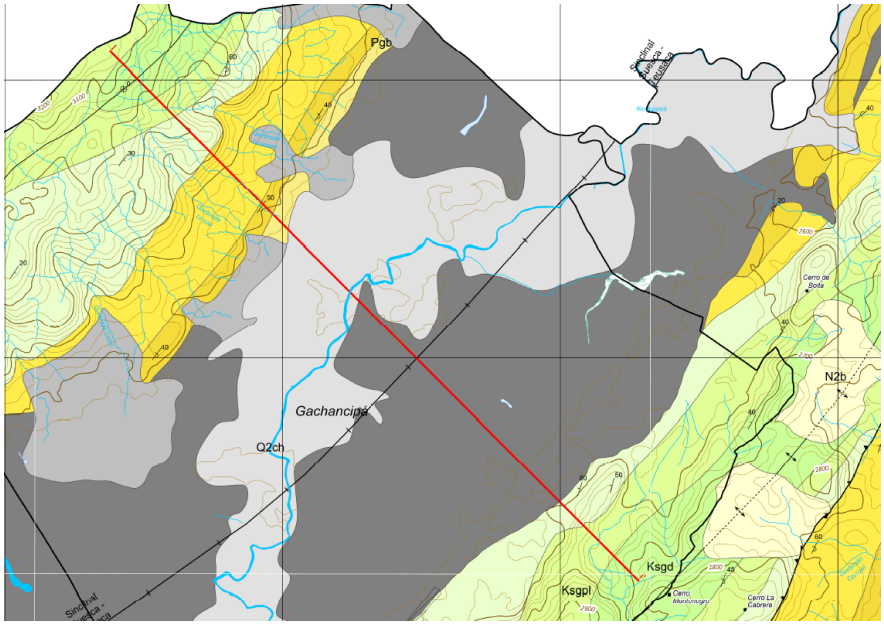


Figura 25. Mapa geológico del sector de Gachancipá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

15.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría del subsuelo de Gachancipá está definida por la cuenca del Sinclinal de Suesca–Teusacá, enmarcada lateralmente por dos grandes estructuras anticlinales regionales.

En el Perfil Geológico Generalizado $I - I'$ (extensión aproximada de 6,8 km orientado de NW a SE, cotas 2.000 a 3.200 m s. n. m.), se aprecian los siguientes dominios hidroestructurales:

- Flanco Noroccidental (NW, 0 a 2,2 km): Corresponde al flanco oriental del Anticlinal de Nemocón. En las zonas más elevadas (0 a 1,3 km) aflora la secuencia del Grupo Guadalupe (Ksgd, Ksgpl y Ksglt) en posición monoclinal descendente. Hacia el pie de monte se disponen sucesivamente la Formación Guaduas (KPgg) y retazos de la Formación Cacho (Pgc) y Formación Bogotá (Pgb).
- Cuenca Central (2,2 a 5,7 km): Depresión principal del Sinclinal de Suesca–Teusacá, donde discurre el río Bogotá. Contiene un amplio relleno arcilloso de la Formación Sabana (Q1sa) con coberturas de la Formación Chía (Q2ch), el cual cubre el zócalo rocoso cretácico y paleógeno y se comporta como un acuífero semiconfinado de productividad variable que confina parcialmente las unidades profundas.
- Flanco Sudoriental (SE, 5,7 a 6,8 km): Representa el flanco occidental del Anticlinal Sopó–Sesquilé, donde la secuencia rocosa del Grupo Guadalupe emerge nuevamente de forma limpia (Ksglt, Ksgpl y Ksgd), ascendiendo hacia las cotas más elevadas del oriente del municipio.

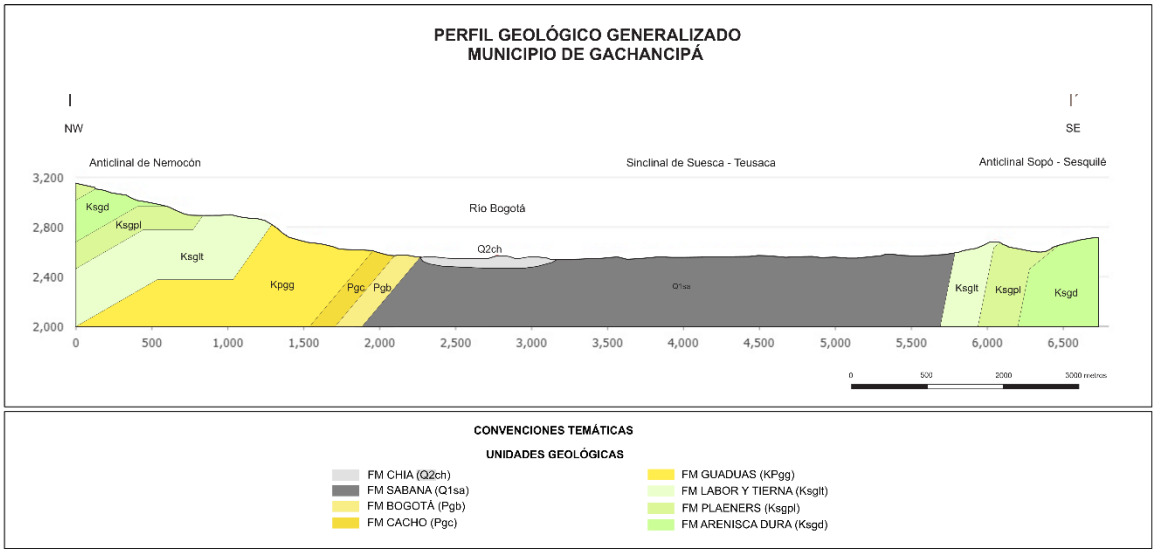


Figura 26. Corte geológico interpretativo del municipio de Gachancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras

mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

15.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Gachancipá se compone de niveles someros porosos de muy baja transmisividad regional y profundos acuíferos fisurados y porosos de alta productividad asociados al Grupo Guadalupe y a la Formación Cacho.

Tabla 20. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Gachancipá.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Formación Sabana / Chía (Q1sa, Q2ch)	Arcillas plásticas, limos, turbas y lentes limosos/arenosos.	Acuífero semiconfinado de productividad variable, porosidad primaria; comportamiento variable según facies. La Formación Chía es una cobertura delgada sin interés como acuífero	> 100 m en el centro de la cuenca	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s.
Formación Bogotá / Guaduas (Pgb, KPgg)	Arcillolitas, lutitas y lodolitas con capas de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	> 300 m	**Muy Baja**. Limitan el flujo vertical y confinan unidades inferiores.
Formación Cacho (Pgc)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad mixta; semiconfinado a confinado	40 – 80 m	**Alta**. Acuífero granular de buena transmisividad y rendimiento.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	Areniscas cuarzosas, liditas y limolitas silíceas fracturadas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 400 m	**Alta**. Reservorio estratégico de alta porosidad secundaria y elevados caudales.

15.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE GACHANCIPÁ

El modelo hidrogeológico del municipio de Gachancipá se organiza sobre la estructura regional del Sinclinal de Suesca–Teusacá, cuyo núcleo está ocupado por un espeso paquete de sedimentos cuaternarios de origen fluvio-lacustre, y cuyos flancos están conformados por unidades permeables del Grupo Guadalupe y la Formación Cacho. Esta configuración genera un sistema hidrogeológico estratificado, con acuíferos someros de baja transmisividad en la cuenca central y acuíferos profundos fisurados de alta productividad en los flancos noroccidental y sudoriental.

La planicie central del municipio, donde discurre el río Bogotá, está conformada por depósitos arcillosos, limosos y turbosos pertenecientes a la Formación Sabana (Q1sa) y la Formación Chía (Q2ch). Estos materiales presentan permeabilidad muy baja y comportamiento semiconfinado a acuitardo, lo que limita la infiltración y restringe la circulación subterránea. Su espesor supera los 100 metros, enmascarando completamente el zócalo rocoso cretácico y paleógeno. Las lentículas arenosas y niveles fluvio-torrenciales presentes en el cauce del río Bogotá permiten la existencia de pequeños acuíferos locales, pero su continuidad lateral es reducida y su rendimiento es bajo.

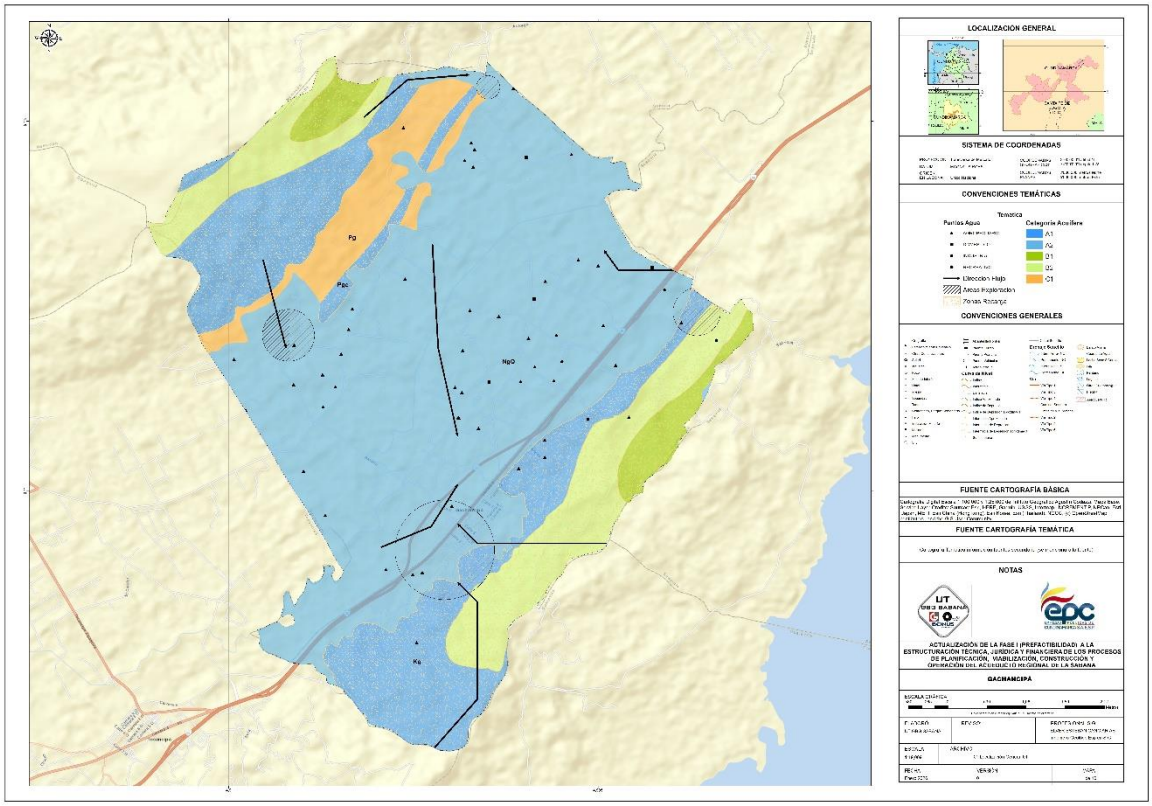


Figura 27. Mapa hidrogeológico del municipio de Gachancipá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Bajo este relleno cuaternario se encuentran las unidades arcillosas de la Formación Bogotá (Pgb) y la Formación Guaduas (KPgg), que actúan como acuitardos regionales. Estas unidades, con espesores superiores a 300 metros, constituyen una barrera hidráulica que confina los acuíferos profundos y limita el flujo vertical entre los niveles someros y las areniscas permeables subyacentes. Su presencia explica la baja productividad de pozos en la cuenca central y la necesidad de perforaciones profundas para interceptar unidades acuíferas de mayor rendimiento.

El acuífero profundo principal se desarrolla en las areniscas cuarzosas de la Formación Cacho (Pgc) y del Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd). En el flanco noroccidental, correspondiente al Anticlinal de Nemocón, estas unidades afloran en posición monoclinal

descendente, constituyendo una franja de recarga efectiva. La Formación Cacho, con espesores entre 40 y 80 metros, presenta permeabilidad granular y buena transmisividad, mientras que las areniscas del Grupo Guadalupe conforman un acuífero fisurado de alta porosidad secundaria y gran continuidad regional. En el flanco sudoriental, correspondiente al Anticlinal Sopó–Sesquilé, estas unidades emergen nuevamente, ascendiendo hacia las cotas más elevadas del municipio y conformando la segunda franja de recarga.

La arquitectura hidroestructural del municipio está controlada por la inclinación suave de las unidades hacia el centro del sinclinal y por la presencia de fallas inferidas que segmentan el sistema y generan variaciones en la profundidad del acuífero profundo. En el perfil I–I', las areniscas del Grupo Guadalupe se encuentran a poca profundidad en los flancos (0 a 1,3 km y 5,7 a 6,8 km), mientras que en la cuenca central permanecen confinadas bajo el espeso paquete arcilloso cuaternario y los acuitardos paleógenos. Esta geometría explica la distribución del potencial hidrogeológico: bajo en la cuenca central y alto en los flancos estructurales.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Gachancipá describe un sistema compuesto por:

1. Acuífero somero poroso (Q1sa, Q2ch): discontinuo, de baja permeabilidad y limitado a zonas de borde del río Bogotá.
2. Acuitardos regionales (Pgb, KPgg): unidades arcillosas que confinan el sistema y restringen el flujo vertical.
3. Acuífero intermedio granular (Pgc): areniscas de la Formación Cacho con buena transmisividad y potencial de explotación.
4. Acuífero profundo fisurado (Ksglt, Ksgpl, Ksgd): unidad de alta transmisividad, con recarga en los flancos noroccidental y sudoriental, y potencial de explotación elevado.

Este modelo confirma que el potencial hidrogeológico de Gachancipá se concentra en los flancos del sinclinal, donde las areniscas permeables afloran y presentan mayor fracturamiento, mientras que la cuenca central constituye una zona de baja productividad debido al espeso paquete arcilloso cuaternario y a los acuitardos paleógenos que confinan el sistema.

Tabla 21. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Gachancipá.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Sabana / Chía (Q1sa, Q2ch)	$0{,}01 - 0{,}8$*(matriz)* $1{,}0 - 4{,}0$*(lentes)*	$1{,}0 - 20$	S_y: $0{,}01 - 0{,}05$	$0{,}5 - 2{,}0$ L/s	Predominio de matriz arcillosa lacustre. Acuífero semiconfinado de productividad variable, condicionado a los cambios de facies.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Bogotá / Guaduas (Pgb, KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	$S: 10^{-5} - 10^{-4}$	$< 0{,}5$ L/s	Sello impermeable continuo que restringe el flujo vertical entre la superficie y Guadalupe.
Formación Cacho (Pgc)	$0{,}5 - 5{,}0$	$30 - 200$	$S: 10^{-4} - 10^{-3}$	$4{,}0 - 12{,}0$ L/s	Elevada porosidad primaria. Excelente horizonte intermedio de explotación en flancos.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $> 5{,}0$*(fracturas)*	$20 - 350$*(> 450 en fallas)*	$S: 10^{-5} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 25{,}0$ L/s	Reservorio fracturado regional de alta transmisividad. Principal objetivo para pozo profundo.

15.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA PARA GACHANCIPÁ

El modelo hidrogeológico integrado de Gachancipá evidencia un sistema estratificado donde la productividad hídrica se concentra en los flancos del sinclinal, especialmente en las unidades permeables del Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd) y la Formación Cacho (Pgc), mientras que la cuenca central está dominada por un espeso paquete arcilloso cuaternario (Q1sa, Q2ch) y acuitardos paleógenos (Pgb, KPgg) que limitan la infiltración y la circulación subterránea.

En consecuencia, el Programa de Exploración Complementaria se orienta a refinar la geometría del acuífero profundo, delimitar zonas de recarga, y evaluar la continuidad lateral de las unidades permeables, priorizando los flancos noroccidental y sudoriental donde el potencial hidrogeológico es mayor.

Geología detallada de campo (escala 1:10.000 o mayor)

Se propone un levantamiento geológico detallado focalizado en los flancos estructurales del municipio:

- Flanco Noroccidental (Anticlinal de Nemocón)

Donde afloran las areniscas del Grupo Guadalupe en posición monoclinal descendente. Objetivos:

- Verificar continuidad de areniscas permeables (Ksgd, Ksgpl, Ksglt).
- Identificar zonas de fracturamiento y lineamientos estructurales.
- Precisar la geometría del contacto Guadalupe–Guaduas–Cacho.

- Flanco Sudoriental (Anticlinal Sopó–Sesquilé)

Donde las areniscas emergen nuevamente hacia las cotas altas. Objetivos:

- Delimitar zonas de recarga efectiva.
- Caracterizar retazos tectónicos permeables y zonas de fracturamiento secundario.

Este levantamiento permitirá discriminar sectores con potencial real frente a zonas donde el espeso paquete arcilloso cuaternario actúa como acuitardo.

Inventario ampliado de captaciones y puntos de agua

Se actualizará el inventario hidrogeológico municipal incorporando:

- Profundidad real de pozos existentes.
- Litologías reportadas en perforaciones.
- Caudales de explotación y estacionalidad.
- Estado técnico y administrativo de concesiones.
- Identificación de pozos que interceptan unidades del Grupo Guadalupe o la Formación Cacho.

Este inventario permitirá reconocer corredores hidráulicos activos y zonas donde la explotación ha sido históricamente viable.

Geofísica aplicada (SEV, sísmica de reflexión y magnetotelúrica)

Se recomienda ejecutar campañas geofísicas en tres zonas estratégicas:

(i) Flanco Noroccidental (0 a 2,2 km del perfil I–I’)

Donde afloran las areniscas del Grupo Guadalupe. Objetivo: delimitar espesores saturados y continuidad lateral de unidades permeables.

(ii) Cuenca Central (2,2 a 5,7 km)

Donde el relleno arcilloso cuaternario supera los 100 m. Objetivo: precisar el espesor del acuitardo y la profundidad del zócalo rocoso.

(iii) Flanco Sudoriental (5,7 a 6,8 km)

Donde emergen nuevamente las areniscas permeables. Objetivo: identificar zonas de fracturamiento y potencial de recarga.

Los métodos geofísicos permitirán:

- Estimar espesores saturados.
- Identificar acuitardos y discontinuidades estructurales.
- Precisar la profundidad del acuífero profundo fisurado.
- Evaluar la continuidad lateral de la Formación Cacho.

Perforaciones exploratorias someras y profundas

Con base en la geología y la geofísica, se recomienda perforar en tres zonas:

(i) Sector Noroccidental (Anticlinal de Nemocón)

Donde las areniscas del Guadalupe se encuentran a menor profundidad. Objetivo: caracterizar el acuífero fisurado y evaluar su transmisividad.

(ii) Sector Sudoriental (Anticlinal Sopó–Sesquilé)

Donde las areniscas emergen hacia las cotas altas. Objetivo: evaluar la recarga y la continuidad lateral de unidades permeables.

(iii) Transición cuenca–ladera

Donde el espesor del paquete arcilloso disminuye y pueden existir ventanas hidráulicas. Objetivo: verificar la presencia de areniscas permeables intermedias.

Las perforaciones deberán incluir:

- Registro litológico continuo.
- Ensayos de permeabilidad (slug tests, Lefranc).
- Pruebas de bombeo para estimar transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
- Muestreo hidroquímico para evaluar calidad y origen del agua.

5. Integración y actualización del modelo hidrogeológico

Los resultados permitirán:

- Refinar la geometría del acuífero profundo fisurado.
- Delimitar zonas de recarga y descarga.
- Establecer áreas de protección y restricciones para captaciones.
- Optimizar la planificación hídrica municipal y la gestión del recurso subterráneo.

16 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE COTA

El municipio de Cota se localiza en la provincia Sabana Centro (departamento de Cundinamarca), sobre el margen occidental del río Bogotá al pie del cerro Majuy. Presenta un relieve plano de planicie aluvial en su franja oriental que contrasta con el sistema montañoso en su sector occidental, con altitudes que oscilan entre los 2.550 y 2.900 m s. n. m. Su clima es frío, con temperaturas promedio de 12 °C a 14 °C y una precipitación media anual entre 700 y 900 mm distribuida en un régimen bimodal.

16.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La geología del subsuelo de Cota está dominada por secuencias sedimentarias del Cretácico Inferior a Superior (Grupo Guadalupe y Formación Conejo), afectadas por cabalgamientos y cubiertas por depósitos inconsolidados del Cuaternario:

- Depósitos Cuaternarios (Qal, Qco): Coberturas fluvio-lacustres y detríticas compuestas por arcillas, limos, gravas y arenas que rellenan el plano de inundación del río Bogotá y las laderas del cerro Majuy.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Conformada por las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a una alternancia de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, liditas silíceas, cherts y limolitas altamente diaclasadas.
- Secuencia del Cretácico Inferior a Superior, Formación Conejo (Kscn): Potente conjunto laminado de lutitas, lodolitas y limolitas oscuras de muy baja permeabilidad.

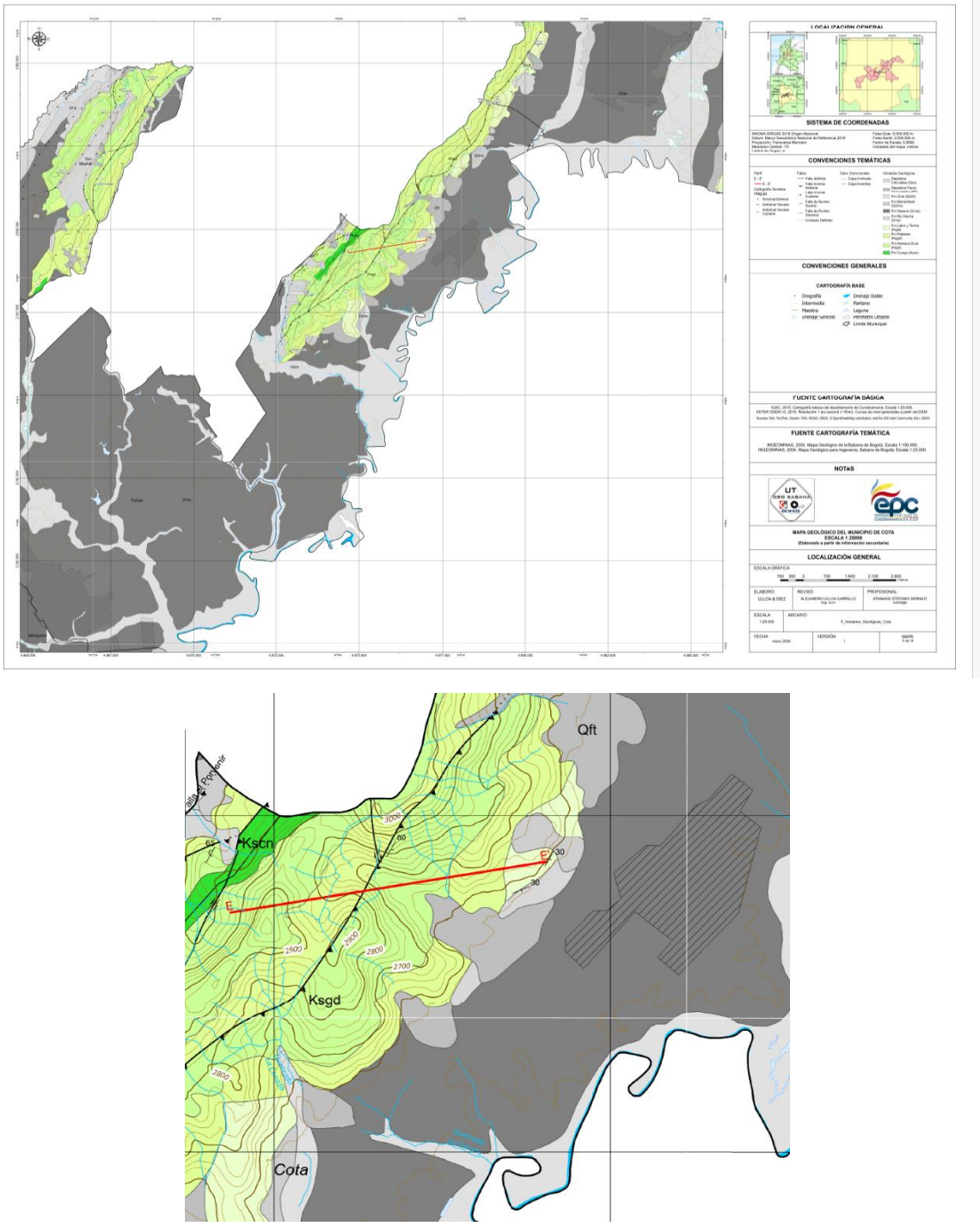


Figura 28. Mapa geológico del sector de Cota y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

16.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría del subsuelo de Cota está caracterizada por una estructura monoclinal fuertemente afectada por un plano de Falla de Cabalgamiento (Inclinación aparente) orientado hacia el SW/SSW.

En el Perfil Geológico Generalizado $E - E'$ (extensión de 2,4 km orientado de SW a NE, cotas 2.000 a 2.900 m s. n. m.), se diferencian las siguientes unidades tectono-estratigráficas:

- Sector Suroeste (SW, 0 a 1,2 km): Bloque cabalgante superior donde aflora el núcleo de la Formación Conejo (Kscn) infrayaciendo a las Formaciones Arenisca Dura (Ksgd) y Plaeners (Ksgpl) con un buzamiento monoclinal consistente hacia el NE. Este bloque conforma la zona de mayor altitud (cerro Majuy, ~2.900 m s. n. m.) y actúa como el principal frente de recarga directa.
- Plano de Cabalgamiento (km 1,2 a 1,8): Traza de la Falla de Cabalgamiento que yuxtaponen los bloques Cretácicos de Ksgpl sobre las unidades del bloque inferior. La cizalla asociada a esta falla genera una franja de intenso fracturamiento secundario que favorece la transmisividad hídrica.
- Sector Noreste (NE, 1,2 a 2,4 km): Bloque infrayacente donde la Formación Arenisca Dura (Ksgd) ocupa la mayor extensión subsuperficial, cubierta en concordancia por un nivel de la Formación Labor y Tierna (Ksglt) hacia el extremo NE.

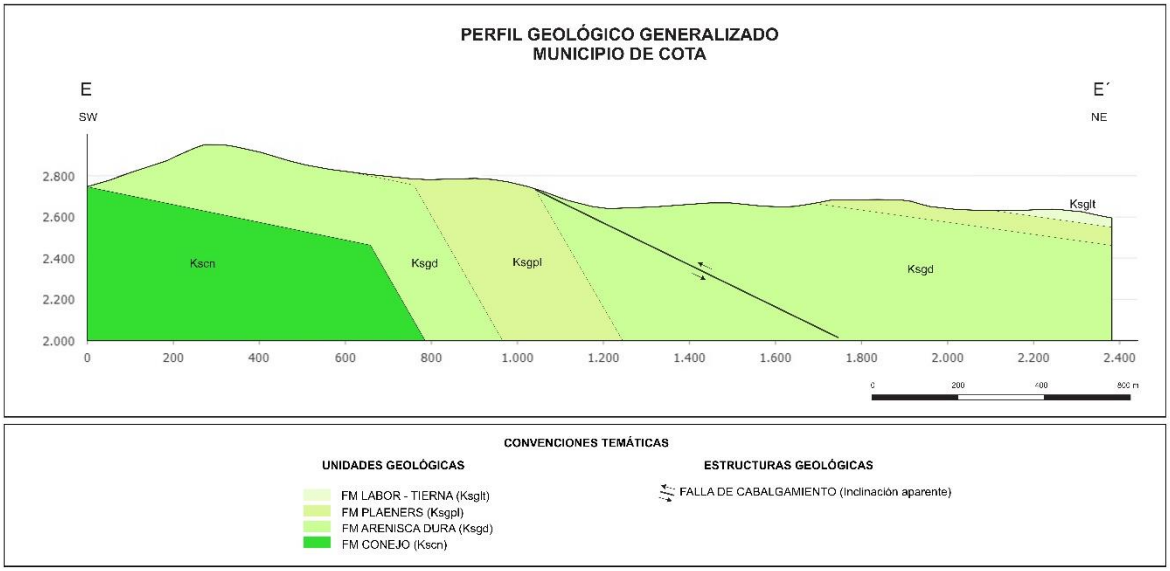


Figura 29. Corte geológico interpretativo del municipio de Cota, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

16.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Cota se divide entre el acuífero fisurado/fracturado profundo de alta productividad del Grupo Guadalupe y el acuitardo basal de la Formación Conejo.

Tabla 22. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Cota.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Depósitos Cuaternarios (Qal, Qco)	Arcillas, limos, gravas y arenas.	Acuífero local, porosidad primaria; libre a semiconfinado	Variable (10 – 60 m)	**Baja a Media**. Cobertura somera aprovechada por aljibes.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	80 – 120 m	**Alta**. Acuífero de elevada transmisividad y excelente rendimiento en pozos.
Formación Plaeners (Ksgpl)	Liditas, cherts y limolitas silíceas.	Acuífero confinado de productividad media, porosidad secundaria (liditas fracturadas)	Hasta 93 m	**Media.** Liditas fracturadas; caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	Areniscas cuarzosas masivas y gruesas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 300 m	**Alta**. Reservorio estratégico de gran volumen y extensión regional.
Formación Conejo (Kscn)	Lutitas y lodolitas oscuras laminadas.	Acuitardo con acuíferos locales, porosidad secundaria; base del sistema	Hasta 370 m	**Muy Baja**. Sello impermeable inferior del sistema hidrogeológico.

16.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelo hidrogeológico del municipio de Cota se organiza sobre una estructura monoclinal afectada por un plano de cabalgamiento regional que controla la geometría del subsuelo y la distribución de las unidades acuíferas. El sistema combina un acuífero somero poroso de baja a moderada productividad en la planicie aluvial del río Bogotá y un acuífero profundo fisurado de alta transmisividad asociado a las areniscas del Grupo Guadalupe, especialmente en el sector montañoso del cerro Majuy.

La franja oriental del municipio, correspondiente a la planicie del río Bogotá, está conformada por depósitos cuaternarios (Qal, Qco) de arcillas, limos, arenas y gravas que rellenan el plano de inundación. Estos materiales presentan permeabilidad baja a media y conforman acuíferos someros libres a semiconfinados, aprovechados principalmente

mediante aljibes y pozos de poca profundidad. Su continuidad lateral es variable y su rendimiento depende de la presencia de lentes arenosas y de la estacionalidad de lluvias.

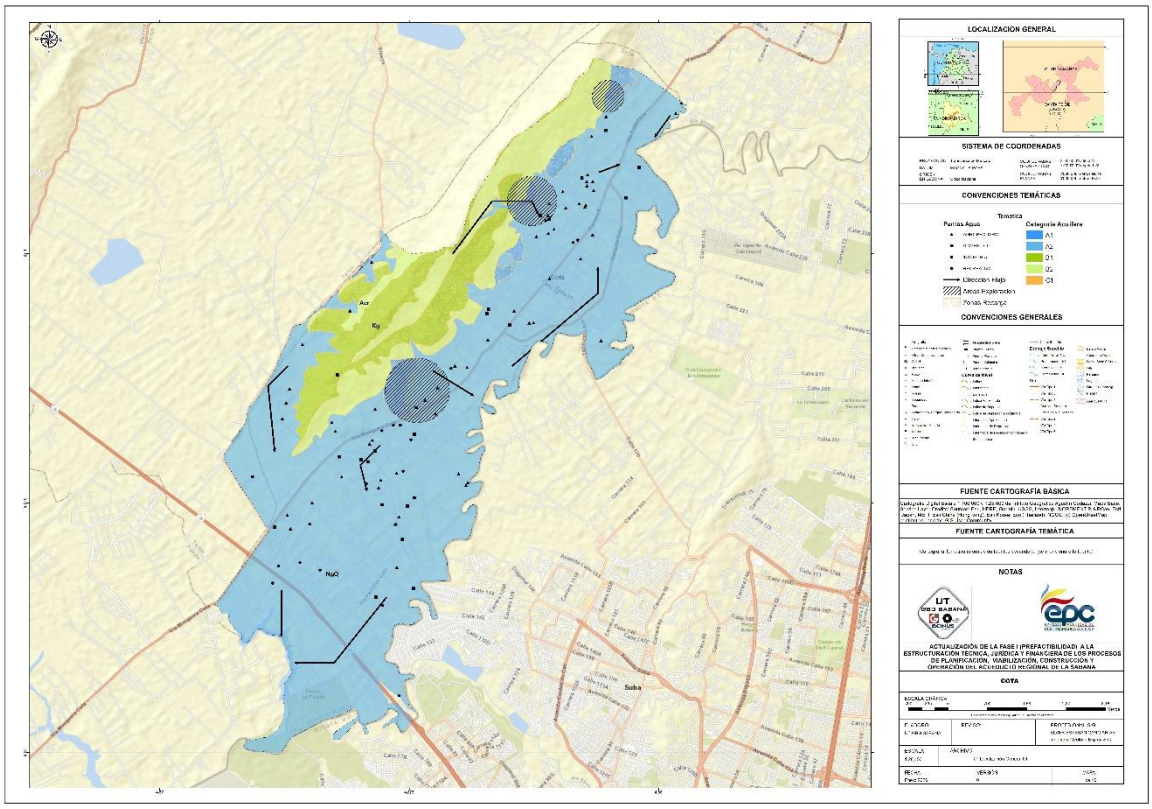


Figura 30. Mapa hidrogeológico del municipio de Cota, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Hacia el sector occidental, el relieve asciende hacia el cerro Majuy, donde afloran las unidades permeables del Grupo Guadalupe. En el bloque cabalgante superior, la Formación Conejo (Kscn) constituye el núcleo del cerro y actúa como acuitardo basal debido a su composición de lutitas y lodolitas de muy baja permeabilidad. Sobre ella infrayacen las areniscas de la Formación Arenisca Dura (Ksgd) y la Formación Plaeners (Ksgpl), dispuestas con un buzamiento monoclinal hacia el noreste. Estas unidades conforman el acuífero profundo principal del municipio, caracterizado por alta porosidad secundaria, fracturamiento tectónico y excelente transmisividad.

La traza del plano de cabalgamiento, ubicada aproximadamente entre los 1,2 y 1,8 km del perfil E–E', yuxtapone las areniscas permeables del Grupo Guadalupe sobre las unidades del bloque inferior. La cizalla asociada a esta falla genera una franja de intenso fracturamiento secundario que incrementa la permeabilidad y favorece la circulación subterránea. Esta zona constituye un corredor hidrogeológico estratégico, donde la productividad de pozos profundos tiende a ser mayor.

En el bloque infrayacente del sector noreste, la Formación Arenisca Dura (Ksgd) ocupa la mayor extensión subsuperficial y se encuentra cubierta en concordancia por niveles de la Formación Labor y Tierna (Ksglt). Estas unidades conforman un acuífero fisurado de alta productividad, con espesores superiores a 300 metros en el caso de Ksgd y entre 80 y 120 metros para Ksglt. Su continuidad lateral y su fracturamiento tectónico las convierten en el principal reservorio hídrico del municipio.

La arquitectura hidroestructural del sistema está controlada por la inclinación monoclinal de las unidades hacia el noreste y por la presencia del plano de cabalgamiento, que segmenta el sistema y genera variaciones en la profundidad del acuífero profundo. En el sector del cerro Majuy, las areniscas permeables afloran y constituyen la principal zona de recarga directa, mientras que hacia la planicie del río Bogotá permanecen cubiertas por depósitos cuaternarios y presentan mayor profundidad.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Cota describe un sistema compuesto por:

1. Acuífero somero poroso (Qal, Qco): discontinuo, de baja a media permeabilidad, aprovechado mediante aljibes y pozos someros.
2. Acuífero profundo fisurado (Ksglt, Ksgpl, Ksgd): unidad de alta transmisividad, con recarga en el cerro Majuy y potencial de explotación elevado.
3. Zona de fracturamiento asociado al cabalgamiento: corredor hidrogeológico de alta permeabilidad secundaria.
4. Acuitardo basal (Kscn): unidad lutítica de muy baja permeabilidad que delimita el sistema profundo.

Este modelo confirma que el potencial hidrogeológico de Cota se concentra en el sector occidental y nororiental del municipio, donde las areniscas del Grupo Guadalupe afloran o se encuentran a menor profundidad, mientras que la planicie del río Bogotá constituye una zona de baja productividad debido a la presencia de depósitos cuaternarios y a la influencia del acuitardo basal de la Formación Conejo.

Tabla 23. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Cota.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Cuaternarios (Qal, Qtf)	$0{,}05 - 1{,}5$*(matriz)* $1{,}0 - 5{,}0$*(abanicos)*	$5 - 30$	S_y: $0{,}02 - 0{,}08$	$0{,}5 - 3{,}0$ L/s	Nivel freático somero en planicie aluvial. Alta heterogeneidad granulométrica.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	$1{,}0 - 6{,}0$	$40 - 300$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 20{,}0$ L/s	Alta permeabilidad primaria e intergranular. Excelente rendimiento de explotación.
Formación Plaeners (Ksgpl)	$0{,}5 - 3{,}5$	$20 - 150$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	Hasta 5 L/s	Permeabilidad por fracturamiento en

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
					niveles silíceos/cherts.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $> 6{,}0$*(fracturas)*	$30 - 350$*(> 500 en cizalla de falla)*	$S: 10^{-5} - 10^{-3}$	10,0 – 25,0 L/s	Principal reservorio profundo del municipio. Caudales potenciados en la zona de falla.
Formación Conejo (Kscn)	$< 10^{-4}$	< 1	N/A	Nulo a muy bajo	Base impermeable del sistema que limita el flujo subterráneo en la zona SW.

16.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El modelo hidrogeológico integrado de Cota evidencia un sistema dominado por un acuífero profundo fisurado de alta productividad asociado a las areniscas del Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd), cuya recarga se concentra en el sector montañoso del cerro Majuy, y por un acuífero somero poroso de baja a moderada permeabilidad en la planicie aluvial del río Bogotá. La presencia del plano de cabalgamiento y la franja de fracturamiento secundario asociada a la Falla de Cabalgamiento constituyen elementos estructurales clave que incrementan la transmisividad y generan corredores hidráulicos preferenciales.

En consecuencia, el Programa de Exploración Complementaria se orienta a refinar la geometría del acuífero profundo, delimitar zonas de recarga, caracterizar la franja de fracturamiento, y evaluar la continuidad lateral de las unidades permeables.

Geología detallada de campo (escala 1:10.000 o mayor)

Se propone un levantamiento geológico detallado focalizado en los sectores donde el modelo hidroestructural indica mayor potencial hidrogeológico:

- Sector Suroccidental, Cerro Majuy (bloque cabalgante superior)

Donde afloran las areniscas permeables del Grupo Guadalupe y la Formación Conejo constituye el núcleo estructural. Objetivos:

- Verificar la continuidad de las areniscas permeables (Ksgd, Ksgpl, Ksglt).
- Identificar zonas de fracturamiento primario y secundario.
- Precisar la geometría del contacto entre Kscn y las areniscas suprayacentes.
- Delimitar áreas de recarga directa en cotas altas (~2.900 m s. n. m.).
- Sector Noreste, bloque infrayacente

Donde la Formación Arenisca Dura ocupa la mayor extensión subsuperficial. Objetivos:

- Caracterizar la continuidad lateral de Ksgd y Ksglt.
- Identificar zonas donde el acuífero profundo se encuentra a menor profundidad.

Este levantamiento permitirá discriminar sectores con potencial real frente a zonas donde los depósitos cuaternarios actúan como acuitardos.

Inventario ampliado de captaciones y puntos de agua

Se actualizará el inventario hidrogeológico municipal incorporando:

- Profundidad real de pozos existentes.
- Litologías reportadas en perforaciones.
- Caudales de explotación y variabilidad estacional.
- Estado técnico y administrativo de concesiones.
- Identificación de pozos que interceptan unidades del Grupo Guadalupe.

Este componente permitirá reconocer corredores hidráulicos activos, especialmente en la franja de fracturamiento asociada al cabalgamiento.

Geofísica aplicada (SEV, sísmica de reflexión y magnetotelúrica)

Se recomienda ejecutar campañas geofísicas en tres zonas estratégicas:

(i) Sector Suroccidental, Cerro Majuy (0 a 1,2 km del perfil E–E')

Donde afloran las areniscas permeables y se concentra la recarga. Objetivo: delimitar espesores saturados y continuidad lateral de unidades permeables.

(ii) Franja del plano de cabalgamiento (1,2 a 1,8 km)

Donde la cizalla genera fracturamiento secundario de alta transmisividad. Objetivo: identificar corredores hidráulicos preferenciales y zonas de mayor permeabilidad.

(iii) Sector Noreste (1,8 a 2,4 km)

Donde Ksgd y Ksglt conforman el acuífero profundo principal. Objetivo: precisar la profundidad del acuífero y la geometría del bloque infrayacente.

Los métodos geofísicos permitirán:

- Estimar espesores saturados.
- Identificar acuitardos y discontinuidades estructurales.
- Precisar la profundidad del acuífero profundo fisurado.
- Evaluar la continuidad lateral de las areniscas permeables.

Perforaciones exploratorias someras y profundas

Con base en la geología y la geofísica, se recomienda perforar en tres zonas:

- (i) Zona de recarga, Cerro Majuy

Donde las areniscas permeables afloran y presentan fracturamiento intenso. Objetivo: caracterizar el acuífero libre/fisurado y evaluar su transmisividad.

- (ii) Franja del cabalgamiento

Donde la cizalla incrementa la permeabilidad secundaria. Objetivo: evaluar la productividad del corredor hidráulico y su continuidad lateral.

- (iii) Sector noreste, bloque infrayacente

Donde Ksgd y Ksglt se encuentran a menor profundidad. Objetivo: verificar la presencia de niveles permeables intermedios y profundos.

Las perforaciones deberán incluir:

- Registro litológico continuo.
- Ensayos de permeabilidad (slug tests, Lefranc).

- Pruebas de bombeo para estimar transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
- Muestreo hidroquímico para evaluar calidad y origen del agua.

Integración y actualización del modelo hidrogeológico

Los resultados permitirán:

- Refinar la geometría del acuífero profundo fisurado.
- Delimitar zonas de recarga y descarga.
- Establecer áreas de protección y restricciones para captaciones.
- Optimizar la planificación hídrica municipal y la gestión del recurso subterráneo.

17 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE TABIO

El municipio de Tabio se localiza en la provincia Sabana Centro (departamento de Cundinamarca), en el margen occidental del valle de la Sabana de Bogotá sobre la cuenca del río Frío. Presenta una amplia topografía de valle interandino flanqueado por importantes elevaciones montañosas en sus bordes oriental y occidental (Serranía de Juaica y peñascos asociados), con altitudes que oscilan entre los 2.560 y los 3.000 m s. n. m. Su clima es frío, con temperaturas promedio de 12 °C a 14 °C y una precipitación media anual entre 750 y 950 mm con régimen bimodal.

17.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La geología del subsuelo de Tabio comprende un cuenco lacustre y aluvial del Cuaternario asentado sobre un zócalo sedimentario plegado y fallado del Cretácico Superior y Paleógeno:

- Depósitos Cuaternarios, Formación Sabana (Q1sa), Formación Chía (Q2ch) y Depósitos Fluvio Torrenciales (Qtf): Complejo paquete de arcillas, limos y turbas de origen lacustre emplazado en el valle central, bordeado por depósitos fluvio-torrenciales en el pie de las laderas.
- Secuencia Maastrichtiana a Paleógena, Formación Guaduas (KPgg): Integrada por un potente paquete de arcillolitas, lutitas y lodolitas grises a oscuras con intercalaciones de mantos de carbón e intercalaciones delgadas de areniscas finas.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a una alternancia de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, liditas silíceas, cherts y limolitas altamente fisuradas.
- Secuencia del Cretácico Inferior a Superior, Formación Conejo (Kscn): Conjunto laminado basal de lutitas y lodolitas oscuras de muy baja permeabilidad.

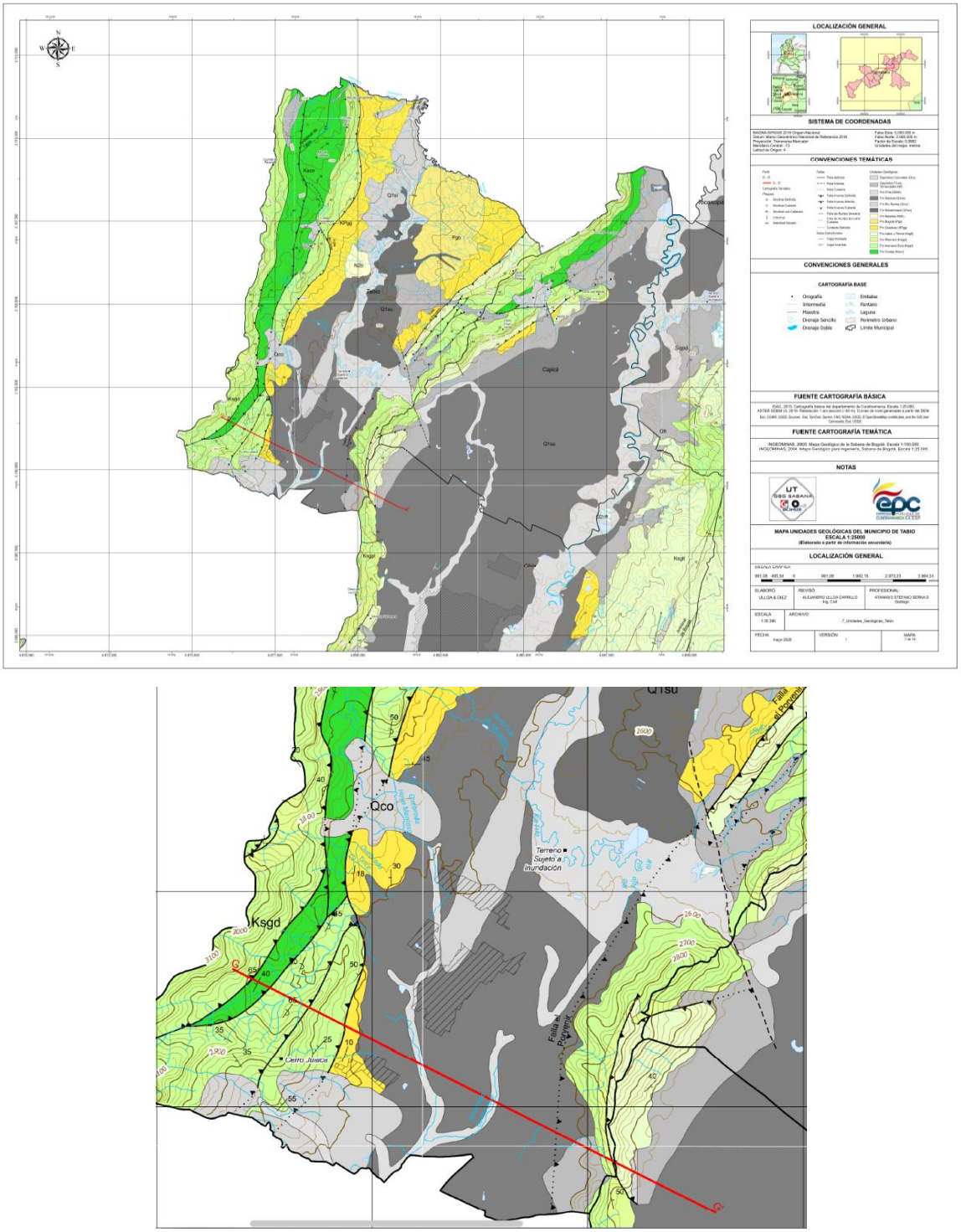


Figura 31. Mapa geológico del sector de Tabio y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

17.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La arquitectura hidrogeológica de Tabio está dominada por una depresión tectónica de tipo Sinclinal rellenada por sedimentos continentales y enmarcada por sistemas de fallas inversas/cabalgamientos que elevan los bloques rocosos en ambos flancos.

En el Perfil Geológico Generalizado $G - G'$ (extensión aproximada de 6,4 km orientado de NW a SE, cotas 2.000 a 3.000 m s. n. m.), se observan las siguientes relaciones tectono-estratigráficas:

- Sector Noroccidental (NW, 0 a 2,0 km): Estructura cabalgante donde una Falla Definida de rumbo inverso eleva la Formación Conejo (Kscn) y las unidades del Grupo Guadalupe (Ksgd, Ksgpl, Ksglt), haciéndolas montar sobre la Formación Guaduas (KPgg). Las elevaciones del NW forman una importante franja de recarga y de recarga tectónica por fracturamiento.
- Cuenca Central (2,0 a 4,5 km): Bloque hundido del Sinclinal, donde la Formación Guaduas (KPgg) se profundiza y queda sepultada por el paquete arcilloso de la Formación Sabana (Q1sa) e intercalaciones de la Formación Chía (Q2ch). Esta capa cuaternaria actúa como sello impermeable superior.
- Sector Suroriental (SE, 4,5 a 6,4 km): Zona de deformación compleja afectada por la Falla El Porvenir (alrededor del km 4,7) y fallas secundarias asociadas. La Falla El Porvenir eleva un bloque de la Formación Arenisca Dura (Ksgd), cubierta localmente por Depósitos Fluvio Torrenciales (Qtf), generando una escama rocosa altamente fracturada que se sumerge de nuevo hacia el SE bajo paquetes de Guaduas.

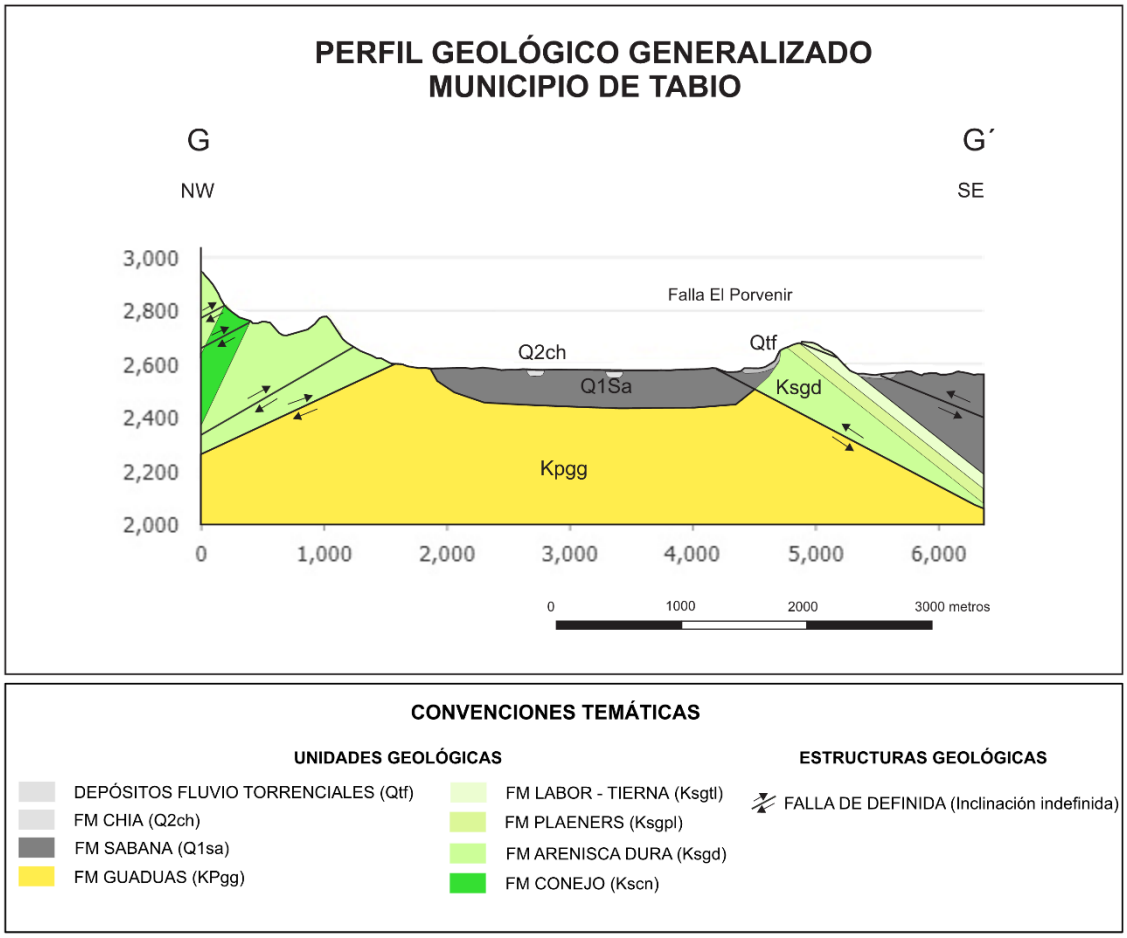


Figura 32. Corte geológico interpretativo del municipio de Tabio, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

17.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Tabio presenta un comportamiento heterogéneo, dividiéndose entre un acuitardo poroso somero en la zona plana y un sistema acuífero fisurado profundo de alto rendimiento dentro de las areniscas del Grupo Guadalupe.

Tabla 24. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Tabio.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Formación Sabana / Chía / Fluvio Torrencial	Arcillas, limos, turbas y lentes de arena/grava.	Acuífero semiconfinado de productividad variable,	> 80 m en el eje del valle	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
(Q1sa, Q2ch, Qtf)		porosidad primaria; comportamiento variable según facies. La Formación Chía es una cobertura delgada sin interés como acuífero		de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s. Los depósitos Qtf presentan permeabilidad moderada.
Formación Guaduas (KPgg)	Arcillolitas, lutitas y mantos de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	> 300 m	**Muy Baja**. Actúa como barrera impermeable amplia bajo el valle.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	Areniscas cuarzosas, liditas y limolitas silíceas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 350 m	**Alta a Media**. Acuífero estratégico de elevada transmisividad condicionado al diaclasado tectónico.
Formación Conejo (Kscn)	Lutitas y lodolitas oscuras laminadas.	Acuitardo con acuíferos locales, porosidad secundaria; base del sistema	N.D.	**Muy Baja**. Impermeable; base del sistema en el sector NW.

17.4 CALIDAD DEL AGUA SUBTERRÁNEA Y MANIFESTACIONES TERMALES

La calidad del agua subterránea del área de estudio se trata de forma regional en el capítulo de hidrogeoquímica. En Tabio se le da mayor desarrollo porque en el municipio afloran aguas termales asociadas a fallas, que inciden en la calidad del agua y en las restricciones para nuevas perforaciones profundas.

- Recarga: La recarga natural ocurre predominantemente en los frentes montañosos del NW y en la franja de influencia de la Falla El Porvenir al SE, donde las areniscas cuarzosas (Ksgd, Ksglt) afloran expuestas a las precipitaciones. En la zona plana del valle, la recarga vertical está altamente limitada por las arcillas de la Formación Sabana.

  Dado que en las partes altas el agua se infiltra con la mayor calidad de toda la cuenca, estas áreas deben conservarse libres de actividades industriales o contaminantes que puedan alterar la química natural del agua de ingreso al sistema.

- Calidad del Agua: Las captaciones asociadas al Grupo Guadalupe ofrecen agua de buena calidad físico-química, aunque en las zonas de falla profundas hay manifestaciones termales o aguas con mineralización moderada. En el acuífero somero de la Formación Sabana es común hallar altos niveles de hierro y materia orgánica.

Por la presencia de aguas termales, se recomienda tomar algunas acciones como son:

Protección de Zonas de Flujo Geotérmico: En el sector de Tabio-Tenjo, se deben restringir las perforaciones profundas que puedan interceptar o cortocircuitar las vías de ascenso de las aguas termales, protegiendo tanto el balance térmico como la presión hidráulica de este sistema singular.

Inclusión en el Modelo Numérico Regional: la anomalía térmica debe conceptualizarse e incorporarse al modelo numérico de flujo y transporte de la Sabana de Bogotá como una condición de contorno térmica, para evitar distorsiones en los análisis de calidad del agua y de disponibilidad de la oferta explotable.

17.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El modelo hidrogeológico del municipio de Tabio se organiza sobre una depresión tectónica de tipo sinclinal, cuyo núcleo está ocupado por un espeso paquete de sedimentos cuaternarios de origen lacustre y fluvio-torrencial, y cuyos flancos están conformados por unidades permeables del Grupo Guadalupe elevadas por fallas inversas y cabalgamientos. Esta arquitectura genera un sistema hidrogeológico heterogéneo, con un acuífero somero poroso de baja transmisividad en la planicie central y un acuífero profundo fisurado de alta productividad en los flancos montañosos del noroccidente y suroriente.

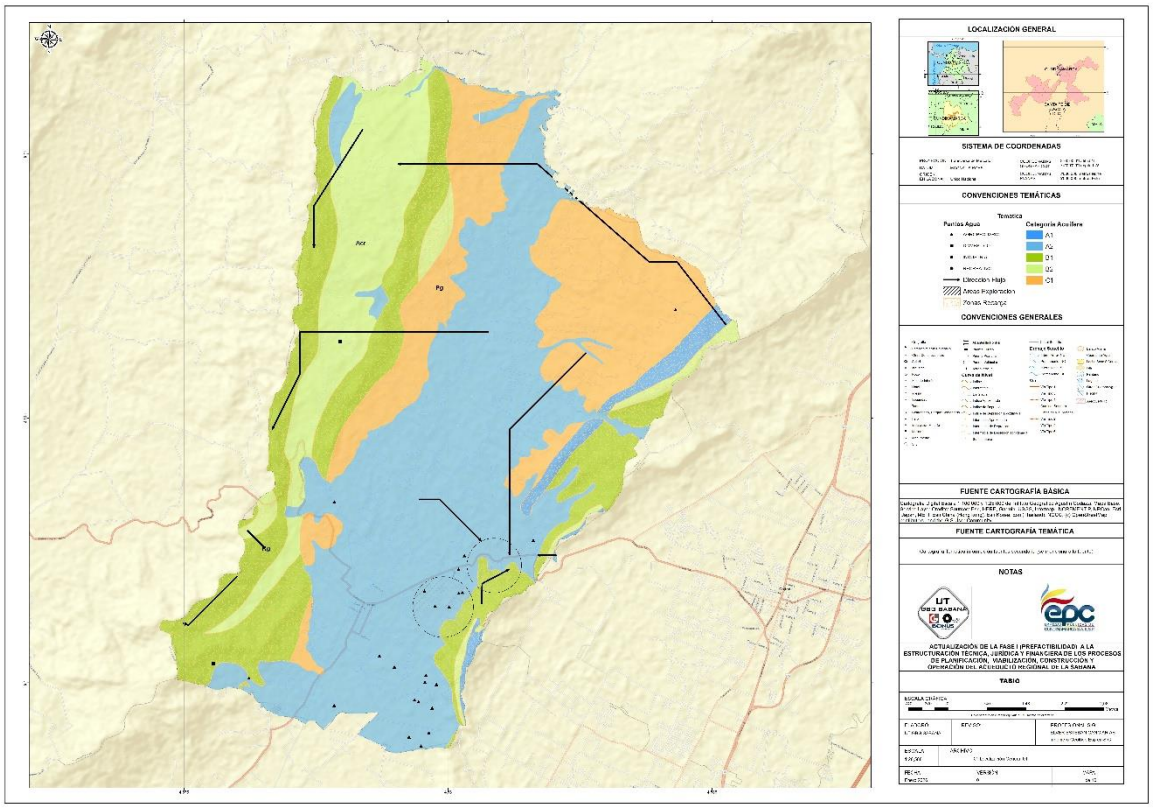


Figura 33. Mapa hidrogeológico del municipio de Tabio, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos

existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

La zona plana del municipio, correspondiente al valle interandino del río Frío, está conformada por depósitos arcillosos, limosos y turbosos pertenecientes a la Formación Sabana (Q1sa) y la Formación Chía (Q2ch), con espesores superiores a 80 metros. Estos materiales presentan permeabilidad muy baja y comportamiento semiconfinado a acuitardo, limitando la infiltración vertical y restringiendo la circulación subterránea. Las lentes arenosas y los depósitos fluvio-torrenciales (Qtf) presentes en el pie de las laderas permiten la existencia de pequeños acuíferos locales, pero su continuidad lateral es reducida y su rendimiento depende de la estacionalidad de lluvias.

Bajo este relleno cuaternario se encuentra la Formación Guaduas (KPgg), compuesta por arcillolitas, lutitas y mantos de carbón, que actúa como un acuitardo regional. Su espesor, superior a 300 metros, constituye una barrera hidráulica que confina los acuíferos profundos y limita el flujo vertical entre los niveles someros y las areniscas permeables subyacentes. Esta unidad explica la baja productividad de pozos en la cuenca central y la necesidad de perforaciones profundas para interceptar unidades acuíferas de mayor rendimiento.

El acuífero profundo principal se desarrolla en las areniscas cuarzosas del Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd), cuya permeabilidad secundaria está controlada por el fracturamiento tectónico asociado a fallas inversas y cabalgamientos. En el flanco noroccidental, una falla inversa eleva las unidades del Grupo Guadalupe y la Formación Conejo (Kscn) sobre la Formación Guaduas, generando una franja de recarga directa y una zona de fracturamiento que incrementa la transmisividad. En el flanco suroriental, la Falla El Porvenir eleva un bloque de la Formación Arenisca Dura (Ksgd), formando una escama rocosa altamente fracturada que constituye otro corredor hidrogeológico de importancia.

La Formación Conejo (Kscn), compuesta por lutitas y lodolitas oscuras laminadas, constituye el sello basal del sistema en el sector noroccidental. Su baja permeabilidad impide la circulación profunda y delimita el espesor efectivo del acuífero fisurado.

La arquitectura hidroestructural del municipio está controlada por la inclinación de las unidades hacia el centro del sinclinal y por la presencia de fallas inversas que segmentan el sistema y generan variaciones en la profundidad del acuífero profundo. En el perfil G–G', las areniscas del Grupo Guadalupe se encuentran a poca profundidad en los flancos (0 a 2,0 km y 4,5 a 6,4 km), mientras que en la cuenca central permanecen confinadas bajo el espeso paquete arcilloso cuaternario y los acuitardos paleógenos. Esta geometría explica la distribución del potencial hidrogeológico: bajo en la cuenca central y alto en los flancos estructurales.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Tabio describe un sistema compuesto por:

1. Acuífero somero poroso (Q1sa, Q2ch, Qtf): discontinuo, de baja permeabilidad y limitado a zonas de borde del valle.
2. Acuitardo regional (KPgg): unidad arcillosa que confina el sistema y restringe el flujo vertical.
3. Acuífero profundo fisurado (Ksglt, Ksgpl, Ksgd): unidad de alta transmisividad, con recarga en los flancos noroccidental y suroriental, y potencial de explotación elevado.

4. Zonas de fracturamiento asociadas a fallas inversas (Falla Definida NW y Falla El Porvenir SE): corredores hidrogeológicos estratégicos.
5. Sello basal (Kscn): unidad lutítica de muy baja permeabilidad que delimita el sistema profundo.

Este modelo confirma que el potencial hidrogeológico de Tabio se concentra en los flancos noroccidental y suroriental, donde las areniscas del Grupo Guadalupe afloran por efecto de las fallas inversas y de la Falla El Porvenir, mientras que el valle del río Frío presenta una productividad limitada y variable por el espesor de la Formación Sabana y por la Formación Guaduas, que confinan el sistema.

Tabla 25. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Tabio.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Sabana / Chía / Fluvio-Torrencial (Q1sa, Q2ch, Qtf)	$0{,}01 - 0{,}8$*(matriz)* $1{,}0 - 4{,}5$*(abanicos Qtf)*	$1 - 20$	S_y: $0{,}01 - 0{,}05$	$0{,}5 - 2{,}5$ L/s	Predominio de matriz arcillosa lacustre en cuenca. Abanicos Qtf entregan caudales someros locales.
Formación Guaduas (KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	S: $10^{-5} - 10^{-4}$	$< 0{,}5$ L/s	Sello impermeable continuo que restringe el flujo vertical entre la superficie y Guadalupe.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $> 5{,}0$*(zonas de falla)*	$20 - 300$*(> 450 en Falla El Porvenir)*	S: $10^{-5} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 25{,}0$ L/s	Reservorio fracturado regional de alta transmisividad. Favorecido por la zona de cizalla tectónica.
Formación Conejo (Kscn)	$< 10^{-4}$	< 1	N/A	Nulo a muy bajo	Base o sello impermeable regional en la franja del NW.

17.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El modelo hidrogeológico integrado de Tabio evidencia un sistema complejo, controlado por la estructura sinclinal del valle del río Frío y por la presencia de fallas inversas (incluida la Falla El Porvenir) que elevan y fracturan las unidades permeables del Grupo Guadalupe. El potencial hidrogeológico se concentra en los flancos montañosos del noroccidente y suroriente, donde las areniscas cuarzosas afloran y presentan fracturamiento intenso, mientras que la cuenca central está dominada por un espeso paquete arcilloso cuaternario y por el acuitardo regional de la Formación Guaduas. En consecuencia, el Programa de

Exploración Complementaria se orienta a refinar la geometría del acuífero profundo, delimitar zonas de recarga, caracterizar las zonas de fracturamiento asociadas a fallas, y evaluar la continuidad lateral de las unidades permeables.

Geología detallada de campo (escala 1:10.000 o mayor)

Se propone un levantamiento geológico detallado focalizado en los sectores donde el modelo hidroestructural indica mayor potencial hidrogeológico:

- Sector Noroccidental (0 a 2,0 km del perfil G–G')

Zona cabalgante donde una falla inversa eleva la Formación Conejo y las areniscas del Grupo Guadalupe. Objetivos:

- Verificar continuidad de las areniscas permeables (Ksgd, Ksgpl, Ksglt).
- Identificar zonas de fracturamiento primario y secundario.
- Precisar la geometría del contacto entre Kscn y las areniscas suprayacentes.
- Delimitar áreas de recarga directa en cotas altas.
- Sector Suroriental (4,5 a 6,4 km del perfil G–G')

Zona afectada por la Falla El Porvenir y fallas secundarias. Objetivos:

- Caracterizar la escama rocosa fracturada de Ksgd.
- Identificar corredores hidráulicos asociados a la cizalla.
- Delimitar zonas de recarga tectónica.

Este levantamiento permitirá discriminar sectores con potencial real frente a zonas donde los depósitos cuaternarios actúan como acuitardos.

Inventario ampliado de captaciones y puntos de agua

Se actualizará el inventario hidrogeológico municipal incorporando:

- Profundidad real de pozos existentes.
- Litologías reportadas en perforaciones.
- Caudales de explotación y variabilidad estacional.
- Estado técnico y administrativo de concesiones.
- Identificación de pozos que interceptan unidades del Grupo Guadalupe.
- Registro de surgencias termales o manifestaciones hidrotermales asociadas a fallas.

Este componente permitirá reconocer corredores hidráulicos activos, especialmente en las zonas de fracturamiento asociadas a fallas inversas.

Geofísica aplicada (SEV, sísmica de reflexión y magnetotelúrica)

Se recomienda ejecutar campañas geofísicas en tres zonas estratégicas:

- (i) Sector Noroccidental, franja cabalgante

Donde afloran las areniscas permeables y se concentra la recarga. Objetivo: delimitar espesores saturados y continuidad lateral de unidades permeables.

- (ii) Cuenca Central (2,0 a 4,5 km)

Donde el relleno arcilloso cuaternario supera los 80 m. Objetivo: precisar el espesor del acuitardo y la profundidad del zócalo rocoso.

- (iii) Sector Suroriental, Falla El Porvenir

Donde la cizalla genera fracturamiento secundario de alta transmisividad. Objetivo: identificar corredores hidráulicos preferenciales y zonas de mayor permeabilidad.

Los métodos geofísicos permitirán:

- Estimar espesores saturados.
- Identificar acuitardos y discontinuidades estructurales.
- Precisar la profundidad del acuífero profundo fisurado.
- Evaluar la continuidad lateral de las areniscas permeables.
- Detectar anomalías térmicas asociadas a flujo geotérmico.

Perforaciones exploratorias someras y profundas

Con base en la geología y la geofísica, se recomienda perforar en tres zonas:

- (i) Zona de recarga noroccidental

Donde las areniscas permeables afloran y presentan fracturamiento intenso. Objetivo: caracterizar el acuífero libre/fisurado y evaluar su transmisividad.

- (ii) Zona de influencia de la Falla El Porvenir

Donde la cizalla incrementa la permeabilidad secundaria. Objetivo: evaluar la productividad del corredor hidráulico y su continuidad lateral.

- (iii) Transición cuenca–ladera

Donde el espesor del paquete arcilloso disminuye y pueden existir ventanas hidráulicas. Objetivo: verificar la presencia de niveles permeables intermedios y profundos.

Las perforaciones deberán incluir:

- Registro litológico continuo.
- Ensayos de permeabilidad (slug tests, Lefranc).
- Pruebas de bombeo para estimar transmisividad y coeficiente de almacenamiento.
- Muestreo hidroquímico para evaluar calidad y origen del agua.
- Monitoreo térmico para identificar posibles influencias hidrotermales.

Integración y actualización del modelo hidrogeológico

Los resultados permitirán:

- Refinar la geometría del acuífero profundo fisurado.
- Delimitar zonas de recarga y descarga.
- Establecer áreas de protección y restricciones para captaciones.

- Incorporar las anomalías hidrotermales en el modelo numérico regional.
- Optimizar la planificación hídrica municipal y la gestión del recurso subterráneo.

18 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE FUNZA

El municipio de Funza se localiza en la provincia Sabana Occidente (departamento de Cundinamarca), sobre la cuenca media del río Bogotá. Presenta una topografía marcadamente plana correspondiente al lecho de la antigua cuenca lacustre de la Sabana de Bogotá, con altitudes uniformes que oscilan alrededor de los 2.540 a 2.560 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío y seco a moderadamente húmedo, con temperaturas promedio de 12 °C a 14 °C y una precipitación media anual de 600 a 800 mm con régimen bimodal, caracterizado por eventos de heladas e intensas temporadas de sequía.

18.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La geología superficial y subsuperficial del territorio de Funza está dominada de manera casi exclusiva por un potente paquete de rellenamiento sedimento-lacustre y fluvio-lacustre inconsolidado a semiconsolidado del Cenozoico (Neógeno-Cuaternario):

- Formación Sabana (Q1sa): Depósito fluvio-lacustre muy grueso constituido por una alternancia monótona de arcillas plásticas grises a verdosas, limos, turbas y lentes de arenas finas a medias emplazados en ambientes de aguas lentas y humedales antiguos.
- Formación Chía (Q2ch): Cobertura aluvial y de terrazas recientes restringida a cauces y valles de inundación, compuesta por limos, arenas arcillosas y gravas continentales finas de disposición lenticular.
- Formación Tilatá (NgQt): Infrayace en profundidad al paquete lacustre de Sabana. Está conformada por una secuencia continental de gravas, arenas de grano medio a grueso y delgados mantos de arcilla, constituyendo el basamento poroso del Cenozoico.

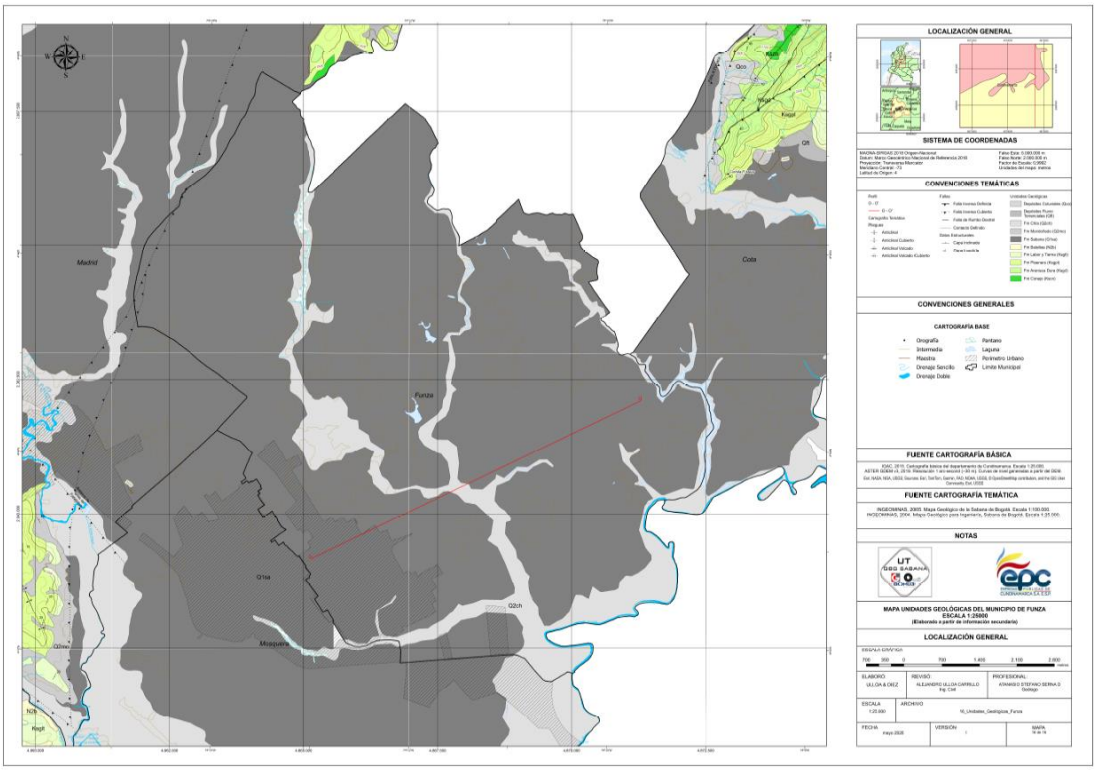




Figura 34. Mapa geológico del sector de Funza y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

18.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría subsuperficial de Funza representa el sector central más profundo de la cuenca lacustre de la Sabana de Bogotá.

En el Perfil Geológico Generalizado $O - O'$ (extensión de 7,0 km con orientación SW a NE, cota ~2.550 m s. n. m.), se diferencian las siguientes características hidroestructurales:

- Dominio Único de Cuenca Lacustre (0 a 7,0 km): A lo largo de todo el corte no afloran unidades rocosas del zócalo Cretácico o Paleógeno. La Formación Sabana (Q1sa) ocupa de manera continua la totalidad del perfil superando los 550 metros de espesor visible (desde la cota superficial de 2.550 m s. n. m. descendiendo por debajo de los 2.000 m s. n. m.). Este espesor corresponde al relleno lacustre visible en el perfil; los pozos del acueducto municipal encontraron la Formación Tilatá debajo de la Formación Sabana a unos 300 m de profundidad.
- Acuíferos Someros Discontinuos (km 2,8 a 3,4): Se observan rellenamientos de la Formación Chía (Q2ch) incrustados sobre el techo de la Formación Sabana (Q1sa), representando antiguos canales fluviales y abanicos continentales con mejor permeabilidad primaria.
- Comportamiento Tectónico: La cuenca se comporta como un bloque hundido relativamente libre de deformaciones tectónicas brutales visibles en superficie, donde las facies arcillosas confinan profundamente los acuíferos rocosos basales (no interceptados en los primeros cientos de metros del perfil).

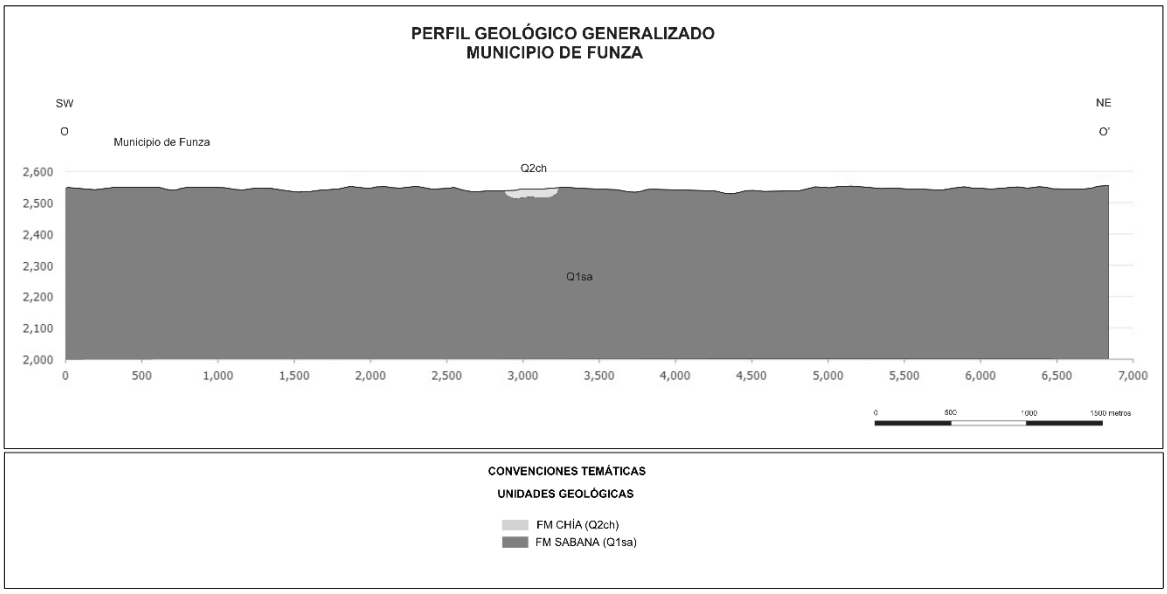


Figura 35. Corte geológico interpretativo del municipio de Funza, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

18.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Funza está dominado por un espeso medio arcilloso que opera como un gran acuitardo/acuífugo regional con lentículas porosas de almacenamiento local.

Tabla 26. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Funza.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado (m)	Permeabilidad / Productividad
Formación Chía (Q2ch)	**Limos, arenas finas, gravillas y materia orgánica.**	Acuitardo somero de poco espesor	**5 – 25 m**	**Baja.** Cobertura delgada, de 5 a 25 m, sin interés como acuífero.
Formación Sabana (Q1sa)	**Arcillas plásticas, limos, turbas y lentículas de arena.**	Acuífero semiconfinado de productividad variable, porosidad primaria; comportamiento variable según facies	Del orden de 300 m; debajo se encuentra la Formación Tilatá	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s.
Formación Tilatá (NgQt)	**Gravas, arenas de grano medio-grueso e intercalaciones de arcilla.**	Acuífero regional, porosidad primaria; semiconfinado a confinado	**50 – 150 m *(subsuperficial)***	**Media a Alta. Excelente potencial acuífero basal previo al basamento rocoso.**

18.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

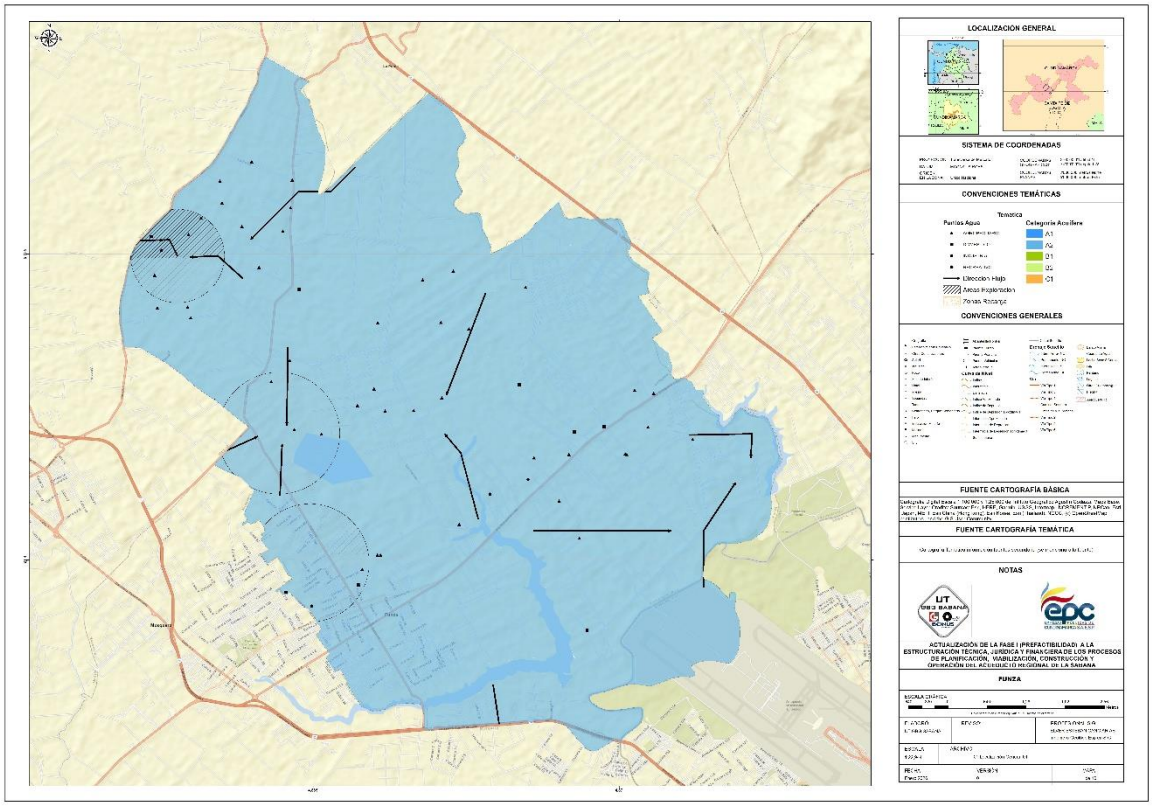


Figura 36. Mapa hidrogeológico del municipio de Funza, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 27. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Funza.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Chía (Q2ch)	$0{,}1 - 2{,}0$	$1 - 15$	S_y: $0{,}02 - 0{,}08$	$0{,}2 - 1{,}5$ L/s	Niveles freáticos muy someros y lenticulares. Alta vulnerabilidad a sequías.
Formación Sabana (Q1sa)	$10^{-4} - 10^{-2}$*(matriz)* $0{,}5 - 3{,}0$*(lentes)*	$1 - 30$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$0{,}5 - 3{,}0$ L/s	Acuífero semiconfinado de productividad variable, condicionado a los cambios de facies. Producción supeditada a la

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
					interceptación de paleocanales.
Formación Tilatá (NgQt)	$1{,}0 - 10{,}0$	$30 - 180$	$S: 10^{-4} - 10^{-3}$	$5{,}0 - 15{,}0$ L/s	Reservorio poroso granular profundo de buena transmisividad bajo la cobertura de Q1sa

18.5 INFORMACIÓN ADICIONAL DEL CONVENIO EPC-CAR

El documento presenta la evaluación hidrogeológica del predio Lo 3 en el municipio de Funza, dentro del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024. El predio, identificado con la cédula catastral 25286010000000299004200000000, fue seleccionado para la ejecución de tres sondeos magnetotelúricos ubicados a distancias de 145 y 312 metros entre sí.

La geología regional del área corresponde a un conjunto de unidades sedimentarias que abarcan desde el Cretácico superior hasta depósitos cuaternarios recientes, destacándose formaciones como Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas, Bogotá y Tilatá, además de depósitos de terraza alta, aluviales y coluviales. En Funza, la mayor parte del subsuelo está cubierto por depósitos cuaternarios, y los estudios previos del SGC y la EAAB permiten definir un perfil geológico con un relleno sedimentario superior a 400 a 500 metros, dominado por la Formación Sabana y cubierto por materiales de la Formación Chía, con transición hacia la Formación Tilatá en profundidad. La integración de perforaciones, SEV y magnetotelúrica confirma la presencia de una cuenca profunda con continuidad lateral marcada.

El inventario hidrogeológico del municipio registra 389 puntos de agua, de los cuales el 50% están en uso, el 20% abandonados y el 14% obstruidos, sin nacimientos reportados. La CAR cuenta con 55 concesiones de aguas subterráneas en Funza, destinadas principalmente al uso agropecuario (84%), seguido por el doméstico (9%) y el industrial (7%).

La concesión más cercana al predio Lo 3 corresponde al expediente 4110, ubicada a 1.030 metros, con un pozo de 395,92 metros de profundidad y un caudal concesionado de 4,5 L/s. Su columna litológica muestra arcillas y turbas superficiales, un espesor considerable de la Formación Tilatá, seguido por la Formación Bogotá y finalmente la Arenisca del Cacho, que constituye el acuífero productor.

Según seguimiento técnico, este pozo presenta fallas operativas y solo produce agua durante 15 minutos antes de agotarse temporalmente.

El documento describe detalladamente el método magnetotelúrico, basado en la medición de campos eléctricos y magnéticos para inferir la resistividad del subsuelo. Se explica la disposición de electrodos, sensores, configuración del equipo y el procesamiento de datos

mediante los software Geode Mtpro, Scs2d y Modsect, aplicando algoritmos de inversión como Occam y ABIC para generar modelos de resistividad.

Los tres sondeos MT realizados en el predio Lo 3 permiten interpretar la estructura eléctrica del subsuelo. El MT1 muestra cinco unidades con resistividades entre 80 y 700 ohm-m en los primeros cientos de metros, asociadas a gravas, arenas y areniscas, indicando potencial hidrogeológico. El MT2 presenta resistividades entre 20 y 200 ohm-m en los primeros 200 metros, también compatibles con materiales permeables. En contraste, el MT3 exhibe resistividades muy altas desde superficie, superiores a 1000 a 15000 ohm-m, lo que sugiere un medio compacto y de baja permeabilidad, sin potencial hidrogeológico en los primeros 200 metros. Esta variabilidad lateral obliga a verificar continuidad antes de cualquier perforación.

La interpretación general concluye que el predio Lo 3 presenta potencial hidrogeológico moderado en los primeros 200 metros, sustentado por MT1 y MT2, donde se infieren arenas y gravas cuaternarias permeables. Sin embargo, la presencia de un medio altamente resistivo en MT3 indica heterogeneidad lateral que debe ser confirmada mediante perforación exploratoria y registros geofísicos de pozo. Se propone preliminarmente ubicar filtros entre 50 y 200 metros, una vez se confirme la continuidad de las unidades permeables. Finalmente, el documento aclara que las diferencias entre los resultados MT y los SEV históricos del SGC no representan contradicción, sino diferencias en la sensibilidad física de los métodos, ya que el SEV suaviza contrastes en medios arcillosos saturados mientras que el MT detecta cambios profundos en consolidación y porosidad.

18.6 INFORMACIÓN ADICIONAL

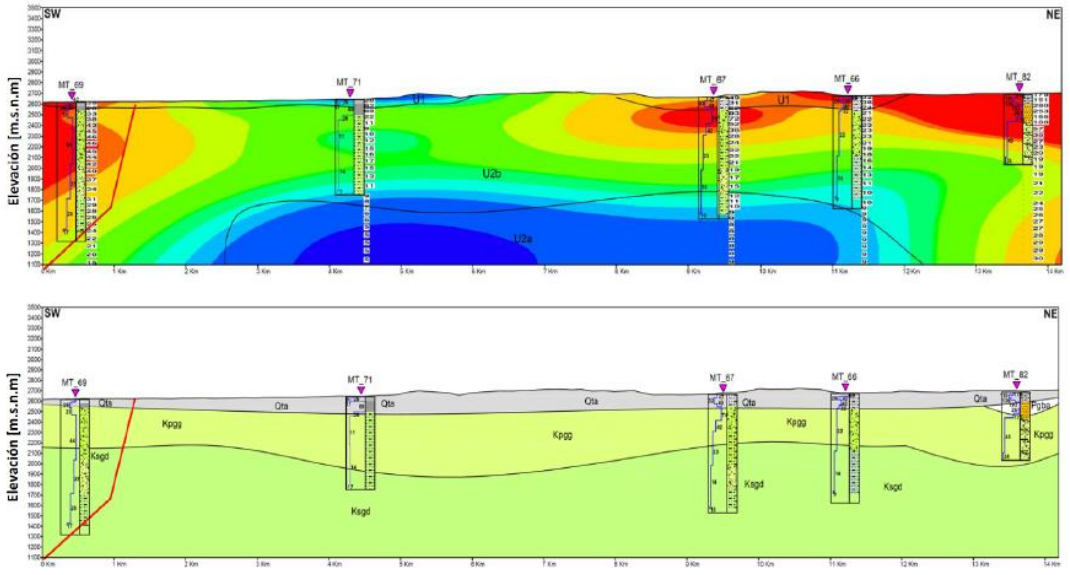


Figura 37. Perfil en los municipios de Funza, Madrid y Facatativá donde el perfil de arriba representas las resistividades de este y en la inferior el geológico asociado las resistividades. (Magneto, 2018)

Figura 37. Perfil magnetotelúrico y su interpretación geológica a lo largo del transecto suroccidente–noreste entre los municipios de Funza, Madrid y Facatativá.

Las figuras presentan un perfil magnetotelúrico y su correspondiente interpretación geológica a lo largo de un transecto con dirección suroccidente–noreste entre los municipios de Funza, Madrid y Facatativá.

En el perfil superior se observa la distribución de resistividades del subsuelo, donde los colores más cálidos representan materiales de alta resistividad y los tonos fríos corresponden a unidades de baja resistividad. Las zonas de resistividad elevada, asociadas a los colores rojo y naranja, indican la presencia de rocas competentes, típicamente areniscas cuarzosas masivas y fracturadas pertenecientes al Grupo Guadalupe, mientras que los tonos verdes y amarillos reflejan litologías intermedias como areniscas con limolitas o niveles parcialmente fracturados.

Las zonas azules y celestes corresponden a materiales de baja resistividad, característicos de depósitos cuaternarios saturados o lutitas arcillosas del Cretácico. La distribución de estas unidades revela un bloque elevado hacia el noreste, donde predominan las resistividades altas, lo que sugiere la presencia de rocas más consolidadas y permeables, mientras que hacia el suroccidente se observan resistividades bajas asociadas a depósitos más finos y saturados. Los puntos MT_69, MT_71, MT_67, MT_66 y MT_82 representan estaciones de medición que permiten correlacionar la variabilidad lateral de las unidades y evidencian contrastes resistivos que sugieren la existencia de contactos estructurales y posibles fallas inversas.

El perfil inferior traduce esta información geofísica en unidades geológicas concretas. Los depósitos cuaternarios aluviales (Qta) se ubican en la parte superior del perfil y corresponden a los niveles de baja resistividad observados en el modelo magnetotelúrico.

Por debajo de ellos aparecen las areniscas del Grupo Guadalupe, representadas por las unidades Kpgq y Ksgd, que coinciden con las zonas de resistividad intermedia y alta del perfil superior. La unidad Kpgq, compuesta por areniscas y limolitas silíceas, se asocia a resistividades moderadas y representa un acuífero intermedio con fracturamiento variable.

La unidad Ksgd, correspondiente a la Arenisca Dura, aparece como un cuerpo continuo y de alta resistividad, lo que confirma su carácter de roca masiva y fracturada, constituyendo el principal acuífero profundo de la región. La geometría del perfil muestra un levantamiento hacia el noreste, coherente con la tectónica de cabalgamiento que caracteriza la Sabana Occidente, y evidencia contactos abruptos entre las unidades cuaternarias y las rocas cretácicas, lo que sugiere la presencia de fallas inversas y escarpes estructurales.

Desde el punto de vista hidrogeológico, las figuras revelan un sistema acuífero estratificado donde los depósitos cuaternarios representan un acuífero somero de baja productividad, útil únicamente para abastecimiento local.

Las areniscas del Grupo Guadalupe conforman los acuíferos intermedio y profundo, con la unidad Ksgd como el reservorio de mayor potencial debido a su fracturamiento tectónico y alta competencia. La correlación entre resistividades y unidades geológicas confirma que las zonas de mayor interés para exploración y captación se encuentran hacia el noreste del perfil, donde el espesor y continuidad de la Arenisca Dura son mayores.

Asimismo, los contrastes resistivos y los cambios abruptos en la geometría de las unidades sugieren la existencia de corredores de fractura que pueden actuar como vías preferenciales de flujo subterráneo, aumentando la transmisividad y el rendimiento de posibles perforaciones. En conjunto, las figuras permiten comprender la arquitectura

hidrogeológica regional y destacan la importancia de la estructura tectónica en la distribución y comportamiento de los acuíferos entre Funza, Madrid y Facatativá.

18.7 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El presente Programa de Exploración Complementaria se formula con base en el modelo hidrogeológico regional y local del municipio de Funza y en los resultados obtenidos durante la evaluación geofísica del predio Lo 3, seleccionado en el marco del Convenio Interadministrativo CAR-CONV-INT-3121-2024. El municipio se localiza en la cuenca media del río Bogotá y se caracteriza por una topografía plana correspondiente al antiguo sistema lacustre de la Sabana de Bogotá, donde predomina un paquete sedimentario cenozoico de gran espesor. De acuerdo con la información integrada, “la Formación Sabana ocupa de manera continua la totalidad del perfil superando los 550 metros de espesor visible”, constituyendo un acuífero semiconfinado de productividad variable, condicionado a la presencia de lentículas arenosas, mientras que la Formación Chía conforma la cobertura somera con limos, arenas finas y gravillas, una cobertura delgada, de 5 a 25 m, que no constituye un acuífero.

En profundidad, la Formación Tilatá constituye el principal reservorio granular, con gravas y arenas de grano medio a grueso y transmisividades medias a altas.

En este caso particular. la geología superficial no va a aportar mas de lo que ya se conoce.

En este sentido, lo que es muy importante es actualizar el inventario de captaciones existentes para determinar con precisión el caudal que se está extrayendo y de dónde proviene el agua.

La información magnetotelúrica levantada en el predio Lo 3 evidencia heterogeneidad lateral en la estructura eléctrica del subsuelo. Los sondeos MT1 y MT2 presentan resistividades entre 20 y 200 ohm-m en los primeros 200 metros, compatibles con arenas y gravas cuaternarias permeables, mientras que MT3 muestra resistividades superiores a 1000 a 15000 ohm-m, indicando un medio compacto y de baja permeabilidad.

Esta variabilidad obliga a verificar la continuidad de las unidades permeables antes de definir intervalos de captación. El documento técnico señala que “el predio fue seleccionado para la ejecución de tres sondeos magnetotelúricos ubicados a distancias de 145 y 312 metros entre sí”, lo que proporciona un primer control geofísico, pero no suficiente para establecer con certeza la geometría de los acuíferos someros e intermedios.

Adicionalmente, la litología reportada en la concesión cercana 4110 confirma la presencia de arcillas y turbas superficiales, un espesor considerable de la Formación Tilatá y niveles arenosos profundos asociados a la Arenisca del Cacho, lo que refuerza la necesidad de una verificación directa mediante perforación exploratoria.

Con fundamento en lo anterior, se establece un programa de exploración complementaria orientado a confirmar el potencial hidrogeológico y a definir con precisión los intervalos productivos y parámetros hidráulicos de los acuíferos presentes.

Se desarrollará una fase de geofísica complementaria que incluirá la ejecución de entre cuatro y seis sondeos eléctricos verticales (SEV), con profundidades de investigación de hasta 300 metros (distancia AB/2 de 1000 m). Estos sondeos permitirán diferenciar niveles arcillosos saturados de la Formación Sabana respecto a niveles arenosos y gravosos de la

Formación Chía y Tilatá, y correlacionar los resultados con los SEV históricos del SGC para validar la continuidad lateral de las unidades permeables.

En caso de ser técnicamente viable, se recomienda la adquisición de uno o dos nuevos puntos magnetotelúricos entre MT2 y MT3, con el fin de precisar la transición resistiva observada y determinar si el comportamiento de MT3 corresponde a un fenómeno local o regional.

La fase central del programa consiste en la perforación de un pozo exploratorio–piloto en el predio Lo 3, con una profundidad objetivo de 400 metros. Durante la perforación se realizará una descripción litológica continua y se aplicarán registros geofísicos de pozo (gamma natural, resistividad, SP y caliper) para identificar con precisión los intervalos porosos y los niveles arcillosos sellantes. Con base en esta información se ajustará el diseño preliminar de filtros, inicialmente propuesto entre 50 y 90 metros para interceptar el acuífero somero de la Formación Chía o lentes arenosos en el techo de la Formación Sabana, entre 120 y 180 metros para lentes arenosos más desarrollados dentro de la Formación Sabana, y entre 190 y 230 metros si se interceptan las gravas y arenas medio–gruesas de la Formación Tilatá.

La información geológica, geoeléctrica, magnetotelúrica y litológica disponible para Funza es suficiente para avanzar hacia un modelo numérico de flujo subterráneo. Los lineamientos para ese modelo se presentan de forma conjunta para Funza, Madrid, Mosquera y Facatativá en el capítulo de integración regional.

19 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE MADRID

El municipio de Madrid se localiza en la provincia Sabana Occidente (departamento de Cundinamarca), sobre la cuenca media del río Bogotá y la subcuenca del río Subachoque. Presenta una morfología predominantemente plana de cuenca interandina correspondiente a la planicie de la Sabana, interrumpida por colinas y lomas de baja elevación que corresponden a la exposición de estructuras anticlinales, con altitudes que oscilan entre los 2.540 y 2.650 m s. n. m. Su clima es frío, con temperaturas promedio entre 12 °C y 14 °C y una precipitación media anual de 600 a 800 mm distribuida en un régimen bimodal.

19.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La secuencia estratigráfica de Madrid está conformada por un potente relleno fluvio-lacustre no consolidado que reposa sobre un zócalo sedimentario plegado del Cretácico Superior al Paleógeno:

- Depósitos Cuaternarios, Formación Sabana (Q1sa) y Formación Chía (Q2ch): Extenso espesor de arcillas lacustres plásticas, limos, turbas e intercalaciones de lentes de arena y grava continental en los valles aluviales del río Subachoque.
- Secuencia Paleógena, Formaciones Regadera (Pgr), Bogotá (Pgb), Cacho (Pgc) y Guaduas (KPgg): Sucesión de arcillolitas, lutitas y lodolitas de ambiente continental a marginal (KPgg, Pgb) que confinan potentes bancos de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso (Pgc, Pgr).
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd), compuestas por areniscas cuarzosas masivas, liditas silíceas y cherts intensamente fracturados.

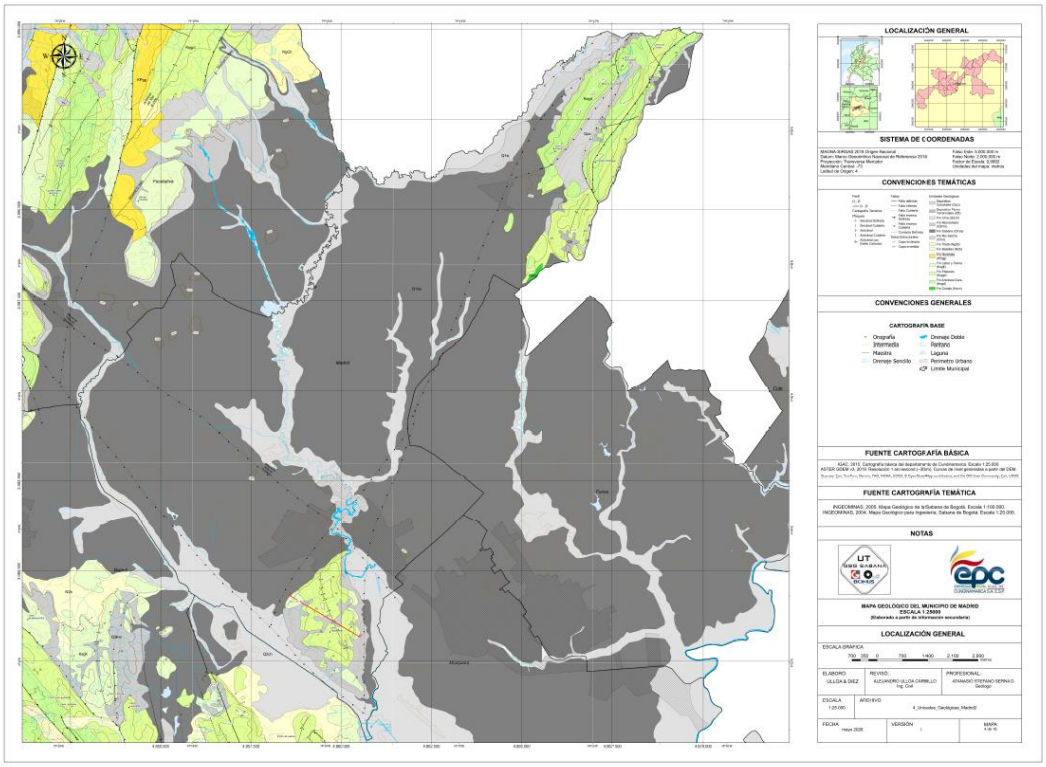


Figura 38. Mapa geológico del sector de Madrid y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

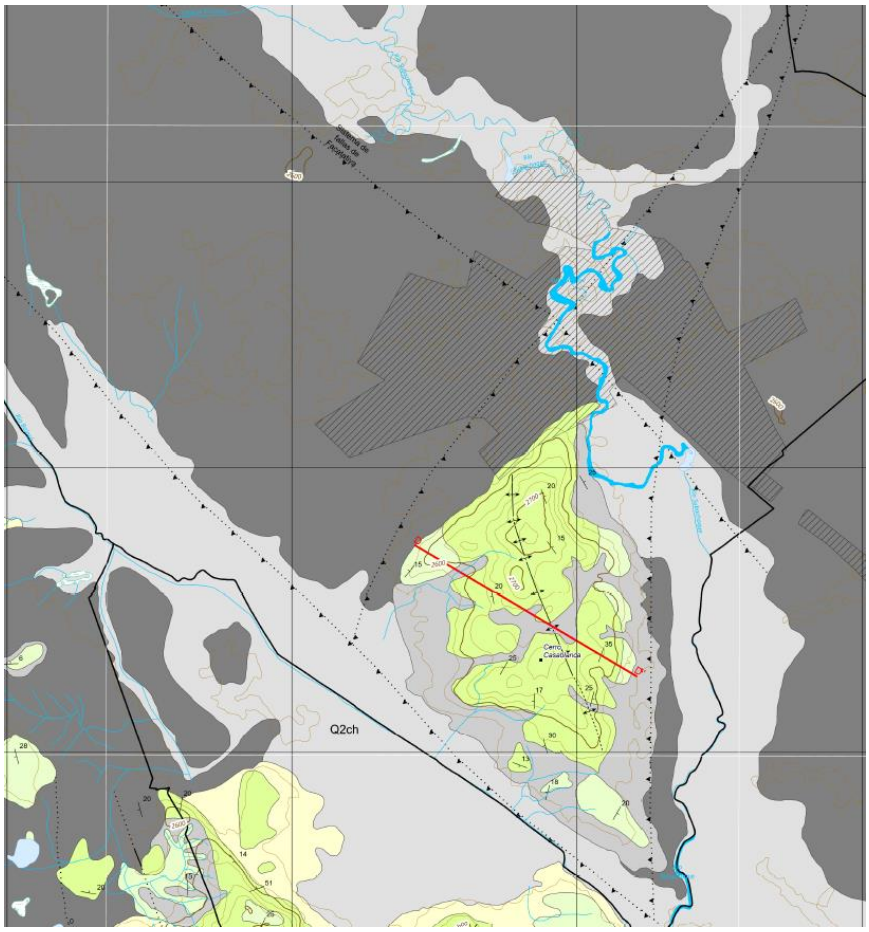


Figura 39. Detalle ampliado del mapa geológico del sector de Madrid y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

19.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

El subsuelo de Madrid responde a la depresión del Sinclinal de Madrid–Subachoque, flanqueado por estructuras anticlinales y afectado por un complejo sistema de fallas inversas:

- Eje del Sinclinal (Sector Central y Oriental): Gran cuenca deprimida donde la Formación Sabana (Q1sa) alcanza elevados espesores, cubriendo el paquete pelítico de las Formaciones Bogotá (Pgb) y Guaduas (KPgg). Esta configuración genera condiciones de confinamiento vertical para los niveles permeables infrayacentes.
- Flancos Levantados (Sectores de Colina y Bordes): Afloramientos discontinuos de las unidades paleógenas (Pgc, Pgr) y del Grupo Guadalupe (Ksglt), los cuales emergen formando lomas suaves y actuando como frentes de infiltración directa o recarga lateral hacia la cuenca central.

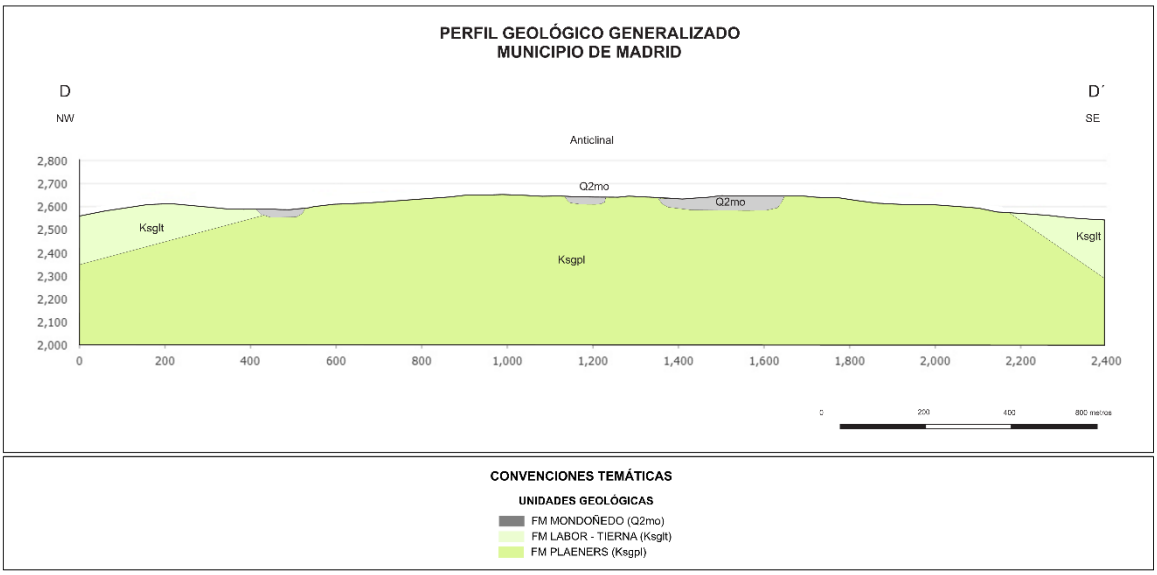


Figura 40. Corte geológico interpretativo del municipio de Madrid, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

19.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El municipio presenta un marcado comportamiento dual: un acuífero poroso somero aluvial/lacustre con transmisividad heterogénea y profundos acuíferos fisurados/porosos de alta productividad asociados a las Formaciones Cacho, Regadera y Grupo Guadalupe.

Tabla 28. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Madrid.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado (m)	Permeabilidad / Productividad
Formación Sabana / Chía (Q1sa, Q2ch)	Arcillas plásticas, limos, turbas y lentes de arena/grava.	Acuífero semiconfinado de productividad variable, porosidad primaria; comportamiento variable según facies. La Formación Chía es una cobertura delgada sin interés como acuífero	> 120 m en cuenca central	**Variable.** Producción variable según los cambios de facies; caudales del orden de 1 a 3 L/s, en general menores de 5 L/s y en muchos casos inferiores a 1 L/s.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado (m)	Permeabilidad / Productividad
Formaciones Bogotá y Guaduas (Pgb, KPgg)	Arcillolitas, lutitas, lodolitas y capas de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	> 300 m	Muy Baja. Barrera impermeable vertical que aísla los reservorios profundos.
Formaciones Cacho y Regadera (Pgc, Pgr)	Areniscas cuarzosas de grano medio a conglomeráticas.	Acuífero, porosidad mixta; semiconfinado a confinado	50 – 110 m	Alta. Excelente acuífero granular intermedio con altos rendimientos en pozos.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	Areniscas cuarzosas, liditas, cherts y limolitas fracturadas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 400 m	Alta. Reservorio profundo principal gobernado por porosidad secundaria y diaclasado.

19.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

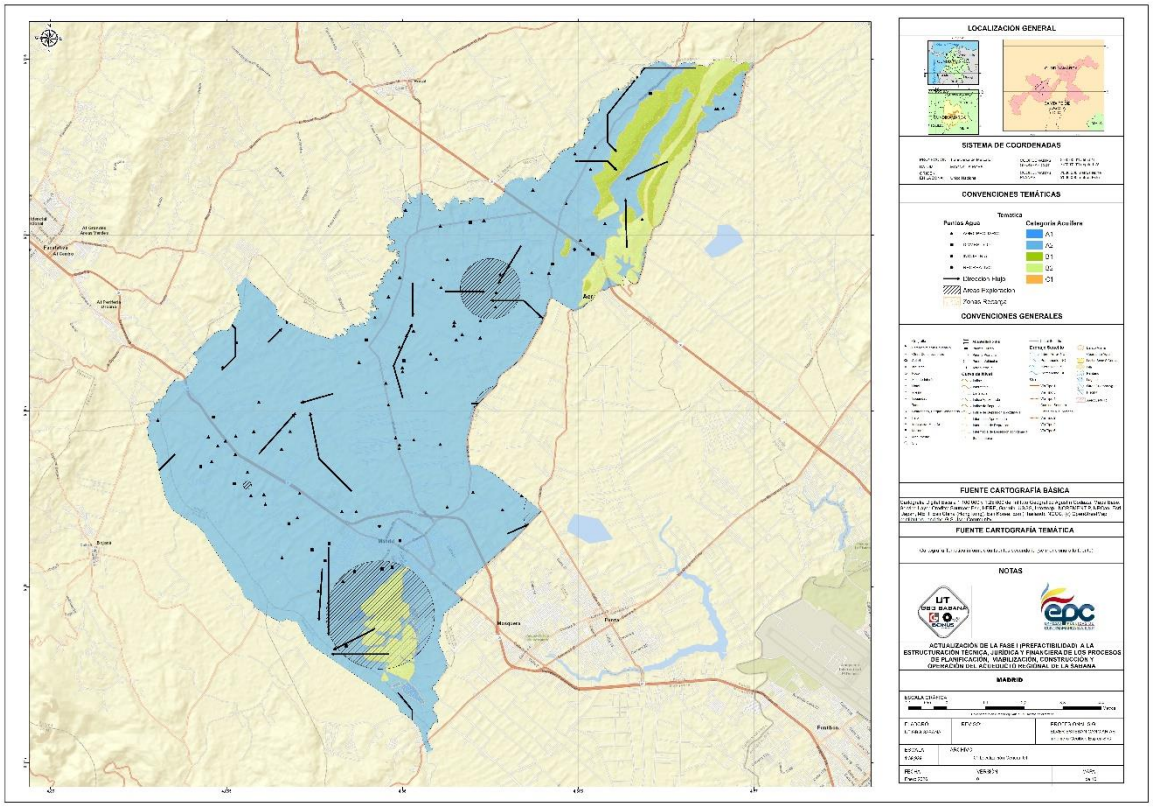


Figura 41. Mapa hidrogeológico del municipio de Madrid, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos

existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 29. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Madrid.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Sabana / Chía (Q1sa, Q2ch)	$0{,}01 - 0{,}8$*(matriz)* $1{,}0 - 4{,}0$*(lentes)*	$1{,}0 - 25$	S_y: $0{,}01 - 0{,}05$	$0{,}5 - 2{,}5$ L/s	Elevada matriz arcillosa. Captación somera en paleocanales del río Subachoque.
Formaciones Bogotá y Guaduas (Pgb, KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	S: $10^{-5} - 10^{-4}$	$< 0{,}5$ L/s	Sello impermeable continuo que restringe el flujo hacia unidades inferiores.
Formaciones Cacho y Regadera (Pgc, Pgr)	$0{,}8 - 6{,}0$	$40 - 220$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$5{,}0 - 15{,}0$ L/s	Elevada porosidad intergranular. Excelente respuesta hidráulica en pozos profundos.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $> 5{,}0$*(fracturas)*	$30 - 350$*(> 450 en fallas)*	S: $10^{-5} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 25{,}0$ L/s	Principal acuífero fisurado. Caudales elevados condicionados al fracturamiento tectónico.

19.5 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PROVENIENTE DEL CONVENIO EPC-CAR

Predio Máximo Mendoza (Madrid)

El estudio hidrogeológico del predio Máximo Mendoza, ubicado en el municipio de Madrid y evaluado en el marco del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024, se desarrolló sobre depósitos cuaternarios de terraza (Qta) delimitados por fallas cubiertas y estructuras anticlinales que exponen rocas del Grupo Guadalupe en sectores cercanos. La geología regional está dominada por unidades cretácicas como Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas y Bogotá, infrayacidas por depósitos cuaternarios de gran espesor.

Los perfiles geoeléctricos históricos del SGC (1996), muestran variaciones en el espesor del relleno cuaternario entre 200 y más de 500 metros, con resistividades de 200 ohm-m asociadas a la Formación Arenisca Dura, que infrayace los depósitos recientes. El

documento señala que “hacia el NW una capa de aproximadamente 350 metros de profundidad… y hacia el SE el cuaternario se hace mucho más grueso con más de 500 metros de espesor”, lo que evidencia una cuenca sedimentaria heterogénea.

El inventario hidrogeológico del municipio registra 276 puntos de agua, de los cuales el 49% están en uso y el 48% en abandono, con predominio de usos agropecuarios. Las concesiones cercanas al predio muestran profundidades entre 154 y 530 metros y litologías dominadas por arcillas cuaternarias en los primeros 200 metros, seguidas por areniscas finas del Grupo Guadalupe, donde se obtienen los mayores caudales (hasta 51,99 L/s).

El pozo Lusitania (expediente 85842), perforado a 516 metros, confirma la presencia de un acuífero profundo de alta transmisividad (362 m²/día). Los sondeos magnetotelúricos realizados en el predio permiten caracterizar la resistividad del subsuelo y corroboran la presencia de un medio cuaternario espeso con unidades arenosas profundas asociadas al Grupo Guadalupe, constituyendo el principal acuífero regional.

Predio San Isidro (Madrid)

El predio San Isidro, ubicado en Madrid y evaluado mediante dos sondeos magnetotelúricos, se encuentra sobre depósitos cuaternarios de terraza (Qta) influenciados por fallas cubiertas como la de Facatativá y la de Subachoque, así como por estructuras anticlinales que exponen rocas del Grupo Guadalupe en sectores cercanos.

La geología regional incluye unidades cretácicas como Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas y Bogotá, además de depósitos cuaternarios extensos.

El perfil geoeléctrico del SGC (1996), ubicado a 900 metros del predio, muestra un espesor cuaternario cercano a 350 metros y resistividades de 500 ohm-m asociadas a la Formación Guaduas, infrayaciendo los depósitos recientes.

El documento indica que “los dos MT realizados en el predio San Isidro se encuentran en el área central de la planicie del Cuaternario… haciendo que las rocas del Grupo Guadalupe se encuentren a mayor profundidad”, lo que confirma la presencia de una cuenca sedimentaria profunda.

El inventario hidrogeológico del municipio registra 276 puntos de agua, con predominio de pozos agrícolas (73%) y ausencia de manantiales o aljibes. Las concesiones cercanas al predio presentan profundidades entre 180 y 357 metros, con litologías dominadas por arcillas y arenas cuaternarias, y caudales entre 0,05 y 1,91 L/s, lo que evidencia un aprovechamiento moderado del acuífero somero.

La información sugiere que el predio San Isidro se ubica en una zona donde el acuífero profundo del Grupo Guadalupe se encuentra a mayor profundidad que en otros sectores de Madrid, mientras que los depósitos cuaternarios constituyen el principal medio hidrogeológico en los primeros cientos de metros.

Predio Institución Zoraida Cadavid (Madrid)

El predio Institución Zoraida Cadavid, evaluado mediante dos sondeos magnetotelúricos, se localiza sobre depósitos cuaternarios de terraza (Qta) influenciados por fallas cubiertas y estructuras anticlinales que exponen rocas del Grupo Guadalupe en sectores cercanos.

La geología regional del municipio de Madrid está dominada por unidades cretácicas como Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas y Bogotá, además de

depósitos cuaternarios de gran espesor. Los perfiles geoeléctricos del SGC (1996), ubicados a 820 y 600 metros del predio, muestran espesores cuaternarios entre 200 y más de 500 metros, con resistividades de 200 ohm-m asociadas a la Formación Arenisca Dura, que infrayace los depósitos recientes.

El documento señala que “hacia el SE el cuaternario se hace mucho más grueso con más de 500 metros de espesor”, lo que evidencia una cuenca profunda con variabilidad lateral. El inventario hidrogeológico del municipio registra 276 puntos de agua, con predominio de pozos agrícolas y ausencia de manantiales.

Las concesiones cercanas al predio presentan profundidades entre 154 y 516 metros, con litologías dominadas por arcillas cuaternarias en los primeros 200 metros y areniscas finas del Grupo Guadalupe en profundidad, donde se obtienen los mayores caudales (hasta 51,99 L/s).

El pozo Lusitania, perforado a 516 metros, confirma la presencia de un acuífero profundo de alta transmisividad.

Los sondeos MT realizados en el predio permiten caracterizar la resistividad del subsuelo y corroboran la presencia de un medio cuaternario espeso con unidades arenosas profundas asociadas al Grupo Guadalupe, constituyendo el principal acuífero regional.

Resumen integrado de los tres estudios (Madrid)

Los tres estudios hidrogeológicos realizados en los predios Máximo Mendoza, San Isidro y Zoraida Cadavid en el municipio de Madrid evidencian un comportamiento hidrogeológico coherente y consistente con la estructura regional de la Sabana de Bogotá.

En todos los casos, los predios se encuentran sobre depósitos cuaternarios de terraza (Qta) de gran espesor, influenciados por fallas cubiertas y estructuras anticlinales que delimitan la geometría del subsuelo.

Los perfiles geoeléctricos históricos del SGC (1996) muestran espesores cuaternarios variables entre 200 y más de 500 metros, con resistividades profundas asociadas a la Formación Arenisca Dura y, en algunos sectores, a la Formación Guaduas, que infrayacen los depósitos recientes. Los documentos señalan que “hacia el SE el cuaternario se hace mucho más grueso con más de 500 metros de espesor”, lo que confirma la presencia de una cuenca sedimentaria profunda y heterogénea.

El inventario hidrogeológico del municipio registra 276 puntos de agua, con predominio de pozos agrícolas y ausencia de manantiales, lo que evidencia una dependencia significativa del recurso subterráneo.

Las concesiones cercanas a los tres predios muestran profundidades entre 150 y 530 metros, con litologías dominadas por arcillas cuaternarias en los primeros 200 metros y areniscas finas del Grupo Guadalupe en profundidad, donde se obtienen los mayores caudales (hasta 51,99 L/s). El pozo Lusitania, perforado a 516 metros, confirma la presencia de un acuífero profundo de alta transmisividad, constituyendo el principal reservorio regional. Los sondeos magnetotelúricos realizados en los tres predios corroboran la presencia de un medio cuaternario espeso con unidades arenosas profundas asociadas al Grupo Guadalupe, cuya continuidad lateral está controlada por estructuras tectónicas. En conjunto, los estudios muestran que el municipio de Madrid posee un sistema hidrogeológico estratificado, donde los depósitos cuaternarios constituyen acuíferos

someros de baja a moderada productividad, mientras que el Grupo Guadalupe representa el acuífero profundo de mayor potencial.

19.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El municipio de Madrid presenta una configuración hidrogeológica compleja y altamente favorable para la implementación de un programa de exploración complementaria, debido a la abundante información geológica, geoeléctrica, magnetotelúrica y litológica disponible.

El modelo hidrogeológico regional indica que Madrid se ubica sobre la depresión del Sinclinal Madrid–Subachoque, donde la Formación Sabana y la Formación Chía conforman un potente paquete fluvio-lacustre de más de 120 metros de espesor en la cuenca central, sobreyaciendo unidades paleógenas y cretácicas que actúan como acuitardos y como reservorios profundos.

Hacia el SE el cuaternario se hace mucho más grueso con más de 500 metros de espesor, lo que confirma la presencia de una cuenca sedimentaria profunda y heterogénea. En los flancos levantados afloran unidades del Grupo Guadalupe, caracterizadas por areniscas cuarzosas fracturadas que constituyen el principal acuífero regional, con transmisividades que pueden superar los 350 m²/día en zonas de fallamiento, como lo demuestra el pozo Lusitania perforado a 516 metros, cuya prueba de bombeo reporta una transmisividad de 362 m²/día.

Los tres predios evaluados en el marco del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024, Máximo Mendoza, San Isidro y Zoraida Cadavid, se encuentran sobre depósitos cuaternarios de terraza (Qta) influenciados por fallas cubiertas y estructuras anticlinales que controlan la geometría del subsuelo y la continuidad lateral de los acuíferos.

Los perfiles geoeléctricos del SGC (1996), muestran espesores cuaternarios variables entre 200 y más de 500 metros, con resistividades profundas asociadas a la Formación Arenisca Dura y, en algunos sectores, a la Formación Guaduas.

Los sondeos magnetotelúricos realizados en los tres predios corroboran la presencia de un medio cuaternario espeso con unidades arenosas profundas asociadas al Grupo Guadalupe, cuya profundidad varía según la posición estructural. En el predio San Isidro, por ejemplo, “las rocas del Grupo Guadalupe se encuentran a mayor profundidad”, mientras que en Máximo Mendoza y Zoraida Cadavid se identifican resistividades compatibles con areniscas finas del Grupo Guadalupe a partir de los 200 a 250 metros.

El inventario hidrogeológico del municipio registra 276 puntos de agua, con predominio de pozos agrícolas (73%) y ausencia de manantiales, lo que evidencia una dependencia significativa del recurso subterráneo. Las concesiones cercanas a los predios muestran profundidades entre 150 y 530 metros, con litologías dominadas por arcillas cuaternarias en los primeros 200 metros y areniscas finas del Grupo Guadalupe en profundidad, donde se obtienen los mayores caudales (hasta 51,99 L/s).

Esta información, sumada a los parámetros hidráulicos reportados para las unidades hidrogeológicas, como conductividades entre 0,8 y 6,0 m/día para las Formaciones Cacho y Regadera, y entre 0,1 y 2,5 m/día en matriz y >5 m/día en fracturas para el Grupo Guadalupe, permite establecer un programa de exploración complementaria robusto y técnicamente sustentado.

Con base en esta evidencia, se propone un programa de exploración complementaria que permita confirmar la geometría de los acuíferos someros y profundos, su continuidad lateral, sus parámetros hidráulicos y su potencial de explotación.

El programa inicia con una actualización y verificación del inventario de captaciones de agua subterránea en campo y en oficina y continúa con una fase de oficina en la que se integrará la cartografía geológica e hidrogeológica disponible, los perfiles geoeléctricos históricos del SGC, las concesiones vigentes y la información litológica de pozos profundos, con el fin de ajustar el modelo conceptual y delimitar los volúmenes probables de acuíferos en los depósitos cuaternarios y en las unidades profundas del Grupo Guadalupe.

En caso de ser técnicamente viable, se recomienda la adquisición de nuevos puntos magnetotelúricos en zonas donde los perfiles existentes muestran cambios abruptos de resistividad, con el fin de precisar la transición entre el medio cuaternario y las areniscas profundas del Grupo Guadalupe.

Se considera igualmente muy importante implementar la Reflexión Sísmica de manera quye se localicen las zonas de fracturas /fallas que es d donde se obtiene el agua subterránea.

A continuación, el programa contempla una fase de monitoreo piezométrico y calidad de agua mediante la instalación de piezómetros someros en los predios y su entorno inmediato, con el fin de definir niveles freáticos, gradientes locales y respuesta a eventos de lluvia o sequía.

La información geológica, geoeléctrica, magnetotelúrica y litológica disponible para Madrid es suficiente para avanzar hacia un modelo numérico de flujo subterráneo. Los lineamientos para ese modelo se presentan de forma conjunta para Funza, Madrid, Mosquera y Facatativá en el capítulo de integración regional.

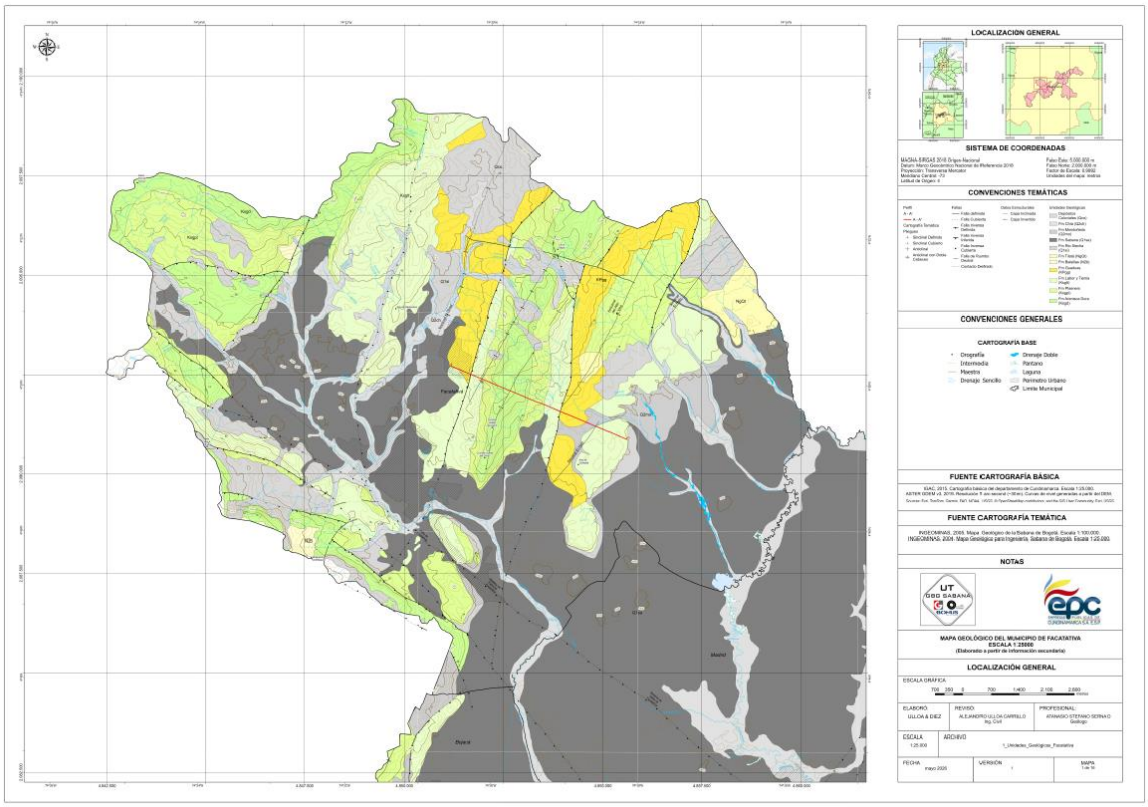
20 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE FACATATIVÁ

El municipio de Facatativá se localiza en la provincia Sabana Occidente (departamento de Cundinamarca), sobre el extremo occidental de la Sabana de Bogotá en la divisoria de aguas hacia la cuenca del río Magdalena y el río Bogotá. Presenta una topografía variada compuesta por una llanura interandina en su sector oriental que se conecta con relieves montañosos de escarpes, cuencas y cerros en sus sectores central y occidental, con altitudes que oscilan entre los 2.580 y cerca de los 3.000 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío, con temperaturas promedio de 12 °C a 14 °C y una precipitación media anual entre 800 y 1.000 mm con régimen bimodal.

20.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La secuencia estratigráfica del subsuelo de Facatativá comprende un registro sedimentario del Cretácico Superior y Paleógeno, fuertemente afectado por cabalgamientos y cubierto discontinuamente por sedimentos continentales del Cuaternario:

- Depósitos Cuaternarios, Formación Mondoñedo (Q2mo): Rellenos sedimento-continentales someros constituidos por limos, arcillas y gravas aluviales situados en depresiones y valles intra-montanos.
- Secuencia Maastrichtiana a Paleógena, Formación Guaduas (KPgg): Formada por una monótona alternancia de arcillolitas, lutitas y lodolitas grises a oscuras con intercalaciones de mantos de carbón e intercalaciones delgadas de areniscas finas.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a alternancias de areniscas cuarzosas de grano fino a grueso, liditas silíceas, cherts y limolitas altamente diaclasadas.



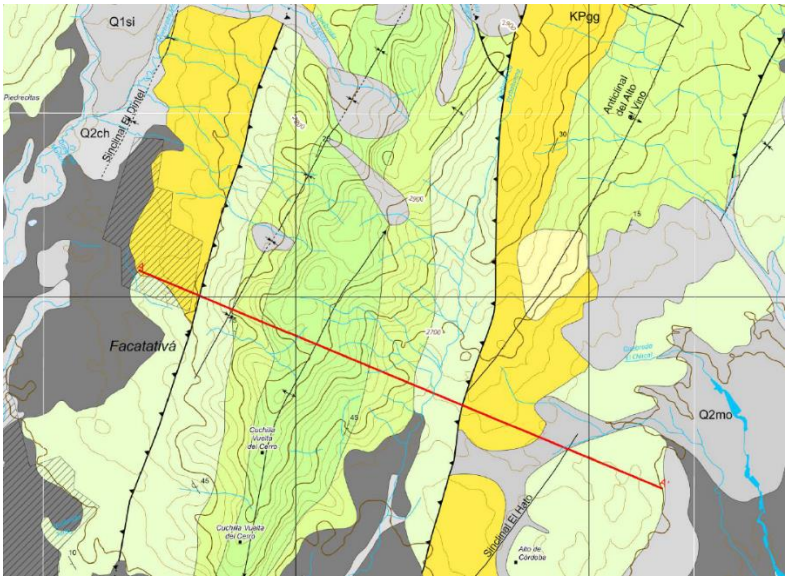


Figura 42. Mapa geológico del sector de Facatativá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

20.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría hidrogeológica de Facatativá está definida por un complejo sistema de pliegues (Sinclinal al NW, Anticlinal central y Sinclinal El Hato al SE) atravesados por fallas de cabalgamiento de rumbo regional.

En el Perfil Geológico Generalizado $A - A'$ (extensión de 4,8 km con orientación NW a SE, cotas 2.000 a 3.000 m s. n. m.), se diferencian las siguientes unidades tectono-estratigráficas:

- Sector Noroccidental (NW, 0 a 0,8 km): Estructura de Sinclinal donde la Formación Guaduas (KPgg) yace sobre la Formación Labor y Tierna (Ksglt) en el extremo inicial.
- Bloque Cabalgante Central (0,8 a 2,5 km): Dominio de una estructura Anticlinal elevada por una Falla de Cabalgamiento (Inclinación aparente) orientada hacia el SE. El núcleo de este levantamiento expone la Formación Arenisca Dura (Ksgd), alcanzando la cota más alta del relieve (~2.950 m s. n. m.). Esta amplia masa de areniscas masivas fuertemente diaclasadas actúa como la principal zona de recarga hídrica del territorio.
- Sector Suroriental (SE, 2,5 a 4,8 km): Depresión del Sinclinal El Hato, delimitada por una falla inversa opuesta que yuxtapone la Formación Plaeners (Ksgpl) sobre la Formación Guaduas (KPgg). En la cuenca del sinclinal (km 3,3 a 4,8) se acumula un potente espesor de arcillolitas de Guaduas, sobre el cual reposa localmente la Formación Mondoñedo (Q2mo) en una pequeña escotadura (km 3,8 a 4,1).

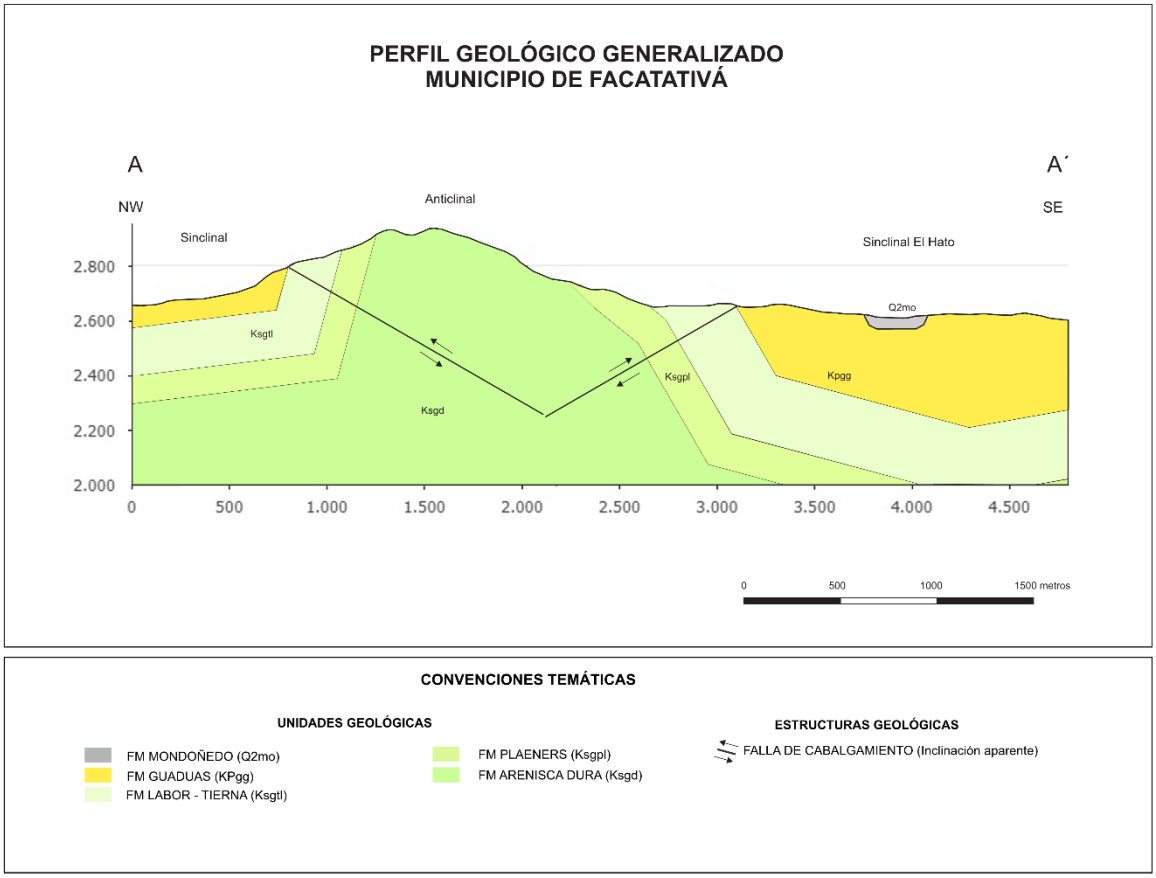


Figura 43. Corte geológico interpretativo del municipio de Facatativá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

20.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Facatativá presenta una clara dualidad entre potentes acuíferos fisurados/fracturados en el bloque montañoso y acuitardos profundos impermeables en las zonas de cuenca.

Tabla 30. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Facatativá.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Formación Mondoñedo (Q2mo)	Limos, arcillas y gravas aluviales.	Acuitardo local con niveles acuíferos, porosidad primaria; libre	Localizado (5 – 20 m)	**Baja a Moderada**. Cobertura somera con abastecimiento local en aljibes.
Formación Guaduas (KPgg)	Arcillolitas, lutitas y mantos de carbón.	Acuitardo, porosidad	> 350 m en Sinclinal El Hato	**Muy Baja**. Sello impermeable amplio

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
		secundaria limitada; capa confinante		que confina las capas inferiores.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	80 – 120 m	**Alta**. Excelente transmisividad en zonas fracturadas y flancos de pliegue.
Formación Plaeners (Ksgpl)	Liditas, cherts, limolitas silíceas y areniscas finas.	Acuífero confinado de productividad media, porosidad secundaria (liditas fracturadas)	Hasta 93 m	**Media.** Liditas fracturadas; caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	Areniscas cuarzosas masivas y gruesas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 300 m	**Alta**. Principal reservorio del municipio con elevada capacidad hídrica.

20.4 INFORMACIÓN COMPLEMENTARIA PROVENIENTE DEL CONVENIO EPC-CAR

El predio Guapucha, ubicado en el municipio de Facatativá y evaluado en el marco del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024, fue seleccionado para la ejecución de un sondeo magnetotelúrico (MT) y cuenta con una concesión de aguas subterráneas vigente (No. 75950).

El pozo concesionado presenta área de rebose y condiciones adecuadas para la toma de datos geofísicos, sin interferencias de cableado eléctrico.

La geología regional del municipio está dominada por unidades sedimentarias del Cretácico superior y depósitos cuaternarios, incluyendo las formaciones Chipaque, Arenisca Dura, Plaeners, Labor y Tierna, Guaduas, Bogotá y Tilatá, además de depósitos de terraza, aluviales y coluviales. Estas unidades conforman una arquitectura estratigráfica compleja, donde las areniscas cuarzosas del Grupo Guadalupe constituyen los principales acuíferos profundos.

Desde el punto de vista estructural, Facatativá se ubica en una zona de alta complejidad tectónica, situada entre el Anticlinorio de Villeta y la unidad tectónica de la Sabana de Bogotá. El documento señala que “desde el flanco occidental del Sinclinal de Subachoque hasta el límite occidental de la región… ocurren una serie de fallas cabalgantes”, lo que evidencia la presencia de pliegues y fallas inversas que controlan la geometría del subsuelo y la continuidad de los acuíferos.

En este contexto, el predio Guapucha se localiza sobre el Sinclinal El Dintel, donde los depósitos de Terraza Alta (Qta) suprayacen rocas de las formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura.

La información geoeléctrica histórica del SGC (1996) permitió interpretar dos perfiles transversales cercanos al sondeo MT. Los SEV muestran resistividades entre 20 y 70 ohm-m asociadas a depósitos de terraza, y valores de 300 a 500 ohm-m a profundidades entre 250 y 320 metros, correspondientes a la Formación Arenisca Dura. En el otro perfil,

los SEV indican un mayor espesor de depósitos cuaternarios y la presencia de las formaciones Labor y Tierna y Arenisca Dura en profundidad, con resistividades de 150 a 400 ohm-m. Esta información confirma que el predio se encuentra sobre un paquete cuaternario relativamente grueso, infrayacido por unidades arenosas del Grupo Guadalupe, que constituyen los principales acuíferos profundos de la región.

El inventario hidrogeológico del municipio registra 444 puntos de agua, de los cuales 442 son pozos y solo 2 son manantiales. El 45% de los pozos se encuentran en uso, mientras que el 15% están abandonados y el 8% secos. En cuanto a los usos principales, el 52% corresponde a consumo doméstico, el 22% a ganadería y el 9% a uso industrial. La CAR reporta 87 concesiones de aguas subterráneas en Facatativá, de las cuales 56 captan el Grupo Guadalupe, 18 la Formación Guaduas y 13 los depósitos cuaternarios, lo que evidencia la importancia del acuífero profundo regional. El caudal total concesionado para el Grupo Guadalupe asciende a 214,8 L/s, destacándose como el reservorio de mayor productividad.

El pozo Guapucha-2, ubicado en el predio, cuenta con registros eléctricos completos que permiten identificar contactos litológicos y niveles permeables. Entre 25 y 32 metros se observan areniscas de grano grueso con altas resistividades y bajos valores de rayos gamma, mientras que entre 45 y 137 metros se presenta una intercalación de areniscas finas, medias y gruesas con capas delgadas de limolitas. El diseño del pozo incluye ocho filtros instalados por debajo de los 140 metros, coincidiendo con niveles arenosos. A profundidades mayores, entre 260 y 278 metros, se identifican areniscas muy competentes seguidas por limolitas silíceas. El documento señala que “los resultados de los registros eléctricos coinciden con rocas del Grupo Guadalupe”, confirmando que el pozo intercepta unidades de la Formación Labor y Tierna, aunque no se observan paquetes gruesos de la Formación Plaeners.

En conjunto, la información geológica, estructural, geoeléctrica y litológica indica que el predio Guapucha se ubica en una zona con potencial hidrogeológico significativo, donde los depósitos cuaternarios pueden albergar acuíferos someros de baja a moderada productividad, mientras que las areniscas del Grupo Guadalupe constituyen el acuífero profundo de mayor interés para captación sostenible.

20.5 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El municipio de Facatativá se ubica en el extremo occidental de la Sabana de Bogotá, en la transición hacia la cuenca del río Magdalena, dentro de una zona de marcada complejidad estructural donde convergen pliegues regionales, cabalgamientos y depresiones sinclinales. Su configuración geomorfológica combina una llanura interandina en el sector oriental con relieves montañosos de escarpes y cerros hacia el centro y occidente, con altitudes que varían entre 2.580 y cerca de 3.000 m s. n. m. Esta diversidad fisiográfica condiciona la distribución de las unidades hidrogeológicas y el comportamiento del flujo subterráneo.

El subsuelo de Facatativá está conformado por una secuencia estratigráfica que incluye depósitos cuaternarios someros, una potente unidad pelítica del Maastrichtiano–Paleógeno y el conjunto arenoso del Grupo Guadalupe, que constituye el principal acuífero regional. Los depósitos cuaternarios, representados por la Formación Mondoñedo (Q_2mo), corresponden a rellenos sedimentarios continentales de limos, arcillas y gravas aluviales,

restringidos a depresiones y valles intramontanos. Estos materiales conforman acuíferos porosos someros de baja a moderada productividad, con espesores localizados entre 5 y 20 metros.

Por debajo de estos depósitos se encuentra la Formación Guaduas (KPgg), caracterizada por una alternancia monótona de arcillolitas, lutitas y lodolitas con intercalaciones de mantos de carbón. Esta unidad, cuyo espesor supera los 350 metros en el Sinclinal El Hato, actúa como un acuitardo regional que restringe el flujo vertical y confina las unidades permeables subyacentes.

El conjunto arenoso del Grupo Guadalupe constituye la base permeable del sistema y está conformado por las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). La Formación Labor y Tierna presenta areniscas cuarzosas de grano medio a grueso con alta permeabilidad y transmisividades que pueden alcanzar entre 40 y 250 m²/día, especialmente en zonas de fracturamiento. La Formación Plaeners, compuesta por liditas, cherts y limolitas silíceas, presenta porosidad secundaria asociada al microfracturamiento tectónico, con transmisividades entre 20 y 150 m²/día. La Formación Arenisca Dura, integrada por areniscas cuarzosas masivas y altamente diaclasadas, constituye el principal acuífero profundo del municipio, con transmisividades que pueden superar los 350 m²/día en zonas de falla, lo que la convierte en el reservorio de mayor capacidad hídrica.

La arquitectura hidroestructural de Facatativá está definida por tres grandes dominios tectónicos: el Sinclinal noroccidental, el Bloque Cabalgante central y el Sinclinal suroriental (El Hato). En el perfil geológico, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá, se observa que el sector noroccidental corresponde a un sinclinal donde la Formación Guaduas suprayace a la Formación Labor y Tierna. Hacia el centro del perfil, una falla de cabalgamiento eleva un bloque anticlinal que expone la Formación Arenisca Dura, constituyendo la principal zona de recarga hídrica del municipio. El documento señala que “el núcleo de este levantamiento expone la Formación Arenisca Dura… actuando como la principal zona de recarga hídrica del territorio”. Finalmente, hacia el suroriente se desarrolla el Sinclinal El Hato, donde la Formación Plaeners se yuxtapone sobre la Formación Guaduas, generando una depresión estructural que favorece la acumulación de sedimentos finos y la presencia de acuíferos confinados.

La información geoeléctrica del estudio SGC–EAAB (1996) complementa esta interpretación. Los perfiles muestran resistividades entre 20 y 70 ohm-m asociadas a depósitos de terraza, y valores entre 150 y 500 ohm-m a profundidades de 250 a 350 metros, correspondientes a las areniscas de las Formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura. Esta correlación confirma que el predio Guapucha y su entorno se encuentran sobre un paquete cuaternario relativamente grueso, infrayacido por unidades arenosas del Grupo Guadalupe, que constituyen los principales acuíferos profundos de la región.

El inventario hidrogeológico del municipio registra 444 puntos de agua, de los cuales 442 son pozos y solo 2 manantiales, lo que evidencia una marcada dependencia del recurso subterráneo. El 45% de los pozos se encuentran en uso y el 52% tienen uso doméstico. La CAR reporta 87 concesiones de aguas subterráneas, de las cuales 56 captan el Grupo Guadalupe, con un caudal total concesionado de 214,8 L/s, lo que confirma la importancia de este acuífero como principal fuente de abastecimiento.

El pozo Guapucha-2, ubicado en el predio evaluado, presenta registros eléctricos que permiten identificar niveles arenosos permeables entre 25 y 32 metros y entre 45 y 137 metros, así como areniscas competentes entre 260 y 278 metros, seguidas por limolitas silíceas. El documento señala que “los resultados de los registros eléctricos coinciden con rocas del Grupo Guadalupe”, confirmando que el pozo intercepta unidades de la Formación Labor y Tierna y Arenisca Dura, lo que explica su productividad y su relevancia hidrogeológica.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Facatativá describe un sistema dual: acuíferos someros porosos en los depósitos cuaternarios y acuíferos profundos fisurados en las areniscas del Grupo Guadalupe, separados por un potente acuitardo de la Formación Guaduas. La interacción entre pliegues, cabalgamientos y variaciones litológicas controla la geometría de los acuíferos y la distribución del flujo subterráneo, definiendo zonas de recarga, almacenamiento y explotación que deben ser consideradas en cualquier programa de exploración y gestión del recurso hídrico subterráneo.

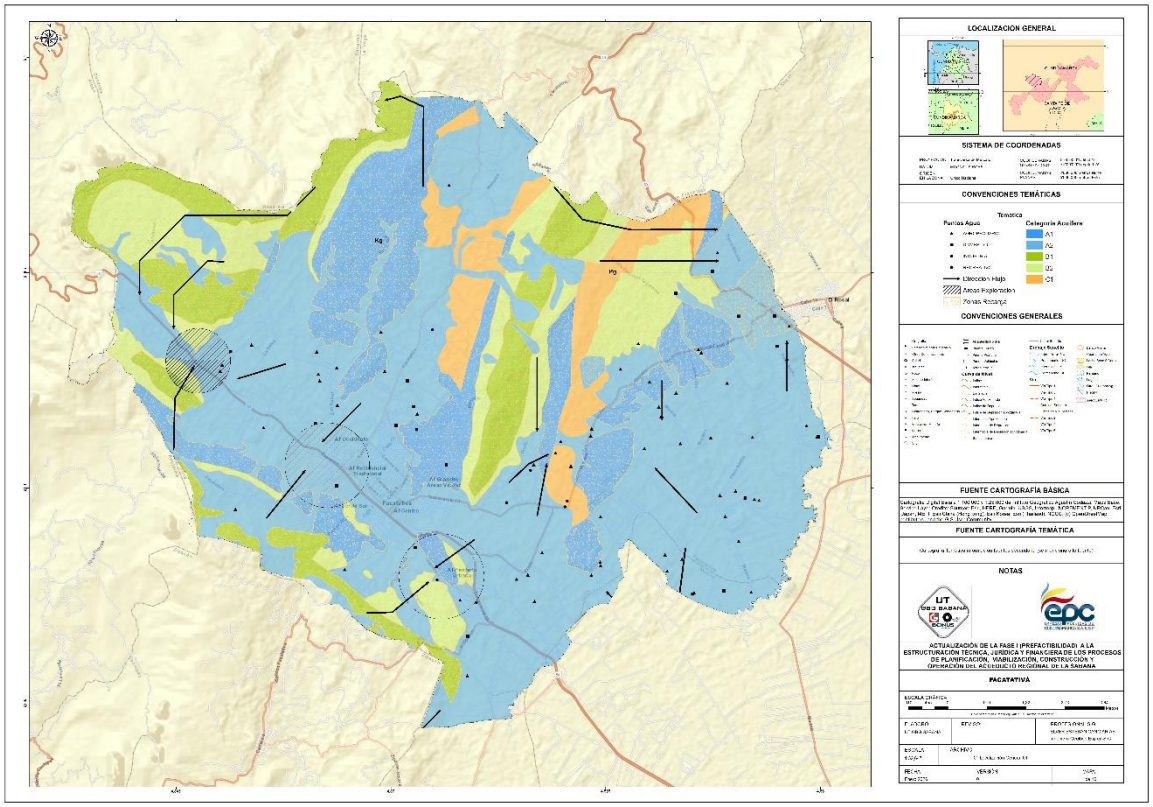


Figura 44. Mapa hidrogeológico del municipio de Facatativá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 31. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Facatativá.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Mondoñedo (Qmo)	$0{,}1 - 1{,}5$	$1 - 15$	S_y: $0{,}02 - 0{,}08$	$0{,}2 - 1{,}5$ L/s	Depósitos someros restringidos a valles intramontanos. Sensibles a temporadas secas.
Formación Guaduas (KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	S: $10^{-5} - 10^{-4}$	$< 0{,}5$ L/s	Sello impermeabilizante continuo en la depresión del Sinclinal El Hato.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	$1{,}0 - 6{,}0$	$40 - 250$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 20{,}0$ L/s	Alta permeabilidad de matriz e intergranular. Excelente rendimiento de producción.
Formación Plaeners (Ksgpl)	$0{,}5 - 3{,}5$	$20 - 150$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	Hasta 5 L/s	Porosidad secundaria tectónica por microfracturamiento en silíceos.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $>$ $5{,}5$*(fracturas)*	$30 - 350$*(> 450 en zona de falla)*	S: $10^{-5} - 10^{-3}$	$10{,}0 - 25{,}0$ L/s	Principal reservorio montañoso. Gran capacidad de almacenamiento e infiltraci

20.6 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El programa de exploración complementaria para el municipio de Facatativá se formula a partir de la arquitectura hidrogeológica identificada en el modelo conceptual, la cual evidencia una marcada dualidad entre acuíferos someros cuaternarios de baja a moderada productividad y acuíferos profundos altamente permeables asociados al Grupo Guadalupe.

La presencia de estructuras mayores como el Sinclinal El Dintel, el Anticlinal central y el Sinclinal El Hato, junto con fallas de cabalgamiento que levantan y yuxtaponen unidades arenosas y pelíticas, condiciona la geometría del subsuelo y la continuidad lateral de los acuíferos.

En este contexto, el predio Guapucha se ubica en una zona donde los depósitos de Terraza Alta suprayacen directamente a las formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura, lo que confiere un potencial hidrogeológico significativo para la captación profunda.

La información geoeléctrica disponible, que muestra resistividades entre 20 y 70 ohm-m en los depósitos cuaternarios y valores entre 150 y 500 ohm-m en las areniscas profundas, confirma la presencia de un paquete permeable del Grupo Guadalupe a profundidades

entre 250 y 350 metros. Asimismo, los registros eléctricos del pozo Guapucha-2 evidencian niveles arenosos permeables entre 25 y 137 metros y areniscas competentes entre 260 y 278 metros, lo que coincide con la litología típica de la Formación Labor y Tierna y la Arenisca Dura.

Se contempla la ejecución de nuevos sondeos magnetotelúricos y sondeos eléctricos verticales así como Reflexión Sísmica. Los MT permitirán precisar la profundidad del contacto entre la Formación Guaduas y el Grupo Guadalupe, así como identificar zonas de fracturamiento asociadas a fallas cabalgantes. Los SEV, por su parte, permitirán mejorar la resolución de los niveles someros y correlacionar los depósitos cuaternarios con los primeros bancos arenosos de Labor y Tierna. Finalmente la Reflexión Sísmica permitirá encontrar las zonas de mayor fracturamiento en las rocas del Guadalupe

Esta información es esencial para definir la continuidad lateral de los acuíferos y delimitar las zonas donde la explotación profunda es más favorable.

Finalmente, el programa contempla una fase de monitoreo piezométrico y calidad de agua, mediante la instalación de una red de observación que permita registrar niveles freáticos y profundos, así como realizar muestreos físico-químicos y bacteriológicos. Esta información permitirá evaluar la aptitud del recurso para diferentes usos y detectar posibles mezclas entre acuíferos someros y profundos en zonas de falla. Con los resultados obtenidos se actualizará el modelo hidrogeológico conceptual y se establecerán lineamientos para la gestión sostenible del recurso, incluyendo zonas recomendadas para nuevas captaciones profundas, áreas donde la explotación debe ser restringida y recomendaciones para el monitoreo continuo.

La información geológica, geoeléctrica, magnetotelúrica y litológica disponible para Facatativá es suficiente para avanzar hacia un modelo numérico de flujo subterráneo. Los lineamientos para ese modelo se presentan de forma conjunta para Funza, Madrid, Mosquera y Facatativá en el capítulo de integración regional.

21 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE BOJACÁ

El municipio de Bojacá se ubica en la provincia Sabana Occidente (departamento de Cundinamarca), en el margen suroccidental de la Sabana de Bogotá sobre la cuenca del río Bojacá. Su territorio abarca una zona plana de planicie aluvial y lacustre que transiciona hacia un relieve de serranías, escarpes y colinas en sus sectores occidental y central, con altitudes que oscilan entre los 2.550 y los 2.900 m s. n. m. Su clima es frío, con temperaturas promedio de 12 °C a 14 °C y una precipitación media anual entre 600 y 800 mm distribuida en un régimen bimodal.

21.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La secuencia estratigráfica del subsuelo de Bojacá está conformada por un potente registro sedimentario del Cretácico Inferior al Superior, intervenido por sistemas de fallamiento inverso y cubierto discontinuamente por depósitos inconsolidados del Cuaternario:

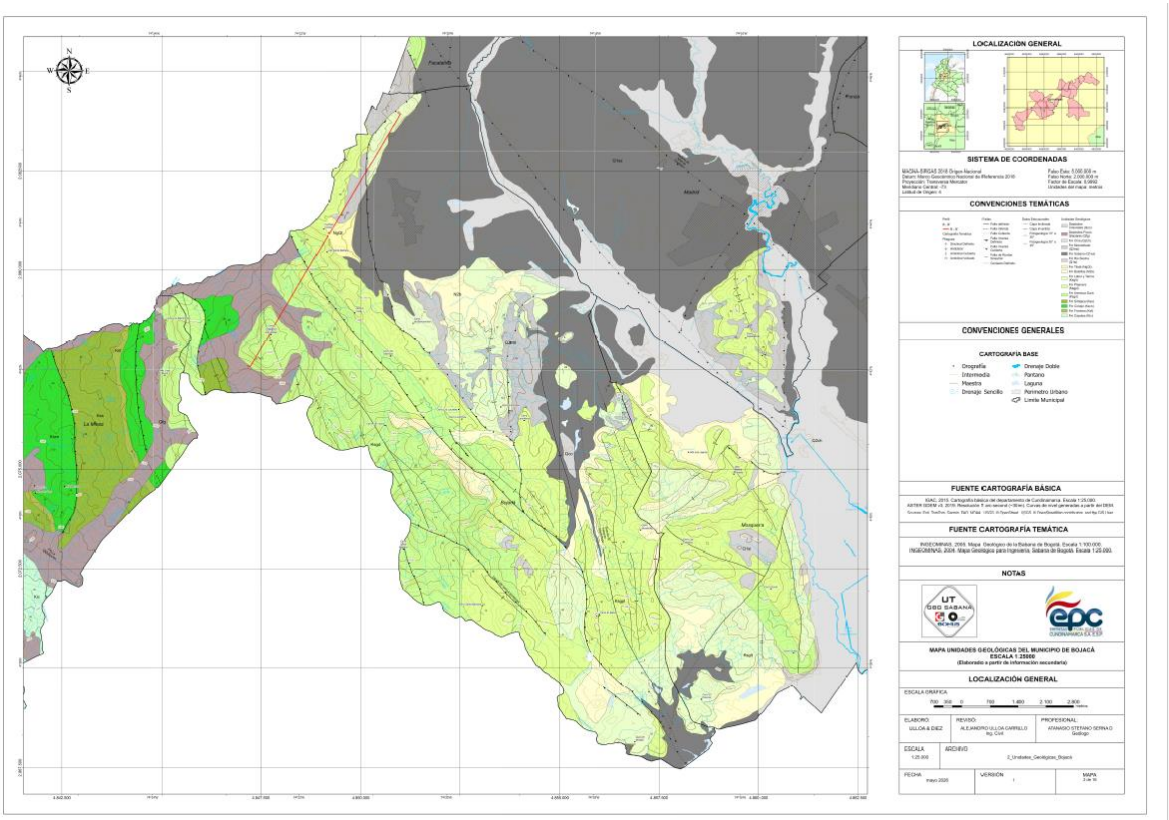


Figura 45. Mapa geológico del sector de Bojacá y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

- Depósitos Cuaternarios, Formación Mondoñedo (Q2mo) y Depósitos Fluvio Torrenciales (Qtf): Coberturas continentales someras compuestas por limos, arcillas, gravas y arenas dispuestas en pequeñas depresiones de loma o abanicos de ladera.

- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a una alternancia de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, liditas silíceas, cherts y limolitas altamente diaclasadas.
- Secuencia del Cretácico Inferior a Superior, Formación Conejo (Kscn): Potente conjunto laminado de lutitas, lodolitas y limolitas oscuras de baja permeabilidad en la base de la secuencia.

21.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La arquitectura del subsuelo de Bojacá exhibe una alta complejidad tectónica, definida por pliegues regionales (Anticlinal?) intervenidos por fallas de cabalgamiento de rumbo regional.

En el Perfil Geológico Generalizado $B - B'$(extensión aproximada de 7,5 km orientado de SW a NE, cotas 1.600 a 2.800 m s. n. m.), se diferencian las siguientes zonas hidroestructurales:

- Sector Suroeste (SW, 0 a 1,5 km): Bloque elevado donde la Formación Conejo (Kscn) infrayace a la Formación Arenisca Dura (Ksgd). Alrededor del km 1,5, una Falla Definida (Inclinación aparente) pone en contacto este bloque con delgados Depósitos Fluvio Torrenciales (Qtf) de ladera.
- Sector Central / Falla de La Delicia (1,5 a 5,8 km): Dominado por la Falla de La Delicia (interpretada como una Falla de Cabalgamiento con inclinación aparente hacia el SW), la cual provoca el ascenso del bloque rocoso donde afloran la Formación Plaeners (Ksgpl) y la Formación Arenisca Dura (Ksgd) conformando una estructura de tipo Anticlinal? (km 4,5 a 5,5). En la cima de este eje anticlinal se preserva un delgado rellenamiento de la Formación Mondoñedo (Q2mo). Este bloque central constituye la principal zona de recarga hídrica directa por la alta exposición de areniscas y liditas.
- Sector Nororiente (NE, 5,8 a 7,5 km): Flanco del anticlinal afectado por una Falla de Cabalgamiento que yuxtapone la Formación Plaeners (Ksgpl) y Labor y Tierna (Ksglt) hacia el extremo NE, inclinándose los estratos suavemente bajo las capas suprayacentes.

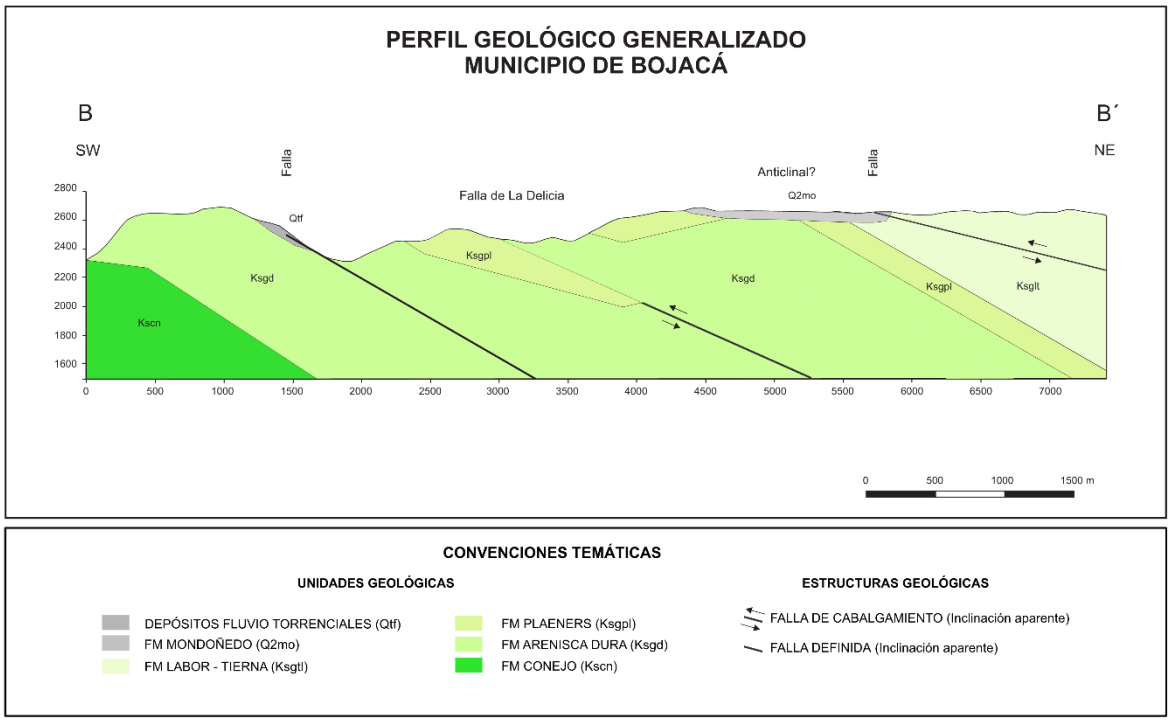


Figura 46. Corte geológico interpretativo del municipio de Bojacá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

21.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Bojacá está dominado por la presencia del acuífero fisurado y fracturado de alta productividad del Grupo Guadalupe, el cual cuenta con un área de recarga extensa favorecida por la deformación tectónica.

Tabla 32. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Bojacá.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Depósitos Qtf/ Formación Mondoñedo (Q2mo)	Limos, arcillas, gravas y arenas aluviales.	Acuitardo local con niveles acuíferos, porosidad primaria; libre	Localizado (5 – 20 m)	**Baja a Moderada**. Coberturas someras de uso local.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas	80 – 120 m	**Alta**. Elevada transmisividad en el bloque nororiental.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
		de afloramiento		
Formación Plaeners (Ksgpl)	Liditas, cherts, limolitas silíceas y areniscas.	Acuífero confinado de productividad media, porosidad secundaria (liditas fracturadas)	Hasta 93 m	**Media.** Liditas fracturadas; caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	Areniscas cuarzosas masivas y gruesas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 350 m	**Alta**. Reservorio principal con amplia zona de recarga en el bloque central.
Formación Conejo (Kscn)	Lutitas y lodolitas oscuras laminadas.	Acuitardo con acuíferos locales, porosidad secundaria; base del sistema	Hasta 370 m	**Muy Baja**. Sello impermeable basal en el sector SW.

21.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE BOJACÁ

El modelo hidrogeológico de Bojacá se organiza alrededor del anticlinal estructural generado por la Falla de La Delicia. La recarga profunda se concentra en el bloque central, donde las areniscas del Grupo Guadalupe afloran y presentan fracturación intensa. Desde esta zona, el flujo subterráneo se dirige hacia los flancos NE y SW, donde las unidades permeables quedan parcialmente confinadas.

La Falla de La Delicia y las fallas menores asociadas generan corredores preferenciales de flujo, aumentando la transmisividad en Ksgpl y Ksgd. En contraste, los depósitos cuaternarios someros actúan como acuíferos locales, con baja continuidad lateral.

El acuífero principal (Ksgd) presenta altos caudales, especialmente en zonas de cizalla y brechamiento tectónico. La Formación Conejo limita la circulación vertical y define el piso hidrogeológico regional.

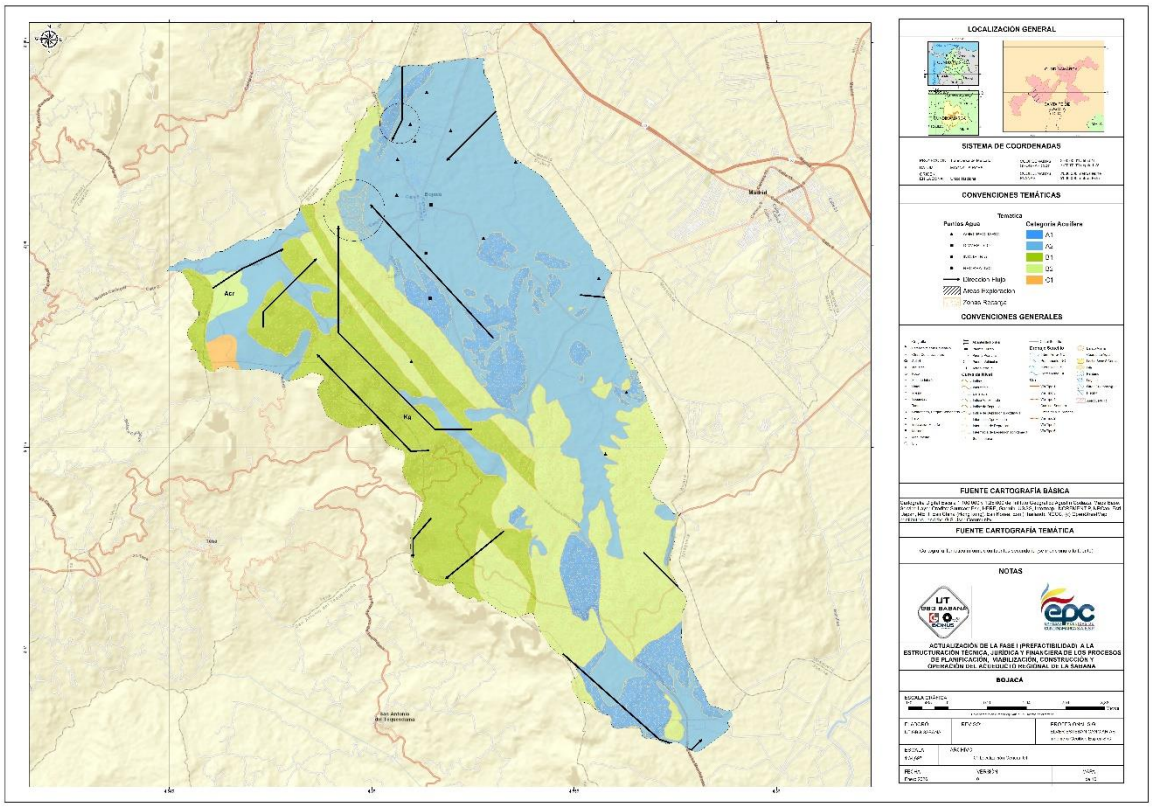


Figura 47. Mapa hidrogeológico del municipio de Bojacá, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 33. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Bojacá.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Qtf / Formación Mondoñedo (Qmo)	$0{,}1 - 1{,}5$	$1 - 15$	S_y: $0{,}02 - 0{,}08$	$0{,}2 - 1{,}5$ L/s	Cubiertas detríticas delgadas de ladera. Uso exclusivo para abastecimiento somero local.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	$1{,}0 - 6{,}5$	$40 - 280$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 22{,}0$ L/s	Alta permeabilidad de matriz e intergranular en la zona del flanco NE.
Formación Plaeners (Ksgpl)	$0{,}5 - 3{,}5$	$20 - 160$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	Hasta 5 L/s	Porosidad secundaria tectónica derivada de la

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
					Falla de La Delicia.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $> 5{,}5$*(fracturas)*	$30 - 350$*(> 450 en cizalla de la falla)*	$S: 10^{-5} - 10^{-3}$	$10{,}0 - 25{,}0$ L/s	Principal reservorio estructural de Bojacá. Infiltración y recarga libre en el anticlinal.
Formación Conejo (Kscn)	$< 10^{-4}$	< 1	N/A	Nulo a muy bajo	Base e infrayacimiento impermeable en el sector del SW.

21.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El programa de exploración para el municipio de Bojacá se orienta a validar el modelo hidrogeológico mediante sondeos eléctricos verticales (SEV), perfiles geofísicos complementarios y perforaciones exploratorias en zonas donde la estructura geológica favorece la acumulación y circulación de agua subterránea. Las zonas propuestas se seleccionan con base en:

- Exposición de unidades permeables del Grupo Guadalupe.
- Corredores de fracturamiento asociados a fallas inversas.
- Ejes de pliegues donde se concentra la recarga profunda.
- Transiciones litológicas con potencial de porosidad secundaria.

A continuación se amplía la descripción de cada zona prioritaria.

Zona A, eje del Anticlinal (km 4,5)

Objetivo hidrogeológico: Captación del acuífero libre fracturado de la Formación Arenisca Dura (Ksgd) en la zona de máxima recarga.

Justificación estructural e hidrogeológica:

El eje anticlinal identificado entre los km 4,5 y 5,5 constituye la principal ventana de recarga profunda del municipio. Estructuralmente no es favorable para acumular agua, pero puede contener agua entre fracturas que la profundizar el pozo sería una fuente.

Las areniscas cuarzosas masivas de la Formación Arenisca Dura afloran o quedan someras, lo que favorece la infiltración directa;el plegamiento genera fracturamiento tensional en la cresta del anticlinal, aumentando la permeabilidad y la conectividad hidráulica;La presencia de un delgado paquete de la Formación Mondoñedo (Q2mo) sugiere un relleno somero que no afecta significativamente la recarga.

Actividades recomendadas

Realizar SEV de alta penetración (AB/2 entre 300 a 500 m) para delimitar la profundidad del nivel saturado y la continuidad del paquete arenoso.

Perforación exploratoria entre 180 y 260 m, con expectativa de interceptar zonas de fractura abiertas.

Zona B, Falla de La Delicia (km 3,0)

Objetivo hidrogeológico: Sondeos profundos para interceptar la franja de brechamiento y fracturamiento secundario en la Formación Plaeners (Ksgpl).

Justificación estructural e hidrogeológica:

La Falla de La Delicia es una estructura de cabalgamiento que genera zonas de cizalla y brechamiento, donde la porosidad secundaria aumenta significativamente;La Formación Plaeners (Ksgpl), compuesta por liditas y cherts silíceos, presenta fracturamiento intenso en los corredores tectónicos, lo que incrementa la transmisividad;La yuxtaposición de unidades permeables y semipermeables crea trampas hidráulicas que favorecen la acumulación de agua subterránea y finalmente.el bloque levantado por la falla funciona como zona de recarga lateral, alimentando el acuífero fracturado.

Actividades recomendadas:

Realizar SEV de resolución media (AB/2 entre 200 a 350 m) para identificar contrastes resistivos asociados a brechas y fracturas.

Perforación exploratoria profunda entre 250 y 350 m, dirigida a interceptar la zona de fractura.

22 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE MOSQUERA

El municipio de Mosquera se ubica en la provincia Sabana Occidente (departamento de Cundinamarca), sobre la cuenca media del río Bogotá y la cuenca de la laguna de Herrera. Presenta una topografía predominantemente plana correspondiente a la planicie aluvial y lacustre en su sector oriental y central, la cual contrasta con relieves montañosos y serranías/lomeríos en su sector occidental y sudoccidental (como Cerro Gordo), con altitudes que oscilan entre los 2.540 y cerca de los 2.850 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío y seco a moderadamente húmedo, con una temperatura media anual de 12 °C a 14 °C y precipitación entre 600 y 800 mm distribuidos en un régimen bimodal.

22.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La secuencia estratigráfica del subsuelo de Mosquera está conformada por un núcleo sedimentario del Cretácico Superior expuesto en los relieves anticlinales, el cual profundiza hacia las zonas llanas bajo coberturas del Cuaternario:

- Depósitos Cuaternarios (Q1sa, Q2ch): Coberturas fluvio-lacustres no consolidadas constituidas por arcillas, limos, turbas y lentes de arenas y gravas asociadas a la planicie de la Sabana y el entorno de la Laguna de Herrera.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a una sucesión continua de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, liditas silíceas, cherts y limolitas highly fisuradas por deformación tectónica.

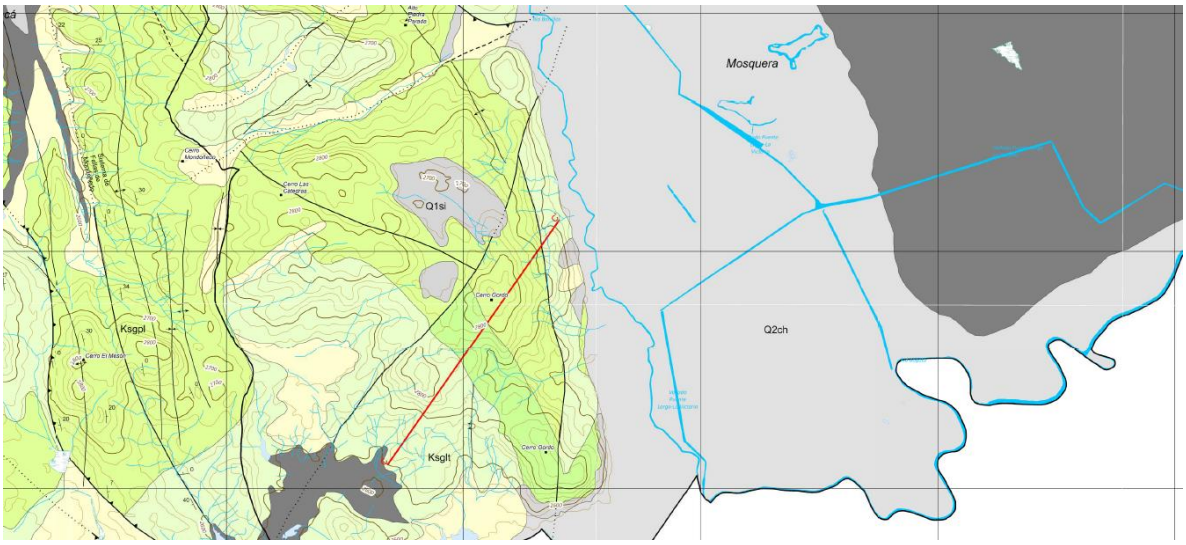


Figura 48. Mapa geológico del sector de Mosquera y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

22.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría del subsuelo de Mosquera está definida por una gran estructura de tipo Anticlinal (asociada al relieve de Cerro Gordo) recortada en su flanco oriental por una falla de rumbo/inversa.

En el Perfil Geológico Generalizado $C - C'$ (extensión de 3,2 km orientado de SW a NE, cotas 2.300 a 2.850 m s. n. m.), se observan las siguientes relaciones tectono-estratigráficas:

- Flanco Suroccidental (SW, 0 a 0,8 km): Aflora la Formación Labor y Tierna (Ksglt) en posición monoclinal descendente hacia el SW, sirviendo de transición entre el relieve montañoso y las zonas llanas periféricas.
- Núcleo del Anticlinal / Cerro Gordo (0,8 a 2,8 km): Corresponde a la zona de mayor cota del perfil (~2.850 m s. n. m.) donde la estructura Anticlinal expone el núcleo masivo de la Formación Arenisca Dura (Ksgd), flanqueado de forma concordante por la Formación Plaeners (Ksgpl). Esta amplia masa de areniscas y liditas fracturadas conforma el principal frente de infiltración y recarga hídrica directa del municipio.
- Sector Nororiental (NE, 2,8 a 3,2 km): La secuencia del flanco oriental es interrumpida abruptamente a la altura del km 2,8 por una Falla Definida (Inclinación indefinida). Esta estructura tectónica pone en contacto el bloque elevado de la Formación Arenisca Dura (Ksgd) con paquetes descendentes de la Formación Labor y Tierna (Ksglt), controlando el flujo subterráneo lateral y generando franjas de permeabilidad secundaria por diaclasado en la zona de cizalla.

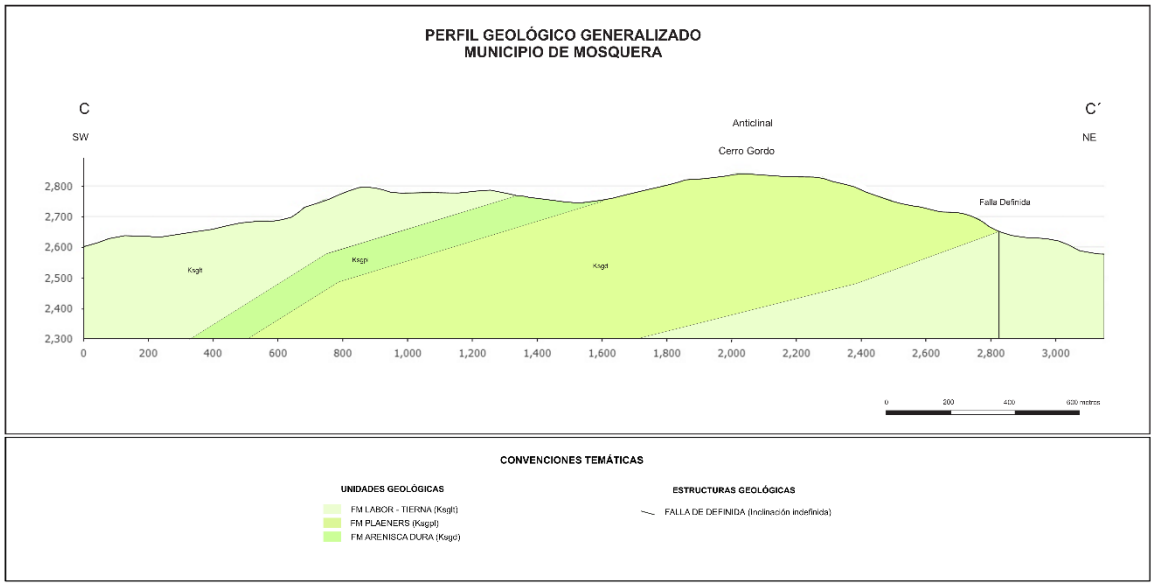


Figura 49. Corte geológico interpretativo del municipio de Mosquera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y

menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

22.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de Mosquera está dominado por el acuífero fisurado/fracturado de alta productividad del Grupo Guadalupe en las zonas elevadas, el cual se profundiza bajo el relleno poroso de la planicie.

Tabla 34. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Mosquera.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Depósitos Cuaternarios (Qal, Qla)	Arcillas plásticas, limos, turbas y lentes de arena/grava.	Acuífero local, porosidad primaria; libre a semiconfinado	Variable (10 – 80 m)	**Baja a Moderada**. Lentes porosos locales de uso somero.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	Areniscas cuarzosas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	80 – 130 m	**Alta**. Elevada transmisividad y excelente rendimiento en captaciones profundas.
Formación Plaeners (Ksgpl)	Liditas, cherts, limolitas silíceas y areniscas finas.	Acuífero confinado de productividad media, porosidad secundaria (liditas fracturadas)	Hasta 93 m	**Media.** Liditas fracturadas; caudales máximos conocidos del orden de 5 L/s.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	Areniscas cuarzosas masivas de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 300 m	**Alta**. Reservorio estratégico de gran volumen y continua recarga directa.

22.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El municipio de Mosquera se emplaza sobre la cuenca media del río Bogotá y el sistema lacustre de la Laguna de Herrera, en el sector central de la Sabana Occidente. Su configuración fisiográfica combina una amplia planicie aluvial y lacustre en los sectores oriental y central, con relieves montañosos y lomeríos estructurales hacia el occidente y suroccidente, entre los cuales destaca el Cerro Gordo como expresión geomorfológica dominante. Las altitudes varían entre los 2.540 y 2.850 m s. n. m., en un ambiente climático frío con precipitaciones entre 600 y 800 mm anuales bajo régimen bimodal.

Desde el punto de vista geológico, el subsuelo de Mosquera está constituido por un núcleo sedimentario del Cretácico Superior que aflora en los relieves anticlinales y que se profundiza hacia las zonas planas bajo un potente paquete cuaternario. Este relleno está representado por depósitos fluvio-lacustres de la Formación Sabana y la Formación Chía, compuestos por arcillas plásticas, limos, turbas y lentes arenosos y gravosos de disposición lenticular. En profundidad, el basamento sedimentario corresponde al Grupo Guadalupe, integrado por las Formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura, caracterizadas

por areniscas cuarzosas de grano medio a grueso, liditas silíceas, cherts y limolitas intensamente fracturadas por la deformación tectónica regional.

La arquitectura hidroestructural del municipio está controlada por una gran estructura anticlinal asociada al relieve de Cerro Gordo, cuyo flanco oriental se encuentra truncado por una falla inversa de rumbo regional. En el perfil geológico interpretativo, con orientación suroccidente–noreste y una extensión aproximada de 3,2 km, se observa que el flanco suroccidental presenta la Formación Labor y Tierna en posición monoclinal descendente, actuando como transición entre el relieve montañoso y la planicie. El núcleo del anticlinal expone la Formación Arenisca Dura, constituyendo la zona de mayor cota y el principal frente de infiltración hídrica del municipio. Hacia el noreste, la secuencia estratigráfica es abruptamente interrumpida por una falla definida que yuxtapone el bloque elevado de Arenisca Dura con paquetes descendentes de Labor y Tierna, generando zonas de cizalla con permeabilidad secundaria elevada y controlando el flujo subterráneo lateral hacia la planicie.

El sistema hidrogeológico de Mosquera presenta una marcada dualidad entre un acuífero profundo fisurado de alta productividad asociado al Grupo Guadalupe y un acuífero somero poroso cuaternario de baja a moderada permeabilidad. Los depósitos cuaternarios actúan principalmente como acuitardo o cobertura semiconfinante, aunque localmente contienen lentes arenosos y gravosos que permiten captaciones someras de bajo caudal. En contraste, las areniscas fracturadas de Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura conforman el principal reservorio hídrico del municipio, con transmisividades elevadas y caudales típicos entre 10 y 30 L/s, especialmente en zonas de falla donde la permeabilidad secundaria se incrementa significativamente.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de Mosquera describe un sistema estratificado donde la planicie cuaternaria funciona como una cobertura protectora y de almacenamiento somero, mientras que el Grupo Guadalupe constituye el acuífero profundo regional, alimentado por recarga directa en las zonas elevadas del anticlinal y por flujo lateral hacia las zonas deprimidas de la Sabana. Esta arquitectura, fuertemente controlada por la tectónica compresiva y la presencia de fallas inversas, determina la distribución de los acuíferos, su productividad y las zonas de mayor potencial para futuras captaciones.

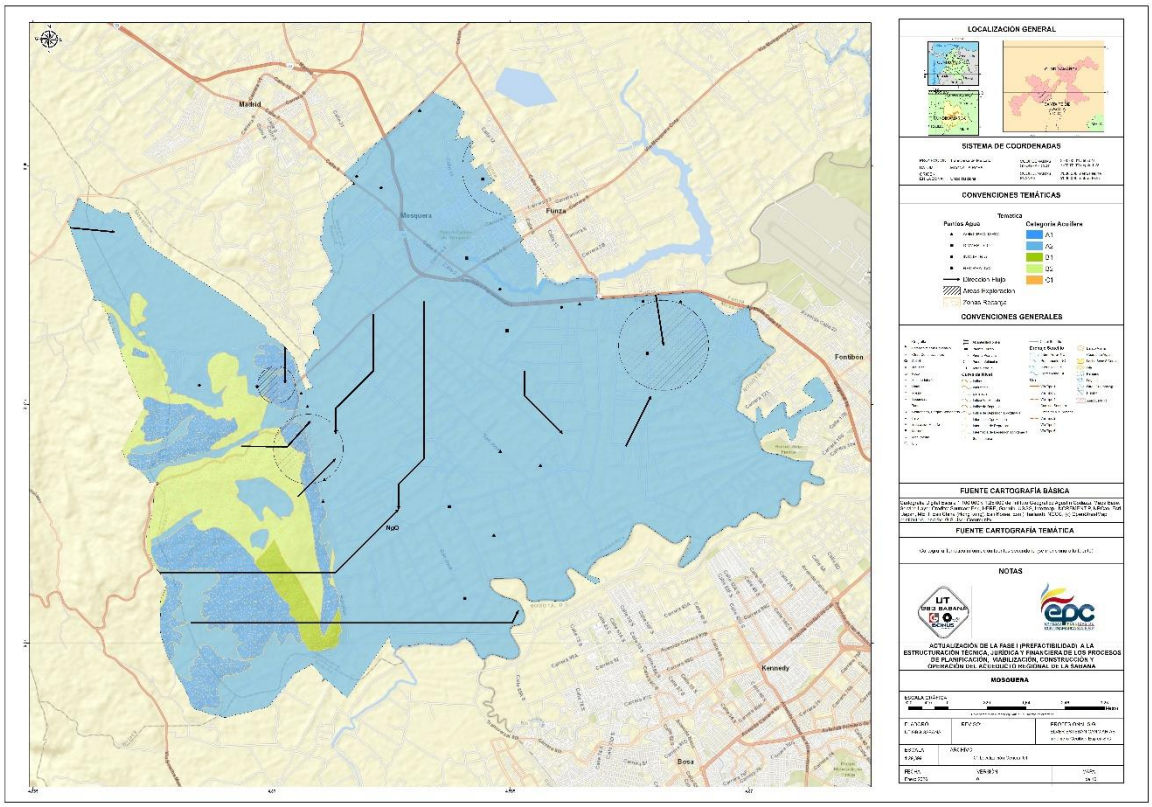


Figura 50. Mapa hidrogeológico del municipio de Mosquera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 35. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Mosquera.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Cuaternarios (Q1sa, Q2ch)	$0{,}01 - 0{,}8$*(matriz)* $1{,}0 - 4{,}0$*(lentes)*	$1{,}0 - 25$	S_y: $0{,}01 - 0{,}05$	$0{,}5 - 2{,}0$ L/s	Predominio de matriz arcillosa lacustre. Lentes lenticulares permiten pequeños aljibes.
Formación Labor y Tierna (Ksglt)	$1{,}0 - 7{,}0$	$50 - 350$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$10{,}0 - 25{,}0$ L/s	Elevada transmisividad e interconexión hidráulica con la planicie aluvial.
Formación Plaeners (Ksgpl)	$0{,}5 - 3{,}5$	$20 - 180$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	Hasta 5 L/s	Porosidad secundaria por fracturamiento

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
					en rocas silíceas.
Formación Arenisca Dura (Ksgd)	$0{,}1 - 2{,}5$*(matriz)* $> 5{,}0$*(fracturas)*	$30 - 350$*(> 450 en Falla Definida)*	$S: 10^{-5}$ $- 10^{-3}$	$10{,}0$ $- 30{,}0$ L/s	Principal reservorio estructural del municipio. Caudales máximos en brecha de falla.

22.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA DE MOSQUERA

El programa de exploración complementaria para el municipio de Mosquera se formula a partir de la arquitectura hidrogeológica identificada en el modelo conceptual, la cual evidencia un sistema dual compuesto por un acuífero somero cuaternario de baja a moderada permeabilidad y un acuífero profundo altamente productivo asociado al Grupo Guadalupe.

La presencia del Anticlinal de Cerro Gordo, junto con la falla inversa que recorta su flanco oriental, controla la geometría del subsuelo, la continuidad lateral de las unidades arenosas y la distribución de zonas de recarga y descarga. En este contexto, la exploración complementaria se orienta a refinar la caracterización de los acuíferos, delimitar las zonas de mayor potencial hídrico y establecer parámetros hidráulicos que permitan evaluar la sostenibilidad del recurso subterráneo.

La primera fase del programa consiste en la integración y análisis detallado de la información existente, incluyendo cartografía geológica, perfiles estructurales, registros de pozos, concesiones vigentes y datos geofísicos históricos del SGC. Esta fase permitirá consolidar un modelo conceptual actualizado que incorpore la geometría del anticlinal, la ubicación de la falla definida, la distribución de las unidades hidroestratigráficas y la relación entre las zonas de recarga en Cerro Gordo y los flujos subterráneos hacia la planicie lacustre.

Particular importancia hay que darle a la actualización del inventario de captaciones de agua subterránea, toda vez que se requiere saber qué caudales se están explotando y de que unidades geológicas provienen.

La segunda fase contempla la ejecución de exploración geofísica complementaria mediante nuevos sondeos magnetotelúricos (MT). Los MT permitirán precisar la profundidad del contacto entre las unidades del Grupo Guadalupe y los depósitos cuaternarios, así como identificar zonas de fracturamiento asociadas a la falla inversa del flanco oriental.

La tercera fase corresponde a la exploración hidrogeológica directa mediante la perforación de un pozo exploratorio profundo en el sector de influencia del Anticlinal de Cerro Gordo, con una profundidad objetivo entre 250 y 350 metros, con el fin de interceptar las areniscas de Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura, que constituyen los principales acuíferos del municipio.

Finalmente, el programa contempla una fase de monitoreo piezométrico y calidad de agua mediante la instalación de una red de observación que permita registrar niveles freáticos y profundos, así como realizar muestreos físicos-químicos y bacteriológicos. Esta información permitirá evaluar la aptitud del recurso para diferentes usos, detectar posibles mezclas entre acuíferos someros y profundos en zonas de cizalla y establecer alertas tempranas frente a procesos de sobreexplotación. Con los resultados obtenidos se actualizará el modelo hidrogeológico conceptual y se establecerán lineamientos para la gestión sostenible del recurso, incluyendo zonas recomendadas para nuevas captaciones profundas, áreas donde la explotación debe ser restringida y recomendaciones para el monitoreo continuo.

Este programa de exploración complementaria permitirá consolidar el conocimiento hidrogeológico del municipio de Mosquera, optimizar la explotación del acuífero profundo del Grupo Guadalupe y garantizar la sostenibilidad del recurso hídrico subterráneo en el marco del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024.

23 INTEGRACIÓN REGIONAL HIDROGEOLÓGICA FUNZA – MADRID – MOSQUERA – FACATATIVÁ

La integración regional de los estudios hidrogeológicos realizados en los municipios de Funza, Madrid, Mosquera y Facatativá permite consolidar un modelo hidrogeológico continuo y coherente para la Sabana Occidente, sustentado en información geológica, estructural, geoeléctrica, magnetotelúrica, litológica e hidráulica de alta resolución. Esta región constituye un corredor hidrogeológico estratégico donde convergen tres grandes dominios: la planicie lacustre de la Sabana de Bogotá, los flancos estructurales del Sinclinal Subachoque–Madrid y los bloques anticlinales elevados del Grupo Guadalupe que emergen hacia Mosquera y Facatativá. La articulación de estos dominios define un sistema acuífero estratificado, tectónicamente controlado y con variaciones laterales significativas en espesor, permeabilidad y productividad.

En el municipio de Funza, la arquitectura del subsuelo está dominada por un potente relleno cuaternario de la Formación Sabana, cubierto por la delgada Formación Chía; la Formación Sabana conforma un acuífero semiconfinado de productividad variable, controlado por lentes arenosos de extensión local. Debajo de la Formación Sabana, a unos 300 m de profundidad, los pozos del acueducto municipal encuentran la Formación Tilatá, de la cual se extrae el agua para el acueducto, mientras que los registros de pozos profundos y los sondeos magnetotelúricos evidencian la presencia de unidades arenosas más competentes en niveles inferiores, correlacionables con la Formación Bogotá y la Arenisca del Cacho. La información disponible muestra que Funza se ubica en el sector central más profundo de la cuenca lacustre, donde los acuíferos someros son discontinuos y de baja productividad, mientras que los acuíferos profundos presentan mayor potencial, aunque con heterogeneidad lateral marcada.

El municipio de Madrid presenta una configuración hidrogeológica más compleja, influenciada por la presencia del Sinclinal Madrid–Subachoque y por la proximidad de estructuras anticlinales que exponen rocas del Grupo Guadalupe. Los estudios magnetotelúricos y los perfiles geoeléctricos del SGC (1996) muestran espesores cuaternarios variables entre 200 y más de 500 metros, infrayacidos por las Formaciones Guaduas, Bogotá y, en profundidad, por las areniscas del Grupo Guadalupe, que constituyen el principal acuífero regional. Los pozos profundos perforados entre 350 y 530 metros confirman la presencia de acuíferos de alta transmisividad, con caudales superiores a 40 a 50 L/s en sectores donde el fracturamiento tectónico incrementa la permeabilidad secundaria. Madrid representa un corredor hidrogeológico de transición entre la cuenca lacustre y los bloques estructurales elevados, con acuíferos profundos altamente productivos y acuíferos someros de baja respuesta hidráulica.

En Mosquera, la estructura hidrogeológica está controlada por el Anticlinal de Cerro Gordo, cuyo núcleo expone la Formación Arenisca Dura y cuyos flancos presentan las Formaciones Plaeners y Labor y Tierna. Esta configuración convierte a Mosquera en una de las zonas de mayor potencial de recarga directa del acuífero profundo, debido a la exposición de areniscas masivas y fracturadas. Hacia la planicie oriental, el acuífero profundo se encuentra cubierto por depósitos cuaternarios de espesor variable, que actúan como acuitardo somero. La presencia de una falla inversa en el flanco oriental del anticlinal genera zonas de cizalla con permeabilidad secundaria elevada, favoreciendo la transmisión

lateral del flujo subterráneo hacia Funza y Madrid. Mosquera constituye, por tanto, un nodo estructural clave en la recarga y distribución del acuífero profundo del Grupo Guadalupe.

El municipio de Facatativá presenta la mayor complejidad estructural del corredor, al ubicarse entre el Anticlinorio de Villeta y la unidad tectónica de la Sabana de Bogotá. Su subsuelo está atravesado por pliegues amplios (Sinclinal El Dintel, Anticlinal central y Sinclinal El Hato) y fallas cabalgantes que controlan la geometría de los acuíferos. Los depósitos cuaternarios son someros y discontinuos, mientras que las Formaciones Guaduas, Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura conforman un sistema acuífero profundo altamente productivo, especialmente en zonas de fracturamiento. Los registros eléctricos del pozo Guapucha y los perfiles geoeléctricos del SGC confirman la presencia de areniscas competentes entre 140 y 300 metros, con niveles permeables bien definidos y caudales elevados. Facatativá representa el extremo occidental del corredor hidrogeológico, donde el acuífero profundo del Grupo Guadalupe alcanza su mayor espesor y productividad.

La integración de los cuatro municipios revela un sistema hidrogeológico regional continuo, donde los depósitos cuaternarios conforman un acuífero somero semiconfinado de productividad variable, mientras que el Grupo Guadalupe constituye el acuífero profundo regional, con alta transmisividad y caudales sostenidos. La tectónica compresiva de la Sabana Occidente controla la distribución de los acuíferos, generando zonas de recarga en los bloques anticlinales (Mosquera y Facatativá), zonas de almacenamiento profundo en los sinclinales (Madrid y Funza) y corredores de transmisión lateral asociados a fallas inversas y zonas de cizalla. La información disponible, incluyendo más de 20 perfiles geoeléctricos, 12 sondeos magnetotelúricos, registros eléctricos de pozos profundos, pruebas de bombeo, columnas litológicas completas y un inventario regional de más de 1.100 puntos de agua, permite definir con precisión la geometría de los acuíferos, sus propiedades hidráulicas, los mecanismos de recarga y la heterogeneidad estructural regional.

En conjunto, la región Funza–Madrid–Mosquera–Facatativá constituye un sistema hidrogeológico integrado, con suficiente información para avanzar hacia la construcción de un modelo numérico de flujo subterráneo de tipo MODFLOW o equivalente, que permita evaluar la disponibilidad del recurso, simular escenarios de explotación, identificar zonas de vulnerabilidad y establecer lineamientos para la gestión sostenible del acuífero profundo del Grupo Guadalupe en Sabana Occidente.

23.1 LINEAMIENTOS PARA LA MODELACIÓN NUMÉRICA DEL SISTEMA HIDROGEOLÓGICO REGIONAL

La construcción de un modelo numérico de flujo subterráneo para la región de Sabana Occidente, que comprende los municipios de Funza, Madrid, Mosquera y Facatativá, requiere la definición de lineamientos técnicos que garanticen la coherencia conceptual, la representatividad espacial y la confiabilidad de los resultados. La información hidrogeológica integrada para estos cuatro municipios demuestra que la región cuenta con una base de datos suficiente y robusta para avanzar hacia la simulación numérica mediante MODFLOW o un software equivalente basado en diferencias finitas. Los lineamientos que se presentan a continuación establecen los criterios fundamentales para la estructuración del modelo, la parametrización de las unidades hidroestratigráficas, la definición de

condiciones de borde, la incorporación de la heterogeneidad estructural y la calibración del sistema.

El primer lineamiento corresponde a la definición del modelo conceptual regional, el cual debe representar la arquitectura hidrogeológica estratificada que caracteriza la Sabana Occidente. Este modelo conceptual debe integrar los depósitos cuaternarios de la planicie lacustre (Formaciones Sabana, Chía y Mondoñedo), el potente acuitardo pelítico de las Formaciones Bogotá y Guaduas, y el acuífero profundo regional del Grupo Guadalupe, conformado por las Formaciones Labor y Tierna, Plaeners y Arenisca Dura. La geometría de estas unidades debe ser representada con base en los perfiles geoeléctricos del SGC (1996), los sondeos magnetotelúricos ejecutados en el marco del Convenio CAR-CONV-INT-3121-2024, las columnas litológicas de pozos profundos y la cartografía estructural regional. La presencia de sinclinales profundos (Funza y Madrid), anticlinales elevados (Mosquera y Facatativá) y fallas inversas debe incorporarse explícitamente en el modelo conceptual, dado que estas estructuras controlan la continuidad lateral de los acuíferos y la distribución del flujo subterráneo.

El segundo lineamiento corresponde a la definición del dominio espacial del modelo, el cual debe abarcar la totalidad del corredor hidrogeológico Funza–Madrid–Mosquera–Facatativá, extendiéndose desde la planicie lacustre del río Bogotá hasta los bloques estructurales elevados del Grupo Guadalupe. El dominio debe incluir las zonas de recarga directa en los anticlinales de Cerro Gordo (Mosquera) y El Dintel–Alto del Vino (Facatativá), las zonas de almacenamiento profundo en los sinclinales de Funza y Madrid, y las zonas de descarga potencial hacia la cuenca del río Bogotá y la Laguna de Herrera. La discretización horizontal debe considerar celdas de tamaño variable, con mayor resolución en áreas de interés hidrogeológico (zonas de falla, pozos profundos, áreas de recarga y zonas de transición estratigráfica). La discretización vertical debe representar las unidades hidroestratigráficas principales, incluyendo al menos cuatro niveles: acuífero somero cuaternario, acuitardo pelítico, acuífero intermedio (Cacho–Regadera en Madrid) y acuífero profundo del Grupo Guadalupe.

El tercer lineamiento corresponde a la parametrización hidráulica del modelo, la cual debe basarse en valores medidos en campo y en rangos típicos reportados para las unidades hidrogeológicas de la Sabana de Bogotá. Los depósitos cuaternarios deben parametrizarse con conductividades hidráulicas entre 0,01 y 0,8 m/día en matriz y entre 1 y 4 m/día en lentes arenosos. Las Formaciones Bogotá y Guaduas deben representarse como acuitardos con conductividades entre 10^{-5} y 10^{-2} m/día y transmisividades menores a 5 m²/d. Las areniscas del Grupo Guadalupe deben parametrizarse con conductividades entre 0,1 y 7 m/día en matriz y valores superiores a 5 m/día en zonas de fractura, con transmisividades entre 30 y 350 m²/d, pudiendo superar los 450 m²/d en zonas de falla. Los coeficientes de almacenamiento deben asignarse según el tipo de acuífero: valores entre 10^{-4} y 10^{-3} para acuíferos confinados profundos y valores entre 0,01 y 0,05 para acuíferos libres someros.

El cuarto lineamiento corresponde a la definición de condiciones de borde y fuentes de recarga. La recarga debe representarse como una función espacialmente variable, con valores mayores en las zonas elevadas del anticlinal de Mosquera y Facatativá, donde la exposición de areniscas fracturadas favorece la infiltración directa. En la planicie lacustre, la recarga debe ser menor y controlada por la permeabilidad de los depósitos cuaternarios. Las condiciones de borde deben incluir límites de no flujo en las divisorias hidrogeológicas,

límites de flujo constante en zonas de descarga hacia el río Bogotá y la Laguna de Herrera, y condiciones de flujo lateral en zonas de falla donde la permeabilidad secundaria controla la transmisión del flujo entre bloques estructurales.

El quinto lineamiento corresponde a la incorporación de la heterogeneidad estructural, la cual es fundamental para representar adecuadamente el comportamiento del acuífero profundo. Las fallas inversas identificadas en Mosquera y Facatativá deben incorporarse como zonas de alta permeabilidad secundaria, mientras que los sinclinales profundos de Funza y Madrid deben representarse como zonas de almacenamiento con menor permeabilidad vertical. La geometría de los pliegues debe integrarse mediante variaciones en la elevación de las unidades hidroestratigráficas y en la distribución de parámetros hidráulicos.

El sexto lineamiento corresponde a la calibración del modelo, la cual debe realizarse mediante ajuste de niveles piezométricos, caudales de pozos y pruebas de bombeo. La calibración debe incluir etapas estacionarias y transitorias, incorporando variaciones estacionales de recarga y respuesta del acuífero somero. Los pozos profundos de Madrid y Facatativá, con pruebas de bombeo confiables, deben utilizarse como puntos de control para la calibración del acuífero profundo del Grupo Guadalupe.

Finalmente, el séptimo lineamiento corresponde a la validación y análisis de escenarios, que debe incluir simulaciones de explotación sostenible, evaluación de vulnerabilidad, análisis de interferencia entre pozos y escenarios de variación climática. El modelo debe permitir identificar zonas de alta productividad, zonas de riesgo por sobreexplotación y áreas donde la explotación debe ser restringida debido a la presencia de acuitardos gruesos o baja permeabilidad.

En conjunto, estos lineamientos establecen la estructura técnica necesaria para la construcción de un modelo numérico regional con MODFLOW, capaz de representar adecuadamente el sistema hidrogeológico de Sabana Occidente y de servir como herramienta para la gestión sostenible del recurso hídrico subterráneo en Funza, Madrid, Mosquera y Facatativá.

24 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA CALERA

El municipio de La Calera se ubica en la provincia del Guavio (departamento de Cundinamarca), sobre la ladera oriental de los Cerros Orientales de Bogotá y la subcuenca del río Teusacá (cuenca del río Bogotá). Presenta una topografía accidentada y de valle interandino flanqueada por importantes serranías y escarpes montañosos, con altitudes que oscilan entre los 2.600 y los 3.100 m s. n. m. Su clima es predominantemente frío a muy frío (de páramo en las zonas altas), con una temperatura media anual de 11 °C a 13 °C y una precipitación media entre 800 y 1.200 mm distribuidos en un régimen bimodal.

24.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La estratigrafía de La Calera abarca un extenso y complejo registro sedimentario que se extiende desde el Cretácico Inferior/Superior hasta el Cenozoico y Cuaternario:

- Depósitos Cuaternarios y Terciarios (Qal, Qtf, N1m): Depósitos Aluviales (Qal) y Fluvio Torrenciales (Qtf) del Cuaternario, acompañados por la Formación Marichuela (N1m), emplazados sobre las zonas deprimidas del valle del río Teusacá.
- Secuencia Paleógena, Formaciones Bogotá (Pgb) y Cacho (Pgc): Integrada por un potente paquete de arcillolitas, lutitas y lodolitas rojas/púrpuras (Pgb) e intercalaciones gruesas de areniscas cuarzosas de grano medio a grueso (Pgc).
- Secuencia Maastrichtiana a Paleógena, Formación Guaduas (KPgg): Formada por alternancias de arcillolitas, lutitas y lodolitas oscuras con delgados niveles de areniscas y capas de carbón.
- Secuencia del Cretácico Superior (Grupo Guadalupe): Comprende las Formaciones Labor y Tierna (Ksglt), Plaeners (Ksgpl) y Arenisca Dura (Ksgd). Corresponden a una sucesión gruesa de areniscas cuarzosas de grano grueso, liditas silíceas, cherts y limolitas altamente diaclasadas.
- Secuencia Basal Cretácica, Formación Chipaque (Ksch): Conjunto lutítico y lodolítico basales con intercalaciones de limolitas y calizas de muy baja permeabilidad.

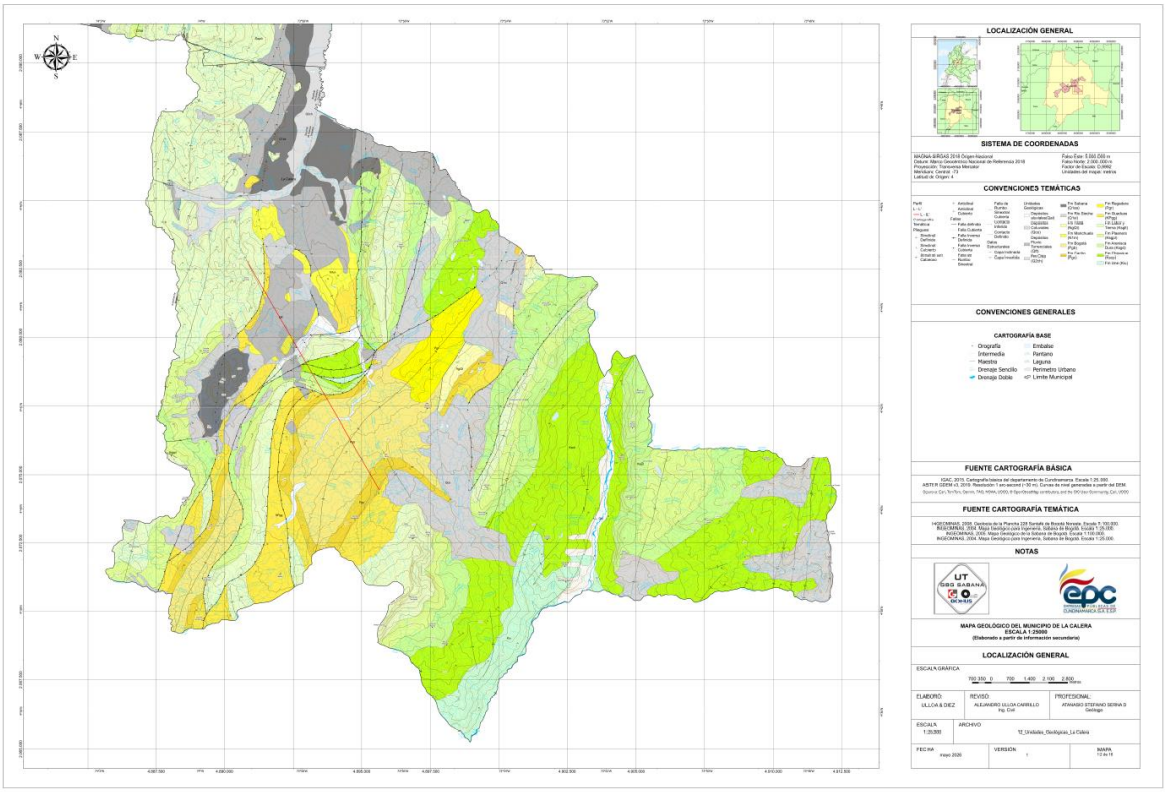


Figura 51. Mapa geológico del sector de La Calera y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

24.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La arquitectura hidrogeológica de La Calera está gobernada por el Sinclinal de Teusacá y el Anticlinal de Bogotá/Chingaza, fuertemente afectados por un sistema de fallas inversas de rumbo regional N-S a NNE-SSW (como la Falla de Teusacá y la Falla de Chocontá):

- Flanco Oriental (Zona Montañosa y Zonas de Recarga): Estructura anticlinal elevada donde afloran de forma continua las areniscas fracturadas y liditas del Grupo Guadalupe (Ksgd, Ksgpl, Ksglt). Constituye la principal zona de recarga autóctona y regional, abasteciendo los acuíferos profundos y alimentando los drenajes hacia el Embalse San Rafael.
- Depresión Sinclinal del Río Teusacá (Sector Central): Depresión tectónica donde la Formación Cacho (Pgc) y el Grupo Guadalupe profundizan bajo la cobertura de las arcillolitas de las Formaciones Bogotá (Pgb) y Guaduas (KPgg). Esta cuenca apilada genera condiciones de fuerte confinamiento a artesianismo parcial para las aguas profundas.
- Sistema de Fallas Inversas (Falla de Teusacá y asociadas): Trazas tectónicas de gran magnitud que yuxtaponen bloques rocosos cretácicos sobre unidades

paleógenas. Estas estructuras actúan como barreras hidráulicas transversales o como fajas de alta transmisividad y permeabilidad secundaria por trituración/diaclasado en sus zonas de daño.

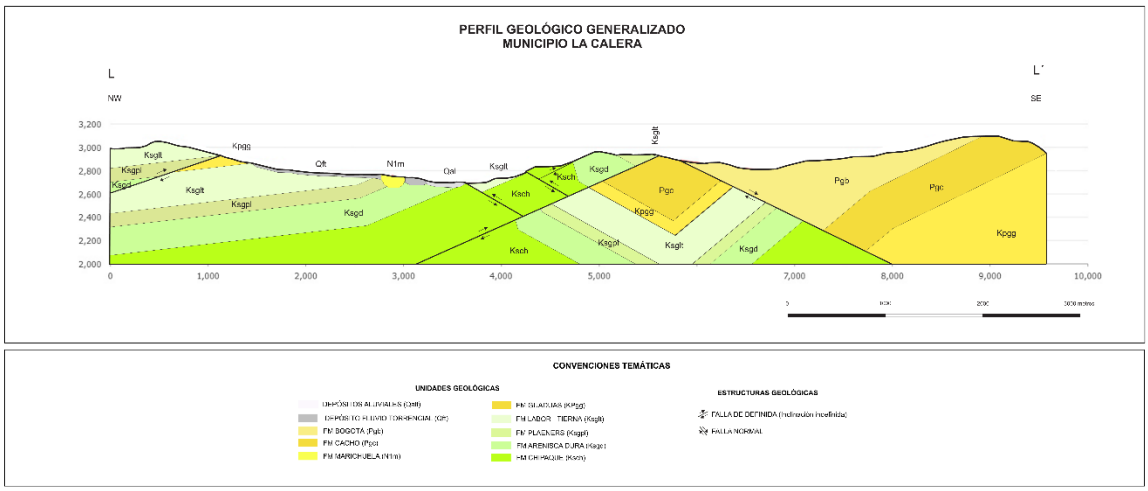


Figura 52. Corte geológico interpretativo del municipio de La Calera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

24.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El sistema hidrogeológico de La Calera es marcadamente multicapa, destacándose las unidades arenosas del Grupo Guadalupe y de la Formación Cacho como los acuíferos de mayor potencial, aislados por sellos pelíticos.

Tabla 36. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de La Calera.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Depósitos Aluviales / Fluvio Torrenciales (Qal, Qtf, N1m)	Gravas, arenas, limos y matrices arcillosas.	Acuífero local, porosidad primaria; libre a semiconfinado	Variable (10 – 40 m)	**Media a Alta** en fases granulares de valle. Excelente recarga directa.
Formaciones Bogotá y Guaduas (Pgb, KPgg)	Arcillolitas, lutitas y lodolitas con capas de carbón.	Acuitardo, porosidad secundaria limitada; capa confinante	> 400 m	**Muy Baja**. Actúan como potentes barreras impermeables regionales.
Formación Cacho (Pgc)	Areniscas cuarzosas granulares de grano medio a grueso.	Acuífero, porosidad mixta; semiconfinado a confinado	60 – 120 m	**Alta**. Acuífero de elevada transmisividad localizado en el

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
				sector central y oriental.
Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	Areniscas cuarzosas, liditas, cherts y limolitas silíceas.	Acuífero, porosidad secundaria; confinado, libre en zonas de afloramiento	> 400 m	**Alta**. Reservorio estratégico de excelente porosidad secundaria por deformación.
Formación Chipaque (Ksch)	Lutitas, lodolitas y limolitas oscuras.	Acuífugo; piso del sistema	> 350 m	**Muy Baja**. Constituye el sello impermeable basal expuesto en fallas.

24.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA CALERA

El municipio de La Calera se emplaza sobre la vertiente oriental de los Cerros Orientales de Bogotá, en la provincia del Guavio, dentro de la cuenca del río Teusacá y el sistema hidrográfico del río Bogotá. Su configuración fisiográfica está dominada por un relieve abrupto, con serranías, escarpes y valles interandinos profundamente incisos, donde las altitudes varían entre los 2.600 y 3.100 m s. n. m. El clima es frío a muy frío, con condiciones de páramo en las zonas altas, y una precipitación anual entre 800 y 1.200 mm bajo régimen bimodal. Esta combinación de topografía montañosa, gradiente altitudinal y alta humedad convierte a La Calera en una de las zonas de mayor recarga hídrica natural del oriente de la Sabana.

Desde el punto de vista geológico, La Calera presenta una secuencia estratigráfica amplia y compleja que abarca unidades del Cretácico Inferior y Superior, del Paleógeno y del Cuaternario. En las zonas bajas del valle del río Teusacá se desarrollan depósitos aluviales y fluvio-torrenciales (Qal, Qtf), junto con la Formación Marichuela (N1m), que conforman acuíferos porosos someros de permeabilidad variable. En el sector central y occidental afloran las Formaciones Bogotá (Pgb) y Guaduas (KPgg), compuestas por arcillolitas, lutitas y lodolitas de muy baja permeabilidad, que actúan como acuitardos regionales y sellos confinantes de los acuíferos profundos. Por encima de estas unidades se disponen las areniscas cuarzosas de la Formación Cacho (Pgc), de grano medio a grueso, que constituyen un acuífero secundario de buena transmisividad. En las zonas montañosas y de mayor elevación afloran ampliamente las unidades del Grupo Guadalupe (Ksglt, Ksgpl, Ksgd), caracterizadas por areniscas masivas, liditas silíceas y cherts intensamente fracturados, que conforman el principal acuífero profundo del municipio. La secuencia basal está representada por la Formación Chipaque (Ksch), un conjunto lutítico de muy baja permeabilidad que actúa como sello hidrogeológico inferior.

La arquitectura hidroestructural de La Calera está controlada por dos grandes estructuras regionales: el Anticlinal de Bogotá–Chingaza y el Sinclinal de Teusacá. En el flanco oriental del municipio, el anticlinal expone de manera continua las areniscas fracturadas del Grupo Guadalupe, constituyendo la principal zona de recarga autóctona y regional. Estas unidades reciben infiltración directa de la precipitación y alimentan los flujos subterráneos profundos que migran hacia el valle del río Teusacá y hacia el Embalse San Rafael. En el sector central, la depresión sinclinal del Teusacá aloja un paquete apilado de unidades pelíticas

(Formaciones Bogotá y Guaduas) que confinan las areniscas de Cacho y del Grupo Guadalupe, generando condiciones de flujo confinado e incluso artesianismo parcial en algunos sectores. Este comportamiento multicapa es característico de cuencas tectónicas profundas donde los acuíferos arenosos quedan atrapados entre sellos arcillosos de gran espesor.

El sistema de fallas inversas que atraviesa La Calera, entre ellas la Falla de Teusacá y trazas asociadas con rumbo N–S a NNE–SSW, desempeña un papel fundamental en la distribución del flujo subterráneo. Estas fallas yuxtaponen bloques cretácicos sobre unidades paleógenas, actuando en algunos casos como barreras hidráulicas que segmentan los acuíferos y, en otros, como zonas de alta transmisividad debido al fracturamiento y trituración de las rocas en las zonas de daño. La presencia de estas estructuras genera corredores preferenciales de flujo y zonas de recarga profunda, así como discontinuidades que condicionan la continuidad lateral de los acuíferos.

El sistema hidrogeológico de La Calera es marcadamente multicapa. Los depósitos aluviales y fluvio-torrenciales del valle del Teusacá conforman acuíferos someros de permeabilidad media a alta, con buena respuesta a la recarga directa. Las Formaciones Bogotá y Guaduas actúan como acuitardos regionales que confinan los acuíferos profundos y limitan el flujo vertical. La Formación Cacho constituye un acuífero intermedio de elevada transmisividad, especialmente en sectores donde el fracturamiento tectónico incrementa la permeabilidad secundaria. El Grupo Guadalupe representa el acuífero principal del municipio, con espesores superiores a 400 metros y una porosidad secundaria desarrollada por deformación tectónica, lo que le confiere una excelente capacidad de almacenamiento y transmisión. Finalmente, la Formación Chipaque constituye el sello basal del sistema, actuando como límite inferior del flujo subterráneo.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de La Calera describe un sistema estratificado y tectónicamente controlado, donde las zonas montañosas del anticlinal funcionan como áreas de recarga profunda, las unidades pelíticas del sinclinal generan confinamiento y artesianismo, y las areniscas del Grupo Guadalupe y de la Formación Cacho conforman los principales acuíferos de interés para captación sostenible. Esta arquitectura compleja, combinada con la alta disponibilidad de información geológica y estructural, permite avanzar hacia la evaluación detallada del potencial hídrico y hacia la integración del municipio en modelos regionales de flujo subterráneo.

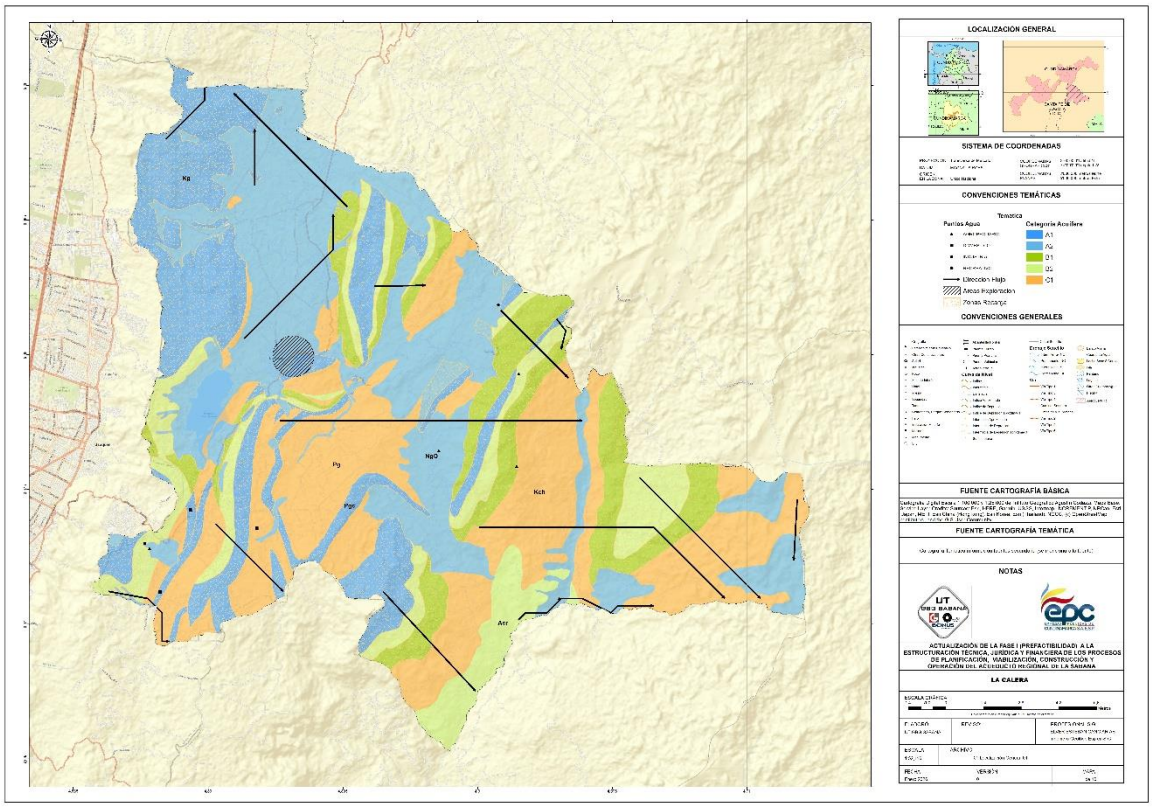


Figura 53. Mapa hidrogeológico del municipio de La Calera, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 37. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de La Calera.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Aluviales / Tilatá (Qal, Qt, NgQt)	$0{,}1 - 2{,}0$*(matriz)* $2{,}0 - 12{,}0$*(gravas/arenas)*	$10 - 120$	S_y: $0{,}03 - 0{,}12$	$1{,}0 - 5{,}0$ L/s	Alta heterogeneidad granulométrica. Nivel freático somero en el valle del Teusacá.
Formación Cacho (Pgc)	$0{,}8 - 6{,}0$	$40 - 220$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$4{,}0 - 12{,}0$ L/s	Porosidad intergranular de elevada respuesta hidráulica en flancos del sinclinal.
Grupo Guadalupe	$0{,}1 - 3{,}0$*(matriz)*	$30 - 350$*(> 500 en cizalla de falla)*	S: $10^{-5} - 10^{-3}$	$8{,}0 - 25{,}0$ L/s	Reservorio fracturado estratégico.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
(Ksglt, Ksgpl, Ksgd)	$> 6{,}0$*(zonas de falla)*				Caudales máximos condicionados al diaclasado tectónico.
Formaciones Bogotá y Guaduas (Pgb, KPgg)	$10^{-5} - 10^{-2}$	< 5	$S: 10^{-5} - 10^{-4}$	$< 0{,}5$ L/s	Sello impermeabilizante amplio que confina los acuíferos profundos de Guadalupe.
Formación Chipaque (Ksch)	$< 10^{-4}$	< 1	N/A	Nulo a muy bajo	Base impermeable del sistema en el sector oriental

24.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

El programa de exploración complementaria para el municipio de La Calera se fundamenta en la compleja arquitectura hidrogeológica identificada en el modelo conceptual, caracterizada por un sistema multicapa donde los acuíferos profundos del Grupo Guadalupe y de la Formación Cacho se encuentran confinados por potentes paquetes pelíticos de las Formaciones Bogotá y Guaduas, mientras que los depósitos aluviales y fluvio-torrenciales del valle del río Teusacá conforman acuíferos someros de permeabilidad variable. La presencia del Anticlinal de Bogotá–Chingaza como zona de recarga regional, la depresión sinclinal del Teusacá como zona de confinamiento y el sistema de fallas inversas como elementos de control estructural del flujo subterráneo, exige un programa de exploración que permita refinar la geometría de los acuíferos, caracterizar la heterogeneidad estructural y cuantificar los parámetros hidráulicos de las unidades permeables.

Puntos Sugeridos para Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) / Perforación:

Zona A (Pie de monte Oriental / Flanco del Anticlinal): Pozos profundos orientados a captar el acuífero libre fracturado de la Formación Arenisca Dura (Ksgd) y Labor y Tierna (Ksglt) en la zona de mayor recarga.

Zona B (Sector Falla de Teusacá / Valle Central): Sondeos exploratorios profundos para evaluar la zona de deformación tectónica y captar la Formación Cacho (Pgc) bajo la cobertura de la Formación Bogotá.

Adicionalmente se requiere actualizar el inventario de captaciones de agua subterráneas buscando establecer la real exploración de los diferentes acuíferos.

25 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE LA MESA

El municipio de La Mesa se localiza en la provincia del Tequendama (departamento de Cundinamarca), sobre el margen occidental de la cuenca media-baja del río Bogotá. Presenta una topografía escarpada a fuertemente ondulada, con elevaciones que oscilan entre los 400 y los 1.400 m s. n. m. Su clima varía de cálido a templado, con un régimen bimodal de precipitaciones y periodos secos que ejercen una presión constante sobre el abastecimiento de agua.

25.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

La estratigrafía regional de La Mesa está conformada por secuencias sedimentarias Cretácicas dominadas por sedimentitas finas y niveles limolíticos/arenosos del Grupo Villeta y unidades afines, cubiertas localmente en posición discordante por depósitos inconsolidados y semiconsolidados del Cuaternario:

- Depósitos Fluvio Glaciares / Terrazas (Qfg / Qta): Coberturas detríticas remanentes compuestas por gravas, arenas, limos y matrices arcillosas que se disponen de forma lenticular sobre las zonas altas de meseta y laderas.
- Formación Trincheras, Miembro Anapoima (Kitra): Conformado por areniscas cuarzosas finas a medias con cemento calcáreo e intercalaciones de lodolitas grises. Es la unidad de mayor extensión en el cuerpo central y alto del perfil del municipio.
- Formación Trincheras, Miembro El Tigre (Kitrt): Lodolitas negras laminadas con intercalaciones de areniscas cuarzosas finas, niveles calcáreos y chert; corresponde a la base de la formación.
- Formación Socotá (Kis): Secuencia de limolitas, calizas y areniscas delgadas de matriz calcárea con estratificación fina.
- Formación Capotes (Kic): Intercalaciones de limolitas y lutitas con presencia de niveles silíceos y calcáreos.

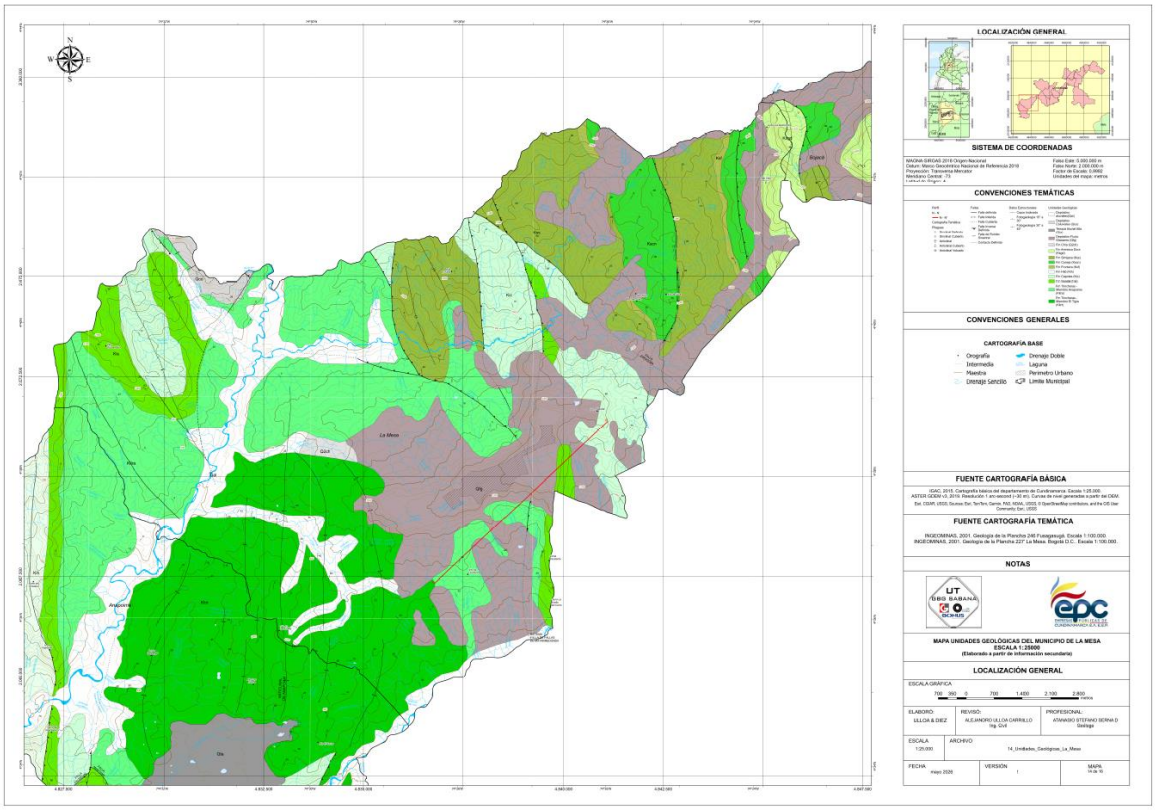


Figura 54. Mapa geológico del sector de La Mesa y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

25.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría del subsuelo en La Mesa está dominada por una inclinación monoclinal generalizada hacia el Noreste (NE) intervenida por fallamiento inverso de escala regional. En el Perfil Geológico Generalizado $N - N'$ (con una longitud aproximada de 6,0 km y orientaciones $SW \rightarrow NE$), se interpretan los siguientes rasgos estructurales clave:

- Sector Suroeste a Central (0 a 3,5 km): Dominio de las unidades cretácicas de la Formación Trincheras. El Miembro El Tigre (Kitrt) infrayace al Miembro Anapoima (Kitra) siguiendo el buzamiento regional. En las cimas topográficas (cotas superiores a 1.000 a 1.300 m s. n. m.), reposan remanentes discretos de Depósitos Fluvio Glaciares (Qfg).
- Estructura Principal (Falla del Río Bogotá / Cabalgamiento Inferido): A la altura del km 3,5 a 4,2 se identifica la Falla del Río Bogotá, descrita como un plano de cabalgamiento inferido inclinado hacia el SW. Esta estructura yuxtapone el paquete de Kitra sobre los bloques más antiguos de las formaciones Socotá (Kis) y Capotes (Kic).

- Sector Noreste (4,5 a 6,0 km): Afloramiento de las secuencias de la Formación Socotá (Kis) y Formación Capotes (Kic) buzando suavemente hacia el NE bajo el plano de falla.

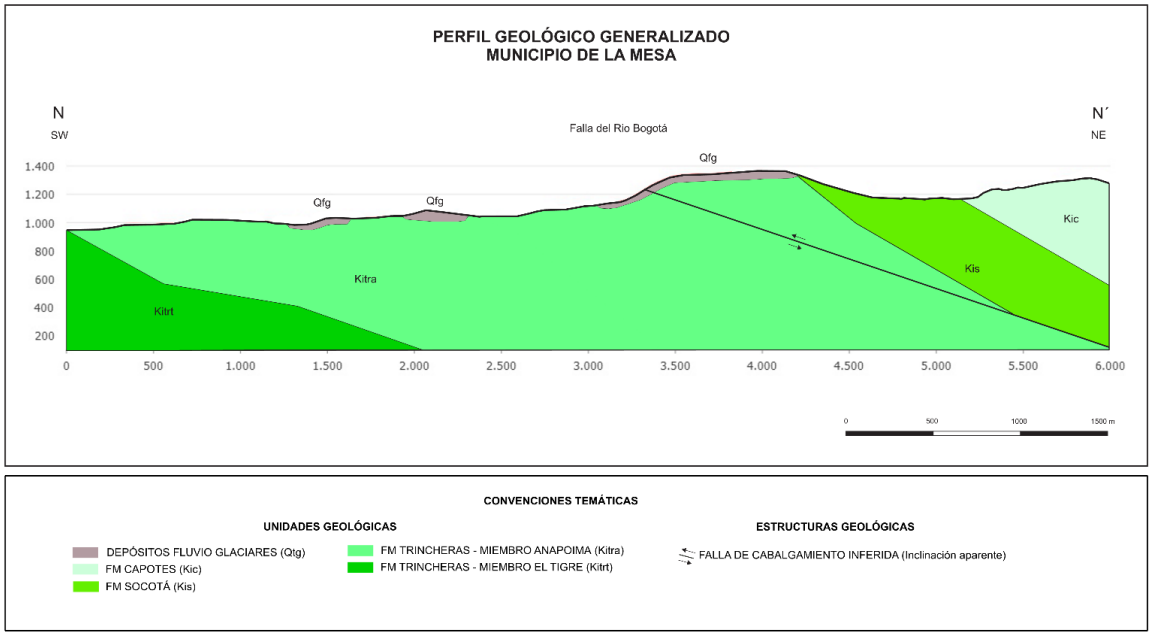


Figura 55. Corte geológico interpretativo del municipio de La Mesa, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

25.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIAL ACUÍFERO

El comportamiento hidrogeológico en el municipio está fuertemente condicionado por la litología dominante (matriz pelítica/arcillosa) y el control estructural del cabalgamiento.

Tabla 38. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de La Mesa.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor / Disposición	Permeabilidad / Productividad
Depósitos Fluvio Glaciares (Qfg / Qta)	Gravas, arenas y limos en matriz arcillosa.	Acuífero local, porosidad primaria; libre a semiconfinado	Capas lenticulares sobre mesetas (espesor variable, < 20 m).	**Baja a Moderada**. Acuíferos colgados de capacidad limitada.
Formación Trincheras, Miembro Anapoima (Kitra)	Areniscas cuarzosas finas a medias con intercalaciones de lodolitas.	Acuífero local, porosidad secundaria	Extenso volumen regional.	**Baja a Media.** Areniscas con flujo controlado por fracturas.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor / Disposición	Permeabilidad / Productividad
Formación Trincheras, Miembro El Tigre (Kitrt)	Lodolitas negras laminadas con niveles calcáreos y chert.	Acuífugo; sello regional	Infrayace a Kitra.	**Nula.** Lodolitas laminadas que actúan como sello regional.
Formación Socotá (Kis) y Capotes (Kic)	Limolitas, calizas y lutitas compactas.	Acuífero local de baja productividad (Kis); acuífugo (Kic)	Bloque inferior bajo la falla.	**Baja**. Dependiente de zonas de deformación y disolución.

25.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El municipio de La Mesa se emplaza sobre el margen occidental de la cuenca media-baja del río Bogotá, en la provincia del Tequendama, dentro de un paisaje caracterizado por laderas abruptas, mesetas residuales y valles profundos que descienden desde los 1.400 m s. n. m. hasta cotas cercanas a los 400 m s. n. m.

Esta marcada variación altitudinal, sumada a un clima cálido a templado con periodos secos prolongados, condiciona fuertemente la disponibilidad y dinámica del recurso hídrico subterráneo, haciendo de La Mesa un territorio donde la presión sobre el abastecimiento es constante y donde la hidrogeología está estrechamente ligada a la estructura geológica regional.

La estratigrafía del municipio está dominada por unidades sedimentarias del Cretácico pertenecientes al Grupo Villeta y formaciones afines, caracterizadas por matrices pelíticas de baja permeabilidad y niveles arenosos delgados que conforman acuíferos secundarios de limitada productividad.

En las zonas altas y mesetas se preservan depósitos fluvio-glaciares y terrazas cuaternarias (Qfg, Qta), compuestos por gravas, arenas y limos en matriz arcillosa, que conforman acuíferos porosos someros de carácter local y comportamiento colgado. Estos depósitos son discontinuos y lenticulares, con espesores menores a 20 metros, y representan las principales fuentes de recarga directa en las zonas elevadas del municipio.

El cuerpo central del perfil geológico está dominado por la Formación Trincheras, especialmente por el Miembro Anapoima (Kitra), constituido por areniscas cuarzosas finas a medias con intercalaciones de lodolitas, que conforma un acuífero fracturado de baja productividad cuyo rendimiento depende del grado de diaclasado y de la continuidad de las capas arenosas. Inmediatamente por debajo se dispone el Miembro El Tigre (Kitrt), compuesto por lodolitas negras laminadas de muy baja permeabilidad, que se comporta como acuífugo y actúa como sello hidrogeológico regional. En el sector nororiental afloran las Formaciones Socotá (Kis) y Capotes (Kic), caracterizadas por limolitas, calizas y lutitas compactas, que conforman acuíferos fisurados de baja productividad, dependientes de zonas de deformación y disolución en niveles calcáreos.

La arquitectura hidroestructural de La Mesa está controlada por una inclinación monoclinal regional hacia el noreste, intervenida por fallamiento inverso de escala regional. El rasgo estructural más importante es la Falla del Río Bogotá, interpretada como un cabalgamiento que yuxtapone la Formación Trincheras sobre las unidades más antiguas de Socotá y

Capotes. Esta estructura genera un contraste hidráulico significativo, actuando como barrera transversal al flujo subterráneo en algunos sectores y como zona de permeabilidad secundaria en otros, dependiendo del grado de fracturamiento en la zona de daño. La presencia de esta falla condiciona la continuidad lateral de los acuíferos y segmenta el sistema hidrogeológico en bloques con comportamientos diferenciados.

El sistema hidrogeológico de La Mesa es, por tanto, de baja a moderada productividad, fuertemente controlado por el predominio de rocas de grano fino y por la presencia del cabalgamiento regional. Los acuíferos someros cuaternarios representan fuentes locales de abastecimiento, pero su capacidad es limitada y su vulnerabilidad a la variabilidad climática es alta. Los acuíferos fracturados de la Formación Trincheras (Miembro Anapoima) y los acuíferos fisurados de Socotá y Capotes presentan una productividad baja a media, dependiente del fracturamiento tectónico y de la presencia de niveles arenosos o calcáreos. El Miembro El Tigre de la Formación Trincheras constituye el principal sello hidrogeológico del municipio, restringiendo el flujo vertical y generando condiciones de confinamiento en los acuíferos subyacentes.

En conjunto, el modelo hidrogeológico de La Mesa describe un sistema estratificado y estructuralmente segmentado, donde los acuíferos someros cuaternarios y los acuíferos fracturados cretácicos presentan una capacidad limitada y una fuerte dependencia de la estructura tectónica. Esta configuración, sumada a la presión climática y a la variabilidad estacional, convierte a La Mesa en un municipio donde la gestión del recurso hídrico subterráneo requiere una planificación cuidadosa y una caracterización detallada de las zonas de recarga, de las estructuras de falla y de los niveles permeables disponibles.

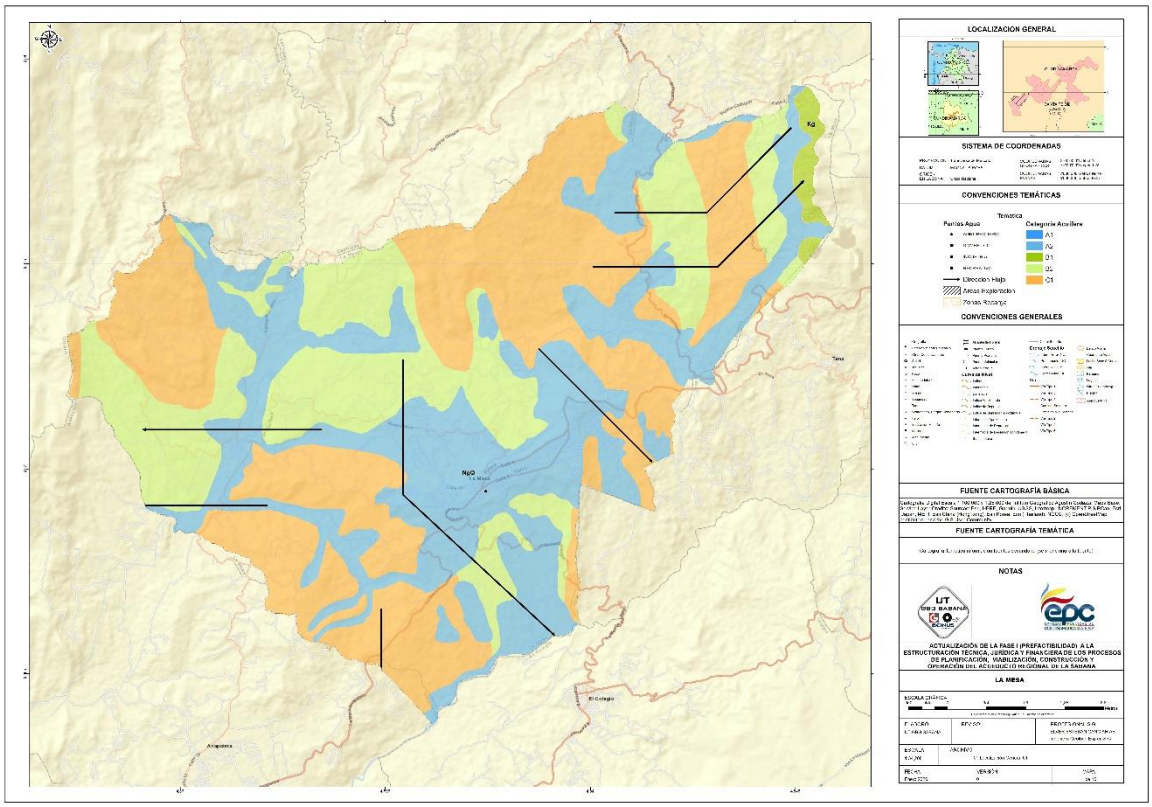


Figura 56. Mapa hidrogeológico del municipio de La Mesa, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 39. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de La Mesa.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K(m/día)	Transmisividad T(m^2/día)	Coeficiente SI Porosidad S_y	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Fluvio-Glaciares (Qfg / Qt)	$0{,}1 - 1{,}5$	$1 - 15$	S_y: $0{,}02 - 0{,}08$	$0{,}2 - 1{,}0$ L/s	Niveles freáticos colgados sobre la meseta. Alta vulnerabilidad al agotamiento en periodos secos.
Formación Trincheras, Miembro El Tigre (Kitrt)	$< 10^{-4}$	$< 0{,}5$	N/A	Nulo a muy bajo	Potente acuitardo/acuífugo pelítico que impide la recarga profunda.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K(m/día)	Transmisividad T(m^2/día)	Coeficiente SI Porosidad S_y	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Formación Trincheras, Miembro Anapoima (Kitra)	$0{,}05 - 1{,}2$	$5 - 40$	$S: 10^{-4}$ $- 10^{-3}$	1,0 $-$ 4,0 L/s	Porosidad secundaria por fracturamiento en niveles delgados de arenisca.
Formaciones Socotá (K_{i-ss}) y Capotes (K_{i-sc})	$0{,}01 - 0{,}8$*(matriz)* $> 2{,}5$*(zona de falla)*	$2 - 30$	$S: 10^{-5}$ $- 10^{-4}$	0,5 $-$ 3,0 L/s	Permeabilidad por fisuramiento/karstificación local en intercalaciones calcáreas.

25.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN COMPLEMENTARIA

En términos generales, el agua subterránea en el municipio de La Mesa no se perfila como una alternativa de abastecimiento masivo ni sostenible para el sistema municipal, debido a la naturaleza de las unidades geológicas predominantes.

La Formación Trincheras, que constituye el volumen litológico dominante en el municipio, combina las areniscas del Miembro Anapoima (Kitra), con permeabilidad secundaria limitada, y las lodolitas del Miembro El Tigre (Kitrt), que actúan como sello regional y restringen el flujo vertical y lateral. Las unidades subyacentes de las Formaciones Socotá (Kis) y Capotes (Kic), aunque contienen niveles calcáreos y limolíticos, son compactas y de baja porosidad, con un desarrollo limitado de fracturamiento efectivo. En consecuencia, el potencial hidrogeológico regional es reducido y altamente dependiente de condiciones estructurales locales.

No obstante, allí donde coinciden fracturamiento tectónico y la presencia de niveles arenosos discretos, particularmente en el Miembro Anapoima (Kitra) y en sectores afectados por la Falla del Río Bogotá, es posible encontrar pequeños reservorios de agua subterránea aprovechable. Estos reservorios no son continuos ni volumétricos, sino puntuales y de carácter local, más adecuados para abastecimientos veredales, nacederos estabilizados o captaciones de bajo caudal que para un sistema urbano de mayor escala. Por ello, la estrategia de exploración debe ser altamente focalizada y basada en la identificación de estructuras favorables, más que en la búsqueda de acuíferos regionales continuos.

En este sentido, el primer paso consiste en actualizar y ampliar el inventario de nacederos y manantiales del municipio, con un enfoque hidrogeológico y estructural. Cada punto de surgencia debe ser georreferenciado con precisión y caracterizado en términos de caudal, variación estacional, unidad geológica aflorante, relación con estructuras (fallas, pliegues, cambios de buzamiento), y condiciones geomorfológicas locales. Este inventario permitirá identificar las unidades geológicas productoras, que con alta probabilidad corresponden a zonas de fracturamiento en Kitra o a contactos litológicos entre depósitos cuaternarios y unidades cretácicas. La ubicación espacial de estos nacederos permitirá delimitar

“microzonas” de interés hidrogeológico donde la exploración detallada tiene mayor probabilidad de éxito.

Complementariamente, se recomienda realizar levantamientos geológicos detallados a escala 1:10.000 o 1:5.000 en las zonas donde se concentran nacederos, fracturas visibles, cambios abruptos de litología o evidencias geomorfológicas de estructuras. Estos levantamientos deben incluir mapeo estructural (dirección y buzamiento de estratos, orientación de fracturas, identificación de zonas de cizalla), verificación de contactos litológicos, caracterización de depósitos cuaternarios y análisis de drenajes. El objetivo es construir un modelo estructural local que permita identificar corredores de fracturamiento, zonas de daño asociadas a la Falla del Río Bogotá y sectores donde los niveles arenosos del Miembro Anapoima afloran o se encuentran a poca profundidad. Este mapeo detallado es indispensable para orientar la exploración geofísica y para seleccionar sitios de perforación con mayor probabilidad de interceptar niveles permeables.

En cuanto a la exploración geofísica, se sugiere la ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en puntos estratégicos previamente definidos mediante el inventario de nacederos y el levantamiento geológico. El SEV01, ubicado en una zona de meseta donde se preservan depósitos fluvioglaciares (Qfg), permitirá evaluar el espesor saturado de estos depósitos porosos someros y localizar el contacto con las rocas del Miembro Anapoima (Kitra). Este sondeo permitirá diferenciar capas resistivas asociadas a gravas y arenas saturadas de niveles arcillosos de menor resistividad, delimitando el volumen potencialmente acuífero y su relación con la topografía.

El SEV02, ubicado en la zona de influencia directa de la Falla del Río Bogotá, tiene como objetivo detectar franjas de alto fracturamiento en las unidades de la Formación Socotá (Kis) o del Miembro Anapoima (Kitra) bajo el bloque cabalgante. En este contexto, la exploración busca evidencias de zonas de daño tectónico donde el fracturamiento haya incrementado la permeabilidad secundaria y permitido la acumulación de agua subterránea en niveles discretos. Un contraste marcado entre la respuesta eléctrica del sello arcilloso (baja resistividad) y la de cuerpos arenosos o calcáreos fracturados (mayor resistividad) podría señalar sitios específicos para perforaciones exploratorias de bajo diámetro.

La integración del inventario de nacederos, los levantamientos geológicos detallados y los SEV permitirá construir un modelo conceptual refinado donde se identifiquen: (i) acuíferos colgados someros en Qfg/Qta de capacidad limitada pero útiles para abastecimientos puntuales; (ii) posibles acuíferos secundarios en areniscas fracturadas de Kitra y sectores deformados de Kis/Kic; y (iii) zonas donde las lodolitas de Kitrt hacen inviable cualquier expectativa de captación significativa. Con esta base, el programa podrá avanzar hacia perforaciones exploratorias muy focalizadas, siempre bajo la premisa de que el recurso subterráneo en La Mesa será complementario y localizado, más que una solución estructural al abastecimiento municipal.

.

26 MODELO HIDROGEOLÓGICO DE ANAPOIMA

El municipio de Anapoima se localiza en la provincia del Tequendama (departamento de Cundinamarca), sobre la cuenca baja del río Bogotá. Presenta una extensión aproximada de 124,2 km² y una topografía variada con altitudes que oscilan entre los 600 y 1.400 m s. n. m. Su clima es predominantemente cálido a templado, con temperaturas promedio entre 22 °C y 28 °C y una precipitación media anual de 1.000 a 1.300 mm, distribuida en un régimen bimodal con déficit hídrico marcado en épocas secas.

26.1 MARCO GEOLÓGICO LOCAL

El subsuelo del municipio está constituido por secuencias sedimentarias plegadas y falladas del Cretácico Inferior a Superior (asociadas al Grupo Villeta y unidades afines), sobre las cuales reposan discordantemente depósitos inconsolidados del Cuaternario:

- Depósitos Cuaternarios (Qal, Qta): Granulares inconsolidados formados por limos, arenas y gravas distribuidos en terrazas aluviales y llanuras del río Bogotá y sus drenajes principales.
- Formación Trincheras (Kitrt, Kitra): Dominada por unidades terrígenas de lutitas y lodolitas con intercalaciones de areniscas finas a medias y limolitas. Ocupa la mayor extensión en la franja central y noreste del municipio.
- Formaciones Capotes (Kic), Socotá (Kis) e Hiló (Kih): Intercalaciones marinas de limolitas, arcillolitas, calizas y niveles silíceos/arenosos cretácicos que afloran estructuralmente complejas en el sector suroeste (SW).

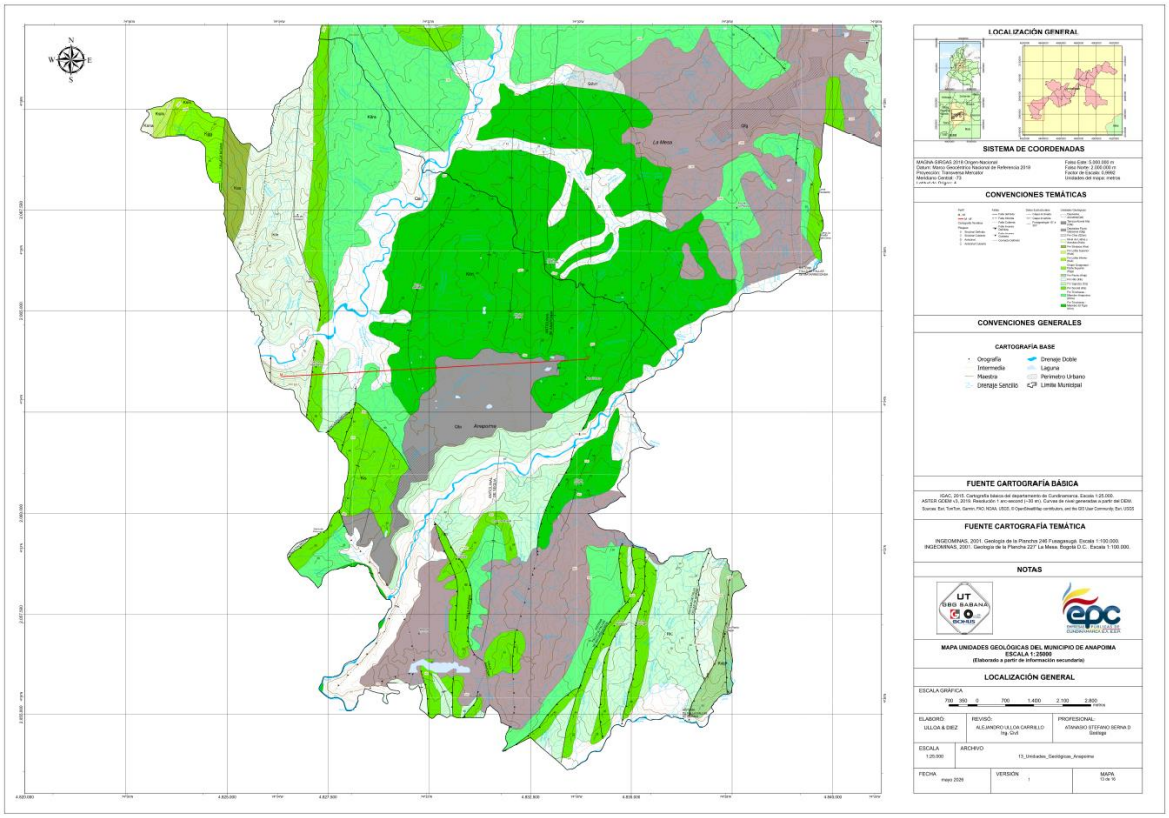


Figura 57. Mapa geológico del sector de Anapoima y áreas adyacentes, a escala 1:25.000, obtenido mediante ampliación cartográfica del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). Se presenta la traza del corte geológico asociado, conforme a la disposición estratigráfica y estructural observada en el área. Consultar Anexos 2 y 3.

26.2 MARCO HIDROESTRUCTURAL E INTERPRETACIÓN DEL PERFIL SUBSUPERFICIAL

La geometría hidrogeológica profunda está controlada por un sistema de fallas de cabalgamiento de rumbo NE-SW y una sucesión de pliegues regionales (Anticlinal y Sinclinal de Anapoima).

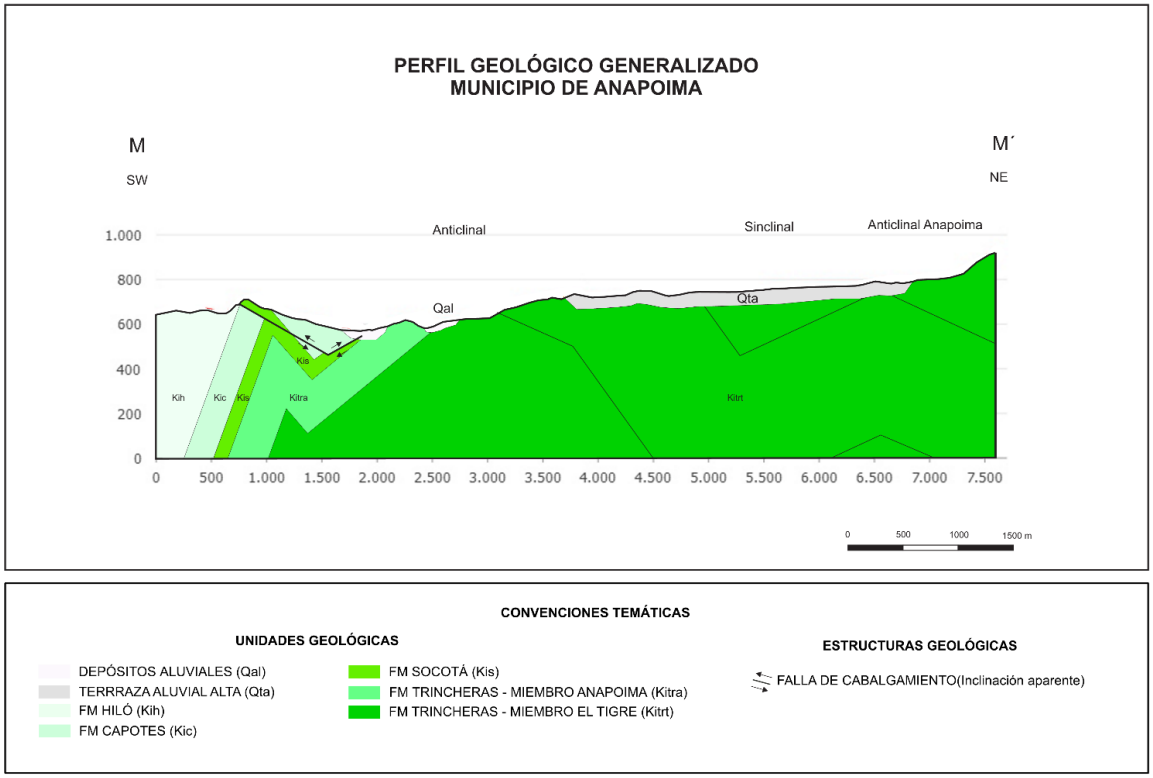


Figura 58. Corte geológico interpretativo del municipio de Anapoima, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (Servicio Geológico Colombiano). El perfil representa la disposición estratigráfica de las unidades litoestratigráficas cartografiadas, con contactos inferidos según la correlación geológica disponible y la continuidad cartográfica de las unidades. Se ilustran variaciones en el buzamiento y estructuras mayores y menores interpretadas a partir de la información geológica existente, incluyendo fallas inferidas conforme a los criterios de coherencia estructural regional. Consultar Anexos 2 y 3.

En el perfil geológico longitudinal $M - M'$ (extensión aproximada de 7,5 km de SW a NE, cota 500 a 900 m s. n. m.), se identifican las siguientes conductas estructurales:

- Sector Suroeste (SW, 0 a 1,5 km): Dominado por fallas de cabalgamiento que yuxtaponen los bloques de las formaciones Kitrt, Kic, Kis y Kih. Las zonas de cizalla actúan como barreras impermeables transversales por milonitización o, alternativamente, como conductos preferenciales paralelos a la falla por fracturamiento secundario.
- Sector Central (4,5 a 6,0 km): Estructura de Sinclinal que genera un efecto de convergencia de flujo subterráneo, favoreciendo el almacenamiento en los niveles arenosos o en la cobertura cuaternaria suprayacente.
- Sector Noreste (NE): Flanco del Anticlinal de Anapoima, el cual opera como una divisoria de aguas subterráneas y zona de recarga local, divergiendo los flujos hacia los flancos.

26.3 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA Y POTENCIALES ACUÍFEROS

Las unidades litogeológicas presentan un comportamiento variable gobernado por la porosidad secundaria (fracturamiento) en el lecho rocoso y por la porosidad primaria (granular) en las coberturas recientes.

Tabla 40. Resumen de unidades hidrogeológicas (UHG) del municipio de Anapoima.

Unidad Cartográfica	Litología Predominante	Tipo de Acuífero	Espesor Esperado	Permeabilidad / Productividad
Depósitos Cuaternarios (Qal, Qta)	Arenas, gravas, limos y matrices arcillosas.	Acuífero local, porosidad primaria; libre a semiconfinado	Qal: 3 - 12 m Qta: 8 - 20 m (máx. 30 m)	**Media a Alta** en fases granulares. Caudales moderados a continuos.
Formación Trincheras, Miembro Anapoima (Kitra)	Intercalaciones de areniscas cuarzosas, lutitas y limolitas.	Acuífero local, porosidad secundaria	Variable (Masa rocosa)	**Baja a Moderada**. Dependiente de zonas de falla/diaclasado (1 - 3 L/s).
Formación Socotá (Kis)	Limolitas y areniscas delgadas con matriz calcárea.	Acuífero local de baja productividad, porosidad secundaria	Ocupa ~10,76% del área	**Baja**. Acuífero secundario de caudales modestos para abasto local.

26.4 DESCRIPCIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO

El municipio de Anapoima, localizado en la provincia del Tequendama sobre la cuenca baja del río Bogotá, presenta una configuración fisiográfica marcada por laderas abruptas, terrazas aluviales y zonas de piedemonte estructural, con altitudes que varían entre los 600 y 1.400 m s. n. m. Su clima cálido a templado, con temperaturas entre 22 °C y 28 °C y precipitaciones anuales entre 1.000 y 1.300 mm, genera una dinámica hídrica activa pero con periodos de déficit marcados durante las épocas secas.

Esta combinación de topografía quebrada, clima contrastante y estructura geológica compleja define un sistema hidrogeológico altamente heterogéneo, donde la disponibilidad de agua subterránea depende de la interacción entre depósitos cuaternarios y unidades fracturadas del Cretácico.

El subsuelo de Anapoima está conformado por una sucesión de unidades sedimentarias plegadas y falladas del Cretácico Inferior a Superior, asociadas al Grupo Villeta y formaciones afines, sobre las cuales reposan depósitos inconsolidados del Cuaternario. En las zonas bajas y planas del municipio se desarrollan depósitos aluviales y terrazas (Qal, Qta), compuestos por arenas, gravas, limos y matrices arcillosas, que conforman acuíferos porosos someros de permeabilidad media a alta, con espesores entre 3 y 12 metros en las llanuras aluviales y entre 8 y 20 metros en las terrazas, alcanzando localmente hasta 30 metros. Estos depósitos representan las principales fuentes de recarga directa y los

acuíferos más productivos del municipio, con caudales moderados y relativamente continuos.

La mayor parte del territorio está dominada por la Formación Trincheras, representada por los Miembros El Tigre (Kitrt) y Anapoima (Kitra). El Miembro El Tigre, compuesto por lodolitas negras laminadas, se comporta como acuífugo de muy baja permeabilidad que restringe el flujo vertical y segmenta el sistema hidrogeológico.

En contraste, el Miembro Anapoima presenta intercalaciones de areniscas cuarzosas finas a medias y limolitas, que conforman un acuífero fracturado secundario de productividad baja a moderada, dependiente del grado de diaclasado y de la presencia de zonas de falla. En sectores donde el fracturamiento tectónico es significativo, estos niveles arenosos pueden producir caudales entre 1 y 3 L/s, suficientes para abastecimientos locales o veredales.

En el sector suroeste del municipio afloran las Formaciones Capotes (Kic), Socotá (Kis) e Hiló (Kih), caracterizadas por intercalaciones de limolitas, arcillolitas, calizas y niveles silíceos/arenosos. Estas unidades presentan un comportamiento hidrogeológico heterogéneo, con acuíferos fisurados de baja productividad, dependientes de zonas de deformación, disolución o fracturamiento. La Formación Socotá, en particular, puede presentar niveles arenosos delgados con permeabilidad local, aunque su capacidad de almacenamiento es limitada.

La arquitectura hidroestructural de Anapoima está controlada por un sistema de fallas de cabalgamiento con rumbo NE–SW y por la presencia de pliegues regionales que conforman el Anticlinal y el Sinclinal de Anapoima. En el sector suroeste, las fallas yuxtaponen bloques de las formaciones Kitrt, Kic, Kis y Kih, generando zonas de cizalla que pueden actuar como barreras impermeables transversales o, alternativamente, como conductos preferenciales paralelos a la falla debido al fracturamiento secundario.

En el sector central, la estructura sinclinal favorece la convergencia del flujo subterráneo y el almacenamiento en los niveles arenosos o en la cobertura cuaternaria suprayacente. En el sector noreste, el flanco del anticlinal funciona como una divisoria de aguas subterráneas y como zona de recarga local, donde los flujos divergen hacia los flancos.

El sistema hidrogeológico de Anapoima es, por tanto, dual y altamente dependiente de la estructura tectónica. Los depósitos cuaternarios conforman acuíferos porosos someros de buena productividad, mientras que las unidades cretácicas presentan acuíferos fracturados de baja a moderada permeabilidad, con caudales modestos y comportamiento anisotrópico. La presencia de fallas y pliegues genera zonas de recarga, almacenamiento y transmisión diferenciadas, que deben ser consideradas en cualquier estrategia de exploración y gestión del recurso hídrico subterráneo.

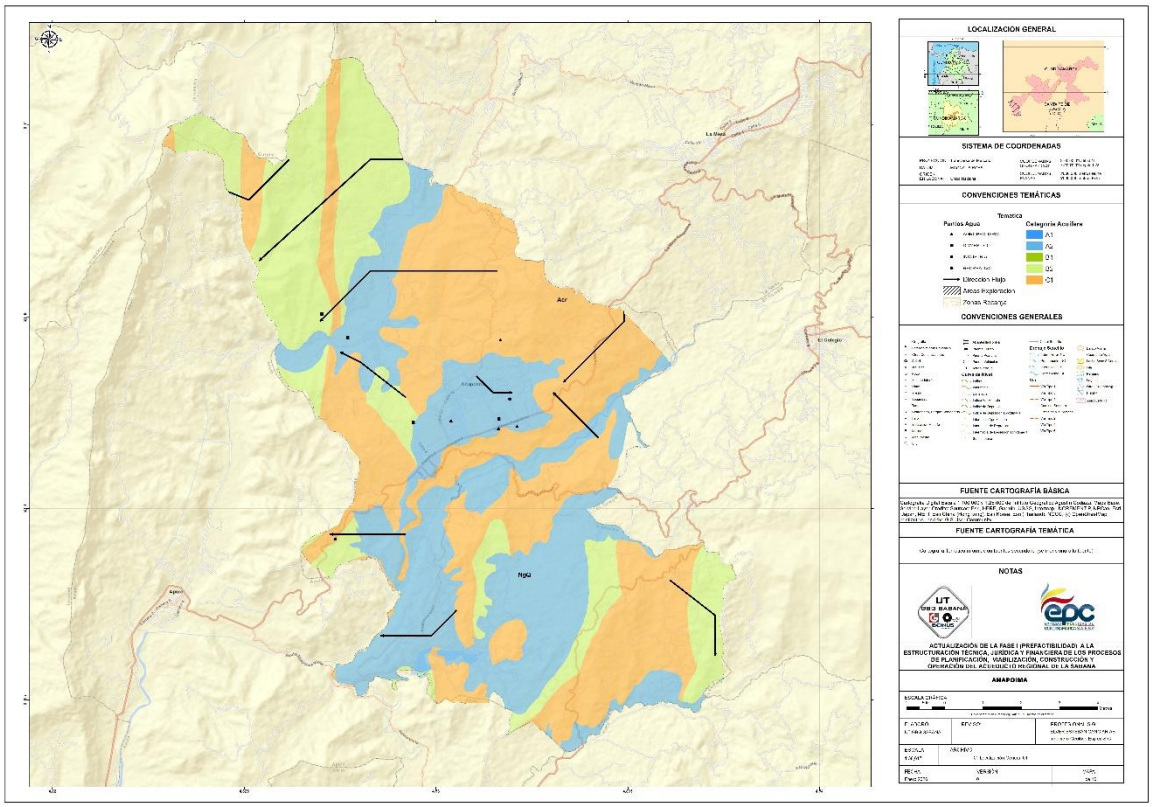


Figura 59. Mapa hidrogeológico del municipio de Anapoima, elaborado a partir del Mapa Geológico de la Sabana de Bogotá (SGC) mediante ampliación cartográfica a escala 1:25.000. El mapa integra la ubicación de pozos existentes, las unidades acuíferas y acuitardos, y los sentidos de flujo subterráneo interpretados. Consultar Anexo 4.

Tabla 41. Parámetros hidráulicos típicos y orientativos por unidad hidrogeológica en el municipio de Anapoima.

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
Depósitos Cuaternarios (Qal, Qta)	$0{,}5 - 5{,}0$*(matriz)* $5{,}0 - 15{,}0$*(gravas Qal)*	$10 - 120$	S_y: $0{,}05 - 0{,}15$	$1{,}0 - 5{,}0$ L/s	Principal fuente somera en valles y abanicos aluviales. Alta transmisividad en Qal.
Formación Trincheras, Miembro Anapoima (Kitra)	$0{,}05 - 1{,}2$	$5 - 40$	S: $10^{-4} - 10^{-3}$	$1{,}0 - 3{,}0$ L/s	Porosidad secundaria por diaclasado en niveles de areniscas cuarzosas.
Formación Socotá (K_{i-ss})	$0{,}01 - 0{,}5$	$1 - 15$	S: $10^{-5} - 10^{-4}$	$0{,}2 - 1{,}5$ L/s	Cementación calcárea limita

Unidad Hidrogeológica	Conductividad Hidráulica K (m/día)	Transmisividad T (m2/dı´a)	Coeficiente S / Porosidad Sy	Rendimiento Típico Pozos (Q)	Comentarios e Interpretación Hidráulica
					la permeabilidad. Caudales modestos en zonas de pliegue.

26.5 PROGRAMA DE EXPLORACIÓN ADICIONAL

El municipio de Anapoima presenta un sistema hidrogeológico condicionado por la interacción entre depósitos cuaternarios delgados, acuíferos fracturados de baja a moderada productividad y una arquitectura estructural compleja dominada por fallas de cabalgamiento y pliegues regionales. Al igual que en La Mesa, la litología predominante, lodolitas, lutitas y limolitas de la Formación Trincheras y unidades marinas compactas de Socotá, Capotes e Hiló, limita la presencia de acuíferos continuos y de alta productividad.

Por ello, el agua subterránea en Anapoima no constituye una alternativa de abastecimiento masivo, sino un recurso local y complementario, aprovechable únicamente en sectores donde coinciden depósitos porosos cuaternarios o fracturamiento tectónico significativo.

En este contexto, el programa de exploración complementaria debe enfocarse en tres frentes: (i) caracterización detallada de los depósitos aluviales y terrazas, que representan los acuíferos más productivos del municipio; (ii) identificación de zonas de fracturamiento asociadas a fallas de cabalgamiento, donde las areniscas intercaladas de la Formación Trincheras pueden presentar permeabilidad secundaria; y (iii) evaluación de nacederos y manantiales como indicadores naturales de zonas permeables.

El primer componente del programa consiste en actualizar y ampliar el inventario de nacederos y manantiales así como pozos existentes, registrando su ubicación precisa, caudal, variación estacional, unidad geológica aflorante y relación con estructuras tectónicas.

En Anapoima, muchos nacederos se localizan en zonas de contacto entre depósitos cuaternarios y unidades cretácicas, o en sectores donde las fallas NE–SW generan fracturamiento y zonas de cizalla. Este inventario permitirá delimitar microzonas de interés hidrogeológico y orientar la exploración hacia sectores con mayor probabilidad de interceptar niveles permeables.

El segundo componente corresponde a levantamientos geológicos detallados, especialmente en las terrazas del río Bogotá y en los flancos del Sinclinal de Anapoima. Estos levantamientos deben incluir mapeo estructural (orientación de fracturas, planos de falla, cambios de buzamiento), verificación de contactos litológicos y caracterización de depósitos cuaternarios. El objetivo es identificar corredores de fracturamiento, zonas de daño tectónico y niveles arenosos discretos dentro de la Formación Trincheras que puedan constituir acuíferos secundarios. Este mapeo es esencial para orientar la exploración geofísica y seleccionar sitios de perforación con mayor probabilidad de éxito.

El tercer componente contempla la ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) en puntos estratégicos. En las terrazas aluviales (Qta), los SEV permitirán determinar el

espesor saturado, diferenciar capas arenosas de matrices arcillosas y ubicar el contacto con las unidades impermeables subyacentes. En zonas de falla, los SEV permitirán identificar contrastes de resistividad asociados a areniscas fracturadas de la Formación Trincheras o niveles permeables de Socotá y Capotes. Estos sondeos son fundamentales para delimitar zonas donde la perforación exploratoria pueda interceptar niveles con caudales modestos pero aprovechables.

El cuarto componente corresponde a la exploración hidrogeológica directa, mediante la perforación de pozos exploratorios de bajo diámetro en sectores previamente identificados como favorables. En las terrazas aluviales, las perforaciones deben enfocarse en espesores entre 8 y 20 metros, donde las arenas y gravas pueden producir caudales moderados y continuos. En zonas de falla, las perforaciones deben orientarse a interceptar niveles arenosos fracturados de la Formación Trincheras, con profundidades objetivo entre 40 y 120 metros. Durante la perforación se deben realizar descripciones litológicas continuas y registros geofísicos de pozo para identificar intervalos permeables y niveles arcillosos sellantes.

En conjunto, este programa de exploración complementaria reconoce que, al igual que en La Mesa, las posibilidades de captación subterránea en Anapoima son limitadas, salvo en las terrazas y depósitos aluviales, que aunque delgados, pueden ofrecer caudales moderados y sostenibles, y en zonas de fracturamiento donde las areniscas intercaladas pueden presentar permeabilidad secundaria. La estrategia propuesta permite identificar estos sectores con precisión y orientar la gestión del recurso hacia soluciones locales y sostenibles.

Puntos Sugeridos para Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) / Exploración:

1. Zona A (Suelo Aluvial): Tramo medio de abanico aluvial sobre Qal para evaluar espesores saturados de gravas.
2. Zona B (Sector Sinclinal): Bloque hundido del sinclinal en el Miembro Anapoima (Kitra) para captar niveles colgados o fracturados en la charnela.

27 BIBLIOGRAFÍA

ACOSTA, J. et al. (1997). Mapa geológico del departamento de Cundinamarca. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Santafé de Bogotá.

ACOSTA, J. y ULLOA, C. (2001a). Geología de la Plancha 227 La Mesa, escala 1:100.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá.

ACOSTA, J. y ULLOA, C. (2001b). Geología de la Plancha 246 Fusagasugá, escala 1:100.000. Memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá.

BERMÚDEZ, O. (2000). Generalización hidrogeológica de Colombia y la formación de las aguas subterráneas en la parte alta de la cuenca del río Bogotá. Tesis de doctorado, San Petersburgo.

BERMÚDEZ, O. y VELANDIA, F. (2002). Modelo hidrogeológico conceptual de la Sabana de Bogotá. Informe técnico final, Proyecto de Cooperación Técnica Internacional OIEA-INGEOMINAS, Aplicación de técnicas isotópicas en los estudios de aguas subterráneas COL/8/019. Grupo de Aguas Subterráneas, INGEOMINAS, Bogotá.

CAMARGO, G. (1995). Elementos estructurales del área de la Sabana de Bogotá y sus alrededores. VI Congreso Colombiano del Petróleo, Bogotá.

CARO, P., PADILLA, J. y VERGARA, H. (1996). Geología de Santafé de Bogotá y alrededores. VII Congreso Colombiano de Geología, Santafé de Bogotá.

CUSTODIO, E. y LLAMAS, M. R. (1996). Hidrología subterránea. Barcelona.

DIEZEMANN, W. (1949). Aguas subterráneas en Bogotá y sus alrededores. Instituto Geológico Nacional, Informe No. 707, Bogotá.

GÓMEZ, H. (1985). Principales rasgos estructurales al suroccidente de la Sabana de Bogotá. Revista CIAF, Vol. 10, Bogotá.

GÓMEZ, H. (1991). La paleomegacizalla transversal de Colombia, base para un nuevo esquema geotectónico. Revista CIAF, Vol. 12 (1), pp. 49-61, Bogotá.

HERNÁNDEZ, H. A. (1990). Estratigrafía del Grupo Guadalupe al occidente de la Sabana de Bogotá. Universidad Nacional de Colombia, Departamento de Geociencias, Bogotá, 158 p.

INGEOMINAS (1975). Mapa geológico del cuadrángulo K-11 Zipaquirá, escala 1:100.000. Elaborado por D. H. McLaughlin y M. Arce. Bogotá.

INGEOMINAS (1995). Estudio hidrogeológico cuantitativo de aguas subterráneas en la Sabana de Bogotá (1989-1993). Informe ejecutivo. Bogotá.

INGEOMINAS (1996). Reactivación de la red de monitoreo, identificación de zonas críticas de bombeo. Informe final. Convenio de Cooperación Técnica INGEOMINAS-Asocoflores, Bogotá.

INGEOMINAS (1998). Geología de la Plancha 227 La Mesa, escala 1:100.000. Memoria explicativa. Bogotá.

INGEOMINAS (2003). Geología de la Plancha 209 Zipaquirá, escala 1:100.000. Bogotá.

JULIVERT, M. (1963). Rasgos tectónicos de la región de la Sabana de Bogotá y los mecanismos de formación estructural. Boletín Geológico, Universidad Industrial de Santander, No. 13-14, Bucaramanga.

KLIMOCHKIN, V. V. (1974). Sobre el papel de la condensación en la formación de los recursos de aguas subterráneas. En: Cuestiones de hidrogeología de la criolitozona, Vol. 1, Yakutsk.

LOBO-GUERRERO, A. (1992). Geología e hidrogeología de Santafé de Bogotá y su Sabana. VII Jornadas Geotécnicas de la Ingeniería de Colombia, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Santafé de Bogotá.

LOBO-GUERRERO, A. (1995). Descenso de niveles de agua subterránea en la Sabana de Bogotá. II Foro sobre la Geotecnia de la Sabana de Bogotá, Sociedad Colombiana de Ingenieros, Santafé de Bogotá.

MOLANO, C. E. y DOMÍNGUEZ, C. J. (1988). Modelo de simulación del acuífero Guadalupe en el sector Madrid, Cundinamarca. III Simposio Colombiano de Hidrogeología.

MONTOYA, D. M. y REYES, G. A. (2005). Geología de la Sabana de Bogotá. Mapa geológico escala 1:100.000 y memoria explicativa. INGEOMINAS, Bogotá.

PADILLA, J. et al. (2004). Mapa geológico para ingeniería de la Sabana de Bogotá, escala 1:25.000. INGEOMINAS, Bogotá.

PADILLA, J. y CALDERÓN, Y. (2004). Cartografía geológica aplicada a la zonificación geomecánica de la Sabana de Bogotá. INGEOMINAS, Bogotá.

RENZONI, G. (1968). Geología del Macizo de Quetame. Geología Colombiana, No. 5, Bogotá.

REYES, I. (1993). La tectónica y su influencia en la recarga de los acuíferos profundos de la Sabana de Bogotá. IV Simposio Colombiano de Hidrogeología, Tomo 1, pp. 31-42, Cartagena.

TROMBE, F. (1988). Las aguas subterráneas. Hyspagrafica S.A., Buenos Aires.

VAN DER HAMMEN, T. (1995). Cronoestratigrafía, bioestratigrafía y correlación del Cuaternario de la Sabana de Bogotá. Análisis Geográficos No. 24, IGAC, Santafé de Bogotá.

VAN DER HAMMEN, T. (1998). Plan ambiental de la cuenca alta del río Bogotá. Santafé de Bogotá, 142 pp.