



HIDROGEOLOGÍA

TABLA DE CONTENIDO

5.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA	1
5.1	MEDIO ABIÓTICO.....	1
5.1.6	HIDROGEOLOGÍA	1
5.1.6.1	Evaluación geológica/geofísica.....	3
5.1.6.2	Evaluación hidráulica.....	106
5.1.6.3	Evaluación Hidrogeoquímica e Isotópica	130
5.1.6.4	Modelo Hidrogeológico Conceptual	323
5.1.6.5	Modelo numérico del flujo de las aguas subterráneas	351

LISTA DE TABLAS

Tabla 5.1.6.1	Estudios base para la caracterización hidrogeológica	1
Tabla 5.1.6.2	Unidades geológicas y sus resistividades.....	6
Tabla 5.1.6.3	Sondeos eléctricos verticales ejecutados en el área de estudio del proyecto	8
Tabla 5.1.6.4	Ubicación de las líneas de geoeléctrica continua	15
Tabla 5.1.6.5	Localización de las líneas de refracción sísmica Inteinsa, 2025	41
Tabla 5.1.6.6	Conductividad hidráulica del lecho de las corrientes superficiales .	53
Tabla 5.1.6.7	Clasificación de los cuerpos de agua superficial por conexión hidráulica con las aguas subterráneas.....	53
Tabla 5.1.6.8	Descripción del grupo de suelo	58
Tabla 5.1.6.9	Áreas aferentes por polígonos de Thiessen	60
Tabla 5.1.6.10	Clasificación de componentes del coeficiente de escurrimiento	63
Tabla 5.1.6.11	Pendientes en la zona de estudio.....	63
Tabla 5.1.6.12	Tipos de coberturas en la zona de estudio	64
Tabla 5.1.6.13	Datos tomados durante el inventario de puntos de agua	67
Tabla 5.1.6.14	Puntos de agua subterránea levantados en campo	68
Tabla 5.1.6.15	Resultados de parámetros fisicoquímicos in situ. pH: potencial hidrógeno; ORP: potencial de óxido – reducción; CE: conductividad eléctrica, Tds: sólidos disueltos totales; S: salinidad; T: Temperatura.....	81
Tabla 5.1.6.16	Resumen de las características de los piezómetros analizados para el sistema de flujo subterráneo	99
Tabla 5.1.6.17	Resumen estadístico de la cota piezométrica.....	101
Tabla 5.1.6.18	Pruebas Slug en piezómetros. GEOSUB y PERFOTEC, 2012.....	107
Tabla 5.1.6.19	Resumen pruebas Slug en las UHG-5 y UHG-7	109
Tabla 5.1.6.20	Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2012 y 2013.....	110
Tabla 5.1.6.21	Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2024 y 2025.....	116
Tabla 5.1.6.22	Resumen de los pozos de bombeo con pruebas a caudal constante, GEOSUB 2012	122
Tabla 5.1.6.23	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-01 y el piezómetro PZA-12-01-1	123
Tabla 5.1.6.24	Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-03 y el piezómetro PZA-12-03-1	124

Tabla 5.1.6.25 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-06 y el piezómetro PZA-12-06-1	125
Tabla 5.1.6.26 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-08 y el piezómetro PZA-12-08-1	126
Tabla 5.1.6.27 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-10	127
Tabla 5.1.6.28 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-11 y el piezómetro PZS-12-11-1	127
Tabla 5.1.6.29 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-14 y el piezómetro PZS-12-14-1	128
Tabla 5.1.6.30. Resumen de parámetros hidráulicos de las unidades de la zona de estudio	129
Tabla 5.1.6.31 Red de monitoreo hidrogeoquímico e isotópico	130
Tabla 5.1.6.32 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1	133
Tabla 5.1.6.33 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2	137
Tabla 5.1.6.34 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 3	141
Tabla 5.1.6.35 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 4	144
Tabla 5.1.6.36 Campañas de monitoreo hidroquímica anteriores a 2025	149
Tabla 5.1.6.37 Tipo de agua identificada para las distintas campañas de monitoreo hidroquímico (2012-2017)	149
Tabla 5.1.6.38 Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025)	156
Tabla 5.1.6.39 Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	159
Tabla 5.1.6.40 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	161
Tabla 5.1.6.41 Error aceptable de balance iónico según la conductividad eléctrica	169
Tabla 5.1.6.42 Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	173
Tabla 5.1.6.43 Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	184
Tabla 5.1.6.44 Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 2	186
Tabla 5.1.6.45 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2	189

Tabla 5.1.6.46 Error de balance iónico según la conductividad eléctrica	197
Tabla 5.1.6.47 Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	202
Tabla 5.1.6.48 Límites de detección de tritio	218
Tabla 5.1.6.49 Puntos de la red de monitoreo isotópico de los años 2020 y 2021	219
Tabla 5.1.6.50 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Enero de 2020	222
Tabla 5.1.6.51 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 1. Enero 2020.....	226
Tabla 5.1.6.52 Resultados de tritio campaña 1 – época seca. Laboratorio Wessling. Enero 2020	228
Tabla 5.1.6.53 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Febrero 2020	228
Tabla 5.1.6.54 Resultados de deuterio y oxígeno 18 de campaña 2. Febrero 2020	231
Tabla 5.1.6.55 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de mayo 2020	232
Tabla 5.1.6.56 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 3. Mayo 2020	236
Tabla 5.1.6.57 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de junio 2020	236
Tabla 5.1.6.58 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 4. Junio 2020.....	240
Tabla 5.1.6.59 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de julio 2020.....	241
Tabla 5.1.6.60 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 5. Julio 2020	244
Tabla 5.1.6.61 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de agosto 2020	245
Tabla 5.1.6.62 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 6. Agosto 2020	248
Tabla 5.1.6.63 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de septiembre-octubre de 2020.....	249
Tabla 5.1.6.64 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 7. Septiembre 2020	251
Tabla 5.1.6.65 Resultados de tritio campaña 7 – época húmeda. Laboratorio Wessling	252
Tabla 5.1.6.66 Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 8 –octubre 2020	253
Tabla 5.1.6.67 Resultados de deuterio y oxígeno 18	255

Tabla 5.1.6.68 Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 9 – noviembre 2020.....	257
Tabla 5.1.6.69 Resultados de análisis de los isótopos deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo. Noviembre 2020.....	259
Tabla 5.1.6.70 Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 10 enero del 2021	260
Tabla 5.1.6.71 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo –campaña 10. Enero 2021	263
Tabla 5.1.6.72 Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 11 febrero del 2021.....	265
Tabla 5.1.6.73 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 11. febrero 2021	267
Tabla 5.1.6.74. Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 12 marzo del 2021	268
Tabla 5.1.6.75 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 12. marzo 2021.....	271
Tabla 5.1.6.76 Resultados de tritio campaña 7 – época transición seca-húmeda. Laboratorio Wessling	272
Tabla 5.1.6.77 Ubicación y cota de los recolectores de agua lluvia.....	273
Tabla 5.1.6.78 Parámetros del ajuste lineal de la línea meteórica local	277
Tabla 5.1.6.79 Estimación del tiempo de decaimiento suponiendo un modelo de flujo pistón y función de entrada de tritio constante	285
Tabla 5.1.6.80 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 1 febrero 2025.....	288
Tabla 5.1.6.81 Resultados de tritio campaña 1 febrero de 2025	290
Tabla 5.1.6.82 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 2 marzo 2025	292
Tabla 5.1.6.83 Resultados de tritio campaña 2 Marzo de 2025.....	294
Tabla 5.1.6.84 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 3 abril (2025).....	296
Tabla 5.1.6.85 Resultados de tritio campaña 3 abril de 2025.....	298
Tabla 5.1.6.86 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 4 abril (2025).....	300
Tabla 5.1.6.87 Resultados de tritio campaña 4. mayo de 2025.....	302
Tabla 5.1.6.88 Criterios de Clasificación DAR Aplicados	312
Tabla 5.1.6.89 Clasificación DAR - Criterios Aplicados	314
Tabla 5.1.6.90 Subunidades que conforman la Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1)	324
Tabla 5.1.6.91 Resumen Unidades Hidrogeológicas en asociación con las unidades geológicas	329

Tabla 5.1.6.92 Valoración de la vulnerabilidad con el método GOD.....	335
Tabla 5.1.6.93 Clasificación parámetros GOD	336
Tabla 5.1.6.94 Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – GOD	337
Tabla 5.1.6.95 Valoración de parámetros para el método DRASTIC	338
Tabla 5.1.6.96 Factores de ponderación para el método DRASTIC.....	339
Tabla 5.1.6.97 Grados de vulnerabilidad general del método DRASTIC	340
Tabla 5.1.6.98 Pesos asignados a las diferentes variables evaluadas. Método DRASTIC.....	340
Tabla 5.1.6.99 Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – DRASTIC	347
Tabla 5.1.6.100. Asignación de las conductividades hidráulicas iniciales para la calibración del modelo numérico.....	375
Tabla 5.1.6.101. Objetivos de calibración estacionaria incorporados al modelo numérico.....	379
Tabla 5.1.6.102 Parámetros del modelo numérico de flujo en escenario inicial y final de calibración	381
Tabla 5.1.6.103 Síntesis de las métricas estadísticas de evaluación de ajuste	382
Tabla 5.1.6.104 Resultado del balance hídrico en estado estacionario en el modelo calibrado	384
Tabla 5.1.6.105 Variaciones temporales mensuales del nivel piezométrico registrados en los puntos de monitoreo	386
Tabla 5.1.6.106 Asignación de los parámetros de almacenamiento a las unidades hidrogeológicas dentro del modelo numérico	387
Tabla 5.1.6.107 Síntesis del balance hídrico en el dominio del modelo en cada periodo de estrés	392
Tabla 5.1.6.108 Parametrización de las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo	398
Tabla 5.1.6.109 Caudales proyectados en las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo	409
Tabla 5.1.6.110 Variables y parámetros del análisis de afectación en la quebrada Guacas	420
Tabla 5.1.6.111 Síntesis de la variación de parámetros y los resultados de la sensibilidad de las variables frente a dichos parámetros	422

LISTA DE FIGURAS

Figura 5.1.6.1 Ubicación de los sondeos eléctricos verticales.....	7
Figura 5.1.6.2 Perfil geológico – geoelectrico A-A'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle del río Nus.....	11
Figura 5.1.6.3 Perfil geológico – geoelectrico B-B'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle de la quebrada Guacas	12
Figura 5.1.6.4 Ubicación en planta de los perfiles geoelectricos verticales	17
Figura 5.1.6.5 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-1 (A-A').....	19
Figura 5.1.6.6 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-2 (B-B').....	21
Figura 5.1.6.7 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-3 (C-C').....	22
Figura 5.1.6.8 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-4 (D-D').....	24
Figura 5.1.6.9 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-5 (E-E').....	25
Figura 5.1.6.10 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-6 (F-F').....	26
Figura 5.1.6.11 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-7 (G-G').....	28
Figura 5.1.6.12 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-8 (H-H').....	29
Figura 5.1.6.13 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-9 (I-I')	30
Figura 5.1.6.14 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-10 (J-J').....	31

Figura 5.1.6.15 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-11 (K-K')	33
Figura 5.1.6.16 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-12 (L-L')	34
Figura 5.1.6.17 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-13 (M-M')	36
Figura 5.1.6.18 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-14 (N-N')	37
Figura 5.1.6.19 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-15 (O-O')	38
Figura 5.1.6.20 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-16 (P-P')	40
Figura 5.1.6.21 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-17 (Q-Q')	41
Figura 5.1.6.22 Localización en planta de los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo en el área de interés del proyecto	42
Figura 5.1.6.23 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-1	43
Figura 5.1.6.24 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-1	44
Figura 5.1.6.25 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-2	45
Figura 5.1.6.26 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-2	46
Figura 5.1.6.27 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-3	47
Figura 5.1.6.28 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-3	48
Figura 5.1.6.29 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-4	49
Figura 5.1.6.30 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-4	50
Figura 5.1.6.31 Bloque diagrama de unidades geológicas	51

Figura 5.1.6.32 Mapa de grupos hidrológicos en el área de influencia	58
Figura 5.1.6.33 Mapa de coberturas de suelo en el área de estudio	59
Figura 5.1.6.34 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Balance Hídrico para el área de influencia.....	61
Figura 5.1.6.35 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Kennessy para el área de influencia	65
Figura 5.1.6.36 Zonas de recarga	66
Figura 5.1.6.37 Inventario de puntos de agua realizado enero y febrero del 2025 ..	77
Figura 5.1.6.38 Unidad geológica superficial donde afloran los manantiales	80
Figura 5.1.6.39 Valores de sólidos totales disueltos para los puntos inventariados	86
Figura 5.1.6.40 Distribución espacial de los valores de Tds de los puntos inventariados	87
Figura 5.1.6.41 Valores de conductividad eléctrica para los puntos inventariados ..	88
Figura 5.1.6.42 Distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica de los puntos inventariados.....	89
Figura 5.1.6.43 Valores de pH para los puntos inventariados	90
Figura 5.1.6.44 Distribución espacial de los valores de pH de los puntos inventariados	91
Figura 5.1.6.45 Valores de temperatura para los puntos inventariados.....	92
Figura 5.1.6.46 Distribución espacial de los valores de temperatura de los puntos inventariados	93
Figura 5.1.6.47 Valores de óxido - reducción para los puntos inventariados	94
Figura 5.1.6.48 Distribución espacial de los valores de óxido - reducción de los puntos inventariados.....	95
Figura 5.1.6.49 Valores de salinidad para los puntos inventariados.....	96
Figura 5.1.6.50 Distribución espacial de los valores de salinidad de los puntos inventariados	97
Figura 5.1.6.51 Ubicación de piezómetros para análisis de flujo subterráneo	98
Figura 5.1.6.52 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-3 – Depósitos aluviales	102
Figura 5.1.6.53 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 12-12, PZ4 y PZS12-14	103
Figura 5.1.6.54 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 13-17, DH-TM-100 y PZS-12-05	103

Figura 5.1.6.55 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros PZR 13-07, DH-FS-309 y BH-5M-08.....	104
Figura 5.1.6.56 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros BH-5M-03, PZR 13-09 y PZR 13-05	105
Figura 5.1.6.57 Mapa de isopiezas	106
Figura 5.1.6.58 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Slug – GEOSUB y PERFOTEC 2012.....	108
Figura 5.1.6.59 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2012 y 2013.....	115
Figura 5.1.6.60 Distribución espacial de las perforaciones en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2024 - 2025	121
Figura 5.1.6.61 Distribución espacial de los puntos donde se llevaron a cabo las pruebas de bombeo – GEOSUB 2012	123
Figura 5.1.6.62 Puntos de la red de Monitoreo	132
Figura 5.1.6.63 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1	135
Figura 5.1.6.64 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1.....	136
Figura 5.1.6.65 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1	137
Figura 5.1.6.66 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2	139
Figura 5.1.6.67 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 2.....	139
Figura 5.1.6.68 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2	140
Figura 5.1.6.69 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3	143
Figura 5.1.6.70 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3. pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3.....	143
Figura 5.1.6.71 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3	144
Figura 5.1.6.72 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4	146
Figura 5.1.6.73 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 4.....	147
Figura 5.1.6.74 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4	148
Figura 5.1.6.75 Diagrama de Piper. Campaña 1 (marzo 2012)	153
Figura 5.1.6.76. Diagrama de Piper. Campaña 2 (octubre 2012)	153
Figura 5.1.6.77 Diagrama de Piper. Campaña 4 (marzo 2016) y campaña 5 (noviembre 2016).....	154

Figura 5.1.6.78 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	162
Figura 5.1.6.79 Distribución espacial de la temperatura en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025).....	163
Figura 5.1.6.80 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025)....	164
Figura 5.1.6.81 Distribución espacial del pH en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	164
Figura 5.1.6.82 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025).....	165
Figura 5.1.6.83 Distribución espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	166
Figura 5.1.6.84 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	167
Figura 5.1.6.85 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025).....	168
Figura 5.1.6.86 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)	169
Figura 5.1.6.87 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial Campaña 1 (2025)	170
Figura 5.1.6.88 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 1. Campaña 1 (2025).....	171
Figura 5.1.6.89 Diagramas de Stiff para los piezómetros. Campaña 1 (2025)	172
Figura 5.1.6.90 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 1. (2025)	174
Figura 5.1.6.91 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 1 (2025)	175
Figura 5.1.6.92 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 1. (2025)	175
Figura 5.1.6.93 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 1 febrero 2025	176
Figura 5.1.6.94 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 1 febrero 2025	177
Figura 5.1.6.95 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 1 febrero 2025	178
Figura 5.1.6.96 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 1 febrero 2025.....	179
Figura 5.1.6.97 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 1 febrero 2025.....	180
Figura 5.1.6.98 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 1 febrero 2025.....	181
Figura 5.1.6.99 Isoconcentraciones de pH - Campaña 1 febrero 2025	182
Figura 5.1.6.100 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)	191

Figura 5.1.6.101 Distribución espacial de la temperatura en los puntos de monitoreo Campaña 2	191
Figura 5.1.6.102 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)...	192
Figura 5.1.6.103 Distribución espacial del pH en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)	192
Figura 5.1.6.104 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025).....	193
Figura 5.1.6.105 Distribución espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2015)	194
Figura 5.1.6.106 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)	195
Figura 5.1.6.107 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025).....	196
Figura 5.1.6.108 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)	197
Figura 5.1.6.109 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)	198
Figura 5.1.6.110 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025)	199
Figura 5.1.6.111 Diagramas de Stiff para los piezómetros Campaña 2 (2025).....	201
Figura 5.1.6.112 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)	203
Figura 5.1.6.113 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025)	204
Figura 5.1.6.114 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 2 (2025)	204
Figura 5.1.6.115 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CA)	205
Figura 5.1.6.116 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CH)	206
Figura 5.1.6.117 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-FE).....	207
Figura 5.1.6.118 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-K).....	208
Figura 5.1.6.119 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-MG)	209
Figura 5.1.6.120 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-NA)	210

Figura 5.1.6.121 Isoconcentraciones de pH - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-PH)	211
Figura 5.1.6.122 Línea Meteórica Mundial	215
Figura 5.1.6.123 Desviaciones de la línea meteórica	216
Figura 5.1.6.124 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia	217
Figura 5.1.6.125 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos ...	218
Figura 5.1.6.126 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020	223
Figura 5.1.6.127 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020	224
Figura 5.1.6.128 Conductividad eléctrica vs profundidad en pozos y piezómetros	225
Figura 5.1.6.129 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 1. Enero 2020.....	225
Figura 5.1.6.130 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia	227
Figura 5.1.6.131 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos ...	227
Figura 5.1.6.132 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020	230
Figura 5.1.6.133 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020	230
Figura 5.1.6.134 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 2. Febrero 2020.....	231
Figura 5.1.6.135 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Mayo 2020..	234
Figura 5.1.6.136 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Mayo 2020.....	235
Figura 5.1.6.137 Línea Meteórica Mundial y composición isotópica de los puntos de muestreo campaña 3. Mayo 2020.....	235
Figura 5.1.6.138 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020	239
Figura 5.1.6.139 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020	239
Figura 5.1.6.140 Composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo y línea meteórica mundial campaña 4. Junio 2020.....	240
Figura 5.1.6.141 pH de los puntos de la red de monitoreo. Julio 2020.....	243
Figura 5.1.6.142 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020.....	243

Figura 5.1.6.143 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020	244
Figura 5.1.6.144 pH de los puntos de la red de monitoreo Campaña 6.....	246
Figura 5.1.6.145 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6.....	247
Figura 5.1.6.146 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6. Agosto 2020.....	248
Figura 5.1.6.147 pH de los puntos de la red de monitoreo. Septiembre 2020	250
Figura 5.1.6.148 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7 Septiembre 2020	250
Figura 5.1.6.149 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7. Septiembre 2020.....	251
Figura 5.1.6.150 pH de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020.....	254
Figura 5.1.6.151 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020	255
Figura 5.1.6.152 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 8. Octubre 2020.....	256
Figura 5.1.6.153 pH de los puntos de la red de monitoreo campaña 9. Noviembre 2020	258
Figura 5.1.6.154 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 9 Noviembre 2020	258
Figura 5.1.6.155 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 9. Noviembre 2020	260
Figura 5.1.6.156 pH de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021	262
Figura 5.1.6.157 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021	262
Figura 5.1.6.158 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 10. Enero 2021	264
Figura 5.1.6.159 pH de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021.	266
Figura 5.1.6.160 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021	266
Figura 5.1.6.161 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 11. Febrero 2021	268
Figura 5.1.6.162 pH de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021.....	270
Figura 5.1.6.163 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021.....	270
Figura 5.1.6.164 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 12. Marzo 2021.....	272

Figura 5.1.6.165 Variación temporal del volumen registrado en los recolectores de agua lluvia	273
Figura 5.1.6.166 Precipitación media multianual para la zona de estudio	274
Figura 5.1.6.167 Variación temporal de la concentración de deuterio en el agua lluvia	274
Figura 5.1.6.168 Evolución temporal del exceso de deuterio en el agua lluvia.....	275
Figura 5.1.6.169 Línea meteórica mundial, local y resultados de isótopos ambientales en el agua lluvia.....	276
Figura 5.1.6.170 Línea meteórica mundial y composición isotópica del agua superficial	277
Figura 5.1.6.171 Evolución temporal del oxígeno 18 en las aguas superficiales y lluvia	278
Figura 5.1.6.172 Composición isotópica del agua subterránea, LMM y marca ponderada del agua lluvia.....	279
Figura 5.1.6.173 Marca ponderada del agua lluvia, marca promedio del agua subterránea y ciclo isotópica del agua lluvia	280
Figura 5.1.6.174 Deuterio vs altura en el agua lluvia	281
Figura 5.1.6.175 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia.....	281
Figura 5.1.6.176 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3.....	281
Figura 5.1.6.177 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3.....	282
Figura 5.1.6.178 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de oxígeno 18 en la precipitación	283
Figura 5.1.6.179 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de deuterio en la precipitación	283
Figura 5.1.6.180 Resultados de tritio	284
Figura 5.1.6.181 Ubicación espacial de los puntos que conforman la red de monitoreo.....	287
Figura 5.1.6.182 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 1 - febrero de 2025.....	288
Figura 5.1.6.183 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 2 - marzo de 2025	292
Figura 5.1.6.184 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 3 - abril de 2025	296
Figura 5.1.6.185 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio. Campaña 4 - abril de 2025	300
Figura 5.1.6.186 Concentración de tritio en el agua lluvia en campañas de 2025 .	304

Figura 5.1.6.187 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en piezómetros	306
Figura 5.1.6.188 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en piezómetros	307
Figura 5.1.6.189 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en piezómetros	308
Figura 5.1.6.190 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en manantiales	309
Figura 5.1.6.191 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en manantiales	310
Figura 5.1.6.192 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en manantiales	311
Figura 5.1.6.193 Azufre Total vs Azufre como Sulfuros	313
Figura 5.1.6.194 pH y Sulfatos en Pruebas Cinéticas (pHase 2015).....	315
Figura 5.1.6.195 pH y Sulfatos en Pruebas de Barriles	316
Figura 5.1.6.196 Comparación de Clasificación DAR – Porcentajes Globales (n= 585 muestras).....	317
Figura 5.1.6.197 Comparación de Clasificación DAR - Por Litologías.....	317
Figura 5.1.6.198 Comparación de Clasificación DAR - Por Litologías y clasificación ANLA 2016	317
Figura 5.1.6.199 pH y Sulfatos en Celdas de Humedad - Relaves.....	319
Figura 5.1.6.200 pH y Sulfatos en Barriles de Campo - Relaves.....	320
Figura 5.1.6.201 Unidades hidrogeológicas de estudios previos y su correlación con las unidades definidas en este estudio.	323
Figura 5.1.6.202 Unidades hidrogeológicas	330
Figura 5.1.6.203 Sistema de flujos de agua subterránea	331
Figura 5.1.6.204 Zonas de recarga y descarga.....	332
Figura 5.1.6.205 Direcciones de flujo.....	333
Figura 5.1.6.206 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca.	335
Figura 5.1.6.207 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Metodología GOD.....	337
Figura 5.1.6.208 Parámetro nivel freático (Dr). Método DRASTIC	342
Figura 5.1.6.209 Parámetro Recarga (Rr). Método DRASTIC.....	342
Figura 5.1.6.210 Parámetro medio acuífero (Ar). Método DRASTIC.....	343
Figura 5.1.6.211 Parámetro tipo de suelo (Sr). Método DRASTIC	343

Figura 5.1.6.212 Parámetro Topografía (Tr). Método DRASTIC	344
Figura 5.1.6.213 Parámetro naturaleza de la zona no saturada (Ir). Método DRASTIC.....	344
Figura 5.1.6.214 Parámetro conductividad hidráulica (Cr). Método DRASTIC	345
Figura 5.1.6.215 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Método DRASTIC.....	347
Figura 5.1.6.216 Unidades hidrogeológicas del área de estudio previas a la construcción del proyecto	349
Figura 5.1.6.217 Unidades hidrogeológicas del área de estudio con zonas de depósitos proyectados	350
Figura 5.1.6.218 Perfil esquemático del flujo subterráneo en la zona de estudio ..	350
Figura 5.1.6.219 Bloque diagrama esquemático de las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio.....	351
Figura 5.1.6.220 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas.....	353
Figura 5.1.6.221 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas.....	354
Figura 5.1.6.222 a) Cuadrícula de diferencias finitas en 2D ilustrando la notación de nodos, b) malla de elementos finitos en 2D ilustrando la notación de nodos y elementos	356
Figura 5.1.6.223 a) Vista en planta de una porción de elementos alrededor del nodo L en una malla de elementos finitos. (b) Vista tridimensional de la función base nodal N (x,y).....	357
Figura 5.1.6.224 Área de influencia para el modelo hidrogeológico conceptual y numérico propuesto	359
Figura 5.1.6.225 Zona activa de modelamiento incorporada en FEFLOW que define la malla principal (supermesh) de elementos finitos para el modelo.....	360
Figura 5.1.6.226 Zonas de refinamiento geométrico del enmallado propuesto en FEFLOW (puntos verdes), representado mayor nivel de detalle alrededor y dentro de la huella minera proyectada y los drenajes principales de la zona de estudio ..	361
Figura 5.1.6.227 Geometría de la malla de elementos finitos construida para el modelo numérico con sus respectivas zonas de refinamiento.....	362
Figura 5.1.6.228 Tamaño de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando la implementación multiescalar, pasando de tamaños regionales (345 m) hasta tamaños locales (15 m).....	363
Figura 5.1.6.229 Ángulos interiores máximos de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando optimización de la malla con ángulos alrededor de 60 y 80°	364
Figura 5.1.6.230 Elevación (top) de cada una de las capas y cortes (slices) que conforman la geometría vertical del modelo.....	366

Figura 5.1.6.231 Espesores de las unidades hidrogeológicas incorporados dentro del modelo numérico de flujo y que definen su configuración geométrica vertical	367
Figura 5.1.6.232 Vistas 3D de la configuración geométrica del modelo numérico, representando las elevaciones (panel superior izquierdo) y las elevaciones con la configuración de la malla 3D de elementos finitos (panel superior derecho y panel inferior)	368
Figura 5.1.6.233 Corte transversal del borde Este del dominio del modelo donde se evidencia la configuración de las capas y espesores de las unidades hidrogeológicas de interés	369
Figura 5.1.6.234 Representación de los nodos configurados con la condición de frontera tipo Transfer Flow (TFBC) en el modelo	371
Figura 5.1.6.235 Serie diaria de variaciones del almacenamiento hídrico subterráneo (GWS) para la zona de estudio en promedio espacial derivados de GRACE y GLDAS – CLSM.....	373
Figura 5.1.6.236 Comparación del comportamiento diario, mensual y anual de GWS y la precipitación en la zona de estudio.....	374
Figura 5.1.6.237 Ciclo promedio anual de GWS y la precipitación para el periodo 2003 – 2024 en la zona de estudio	375
Figura 5.1.6.238 Conductividad hidráulica horizontal asignada a la capa 1 – corte 1 en el modelo numérico, representando la distribución espacial de las UHG	376
Figura 5.1.6.239 Conductividad hidráulica horizontal asignada en el modelo numérico en todas las capas (vista 3D), representando la distribución la geometría espacial de las UHG	377
Figura 5.1.6.240 Tasa de recarga potencial (en m/d) incorporada al modelo numérico para fines de calibración estacionaria.....	378
Figura 5.1.6.241. Localización de los piezómetros que constituyen los objetivos de calibración	381
Figura 5.1.6.242 Diagrama de dispersión entre los niveles piezométricos (hydraulic head) observados y simulados a partir del modelo numérico de flujo calibrado en estado estacionario.....	383
Figura 5.1.6.243 Piezometría simulada en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)	384
Figura 5.1.6.244 Isopiezas simuladas en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)	385
Figura 5.1.6.245 Perfil piezométrico en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)	385
Figura 5.1.6.246 Variaciones temporales de nivel piezométrico observadas en los puntos de monitoreo	386

Figura 5.1.6.247 Recarga asignada en m/d para el trimestre Enero – Marzo (superior) y Abril – Junio (inferior)	389
Figura 5.1.6.248 Recarga asignada en m/d para el trimestre Julio – Septiembre (superior) y Octubre – Diciembre (inferior)	390
Figura 5.1.6.249 Piezometría simulada en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)	390
Figura 5.1.6.250 Perfil piezométrico BB' en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)	391
Figura 5.1.6.251 Variaciones de nivel piezométrico en los puntos de calibración simuladas para un año normal en el modelo numérico de flujo	391
Figura 5.1.6.252 Diagrama de dispersión entre los niveles piezométricos (hydraulic head) observados y simulados a partir del modelo numérico de flujo ajustado en estado transitorio	392
Figura 5.1.6.253 Configuración topográfica del Pit Gramalote entre 2029 y 2038: perfiles en dirección Sur – Norte (superior) y Oeste – Este (inferior).....	395
Figura 5.1.6.254 Configuración topográfica de los depósitos WRF (línea roja) y Stockpile (línea verde) San Antonio para el año 2038. Perfil en dirección SW – NE.	396
Figura 5.1.6.255 Configuración topográfica del depósito WRF San Antonio (línea roja) para el año 2038. perfil en dirección NW -SE	396
Figura 5.1.6.256 Configuración topográfica del depósito Stockpile San Antonio para el año 2038. perfil en dirección NW – SE.....	397
Figura 5.1.6.257 Configuración topográfica del depósito de relaves y el contrafuerte de arenas (presa o pila) para los años iniciales (línea verde) y para la condición final del proyecto (línea roja). Perfiles en dirección W-E (superior) y S-N (inferior).....	397
Figura 5.1.6.258 Ubicación en planta de los nodos (Transfer Flow – círculos verdes) que representan las paredes del Pit en la capa 2 (superior) y las que representan el fondo del Pit en la capa 5 (inferior) para el año 2029, acompañado del túnel de decantación (Transfer Flow) en la capa 5 (inferior)	399
Figura 5.1.6.259 Ubicación en planta de los nodos (Transfer Flow – círculos verdes) que representan las paredes del Pit en la capa 2 (superior) y las que representan el fondo del Pit en la capa 8 (inferior) para el año 2038.....	400
Figura 5.1.6.260 Perfil AA' evidenciando la incorporación del Pit mediante cambios en la conductancia para el año 2029 (superior) y 2038 (intermedia) y perfil del eje del túnel de decantación (inferior).....	401
Figura 5.1.6.261 Ubicación en planta de los nodos (Hydraulic Head – círculos morados) que representan las superficies terminadas de los depósitos (superior) y los cambios en la conductividad hidráulica (inferior) para el año 2029.....	402

Figura 5.1.6.262 Ubicación en planta de los nodos (Hydraulic Head – círculos morados) que representan las superficies terminadas de los depósitos (superior) y los cambios en la conductividad hidráulica (inferior) para el año 2038.....	403
Figura 5.1.6.263 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2029 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	404
Figura 5.1.6.264 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2030 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	405
Figura 5.1.6.265 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2031 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	405
Figura 5.1.6.266 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2032 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	406
Figura 5.1.6.267 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2033 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	406
Figura 5.1.6.268 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2034 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	407
Figura 5.1.6.269 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2035 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	407
Figura 5.1.6.270 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2036 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	408
Figura 5.1.6.271 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2037 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	408
Figura 5.1.6.272 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2038 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)	409
Figura 5.1.6.273 Caudales de descarga hacia el Pit Gramalote durante los años de operación de la obra de acuerdo con el avance minero del PTO	410
Figura 5.1.6.274 Caudales de descarga hacia el túnel de decantación durante los años de operación del proyecto	410
Figura 5.1.6.275 Caudales potenciales de filtración desde las obras de almacenamiento de material en San Antonio y El Balsal de acuerdo con los avances proyectados del PTO	411
Figura 5.1.6.276 Caudales potenciales de filtración desde las obras de la zona de manejo de colas de acuerdo con los reportes de los planos constructivos y el PTO	412

Figura 5.1.6.277 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)	414
Figura 5.1.6.278 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 5 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)	414
Figura 5.1.6.279 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 6 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)	415
Figura 5.1.6.280 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)	415
Figura 5.1.6.281 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 5 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y la no propagación de los efectos de las obras de superficie a las capas más profundas	416
Figura 5.1.6.282 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 8 del modelo numérico (por debajo del fondo del Pit) – evidencia de cambios piezométricos locales alrededor del Pit.....	416
Figura 5.1.6.283 Descensos estimados en las capas someras (capa 1) del modelo en relación con la localización del Pit para el año 2038	417
Figura 5.1.6.284 Comparación de los niveles piezométricos del modelo transitorio en un año normal (sin influencia del proyecto) y los niveles esperados para el año 2038	418
Figura 5.1.6.285 Manantiales potencialmente afectados por el abatimiento de aguas subterráneas.....	420

LISTA DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 5.1.6.1 Aljibe localizado en el campamento La Mayoría.....	78
Fotografía 5.1.6.2 Piezómetro PZS 12 12 en el sector del Topacio.....	79
Fotografía 5.1.6.3 Manantial M100 localizado en la vereda Guacas abajo.....	79

MODIFICACIÓN DE LICENCIA AMBIENTAL DEL PROYECTO DE MINERÍA DE ORO A CIELO ABIERTO GRAMALOTE.

5 CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

5.1 MEDIO ABIÓTICO

5.1.6 HIDROGEOLOGÍA

Este numeral presenta las principales características hidrogeológicas de los terrenos pertenecientes al proyecto aurífero a cielo abierto Gramalote, teniendo en cuenta los términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera (ANLA, 2016). Dentro de este informe, se presenta la caracterización hidrogeológica para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote con el fin de describir la dinámica del régimen de aguas subterráneas en las cercanías del proyecto y su interacción con las aguas superficiales, partiendo de la premisa de que un modelo hidrogeológico conceptual (MHC), integra información geológica, hidrológica, hidrodinámica, hidráulica, hidrogeoquímica e isotópica para ilustrar los procesos y flujos que ocurren en las dimensiones espaciales de su dominio.

El estudio de hidrogeología consta de cuatro componentes que alimentan el MHC y presentan los aspectos teóricos fundamentales asociados al estudio de las aguas subterráneas. El primer componente está conformado por la evaluación geológica-geofísica, en donde a partir de métodos directos e indirectos de exploración se caracteriza la geología de superficie y subsuperficie. El segundo componente es la evaluación hidrológica, este se centra en los procesos hidrológicos superficiales, como las precipitaciones, escurrimientos y la evaporación, con la finalidad de estimar la recarga del sistema acuífero (infiltración) por precipitación producto de estos fenómenos. El tercer componente es la evaluación hidráulica, donde se determinan los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas. El cuarto componente es la evaluación hidrogeoquímica e isotópica, la cual permite reconocer facies hidrogeoquímicas, validar sistemas de flujos, precisar edad y origen de las aguas subterráneas y reconocer afectaciones por actividad antrópica. A partir del MHC se construye el modelo hidrogeológico numérico (MHN), que permite simular las condiciones y comportamiento del sistema de aguas en la zona de interés, teniendo en cuenta la configuración actual del proyecto.

En la Tabla 5.1.6.1 se presentan los estudios más relevantes con información hidrogeológica usados en la actualización del actual componente para el área de influencia del medio abiótico para la Modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote.

Tabla 5.1.6.1 Estudios base para la caracterización hidrogeológica

Nombre del informe	Autor	Año	Información usada
Estudio hidrogeológico para la línea base del Proyecto Gramalote en el municipio de San Roque en el departamento de Antioquia	Hidrogeocol	2012	Información sobre ensayos geofísicos (perfiles geoelectricos)
Reporte Técnico – Evaluación hidrogeológica – documento técnico – feed rev 0	Golder Associates Perú S.A	2017	Información de localización y diseño de los piezómetros
Respuesta de requerimientos de información adicional Modificación de licencia ambiental - I-0010208-GA Resp_Autos_R00	Integral S.A	2018	Información sobre ensayos geofísicos (Sondeos eléctricos verticales – SEV y tomografías eléctricas)
Modificación de Licencia Ambiental - I-0010208-GA-ML-R00	Integral S.A.	2018	Obras claves del proyecto
Hydrogeological Conceptual Model Gramalote Feasibility Stage	Golder Associates Perú S.A	2020	Datos de permeabilidad K
Memorando técnico: requerimiento licencia - potencial de generación de drenaje ácido, proyecto Gramalote, Colombia.	Golder Associates Colombia S.A.S.	2020	Información de drenaje minero ácido
Muestreo Isotópico durante un año hidrológico e inventario de puntos de agua subterránea de acuerdo con los términos de referencia de la ANLA para explotación minera, en el proyecto Gramalote ubicado en el municipio de San Roque, Departamento de Antioquia. Informe Final	SHI SAS	2021	Isotopos de 2021
Diseño de la red hidrogeológica del proyecto Gramalote	SHI SAS	2022	Puntos de monitoreo de años anteriores
Actualización del modelo hidrogeológico conceptual y numérico para el proyecto minero Gramalote	SHI SAS	2025	Modelo numérico actualizado
Reporte del diagnóstico y monitoreo de niveles piezométricos, Monitoreo de isótopos ambientales y muestreo hidroquímico para el Proyecto Minero Gramalote Colombia	SHI SAS	2025	Piezómetros activos y mediciones de niveles

Nombre del informe	Autor	Año	Información usada
Ensayos geofísicos de refracción sísmica y masw zona la planta	Inteinsa	2025	Información sobre ensayos geofísicos para la zona de la planta

Fuente: Integral S.A. 2025

5.1.6.1 Evaluación geológica/geofísica

5.1.6.1.1 Geología

El área de influencia abiótica para la modificación de Licencia Ambiental del Proyecto de Minería de Oro a Cielo Abierto Gramalote está localizada en el extremo norte de la cordillera Central al nordeste del departamento de Antioquia. La unidad geológica principal en la zona del proyecto minero la constituye el Batolito Antioqueño, cuerpo intrusivo que conforma el núcleo de la cordillera Central de los Andes colombianos. En el capítulo 5.1.1 Geología se presenta toda la geología del proyecto, incluyendo la figura de la geología regional del proyecto, a continuación, se presenta la información más relevante.

El Batolito Antioqueño (cuarzodiorita (Kqd) y gabros (Kg)) tuvo origen durante el periodo Cretácico, donde ocurrieron eventos de intensa actividad magmática que dieron origen a cuerpos plutónicos de gran importancia. El Batolito Antioqueño presenta variadas facies composicionales con predominio de rocas tipo cuarzodioritas, que varían localmente desde gabros a granodioritas (González I, 2001) y que cubren gran parte del departamento de Antioquia.

La mineralización en este cuerpo se asocia a las últimas fases de cristalización con un alto contenido de sustancias volátiles que se apoyan en la presencia de aplitas y pegmatitas (Gramalote Colombia Limited, 2018), las cuales ocurren en varios episodios de intrusión a lo largo de las fracturas de la roca caja, la cual corresponde al mismo batolito previamente cristalizado, resultando en una red de venas rellenas de feldespatos, cuarzo y pirita, calcopirita, molibdenita y otros minerales accesorios (Golder Associates Perú S.A., 2020). El proceso de mineralización aurífera se agrupa en diferentes alteraciones como la potásica y la cuarzo-sericitica que dan cuenta de procesos hidrotermales (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Sobre el Batolito Antioqueño se ha desarrollado un perfil de meteorización con espesores importantes de suelos residuales y saprolito, principalmente en zonas de pendientes bajas a moderadas, cimas amplias, quiebres de pendiente, colinas y fondos de los valles, llegando a presentar entre 5,0 y 40,0 m de espesor.

El suelo residual presenta una textura limo arcillosa a arcillosa de color amarillo a rojizo, cubre gran parte del área del proyecto y presenta espesores entre 1,0 a 10,0 m. Por su parte, el saprolito presenta variaciones texturales entre arenoso y limo arenoso de acuerdo con la proporción de cuarzo y minerales máficos en la roca parental. Este horizonte presenta un espesor entre 5,0 y 40,0 m muestra rasgos heredados como planos de diaclasas y bloques con meteorización esferoidal. La zona de transición entre el saprolito y el macizo rocoso (IC-IIA) se caracteriza por presentar bloques frescos a moderadamente meteorizados en una matriz limosa a arenosa con una proporción de suelo-roca de 60:40 y un espesor de aproximadamente 10,0 m. Los afloramientos de roca con menor grado de meteorización son escasos; en los sitios donde se presenta como en el sector de La Cascada y algunos cortes en taludes viales, suele ser característica la ocurrencia de

meteorización esferoidal como núcleos esféricos de roca que se superponen entre ellos con presencia de suelo saprolitizado entre ellos (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Sobre el Batolito Antioqueño se encuentran varios depósitos asociados a dinámicas recientes. Los depósitos aluviales (Qal), los cuales son el resultado de la dinámica fluvial de zona que favorece la acumulación de material aluvial en los cauces activos y llanuras de inundación, se asocian principalmente al río Nus y drenajes secundarios que atraviesan la zona como las quebradas San Antonio, Guacas, Palestina, La Colorada, La Bella y La Linda. (Gramalote Colombia Limited, 2015). Están compuestos de grava, arena, limo y arcilla con espesores entre 3 y 15 m (INTEGRAL S.A., 2025).

Se reconocen depósitos coluviales (Qc), especialmente en zonas de pendiente alta a moderada, donde la gravedad es el agente principal, combinada con factores detonantes como la saturación de suelos y el avance de procesos erosivos. Estos depósitos suelen estar constituidos por suelo y bloques de roca que han sido removidos de los horizontes de meteorización más superficiales. Son matriz-soportados, con fragmentos angulosos a subangulosos, meteorizados, y de tamaños generalmente centimétricos. La textura de la matriz varía desde limo arcilloso hasta limo arenoso, y tiene una consistencia principalmente blanda (INTEGRAL S.A., 2025). Los depósitos muestran poco transporte, acumulándose en la base de las laderas o en zonas de cambio de pendiente hacia áreas menos inclinadas. Su ocurrencia se clasifica como puntual, con espesores usualmente menores a 10,0 m, cubriendo áreas pequeñas (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Además, se presentan depósitos de flujo (Qfl), constituidos por material matriz-soportado proveniente del suelo residual del batolito antioqueño, que se acumulan en vaguadas con poca cobertura vegetal (INTEGRAL S.A., 2025) y se identifican depósitos antrópicos (Qll) asociados a los rellenos de las obras de infraestructura vial que conducen de Barbosa a Puerto Berrío, así como a la disposición de material sobrante contiguo a su trazado. Estos depósitos están compuestos por material heterogéneo con una relación variable entre tamaños gruesos y finos (INTEGRAL S.A., 2025).

Finalmente, dentro del diseño minero se contempla la construcción de 13 zonas de disposición de material. Entre ellas se encuentran los depósitos de material estéril de San Antonio y El Balsal, los cuales se utilizarán principalmente para almacenar tonalita y granodiorita extraídas durante las operaciones mineras, dispuestas en forma de guijos, cantos de roca, grava, arena y una pequeña fracción de finos (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Por otra parte, los residuos generados en el procesamiento del mineral se depositarán en la presa de colas o relaves, la cual se construirá en la cuenca de la quebrada Palestina. El diseño de esta presa incluye una estructura inicial o "presa de arranque", conformada por material residual y saprolito compactado. A medida que se generen las colas de flotación, se construirá la presa de arena utilizando como material base la fracción gruesa de dichos relaves, mientras que la fracción fina se depositará en el embalse de colas (Gramalote Colombia Limited, 2015).

Adicionalmente se tiene proyectada la construcción de otros 10 depósitos de materiales sobrantes - ZODMES, en donde se dispondrá material removido de los horizontes de meteorización proveniente de las excavaciones de las vías para construcción y plataformas (Gramalote Colombia Limited, 2015), el material de estos depósitos corresponderá

principalmente a una mezcla de limos con arenas limosas y arcillosas (INTEGRAL S.A., 2025).

A. Geología estructural

A nivel regional predominan 2 grandes sistemas de fallas que limitan el cuerpo batolítico; al occidente se encuentra el sistema de fallas Romeral, mientras que el sistema de fallas Palestina define el marco tectónico al oriente. Al interior del batolito se han definido fallas asociadas a la intrusión con rumbos predominantes en sentido NW-SE (SGC, 2015). En el capítulo 5.1.1 Geología se presenta toda la geología estructural del proyecto, incluyendo la figura de las fallas y lineamiento del proyecto.

Chica, (2012) identificó en la zona de influencia del proyecto varias fallas geológicas, configurando un modelo estructural a escala más detallada, destacando un primer sistema de fallas en sentido N45°W a N60°W que controla tramos del río Nus y la quebrada Guacas. Se considera una estructura inferida por el control estructural ejercido en los drenajes, aunque localmente se observan geoformas tipo escarpes, silletas y bermas alrededor del eje del río.

El segundo sistema presenta un sentido N40°E a N60°E que controla el tramo inferior de la quebrada Guacas en inmediaciones de su desembocadura al río Nus. Se definen además sistemas de falla complementarios, unos en sentido N-S se consideran evidencias locales de fallas regionales, mientras que estructuras en sentido E-W se asocian a estructuras derivadas de los esfuerzos que generaron el fracturamiento del macizo rocoso. Finalmente, se reconoció la Falla Cisneros como una estructura en sentido N70°W con buzamiento al norte y una longitud de hasta 45 km; se localiza al este de la cabecera urbana de San José del Nus (Chica, 2012).

La mayoría de los lineamientos presentan un sentido E-W a NW-SE como estructuras secundarias que se ramifican desde la falla de Palestina e incluyen las fallas La Caldera, Bizcocho y Nare, las zonas de cizalla Cristales y Playa Rica y el lineamiento regional del río Nus. El movimiento diferencial a lo largo de los lineamientos del Nus y El Socorro, aparentemente generan una dilatación tensional en dirección N-NW, NS y NE, los cuales se refleja en la formación de vetas de cuarzo y carbonato tipo stockwork en estructuras de tercer orden (Gramalote Colombia Limited, 2015).

A partir de la actualización de la geología estructural se logra identificar una mayor densidad de fracturamiento relacionada a fallas secundarias concordantes con las estructuras que controlan los drenajes del río Nus y la quebrada Guacas. Dentro del nuevo marco estructural se sugiere que algunas fallas principales cruzan los pit de Gramalote y Trinidad, definiendo bloques estructurales (Integral S.A., 2025). Aunque estas estas estructuras se localizan dentro del área del proyecto, las perforaciones realizadas indican estas estructuras no presentan características para favorecer el flujo de agua y por tanto se considera que no tienen significancia hidrogeológica (Golder Associates Perú S.A., 2020).

Chica 2012 realizó el cálculo del peso hidráulico de las discontinuidades, de la cuales se observa que la familia con dirección N20°W y buzamiento entre 80° y 90° al E es la de mayor densidad de fracturamiento, alcanzando hasta 51 planos por metro, sin embargo, su importancia o peso hidráulico es muy bajo, debido a que dicha familia de diaclasas no tiene abertura efectiva. En cambio, la familia de discontinuidades con rumbo N20°E y buzamiento entre 30° y 40°E, aunque poco densa (3 planos por metro) es la de mayor importancia hidráulica.

El modelo estructural desarrollado por (Chica, 2012) identifica cuatro direcciones preferenciales para las fallas en la región: N45°W a N60°W, N40°E a N60°E, N–S y E–W. La primera corresponde con las fallas de mayor escala reportadas en estudios anteriores, y es en general la dirección asociada al Río Nus y a partes del cauce de la Quebrada Guacas. La segunda dirección es muy frecuente en la zona, y controla la parte inferior del cauce de la misma quebrada. Los análisis de patrones de la red de drenaje, la fotointerpretación y los resultados de la evaluación hidráulica de las familias de discontinuidades medidas en el trabajo de campo, aportan elementos que permiten dar solidez al modelo estructural planteado.

5.1.6.1.2 Geofísica

El método geofísico empleado fue el eléctrico, mediante la ejecución de sondeos eléctricos verticales (SEV) y tomografías eléctricas.

La incertidumbre asociada a la interpretación de los SEV y las tomografías eléctricas se minimizó utilizando la información del logueo o descripción geológica de las perforaciones exploratorias y de las perforaciones hidrogeológicas para la instalación de piezómetros que se realizaron cerca de los sitios donde se ejecutaron los diferentes sondeos y líneas geoelectricas. Es decir, se correlacionó cada unidad litológica, con un rango de valores de resistividad eléctrica interpretada, haciendo una “calibración” directa de la geología de la zona con los valores de resistividad medidos. En esta “calibración” se tuvo en cuenta si los suelos y rocas estaban secos, saturados y grado de fracturamiento.

Otra consideración que minimizó la incertidumbre en la interpretación geoelectrica, es la geología misma de la zona del proyecto, que, por su homogeneidad, obedece simplemente al perfil de meteorización del batolito antioqueño sin cambios sustanciales en composición geológica, sin presencia de estratos con salinidad detectada u otras condiciones específicas identificadas, como variables que puedan afectar o agregar condicionantes en dicha interpretación. La correlación de la información litológica de los cientos de metros perforados durante la exploración del proyecto, teniendo como soporte los respectivos núcleos, con las resistividades de los sondeos geoelectricos y tomografías ejecutadas en sus cercanías, permitió definir los siguientes rangos de resistividad para la interpretación y análisis de la campaña geofísica (Tabla 5.1.6.2).

Tabla 5.1.6.2 Unidades geológicas y sus resistividades

Formación geológica	Valores de resistividad (Ohm-m)	Características hidrogeológicas
Unidad cuaternario no consolidada a poco consolidada		
Suelos	15 – 20	Suelo limo arcillosos, seco
Suelos	40 – 70	Suelo limo-arenoso, seco
Suelos	80 – 160	Suelo areno-limoso, seco
Suelos	260 – 510	Suelo gravoso, seco
Depósito de Terraza (Qt)	40 – 50	Limo y arena de grano fino. Capa permeable, saturada
Depósito de Terraza (Qt)	70 – 100	Arena de grano fino a medio. Capa permeable, saturada
Depósito de Terraza (Qt)	120 – 830	Arena gruesa y grava fina a muy gruesa. Capa permeable, saturada
Saprolito del Batolito Antioqueño	100 – 150	Compuesto por arcilla y limo arcillosos, seco. Capa poco

Formación geológica	Valores de resistividad (Ohm-m)	Características hidrogeológicas
		permeable, saturada
Saprolito del Batolito Antioqueño	1.000 – 1.700	Compuesto por arena de grano fino a grueso y limo. Capa poco permeable. Seca
Unidad Cretácica consolidada		
Roca ígnea del Batolito Antioqueño	2.900 – 8.700	Rocas ígneas parcialmente meteorizadas. Capa impermeable.
Roca ígnea del Batolito Antioqueño	10.000 – 11.000	Roca ígnea fresca. Capa impermeable.

Fuente: GCL, 2015 en (Integral S.A., 2018)

A. Sondeos eléctricos verticales (Prospección geoelectrica puntual)

En total fueron realizados 16 sondeos eléctricos verticales (SEV's) (Figura 5.1.6.1 y Tabla 5.1.6.3), con el objetivo de evaluar las condiciones geométricas en superficie y profundidad de los cuerpos aluviales potencialmente acuíferos.

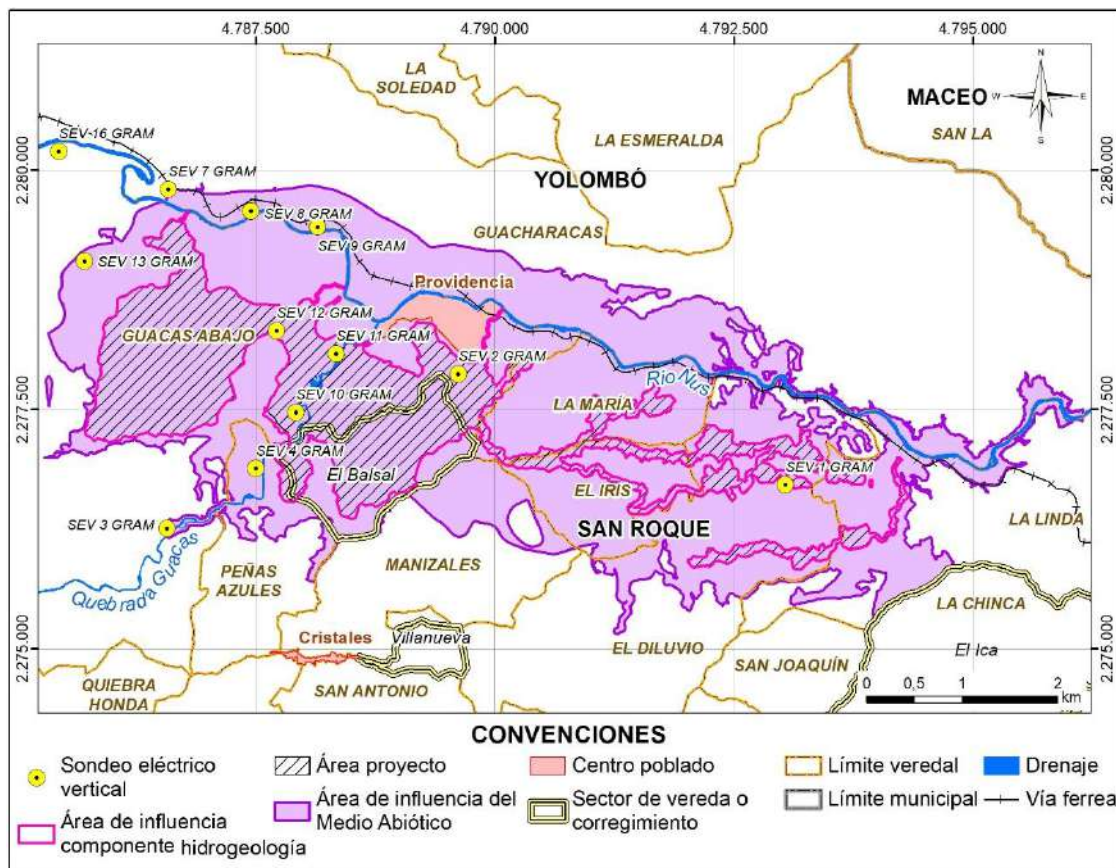


Figura 5.1.6.1 Ubicación de los sondeos eléctricos verticales

Fuente: Integral S.A. 2025 a partir de Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.3 Sondeos eléctricos verticales ejecutados en el área de estudio del proyecto

Identificar sondeo	Coordenadas			AB/2 (m)	Rumbo	Localización
	Este (m)	Norte (m)	Z			
SEV 1 GRAM	4.793.036,21	2.276.709,16	813,99	300	N87°E	Depósito de Terraza de la Q. La Palestina en la Y del carreteable que une a la población de Cristales con el Iris
SEV 2 GRAM	4.789.617,29	2.277.867,86	824,00	300	N88°W	Al Norte del carreteable que conduce al cerro Gramalote, sobre el depósito de la Q. La Colorada
SEV 3 GRAM	4.786.567,41	2.276.251,65	951,51	250	N62°E	Depósito de Terraza de la Quebrada Guacas.
SEV 4 GRAM	4.787.498,05	2.276.879,09	932,27	250	N15°E	Deposito Quebrada Guacas en la Finca Los Cachos
SEV 5 GRAM	4.782.965,26	2.280.668,73	831,76	300	N62°W	Depósito de Terraza del Río Nus, por la entrada a las fincas La Gitana y Guacharaca, costado Occidental del puente.
SEV 6 GRAM	4.783.867,82	2.280.614,15	828,33	300	N87°E	Al sur de la antigua carrilera en la finca Guacharaca, 400 m adelante del puente; sobre depósitos del Río Nus
SEV 7 GRAM	4.786.582,46	2.279.797,20	819,77	300	N45°W	Depósito de Terraza del Río Nus, costado Sur de la antigua carrilera vía Guacharaca - Providencia 800 m aproximadamente delante de la casa-finca.
SEV 8 GRAM	4.787.447,30	2.279.569,71	818,96	300	N80°E	Al sur de la carrilera vía Guacharaca-Providencia, sobre Depósitos de Terrazas del Río Nus.
SEV 9 GRAM	4.788.141,92	2.279.405,53	817,21	300	N85°E	Depósitos del Río Nus, al Sur de la carrilera vía Guacharaca - Providencia
SEV 10 GRAM	4.787.915,79	2.277.467,53	912,22	125	N45°W	Margen Izquierda de la Q. Guacas en el sector de la Garrucha, frente a la casa abandonada.
SEV 11 GRAM	4.788.335,99	2.278.080,14	818,37	300	E W	Depósito de la Q. Guacas, en el sector de la hidroeléctrica y la Finca La Bateíta

Identificar sondeo	Coordenadas			AB/2 (m)	Rumbo	Localización
	Este (m)	Norte (m)	Z			
SEV 12 GRAM	4.787.715,79	2.278.320,46	824,24	200	N45°W	Sector de San Antonio, depósitos de la Q. La Batea
SEV 13 GRAM	4.785.704,17	2.279.045,00	834,84	300	N S	Finca El Topacio, depósito de la Q. El Topacio
SEV 14 GRAM	4.784.605,85	2.275.857,77	978,94	200	N73°E	Aguas arriba de la Quebrada Guacas, en su margen izquierda.
SEV 15 GRAM	4.783.540,07	2.276.304,62	984,65	250	E W	En la cancha de futbol que existe aguas arriba de la Quebrada Guacas, en su margen izquierda.
SEV 16 GRAM	4.785.435,83	2.280.194,82	821,96	300	E W	Costado izquierdo vía Cisneros-San José de Nus, frente a la entrada de la Finca El Topacio, en la cancha de futbol, depósitos del Rio Nus y la Q. El Topacio

Fuente: Integral S.A., 2018

a. Interpretación de los sondeos eléctricos verticales

A partir de la interpretación matemática empleando el programa computacional EarthImager 1D v.1.0.2 (2007), se genera para cada uno de los SEV's, un perfil geológico-geoeléctrico, en el que se correlacionan los valores obtenidos de resistividad verdadera y su variación con la profundidad, con la litología de las diferentes capas de las unidades geológicas sondeadas. Se determinan varios tipos de SEV's, según el número de capas de estos, obteniéndose sondeos de cuatro y cinco capas, debido a delgadas y gruesas intercalaciones litológicas que conforman las capas que constituyen principalmente los depósitos Cuaternarios. La interpretación de los SEV's se presenta en el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_INTEPRETACION_PERFIL_GEOELECTRICO.

I. Suelos

La mayoría de los SEV's levantados sobre el Depósito de Terrazas, muestran una capa superficial menor de 1,0 m de espesor correspondiente a varios tipos de material seco, desde limo arcillosos con resistividades entre 15,0 y 20,0 Ohm-m los cuales se encuentran en baja proporción, siendo los más frecuentes los tipos limo arenoso con resistividades entre 40,0 y 70,0 Ohm-m y los areno limosos con resistividades desde 80,0 hasta 160,0 Ohm-m. En algunos lugares se desarrollan suelos constituidos por arenas y gravas donde la resistividad aumenta de 260 a 510 Ohm-m. Esta situación permite inferir que las capas de suelo funcionan como una zona de tránsito del agua infiltrada proveniente la precipitación y del agua superficial y por ello permanecen secos.

II. Depósitos aluviales de terraza

En los depósitos de terrazas asociados a los valles de las principales corrientes superficiales, a partir de la base de la capa de suelos, desde los 0,50 y 1,0 m de profundidad, hasta profundidades que comúnmente varían de 5,0 a los 10,0 m, los perfiles de los SEV's muestran capas intercaladas y saturadas con agua representadas por limo arenoso que reflejan valores de resistividad entre 40 y 50 Ohm-m, arenas finas a media con resistividades desde 70 hasta 100 Ohm-m, y capas de gravas finas a gruesas y muy gruesas, que reflejan valores de resistividad entre 120 y 830 Ohm-m. En algunos sectores este depósito cuaternario adelgaza su espesor, fluctuando entre 3,0 y 6,0 m, como respuesta a la depositación discordante de las terrazas sobre una paleo topografía irregular constituida por material saprolitizado de las rocas ígneas del Batolito Antioqueño.

III. Saprolito del Batolito Antioqueño

En la sub-cuenca de la quebrada Guacas, algunos SEV's levantados sobre depósitos de terraza producto de la erosión del saprolito, reflejan valores de resistividad desde 100 hasta 150 Ohm-m en su parte superior, como respuesta a la presencia de limo, limos arcillosos y arenas finas saturadas y entre 1000 y 1700 Ohm-m cuando el Saprolito contiene arena fina a gruesa parcialmente saturada.

IV. Rocas Ígneas del Batolito Antioqueño

Las rocas ígneas del Batolito Antioqueño que infrayacen al saprolito, se caracterizan por contener un grado moderado de meteorización al reflejar valores de resistividad desde 2900 hasta 8700 Ohm-m, indicando que generalmente se encuentran secas. Cuando desaparece ésta delgada capa, la resistividad aumenta hasta 11000 Ohm-m.

b. Perfiles geológicos – geoelectricos

A partir de la interpretación matemática de cada SEV's realizada y su ubicación, se elaboran dos perfiles esquemáticos geológicos-geoelectricos, empleando el programa Hidrogeoanalysis v.1 (2009). Los perfiles se obtienen con los sondeos levantados sobre niveles de terrazas cuaternarias asociadas a los valles del Río Nus y la Quebrada Guacas, en los cuales se correlacionan la litología de las diferentes capas de las unidades geológicas sondeadas y los valores obtenidos de resistividad verdadera y su variación con la profundidad. La topografía de la línea de los perfiles no se ajusta al relieve existente porque no todos los SEV's empleados para la interpretación se encuentran sobre la línea del perfil, ni a la misma altura y por ello al extrapolarse se produce la irregularidad topográfica. Estas líneas de cortes se identifican en el mapa GRA-INT-DCAA-04-14 con las siglas A – A' y B – B (Hidrogeocol, 2012). El perfil A-A' abarca la zona al NE fuera del área de influencia.

I. Perfil geológico geoelectrico A-A'

Se elabora con una dirección NW-SE a lo largo del depósito de terraza del río Nus, conformado por los SEV's 5, 6, 16, 7, 8 y 9, donde el primero (SEV-5) se ubica aguas arriba cerca a la entrada a las fincas La Gitana y Guacharacas, y el último (SEV-9) aguas abajo, en la parte posterior del poblado Providencia. El perfil se muestra en la Figura . La parte superior del perfil entre los SEV 5 y 6, señala la presencia de una capa con espesor no mayor de 1,0 m compuesta aguas arriba por limos y arenas finas permeables que reflejan valores de resistividad entre 17 y 144 Ohm-m, representadas por el color azul intenso. Desde el SEV-7 hasta la parte final del perfil (SEV-9), esta capa superior corresponde a suelos desde limo-arenosos hasta gravosos muy permeables, representados por el tono

grisáceo. Debajo de las dos capas anteriores, aparece una tercera constituida por arenas de grano fino a muy grueso saturadas con agua, representada por un color amarillento. Refleja valores de resistividad desde 66 hasta 175 Ohm-m, variando su espesor desde los 3,0 hasta aproximadamente los 6,0 m: Debajo aparece una secuencia de gravas finas a muy gruesa, incluyendo la presencia de cantos embebidos en matriz arenosa, igualmente saturada (de color verde en el perfil), la cual desarrolla espesores desde 4,0 hasta 12,0 m, reflejando resistividades entre 296 y 1013 Ohm-m. Los mayores espesores de ésta última capa ocurren en y cercanías al SEV-6. Las capas de gravas cubren discordantemente al Saprolito de las rocas ígneas del Batolito Antioqueño (en tono morado), no saturadas, al reflejar valores de resistividad desde 1.480 hasta 8.700 Ohm-m, conformando la gruesa capa meteorizada que cubre al basamento impermeable del perfil. La paleo topografía conformada por el Saprolito controla el espesor del Depósito de Terraza disminuyéndolo entre los SEV 7 y 8, haciendo desaparecer la capa arenosa por cambios laterales de facies. Teniendo en cuenta las anteriores consideraciones geológicas-geoeléctricas, se infiere que la zona para perforación de piezómetros exploratorios con profundidades entre 5,0 y 10,0 m, es aquella situada en y alrededores del SEV-6.

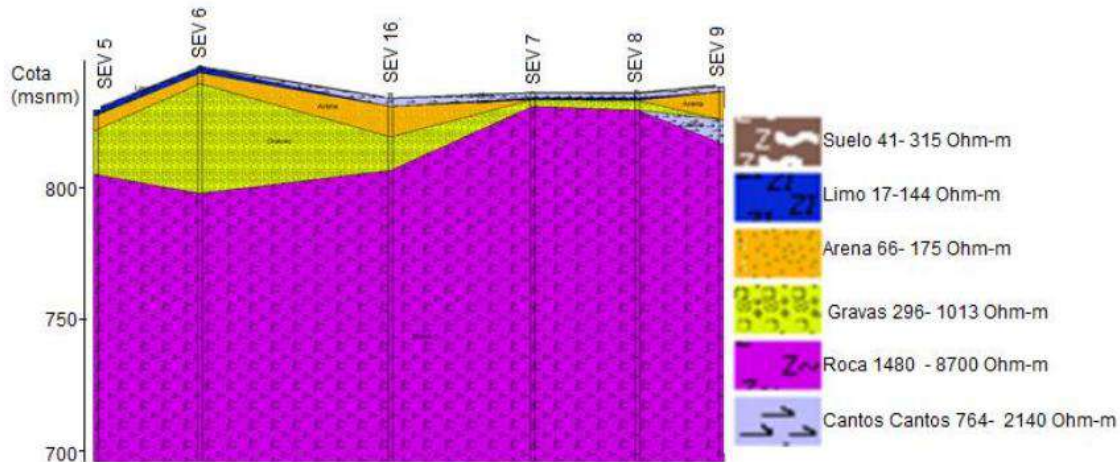


Figura 5.1.6.2 Perfil geológico – geoeléctrico A-A'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle del río Nus

Fuente: Hidrogeocol, 2012 en Integral S.A., 2018

II. Perfil geológico geoeléctrico B-B'

Este perfil de corta longitud (Figura 5.1.6.3), conformado por los SEV's 3, 4, 10 y 11, se ha elaborado sobre el depósito de terraza asociado al estrecho valle de la quebrada Guacas, extendido en dirección SW-NE, desde la parte media de la quebrada, aguas arriba de la hidroeléctrica, hasta el sector de la finca La Bateíta, aguas abajo.

Se caracteriza por contener delgados niveles de terraza, prevaleciendo hacia la parte alta en el sector SW, entre los SEV's -3, 4 y 10, niveles de gravas saturadas, con espesores promedios de 4,0 m que reflejan resistividades entre 296 y 1.013 Ohm-m. A partir del SEV-10 hacia aguas abajo donde se levanta el SEV-11, las gravas gradan a arenas de grano fino a medio e igualmente saturadas, con resistividades entre 66 y 175 Ohm-m, donde el espesor aumenta hasta aproximadamente los 10,0 m. Ambas litologías están cubriendo discordantemente al material saprolítico que cubre a las rocas ígneas del Batolito

Antioqueño. El escaso espesor del depósito cuaternario en la quebrada Guacas solo permite la construcción de piezómetros hasta los 8,0 m de profundidad.

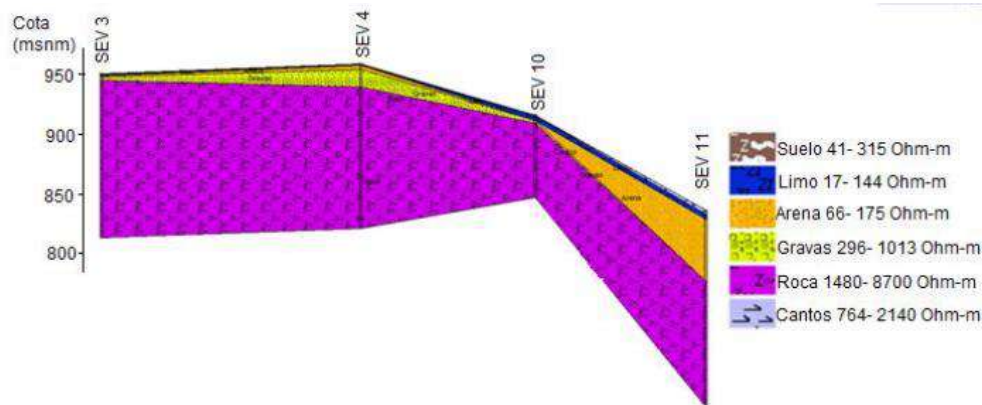


Figura 5.1.6.3 Perfil geológico – geoeléctrico B-B'. Elaborado sobre el depósito de terraza a lo largo del valle de la quebrada Guacas

Fuente: Hidrogeocol, 2012 en Integral S.A., 2018

B. Prospección geoeléctrica continua

En la determinación de la profundidad y espesor del material saprolítico producto de la meteorización de la roca ígnea asociada al Batolito Antioqueño y de los depósitos Cuaternarios representados por terrazas relacionadas con las principales corrientes superficiales, se ejecuta el levantamiento de 17 líneas de geoeléctrica continua con longitud que varía de 550 m a 670 m y separación de electrodos de corriente de 10,0 m y 12,0 m. Esta disposición permite alcanzar una profundidad de investigación de aproximadamente 100 m, a partir del contraste de los valores de resistividad reflejadas por las unidades geológicas subyacentes.

Con el fin de elegir la mejor disposición electródica que se ajuste a las condiciones topográficas del terreno y a la geología del área versus la relación de afectación por ruido, se realizan varias pruebas antes de la ejecución del primer perfil. Para ello se corrieron en modo prueba los arreglos Wenner, Schlumberger, Dipolo-Dipolo y Polo-Dipolo, concluyendo que los dos primeros poseen menos afectación por ruido y por consiguiente se convierten en los de mejor resolución para las condiciones del área. Para la adquisición de la información de campo igualmente se emplea el equipo de resistividad digital de alta resolución y precisión, marca SuperStingTM R8 IP.

La geoeléctrica continua es una metodología de prospección en la cual, para evaluar la resistividad del subsuelo, tanto en profundidad como lateralmente, se mantienen constantes las separaciones del arreglo de electrodos, dispuestos equidistantemente a lo largo del perfil de investigación. Una vez disparada la corriente desde el punto central del perfil, en cada punto de medida (electrodo) se registra el gradiente de voltaje y la corriente a una distancia conocida y a una profundidad dada desde la superficie del terreno. Este proceso lo lleva a cabo el equipo (SuperStingTM R8 IP) en forma automática, después de procesar la información obtenida durante aproximadamente una hora, según el arreglo electródico seleccionado (Wenner, Schlumberger, o Dipolo-Dipolo).

Para la realización del levantamiento geoelectrico se utiliza el equipo de resistividad SuperSting® R8 IP con salida de 8 canales y medición continua de resistividades mediante el uso de 8 cables con 56 electrodos en total.

Para lograr dicho objetivo, la información digital es ingresada al programa EarthImager® 2D vs. 2.2., de propiedad de AGIUSA® y debidamente licenciado para Hidrogeocol Ltda. Cada perfil es procesado individualmente utilizando algoritmos adecuados para la inversión y considerando la técnica y la experiencia del consultor en este tipo de tareas. Las bases de datos generadas del levantamiento fueron ingresadas al Sistema de Información Geográfica GIS, creada para el proyecto (ARCGIS 9.3, ESRI®, licenciado para Hidrogeocol Ltda.).

Las resistividades aparentes medidas en campo y la información topográfica a lo largo de los perfiles de prospección, son los datos de entrada para el algoritmo del programa computacional (Earthimager 2D). Con las mediciones de campo, se obtiene una imagen del subsuelo de la distribución de los valores de resistividad aparente en el terreno, imagen que elabora el programa con base en la interpolación lineal de los valores de resistividad aparente registrados en campo. A cada uno de estos valores le corresponde un punto de ubicación que está referenciado por la profundidad, desde la superficie del terreno y la distancia de separación desde el punto de inicio de las medidas de resistividad.

Para el proceso de interpretación, el programa dispone de diversas opciones que van desde la edición de los datos de campo, para la eliminación y ajuste de datos anómalos, hasta la selección de alternativas de operación para el proceso matemático de inversión y modelación (ya sea por elementos finitos o diferencias finitas). La selección adecuada de las diferentes opciones que el programa presenta depende en gran medida del conocimiento de las condiciones geológicas (estratigrafía y tectónica) del terreno, del factor topográfico que imprime el relieve del terreno y de las características y comportamiento de los datos de resistividad aparente tomados en campo.

El proceso de interpretación es iterativo por ensayo y error, en el cual se busca que el modelo de interpretación matemática (modelo de resistividades reales) genere una imagen de resistividades aparentes calculadas, similar a la obtenida en campo con RMS (Root Mean Square) equivalente a la Raíz de la sumatoria de los mínimos cuadrados, indicando el grado de certidumbre de los resultados reportados. Se elige como valor máximo de RMS $\leq 10\%$ para el post-procesamiento de acuerdo con la experiencia del consultor, a las bases teóricas y al ruido de fondo existente en el sitio de estudio.

Cuando el RMS es menor a 5%, se considera que matemáticamente el modelo de resistividad real se aproxima con buena precisión a las condiciones de campo. En segunda instancia, se verifica que el modelo de resistividad real resultante tenga similitud con la interpretación geológica, para lo cual se requiere tener conocimiento de las condiciones y características geológicas presentes en el subsuelo, a fin de tener criterios de clasificación claros para seleccionar la respuesta que se aproxime con mejor detalle a las condiciones naturales presentes.

a. Localización de los perfiles de geoelectrica continua

La ubicación de los perfiles geoelectricos se realiza tomando en cuenta un arreglo geométrico y espacial que permita cubrir la mayor parte del área posible y que a su vez admita establecer la correlación de las unidades geoelectricas presentes obtenidos en cada uno de los perfiles.

Los perfiles PG-2 y PG-15, se sitúan sobre un depósito de terraza aluvial adyacente al río Nus, en la margen izquierda de la confluencia de la quebrada Guacas con el citado río, de tal manera que permita identificar los espesores del depósito sedimentario y las estructuras asociadas a la tectónica local.

Los perfiles PG-3, PG-5, PG-9, PG-10, PG-11 y PG-12 se ubican en las colinas de los sectores de la quebrada Guacas abajo, Guacas arriba y Monjas, para conocer los espesores del saprolito. Los demás perfiles están distribuidos por toda el área de influencia indirecta del proyecto.

La Tabla 5.1.6.4 muestra la ubicación y características de cada perfil ejecutado y la Figura 5.1.6.4 se muestra el respectivo trazado.

En el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_INTEPRETACION_PERFIL_GEOELECTRICO, se presenta la interpretación de cada perfil de geoelectrica continua levantado.

Tabla 5.1.6.4 Ubicación de las líneas de geoelectrónica continua

Identificación	Ubicación	Electrodo de inicio			Electrodo final			Rumb o	Long. (m)	Máxima prof. (m)
		Coordenadas		Cota Z	Coordenadas		Cota Z			
		X	Y		X	Y				
Perfil geoelectrico 1	Finca El Topacio	4.785.155,40	2.279.090,75	846,98	4.784.648,42	2.279.118,76	971,65	266	560	112
Perfil geoelectrico 2	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.789.134,83	2.278.778,91	819,97	4.788.517,39	2.278.944,39	842,77	290	672	126
Perfil geoelectrico 3	Finca San Antonio, al occidente de la Hidroeléctrica	4.788.322,71	2.278.528,09	823,67	4.787.862,88	2.278.084,84	839,33	224	672	123
Perfil geoelectrico 4	Gramalote, al Occidente del Campamento	4.789.052,74	2.278.254,16	826,72	4.788.723,16	2.277.870,40	855,08	209	560	103
Perfil geoelectrico 5	Cerro Gramalote parte alta	4.788.472,27	2.277.147,27	917,08	4.788.110,98	2.277.594,78	925,97	321	672	105
Perfil geoelectrico 6	Vereda el Iris, al norte del trapiche	4.790.581,12	2.277.028,92	951,90	4.789.968,40	2.276.871,31	941,61	232	672	89
Perfil geoelectrico 7	Vereda el Iris, frente a la casa de la Estrella	4.791.536,79	2.276.151,02	899,28	4.791.216,87	2.276.688,36	859,55	327	672	123
Perfil geoelectrico 8	Vereda el Iris, entre la Quebrada Palestina y el carretable del Iris	4.792.872,21	2.276.968,85	859,25	4.792.939,93	2.276.390,50	836,87	180	560	135
Perfil geoelectrico 9	Guacas Abajo	4.787.046,77	2.275.705,94	1.033,37	4.786.688,81	2.276.136,56	998,49	40	560	112
Perfil geoelectrico 10	Guacas Abajo, Monias	4.785.414,57	2.276.089,19	1.069,59	4.785.235,93	2.276.695,00	1.098,96	354	672	1 35

Identificación	Ubicación	Electrodo de inicio			Electrodo final			Rumb o	Long. (m)	Máxima prof. (m)
		Coordenadas		Cota	Coordenadas		Cota			
		X	Y	Z	X	Y	Z			
Perfil geoelectrico 11	Guacas Abajo	4.784.435,67	2.275.653,97	1.006,00	4.784.468,06	2.276.256,95	1.069,92	19	672	135
Perfil geoelectrico 12	Guacas Arriba	4.782.823,85	2.276.282,45	987,03	4.782.919,74	2.276.757,16	1.105,35	18	560	112
Perfil geoelectrico 13	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.788.721,61	2.278.486,50	816,00	4.789.078,23	2.278.883,15	817,84	44	560	112
Perfil geoelectrico 14	Sector San Antonio al Nor-Occidente del Campamento del Obras Públicas	4.786.724,51	2.278.291,39	846,02	4.786.871,50	2.278.787,88	832,34	17	550	110
Perfil geoelectrico 15	Finca Guacharaca, Norte del Rio Nus	4.789.554,60	2.275.921,81	1.024,95	4.789.814,76	2.276.406,47	957,20	28	550	110
Perfil geoelectrico 16	Parte Sur-Central del área, en el sector de Peñas Azules	4.787.183,70	2.275.790,14	1.001,06	4.787.733,77	2.275.787,97	990,60	90	550	110
Perfil geoelectrico 17	Sector de la Hidroeléctrica, cruzando la Quebrada Guacas hacia el cerro Gramalote	4.788.261,47	2.277.964,24	818,74	4.788.778,19	2.277.875,19	889,19	100	550	110

Fuente: Integral S.A., 2018

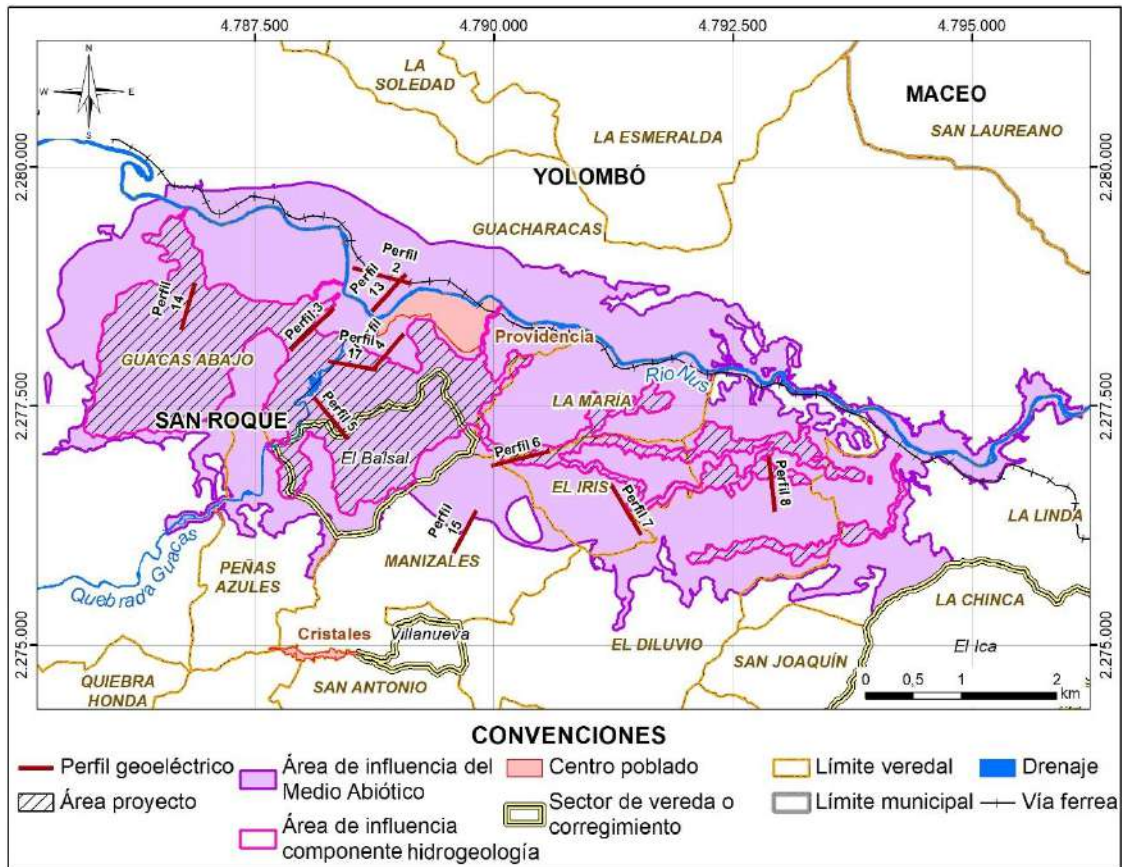


Figura 5.1.6.4 Ubicación en planta de los perfiles geoelectricos verticales

Fuente: Integral S.A. 2025 a partir de Integral S.A., 2018

b. Lectura de los perfiles de prospección de geoelectrica continua

Una vez obtenida la información de campo, se procede a organizar y filtrar los datos para su posterior procesamiento, de tal manera que la interpretación de los perfiles levantados en el área permita evaluar las condiciones en profundidad de las unidades geológicas presentes.

En el modelo de resistividad real que se genera con base en la información de campo, se aprecian las diferentes unidades geoelectricas presentes en el terreno (diferenciadas de acuerdo con los intervalos de resistividad real), condiciones estructurales, espesores, profundidades, etc., características que, al correlacionarlas con la información existente y la geología de campo, permiten obtener un modelo de la situación geológica en el subsuelo evaluado bajo la línea de prospección o pseudosección.

Cada imagen muestra la resistividad aparente medida en campo (imagen superior) y la imagen de la resistividad aparente calculada, resultante de simular en el programa computacional el proceso de campo con base en el modelo de resistividad real (imagen intermedia). En la medida que las dos anteriores imágenes muestren distribuciones de los valores de resistividad similares, es decir que haya una clara relación de correspondencia

mutua entre los valores medidos en campo y los simulados o calculados, (RMS menor a 5%), se le da validez al modelo de resistividad real, desde el punto de vista matemático.

Con base en el modelo de resistividad real resultante y teniendo en cuenta la topografía de superficie (integración y corrección que efectúa directamente el programa de interpretación), se elabora el modelo final de interpretación geológica, en el cual se definen las diferentes formaciones geológicas y las estructuras que conforman el subsuelo, hasta la profundidad de investigación estipulada.

Los diferentes valores de resistividad reflejados están asociados a las diferentes gammas de colores, y son productos de las condiciones matemáticas del modelo de interpretación. Es indispensable que la información de campo sea filtrada y corroborada utilizando técnicas geoestadísticas comúnmente aceptadas como parte del QA/QC para la presentación de datos y del modelo geoelectrico

I. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-1 (A-A')

Está ubicado hacia el sector de la finca El Topacio en la parte alta del cerro, aproximadamente un kilómetro al Sur del Río Nus, con un rumbo de N5°W y una longitud de 560 m., logrando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m., para alcanzar una profundidad aproximada a los 131,0 m en las partes topográficamente más altas. Se utilizó el arreglo Schlumberger (Figura).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente tres (3) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del orden de 3,61%.

Desde el electrodo No.14 hasta el electrodo No. 50 (representados por los puntos negros ubicados en la parte superficial de la imagen inferior), se puede observar que en la parte superior aflora una unidad geoelectrica caracterizada por resistividades que van desde 1.050 hasta los 2.700 Ohm-m, representada por las tonalidades verdes y cuyos espesores promedios varía desde 52,0 m en la parte alta y va decreciendo hacia las partes más bajas (26,0 m.). Esta unidad geoelectrica es correlacionable a una secuencia geológica dominada por material saprolitizado, cuyo protolito ígneo corresponde a la unidad geoelectrica más inferior reconocida en la imagen.

Una segunda unidad ocurre hacia el sector del Río Nus, reflejando las resistividades más bajas del orden de 229 Ohm-m hasta los 1.050 Ohm-m, representados en la figura por las tonalidades que van desde el azul hasta el celeste. Se presenta desde el electrodo No. 1 hasta el No. 13 y su espesor no excede los 12,0 m en profundidad. Esta unidad corresponde a materiales de terrazas constituidos por arenas, cantos y bloques que cubren a delgadas capas producto de la meteorización de las rocas ígneas (color celeste), posiblemente relacionada con terrazas de la Quebrada el Topacio.

La tercera unidad geoelectrica está representada por la variación de las tonalidades amarillas hasta las rojas con resistividades entre los 2.700 Ohm-m y superiores a los 10.000 Ohm-m, la cual no aflora, presentando una continuidad lateral con espesores que sobrepasan a la profundidad de estudio (mayores a 100 m.). Dicha unidad geoelectrica se correlaciona con el basamento ígneo, constituido por tonalitas, cuarzodioritas muy poco o no meteorizados.

En general la imagen representa con claridad la respuesta de las secuencias geológicas presentes en donde no se observan discontinuidades asociadas a la presencia de

fallamientos locales o regionales. Las coberturas relacionadas con el material saprolítico en general tienen espesores máximos de 50,0 m en las partes altas, observándose una disposición concordante de este material con el basamento ígneo. En la Figura 5.1.6.5 se muestra la imagen de resistividad generada, también en el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_INTEPRETACION_PERFIL_GEOELECTRICO.

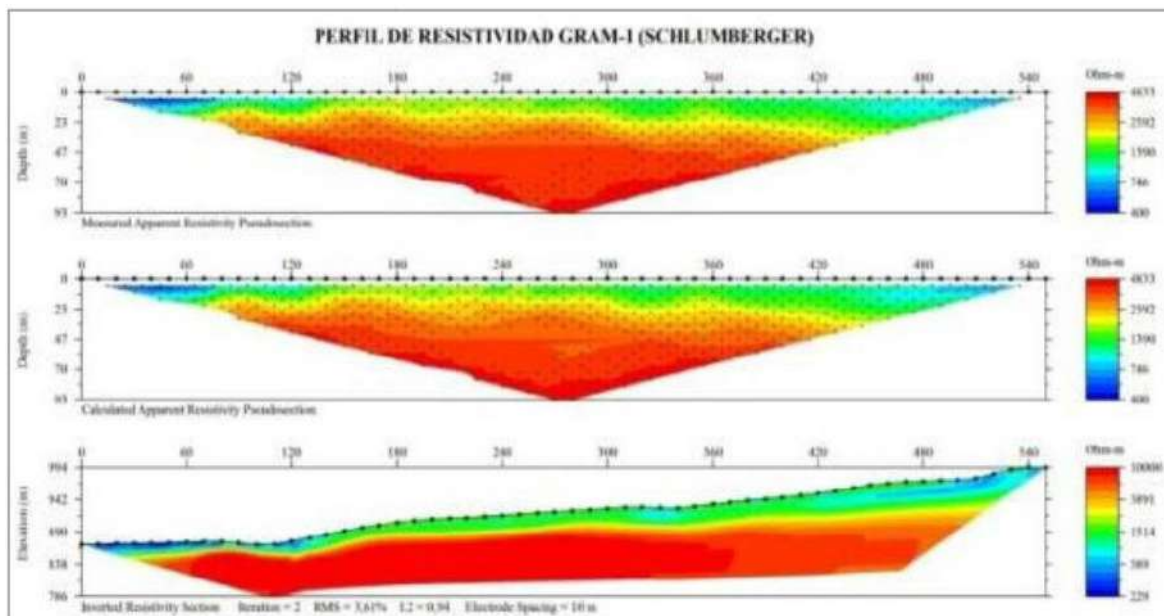


Figura 5.1.6.5 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-1 (A-A')

Fuente: Integral S.A., 2018

II. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-2 (B-B')

El perfil tiene una longitud de 550,0 m., en sentido SE-NW, a lo largo del cual se instalan 56 electrodos separados una distancia de 10,0 m. La profundidad de estudio alcanza los 150,0 m., aproximadamente a lo largo de todo el perfil.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado utilizando la configuración Schlumberger se diferencian principalmente tres (3) unidades geoelectricas, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, de 4,82%.

La primera unidad geoelectrica corresponde a las resistividades que varían en el rango de 21,7 Ohm-m hasta los 200 Ohm-m, representados en la Figura por los matices azules hasta celestes. Se encuentra prácticamente aflorando en todo el perfil hacia la parte superficial desde el electrodo No. 1 hasta el electrodo No. 44 con espesores máximos de 15 m hacia el Oriente, disminuyendo hacia el Occidente en el pie de colina con espesores que no superan los 7,0 m. Esta unidad corresponde a Depósitos de Terrazas de edad Cuaternaria, constituidos por sedimentos poco consolidados, con granulometría de grano medio a muy grueso como arenas limosas y gravas.

La segunda unidad geoelectrica refleja resistividades que van desde los 200 Ohm-m hasta los 1.015 Ohm-m, representados por coloraciones verdes. En general se encuentra subyaciendo a la primera unidad y se observa un aumento de espesor importante (70,0 m.)

hacia la parte izquierda del perfil (sector Oriental) por donde se ubican los electrodos No. 27 y No. 28; mientras hacia el lado derecho del perfil (sector Occidental) los espesores no exceden los 25,0 m. Geológicamente correspondiente al saprolito producto de la meteorización diferencial del basamento ígneo.

La tercera unidad está representada por las tonalidades amarillas hasta rojizas cuyos valores de resistividad aparecen por encima de los 1.000 Ohm-m. Se encuentra cubriendo prácticamente la parte derecha del perfil desde el electrodo No. 28 hasta el electrodo No. 56 y subyaciendo a las unidades anteriormente mencionadas. Los espesores hasta la profundidad de estudio varían desde la parte izquierda del perfil con 32,0 m. hasta los 136,0 m. en la parte derecha. Geológicamente corresponde al basamento ígneo con predominio de granodioritas y granitos de altamente compactos especialmente en donde las resistividades superan a los 5.000 Ohm-m.

El contraste lateral en las resistividades que representan la segunda y tercera unidad geoelectrica es evidente en la Figura 5.1.6.6Figura y permite establecer una serie de hipótesis relacionadas con la presencia de una tectónica activa en el sitio. Al parecer existe una falla de alto ángulo de buzamiento que afecta al sector, provocando que el “bloque” izquierdo (sector Oriental B) haya sufrido un proceso de alteración saprolítica mucho más intenso, mientras hacia el lado derecho del perfil (sector Occidental B’) muestre una predominancia absoluta del basamento rocoso hasta la profundidad de estudio. Estas evidencias coinciden con los estudios geológicos superficiales llevados a cabo en el sector que indican la presencia de lineamientos regionales asociados a una tectónica activa post-Cretácica.

En general la imagen representa con claridad la respuesta de las secuencias geológicas regionales en donde se observan discontinuidades marcadas posiblemente asociadas a la presencia de fallamientos locales o regionales. Las coberturas relacionadas con el material saprolítico son marcadas por el contraste de sus espesores e hidrológicamente únicamente existirían unidades potencialmente acuíferas de pobre capacidad de almacenamiento hacia el lado izquierdo del perfil, debido a la fina granulometría que prevalece en la matriz del material saprolítico (arcilloso).

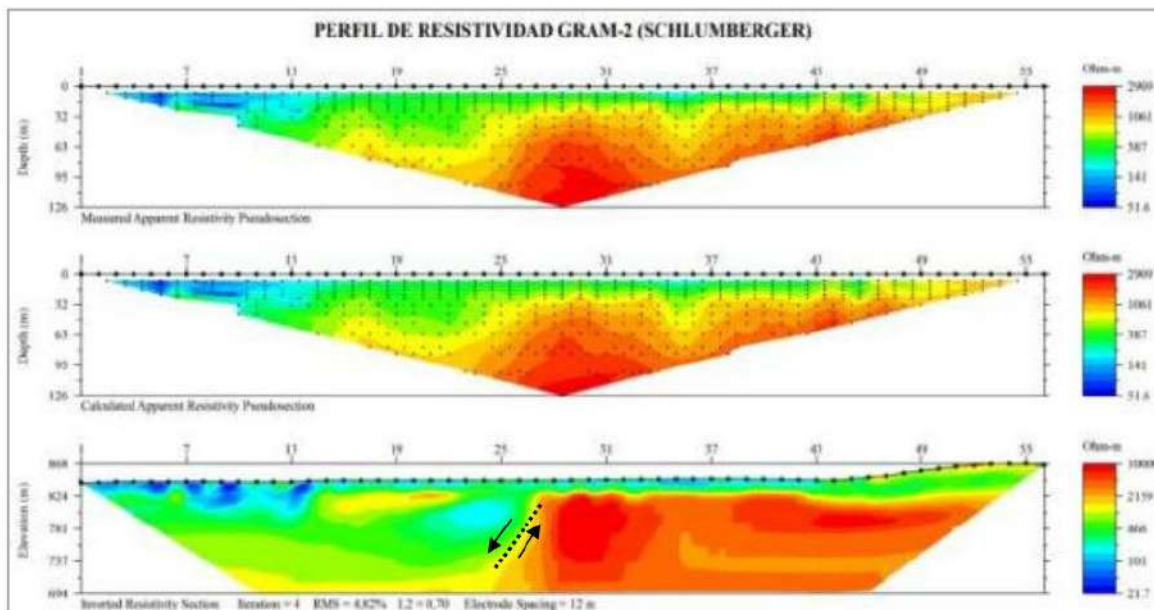


Figura 5.1.6.6 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-2 (B-B')

Fuente: Integral S.A., 2018

III. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-3 (C-C')

Este perfil fue propuesto para investigar el extremo Nor-Occidental del área de Gramalote en el sector de San Antonio, cerca de la pequeña central hidroeléctrica en un sitio topográficamente compuesto por una zona alta de potreros y de colinas suaves (lado izquierdo del perfil) y una zona pantanosa más baja (lado derecho del perfil) en una altitud promedio de 850 msnm. Se utilizó el arreglo Schlumberger (Figura 5.1.6.7).

El espaciamiento entre cada electrodo es de 12,0 m, llegando a alcanzar una longitud total de 660 m lineales con rumbo N46°W. La profundidad máxima de exploración alcanza aproximadamente los 143,0 m. En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,54%.

La primera unidad geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos de resistividad entre 1.500 y 3.000 Ohm-m representados en el perfil por las tonalidades rojizas y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 6, del No. 11 al. 27 y desde el No. 31 hasta el No. 36. Sus espesores son variables, pero se estima que no exceden los 12,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con fragmentos de rocas cuarzodioríticas de tamaños centimétricos embebidos dentro de una matriz limo arenosa que han sido transportados por gravedad, como se puede observar en algunos pequeños afloramientos existentes entre los electrodos No. 20 y 24.

La segunda unidad se caracteriza por aflorar hacia las partes bajas en una zona pantanosa, entre los electrodos No 39 al No. 42 y del. No. 47 al No. 53. En estos sitios se tuvo que hincar los electrodos a una de 2,0 m. para asegurar una correcta inyección de corriente. Los valores de resistividad son bajos y corresponden a los sedimentos acumulados en el

fondo del lecho de la quebrada con rangos que van desde los 70 hasta los 240 Ohm-m, representados en el perfil por las gamas azules y celestes. El espesor promedio no supera los 10,0 m.

La tercera unidad geoelectrica se encuentra representada por el rango de resistividades que va desde los 250 hasta los 800 Ohm-m (rango de tonalidades verdes en la imagen), distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores entre 22,0 m. y 36,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito que va alterando su textura conforme alcanza la superficie del terreno, el cual al compactarse alcanza rangos de resistividad desde 800 Ohm-m hasta 1200 Ohm-m.

La cuarta unidad geoelectrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho. El rango de resistividad se encuentra entre los 1.200 y los 3.500 Ohm-m y simbolizado por las tonalidades rojizas. Dicha unidad es correlacionable con rocas meteorizadas del Batolito Antioqueño. Con base en los valores de resistividad y en el reconocimiento de campo, se nota una predominancia de rocas tipo cuarzodioríticas y dioríticas cuyos espesores promedios a lo largo del perfil son de 100 m hasta la profundidad de estudio.

A lo largo del perfil C-C' se presentan las unidades expuestas casi periclinamente aproximándose a las formas del terreno y en donde no se evidencian estructuras asociadas a la tectónica predominante de la región, pero se observa un mecanismo de alteración diferencial marcado por las variaciones progresivas en resistividad de las unidades (saprolitización). El espesor total aproximado que conforman las unidades poco consolidadas que se encuentran por encima del macizo rocoso es de 30,0 a 47,0 m., y corresponden a una unidad hidrogeológica de muy baja capacidad de almacenamiento de agua.

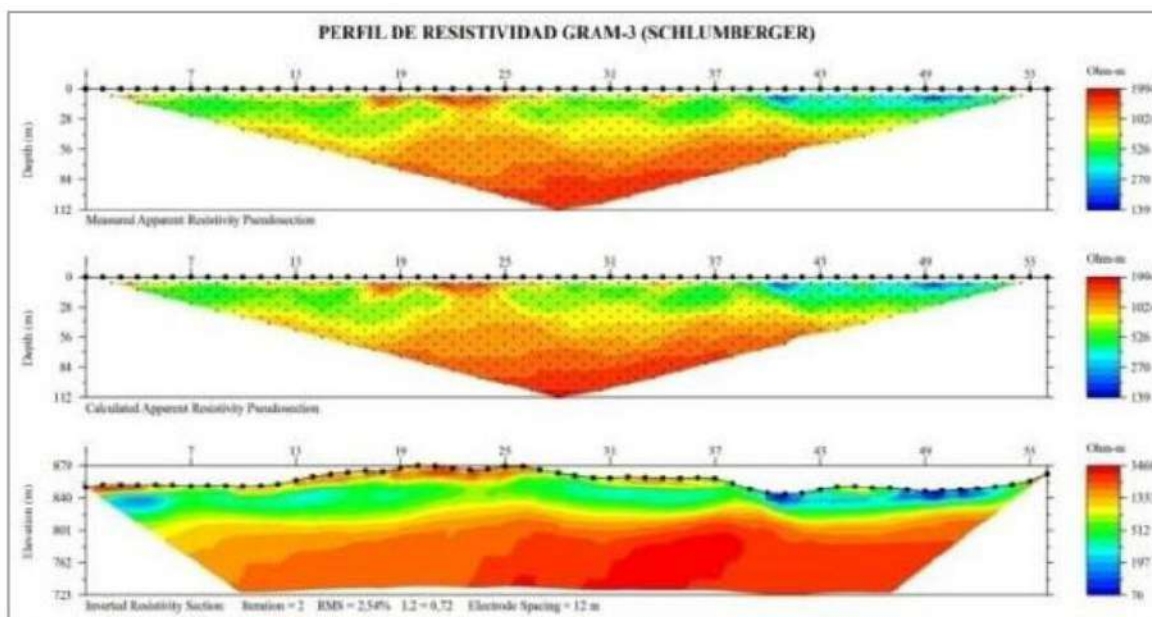


Figura 5.1.6.7 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-3 (C-C')

Fuente: Integral S.A., 2018

IV. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-4 (D-D')

El perfil tiene una longitud de 550,0 m en dirección N40°W, a lo largo del cual se instalaron 56 electrodos separados una distancia de 10,0 m. La profundidad máxima de estudio utilizando la metodología Schlumberger es de aproximadamente 140 m., medidos desde la cota más alta del terreno (Figura 5.1.6.8).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado (parte inferior de las imágenes) se pueden agrupar principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del 2,42%. Cabe resaltar que, durante la ejecución del perfil en campo, se reporta “ruido de fondo” que afecta parcialmente la calidad de los datos, especialmente hacia la parte baja del cauce de una quebrada que por allí transita, lo cual fue tomado en cuenta al momento de procesar la información para minimizar dichos errores posiblemente de origen natural.

La primera unidad geoelectrica está caracterizada por valores altos de resistividad del orden de 1.600 Ohm-m hasta 2.200 Ohm-m, representados en el perfil por la variación de matices desde amarillo hasta naranjas, restringidas a las partes más superficiales a lo largo de casi todo el perfil (Electrodos No. 5 al No. 14 y No. 26 al No. 52). Los espesores son casi constantes a lo largo del perfil, con promedios que bordean los 13,0 m. y corresponden a depósitos de materiales transportados por gravedad como bloques de rocas dentro de una matriz saprolítica de grano medio como arenas y limos. En el sitio no se divisan afloramientos que permitan corroborar lo señalado, pero morfológicamente se puede apreciar que existen mecanismos asociados a movimientos de masas, derrumbes y deslizamientos.

La segunda unidad interpretada corresponde a las resistividades que se encuentran restringidas a las partes topográficamente más bajas por donde cruza la quebrada y en donde se aprecia una disminución en los valores de resistividad (135 Ohm-m hasta los 220 Ohm-m); representados en el perfil por las gamas azules. El espesor promedio es de 12,0 m. y geológicamente pertenece a depósitos de materiales fluviátiles poco consolidados como limos arenosos y arenas parcialmente saturadas. La configuración mostrada y los espesores asociados generan cierta incertidumbre que es atribuida al “ruido de fondo” del sector.

Una tercera unidad geoelectrica en el rango de resistividades de 220 Ohm-m hasta 1.160 Ohm-m representada por la gama de tonalidades verdes, aparece a lo largo del perfil subyaciendo a la primera unidad y aflorando en varios tramos de este. El espesor es variable de tal manera que en el sector de la mencionada quebrada (electrodos No. 16 al No. 19) alcanza los 11,0 m., mientras hacia el lado derecho de la imagen (sector sur-oeste D') aumenta considerablemente hasta los 70,0 m. Los valores de resistividad y el conocimiento geológico del área permiten asociar estos valores a materiales saprolíticos poco consolidados, producto de la alteración del basamento ígneo.

Una cuarta unidad geoelectrica se presenta en el rango de resistividades superiores a 1.160 Ohm-m, representadas por las tonalidades amarillas hasta el rojo intenso y atribuible geológicamente a la secuencia del Batolito Antioqueño con una predominancia de cuarzodioritas y dioritas. Hacia la parte izquierda de la imagen se observa la forma de un lacolito cuyo espesor hasta la profundidad de estudio es de 70,0 m y va disminuyendo hacia la parte derecha del perfil. En general el trazo de las unidades geológicas-geoelectricas difiere del comportamiento de los perfiles anteriormente mencionados, pero se resalta

nuevamente la presencia de una secuencia de materiales poco compactos suprayaciendo al basamento rocoso del Batolito Antioqueño.

Hidrogeológicamente las respuestas de las resistividades no indican la existencia de acuíferos importantes, pero en los sectores donde aparece la segunda unidad con tonos azules y resistividades entre 135 y 220 Ohm-m, reflejadas por materiales de grano medio, podría existir la posibilidad de encontrar cuerpos de agua muy localizados, recargados por la quebrada que por allí transita.

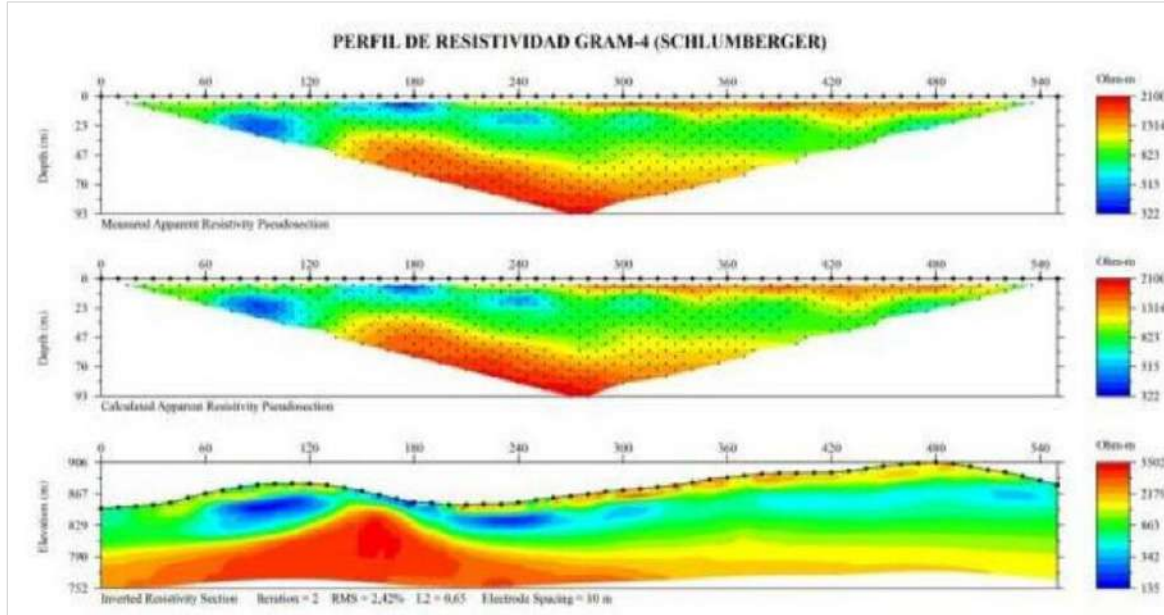


Figura 5.1.6.8 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-4 (D-D')

Fuente: Integral S.A., 2018

V. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-5 (E-E')

Perfil geoelectrico ubicado al oriente de la quebrada Guacas en el sector conocido como El Balsal. Se dispuso un espaciamento medido en terreno entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar una profundidad de 153,0 m. En general el terreno presenta fuertes escarpes con una morfología de colinas abruptas. La longitud total en terreno es de 660 m, con rumbo N39°W y configuración Schlumberger (Figura 5.1.6.9).

Se pueden agrupar las resistividades en cuatro rangos principales de acuerdo con los contrastes de las unidades presentes y su disposición a lo largo del perfil.

La primera unidad geológico- geoelectrica corresponde a los materiales que se encuentran en las partes altas de las colinas con rangos de resistividad del orden de 4.000 Ohm-m hasta 5.000 Ohm-m (tonalidades rojizas) pertenecientes a restos de rocas saprolitizadas medianamente compactas con presencia de escasos bloques de carácter diorítico, lo que se puede corroborar al observar algunos pequeños afloramientos encontrados entre los electrodos No. 45 al No. 49. Su ocurrencia es más bien restringida y los espesores asociados no sobrepasan los 12,0 m.

La segunda unidad geológico- geoelectrica corresponde a los materiales de más baja resistividad (menores a 500 Ohm-m), relacionadas a sedimentos de rellenos de cauces y/o paleocauces. Afloran principalmente en la Quebrada Guacas donde se dispusieron los electrodos No. 23 al No. 26. Se presentan en los tonos azules a celestes y los espesores asociados no superan los 7,0 m.

La tercera unidad geológico-geoelectrica se encuentra presente a lo largo de todo el perfil E-E' y está representada por las tonalidades verdes con rangos de resistividad desde los 500 hasta los 2.000 Ohm-m aproximadamente, marcando un contraste definido con el basamento subyacente. Geológicamente estos materiales corresponden al Saprolito muy alterado, con espesores variables entre 20,0 m y 40,0 m.

La cuarta unidad geológico-geoelectrica aparece representada por las tonalidades amarillas rojizas en rangos de resistividad mayores a los 200 Ohm-m, expuestas a lo largo de todo el perfil subyacentes a las unidades anteriores. Corresponde al basamento de rocas ígneas (granodioritas, cuarzodioritas) con espesores que superan los 100 m. hasta la profundidad de estudio.

En general el perfil presenta el mismo esquema geológico que los perfiles anteriores y no se distinguen discontinuidades marcadas lateralmente que hagan pensar en la presencia de fallamientos en este sector. Hidrogeológicamente no se considera la existencia de unidades potencialmente acuíferas.

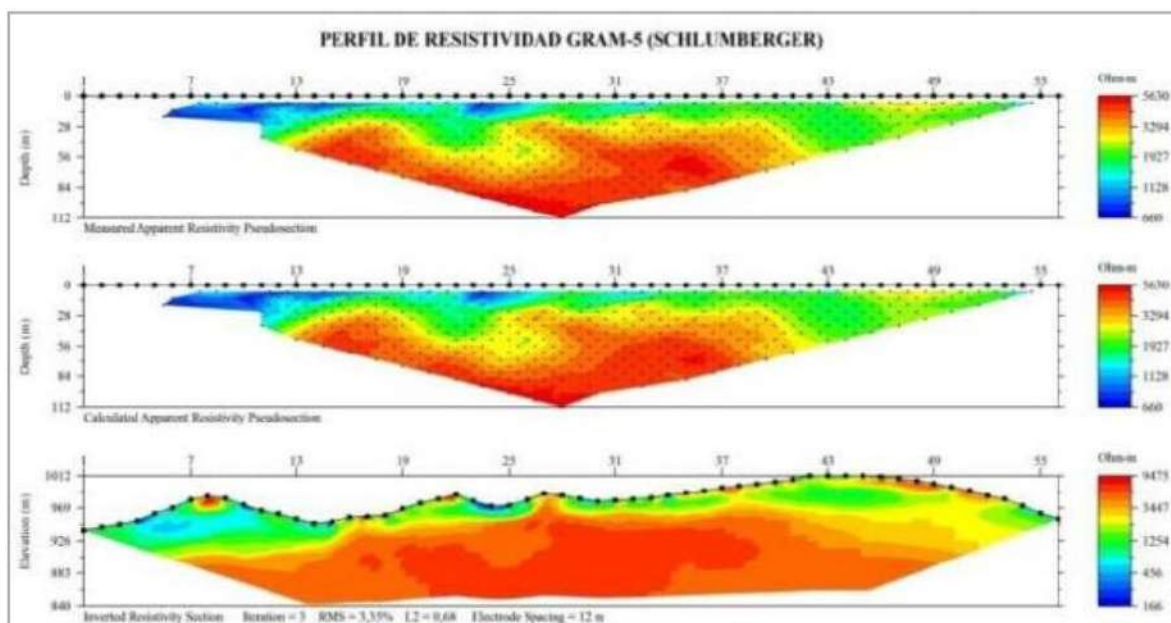


Figura 5.1.6.9 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-5 (E-E')

Fuente: Integral S.A., 2018

VI. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-6 (F-F')

En el sector denominado "Vereda del Iris", el cual corresponde a una zona de escarpes pronunciados, se dispuso el perfil PG-6 (Figura 5.1.6.10.) con un espaciamiento entre electrodos de 12,0 m., cubriendo una longitud total en terreno de 660 m., en dirección

N15°E. La configuración utilizada, Wenner, permite alcanzar profundidades de hasta 100,0 m con respecto a la superficie del terreno.

En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente tres (3) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,73%.

La primera unidad de resistividad representa a las gamas azules con resistividades entre 60 Ohm-m y 200 Ohm-m, aflorando en superficie a lo largo del perfil. Estas resistividades están asociadas a materiales poco consolidados del tipo arenas limosas y/o arcillosas que se forman sobre todo en las partes bajas de las quebradas. El espesor no supera los 10,0 m., y se dispone en general de manera concordante con el relieve del terreno.

La segunda unidad aparece representada por matices verdes con rangos de resistividad de 200 Ohm-m hasta 1.100 Ohm-m, aproximadamente: Se encuentra suprayaciendo al basamento ígneo con espesores de 12,0 m hasta 35,0 m, geológicamente asociada al material Sapolítico del Batolito Antioqueño.

La tercera unidad se encuentra asociada tanto a las rocas ígneas del Batolito propiamente dicho (colores rojizos) como al material saprolitizado (matices amarillos) que caen en los rangos de resistividad desde 1.100 hasta 2.800 Ohm-m. En general se trata de un cuerpo periclinal a la morfología del terreno con espesores que superan la profundidad de estudio (mayores a 70,0 m) que ha sufrido procesos de alteración diferencial hacia las partes más superficiales. Las resistividades no se presentan tan altas como los observados en perfiles anteriores, pero la respuesta es coherente con la geología local en donde se muestra claramente la disposición espacial de las secuencias presentes. Por otra parte, no se evidencian variaciones laterales importantes en los valores de resistividad que indiquen la presencia de estructuras asociadas a la tectónica local.

Las unidades descritas no presentan las condiciones ideales que permitan inferir la existencia de acuíferos importantes a lo largo del perfil.

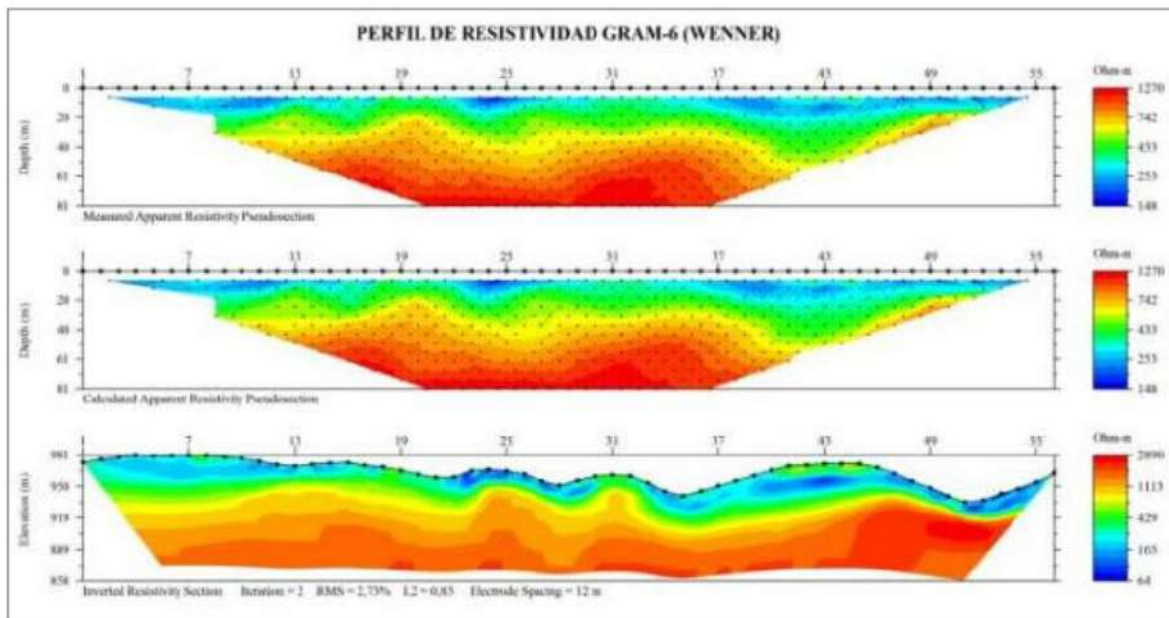


Figura 5.1.6.10 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-6 (F-F')

Fuente: Integral S.A., 2018

VII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-7 (G-G')

El perfil (Figura 5.1.6.11) atraviesa una sección de la quebrada La Palestina situada al suroriente del cerro Gramalote. Morfológicamente el centro del perfil se encuentra sobre una terraza aluvial relativamente plana y hacia los límites laterales se aprecian colinas que sobrepasan los 900 msnm.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cinco (5) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,89% y por su posición espacial en el perfil. Se utilizan configuraciones Schlumberger y Wenner proporcionando similares resultados en ambos casos.

La primera unidad geológico-geoelectrica corresponde a los materiales presentes en la parte superior de la colina, correspondiente al lado derecho del perfil (sector suroriental) entre los electrodos No. 41 al No. 48, cuyas resistividades caen en el rango de 1.200 Ohm-m hasta los 2.300 Ohm-m, valores reflejados por cantos y bloques caídos, alterados y embebidos en una matriz saprolítica. Su ocurrencia es restringida y su espesor no supera los 11,0 m. En el perfil están representados por las tonalidades amarillas y rojas hacia la parte superior.

La segunda unidad geológica-geoelectrica se encuentra definida por los rangos de resistividad desde 12 hasta los 130 Ohm-m, expresado por los matices azules hasta celestes y restringidos a las partes bajas en las terrazas aluviales cuaternarias (electrodos No. 20 hasta el No. 35) con un espesor que no excede los 10,0 m.

La tercera unidad agrupa las resistividades del orden de 130 Ohm-m hasta los 1.000 Ohm-m y se representan en el perfil por tonalidades verdes. Se encuentran expuestas a lo largo de todo el perfil y corresponden geológicamente al saprolítico del Batolito Antioqueño, con un alto grado de alteración. Su espesor es variable, aumentando progresivamente desde el lado izquierdo del perfil (G) donde alcanza los 12,0 m hasta los 45,0 m en su parte derecha (G').

La cuarta unidad representa geológicamente al material saprolítico con un grado menor de alteración que la unidad anterior. Está simbolizado por los tonos anaranjados y amarillos con resistividades del orden de 1.000 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m.

La quinta unidad representa el macizo rocoso correlacionable con rocas ígneas fresca del Batolito Antioqueño, el cual muestra valores de resistividad superiores a los 2.000 Ohm-m y representados en el perfil por las tonalidades rojas. Los espesores asociados superan a la profundidad de estudio. El perfil permite observar una discontinuidad lateral en los valores de resistividad, desde su centro hacia la derecha, lo que hace pensar en la existencia de una posible falla asociada a una tectónica post-Cretácica. Posiblemente se trate de una falla de fuerte buzamiento que provoca el desplazamiento de un bloque y su posterior alteración saprolítica diferencial.

Hidrogeológicamente no se presentan unidades interesantes que posean características hidráulicas y dimensiones favorables para el almacenamiento de importantes volúmenes de agua subterránea.

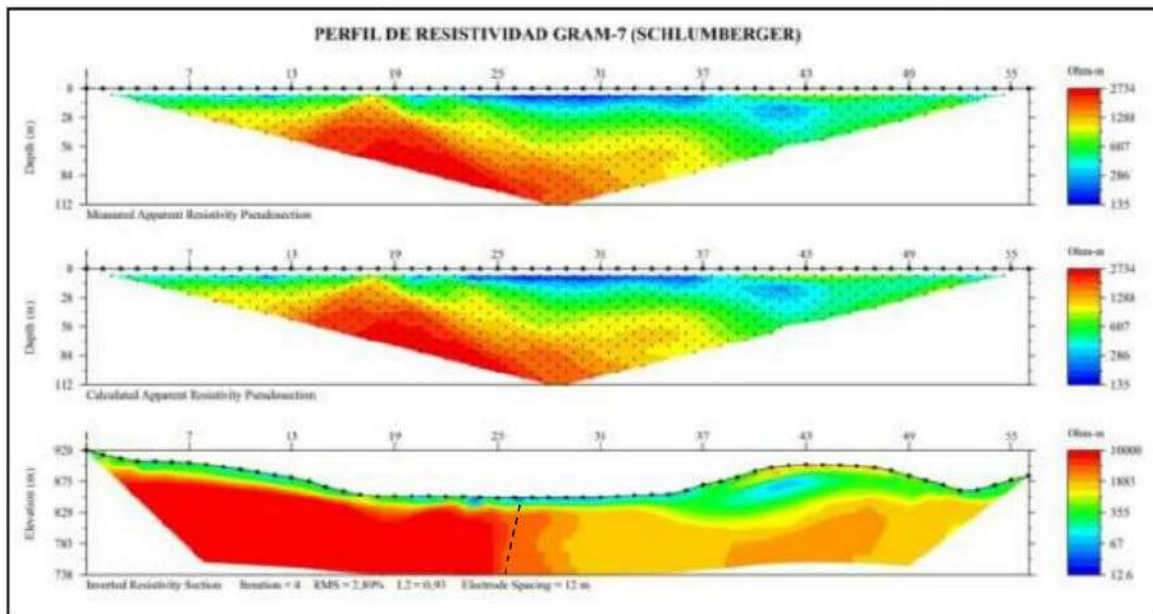


Figura 5.1.6.11 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-7 (G-G')

Fuente: Integral S.A., 2018

VIII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-8 (H-H')

Perfil ubicado en dirección norte-sur, cubriendo una sección de la quebrada Palestina y el carretable a la finca del Iris. La longitud total es de 660 m., con un espaciado entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar una profundidad de exploración aproximada de 150,0 m (Figura).

El modelo geológico – geoelectrico agrupa cuatro (4) unidades basadas en el contraste de las resistividades, en el conocimiento de la geología local y su distribución a lo largo del perfil. Las configuraciones Wenner y Schlumberger arrojaron resultados similares.

La primera unidad corresponde a los materiales aflorantes en las partes superiores del perfil, específicamente entre los electrodos No. 12 al No. 18 y No. 43 al No.56 con resistividades promedio de 2.000 Ohm-m (matices amarillos y rojos). Los pequeños afloramientos presentes en campo corresponden a bloques y cantos de rocas dioríticas caídas y alteradas hasta de tamaños métricos. El espesor de esta unidad no excede los 12,0 m.

La segunda unidad agrupa resistividades desde 32 hasta 180 Ohm-m aproximadamente, las cuales en el perfil están representadas por las gamas azules. Esta unidad aparece restringida hacia las zonas de piedemonte en las quebradas y geológicamente corresponden a sedimentos poco consolidados como arenas y limos que forman la base del lecho de estas y de antiguos paleocauces. El espesor de esta unidad no excede 1,0 m. La tercera unidad es más continua a lo largo del perfil G-G' y está representada por las tonalidades celestes y verdes. Los valores de resistividades oscilan entre los 180 y los 900 Ohm-m, con espesores muy variables desde los 30,0 m (electrodos No. 32 al No. 35)

hasta los 100,0 m. Geológicamente corresponden al Saprolito producto de la alteración del basamento ígneo existente.

La cuarta unidad incumbe a los materiales que aparecen hasta la profundidad de estudio y a lo largo de todo el perfil con resistividades superiores a los 900 Ohm-m, representados por las coloraciones amarillas (Saprolito) y tonalidades rojizas que representan a rocas del Batolito Antioqueño en donde se observa que existen alteraciones diferenciales. Al parecer pueden ocurrir componentes tectónicos locales que provocan las grandes variaciones en espesores de la segunda unidad geológica-geoelectrica, relacionados a posibles fallamientos, considerando la uniformidad de dicha unidad en varios perfiles interpretados anteriormente.

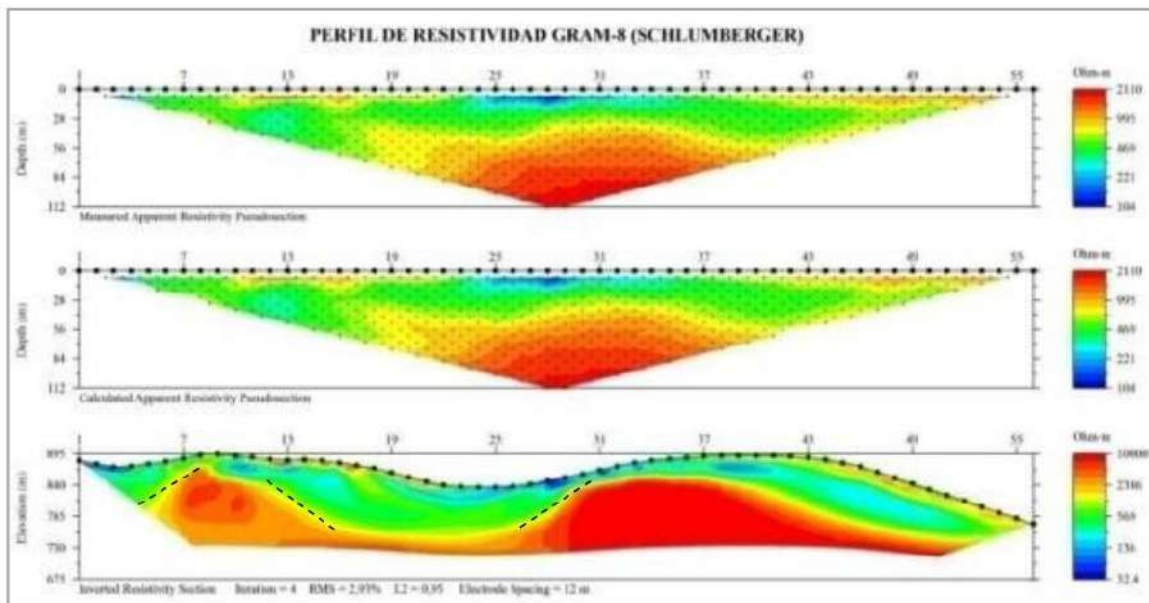


Figura 5.1.6.12 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-8 (H-H')

Fuente: Integral S.A., 2018

IX. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-9 (I-I')

Ubicado sobre una sección de la quebrada Guacas. Morfológicamente el sitio está conformado por una colina que alcanza los 1.026 msnm. hacia el sector suroriental y desciende hasta los 960 msnm., formando una planicie aluvial hacia la parte central y noroccidental. La longitud total es de 550 m., con espaciamento entre electrodos de 10,0 m. La profundidad total alcanzada que utiliza la configuración Schlumberger es de 108,0 m con respecto a la superficie del terreno (Figura 5.1.6.13).

Con base a la respuesta de las resistividades obtenidas en el perfil PG-9, se interpretan cuatro (4) unidades geológicas geoelectricas correlacionables con las unidades anteriormente reportadas en los perfiles PG-1 al PG-8. El Error Medio Porcentual es de 2,71% lo que indica una buena respuesta del subsuelo frente a la inyección de corriente.

La primera unidad corresponde a bloques caídos embebidos en material saprolítico expuestos hacia las partes altas de la colina entre los electrodos No. 8 al No. 14. Están

representados en el perfil por las tonalidades amarillas y rojizas cuyas resistividades fluctúan de 1.500 Ohm-m hasta 3.000 Ohm-m.

La segunda unidad interpretada corresponde a los materiales propios del relleno de la terraza aluvial (limos arenosos, arcillas limosas), caracterizados por estar saturados y poseer bajas resistividades. Afloran desde el piedemonte de la colina por toda la planicie, representados en el perfil por los tonos azules, reflejando valores de resistividad entre 51 y 200 Ohm-m. Los espesores asociados promedios no exceden los 8,0 m.

La tercera unidad asociada a la colina presente en el extremo izquierdo del perfil se encuentra simbolizada por las tonalidades verdes que se exponen desde el electrodo No.1 hasta el No.22 que reflejan resistividades desde 200 Ohm-m hasta los 1.300 Ohm-m. Geológicamente equivale al material saprolítico con moderado grado de alteración, alcanzando un espesor cercano a los 40,0 m.

La cuarta unidad que refleja valores de resistividad superiores a los 1.300 Ohm-m, está representada por los matices amarillos (valores entre 1.300 y 1.800 Ohm-m aproximadamente) que atañen a rocas moderadamente saprolitizadas y por las tonalidades rojas (valores superiores a 1.800 Ohm-m) que equivalen al basamento ígneo propiamente dicho. No se evidencian discontinuidades laterales en los valores de resistividad que permitan el reconocimiento de estructuras tectónicas a lo largo del perfil.

Según los valores de resistividad y el conocimiento de la geología, no existen unidades hidrogeológicas de buena permeabilidad que indiquen potenciales acuíferos.

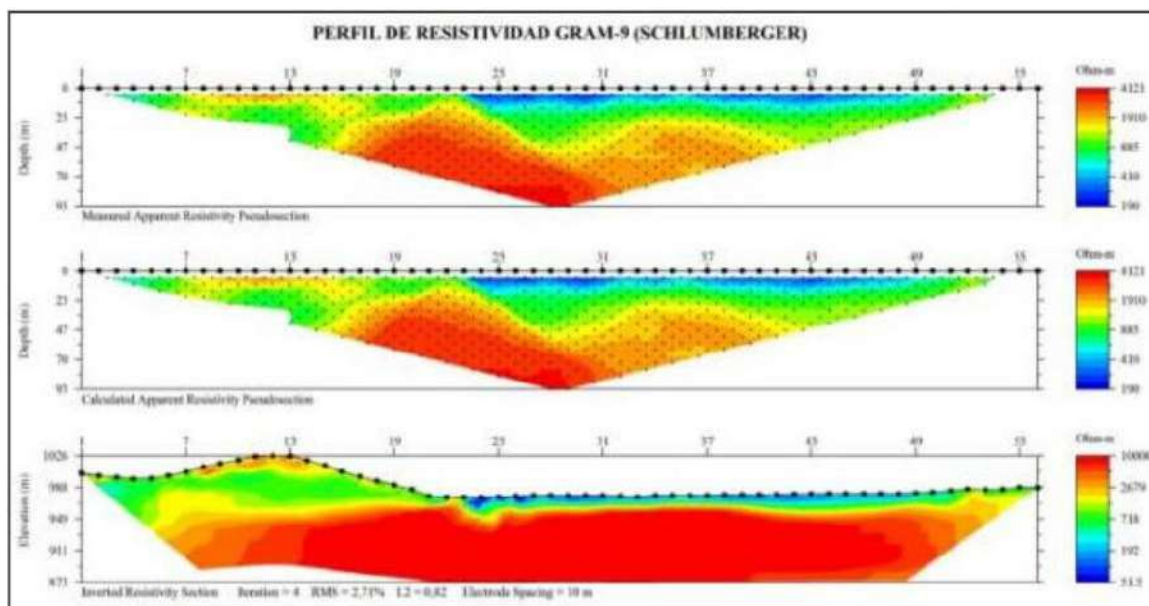


Figura 5.1.6.13 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-9 (I-I')

Fuente: Integral S.A., 2018

X. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-10 (J-J')

Se levanta cercano al sector Las Margaritas. Tiene una dirección N73°W con un espaciamiento entre electrodos de 12,0 m., para alcanzar la longitud total de 660 m y una profundidad máxima de investigación de 136,0 m (Figura 5.1.6.14).

De la interpretación de la imagen generada utilizando la configuración Schlumberger se agrupan según los contrastes de resistividad al menos tres (3) unidades geológico-geoelectricas localizadas a lo largo del perfil y que son correlacionables con las existentes en los perfiles anteriores.

La unidad representada por las tonos azules y celestes restringidos hacia el sector de la quebrada (electrodos No. 38 al No. 43), presentan rangos de resistividad del orden de 79 Ohm-m hasta 350 Ohm-m, reflejados por sedimentos poco consolidados que forman el lecho de la quebrada y cuyo espesor no sobrepasa los 10,0 m. En general están constituidos por arenas limosas y gravas arenosas saturadas.

Una segunda unidad se presenta a lo largo de todo el perfil y está representada por las tonalidades verdes cuyas resistividades van desde los 350 Ohm-m hasta los 1100 Ohm-m y representan al Saprolito. Sus espesores son variables, pero en general oscilan entre 20,0 y 50,0 m.

La tercera y última unidad geológica-geoelectrica, ocurre hacia la base del perfil con valores de resistividad desde 1.100 Ohm-m hasta 2.200 Ohm-m, simbolizados por los matices naranjados amarillentos que equivalen al material saprolítico moderadamente alterado.

Los tonos rojos que representan resistividades mayores a 2.200 Ohm-m están reflejados por rocas ígneas algo alteradas del Batolito Antioqueño. Los espesores superan a la profundidad de estudio (mayores a 80,0 m.).

No se observan discontinuidades laterales que indiquen zonas activas de fallamientos e hidrogeológicamente las unidades presentes no poseen propiedades hidráulicas óptimas para corroborar la existencia de acuíferos importantes en el sector.

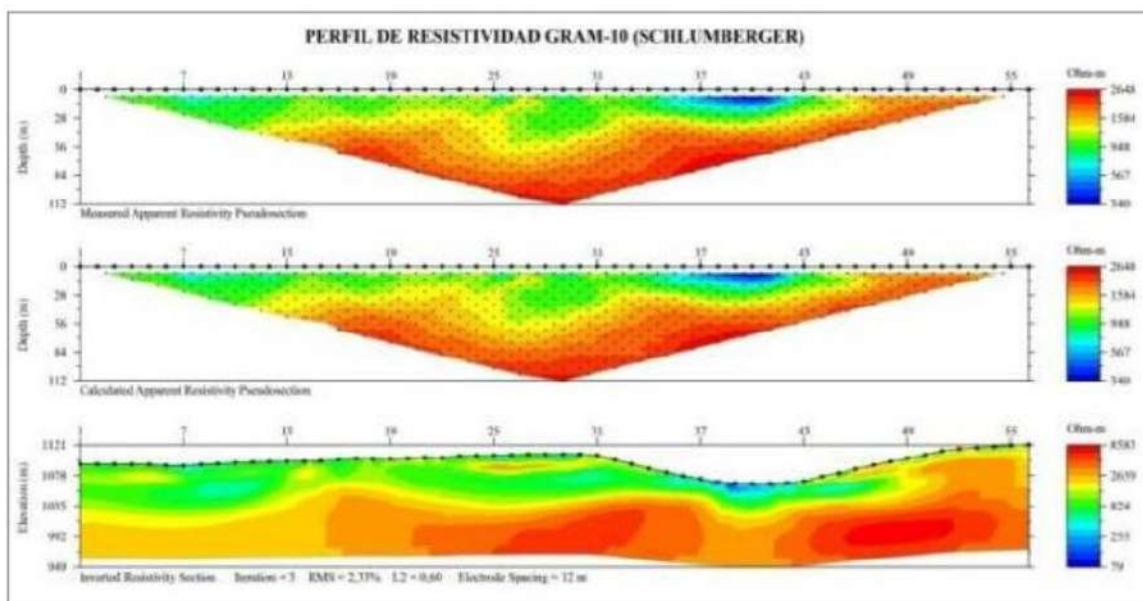


Figura 5.1.6.14 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-10 (J-J')

Fuente: Integral S.A., 2018

XI. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-11 (K-K')

Ubicado sobre una sección de la Quebrada Guacas, al Sur del cerro Gramalote. Se levanta en un sector topográficamente semiplano que supera los 1.000 m.s.n.m (Figura 5.1.6.15). La longitud total de 660 m. El espaciamiento entre electrodos se hace cada 12,0 m., logrando alcanzar una máxima profundidad de investigación cercana a los 120,0 m con respecto al nivel de la superficie del terreno.

El modelo geológico-geoelectrico bajo configuración Schlumberger muestra contrastes de resistividades bien marcados que permiten agruparlas en cuatro unidades bien diferenciadas. El RMS es bajo del orden de 2,65% indicando con ello que el tratamiento de los datos tiene un buen grado de confiabilidad.

La primera unidad geológica-geoelectrica representa los valores de resistividad altos que se encuentran aflorando en la sección derecha del perfil entre los electrodos No. 49 al No. 56, simbolizados por matices rojizos con resistividades de 2.900 Ohm-m hasta 3.500 Ohm-m. Por su ubicación y considerando la presencia de materiales sueltos, esta unidad es correlacionable con bloques y cantos caídos por gravedad embebidos en matriz saprolítica, la cual rellena un flanco de la colina.

Una segunda unidad que exhibe tonalidades celestes y azules (resistividades en el orden de 44 Ohm-m hasta 180 Ohm-m), representa los sedimentos saturados asociados a las terrazas aluviales cuaternarias aflorantes en casi toda la sección. El espesor asociado no sobrepasa los 12,0 m con respecto al nivel circundante.

Una tercera unidad se relaciona con material saprolítico que refleja valores de resistividad entre 180 y 900 Ohm-m (tonos verdes), los cuales subyacen discordantemente a las unidades anteriores. El espesor es variable entre 20,0 m. y 40,0 m.

La cuarta unidad representa tanto el material saprolítico de poco espesor como el basamento constituido por rocas ígneas inalteradas del Batolito Antioqueño. Las resistividades superan los 900 Ohm-m hasta los 4000 Ohm-m y los espesores hasta la profundidad de estudio superan los 80,0 m.

No se observa claramente la existencia de discontinuidades laterales que puedan asociarse a posibles fallamientos tectónicos.

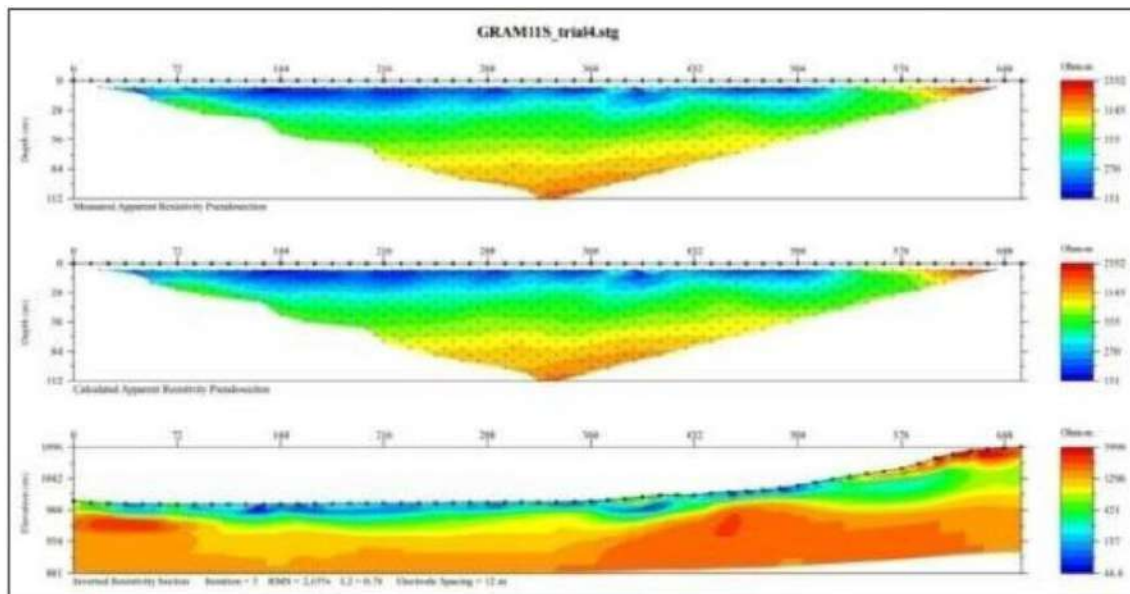


Figura 5.1.6.15 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-11 (K-K')

Fuente: Integral S.A., 2018

XII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-12 (L-L')

Este perfil fue propuesto para investigar el extremo suroccidental del área de influencia directa de Gramalote, hacia las partes altas de la quebrada Guacas a una altitud superior a los 1.045 msnm. El espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo N18°E. La profundidad máxima de exploración cercana a los 130,0 m, aproximadamente (Figura 5.1.6.16).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,95%.

La primera unidad geológica-geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos superiores a 4.000 Ohm-m, representados en el perfil por las tonalidades rojizas y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 4 al No. 7 y del No. 49 al No. 53. Sus espesores son variables, pero no superan los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con bloques de rocas cuarzodioríticas de tamaños métricos embebidos dentro de una matriz saprolítica que han sido trasladados por gravedad, como se puede observar en algunos afloramientos existentes en el sector.

La segunda unidad geológica-geoelectrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 140 Ohm-m hasta los 500 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde tanto a material saprolítico muy alterado como a depósitos de paleocauces que han sido rellenos por sedimentos areno limosos.

La tercera unidad está representada por el rango de resistividades que va desde los 500 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m (rango de tonalidades verdes), distribuida a lo largo de todo

el perfil con espesores promedios de 40,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie.

La cuarta unidad geológica-geoelectrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores. El rango de resistividad supera los 2.000 Ohm-m, representado por las gammas rojizas. Dicha unidad es correlacionable con el Batolito Antioqueño.

A lo largo del perfil L-L' se presentan las unidades expuestas discordantemente y posiblemente existan fallamientos asociados a la tectónica predominante de la región. Por la litología fina a muy fina predominante en las unidades expuestas, permite colegir que presentan una pobre capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

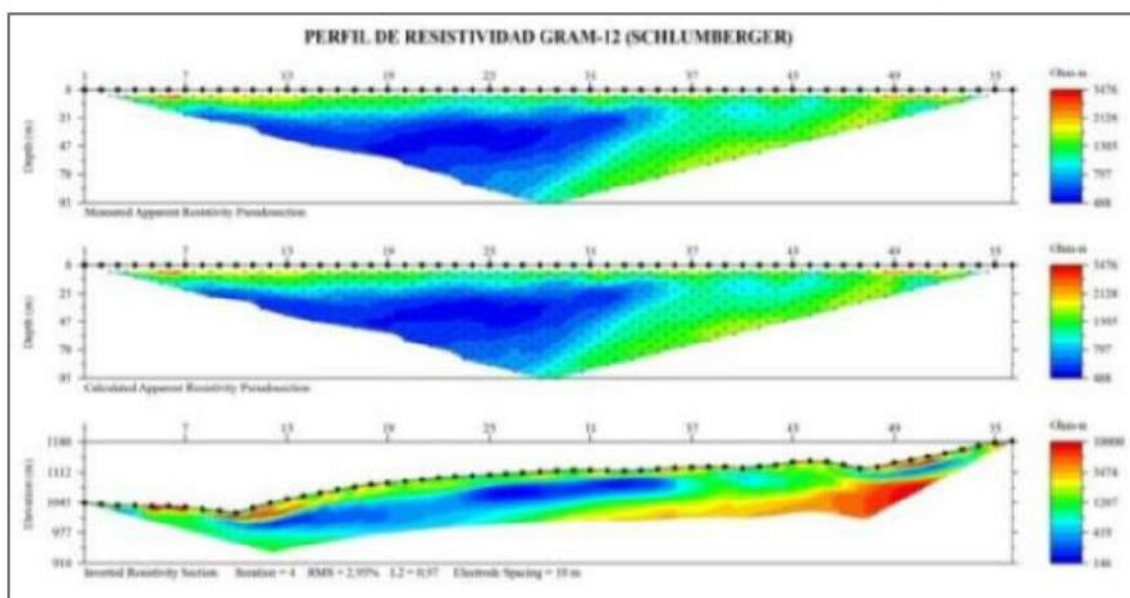


Figura 5.1.6.16 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-12 (L-L')

Fuente: Integral S.A., 2018

XIII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-13 (M-M')

El perfil en general cubre la terraza aluvial del extremo Norte del Río Nus. La profundidad máxima de estudio alcanza los 113,0 m., con respecto al nivel circundante, utilizando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m bajo configuración Schlumberger.

La imagen interpretada (Figura 5.1.6.17) permite discriminar las unidades geológico-geoelectricas por el contraste de resistividades que presentan cada una de estas a lo largo del perfil, que posee un RMS bajo de 2,38% y que asegura que la inversión matemática del modelo sea confiable.

Para corroborar los resultados obtenidos en el perfil PG-2 en el cual se observan variaciones laterales que hacen pensar en posibles fallamientos asociados a una tectónica regional, se localiza el perfil PG-13. Un total de tres (3) unidades geológico-geoelectricas son reconocidas a lo largo del perfil.

La primera corresponde a sedimentos limo arenosos saturados asociados a las terrazas aluviales formadas a lo largo del Río Nus, con un espesor promedio de 10,0 m, las cuales aparecen a lo largo del perfil desde el electrodo No. 14 hasta el No.19 y del electrodo No. 30 al 56, con resistividades desde 45 Ohm-m hasta 170 Ohm-m, representados por las tonalidades azules.

La segunda unidad aparece relacionada con el material saprolítico producto de la alteración de la roca ígnea del Batolito Antioqueño, y representado en el perfil por las tonalidades desde celestes hasta amarillas, con rango de resistividades entre 170 Ohm-m y 1.100 Ohm-m. Subyace a la unidad anterior, observándose un incremento importante en el espesor a partir del electrodo No. 34, que supera los 70,0 m.

La tercera unidad está representada por las tonalidades naranjas hasta rojizas cuyos valores de resistividad se encuentran por encima de los 1,100 Ohm-m. Aparece cubriendo prácticamente la parte izquierda del perfil desde el electrodo No. 1 hasta el electrodo No. 34 y se encuentra subyaciendo a las unidades anteriormente mencionadas. Los espesores hasta la profundidad de estudio van desde los 100,0 m. (parte izquierda del perfil) hasta los 30,0 m. (parte derecha del perfil). Geológicamente corresponde al basamento ígneo formado en el sector posiblemente con una predominancia de granodioritas y granitos totalmente competentes, especialmente en donde las resistividades superan a los 5.000 Ohm-m, y por material saprolitizado de poco espesor asociadas a las tonalidades naranjas. El contraste lateral en las resistividades que representan la segunda y tercera unidad geológica-geoelectrica es evidente en la Figura , y permite junto con la interpretación del perfil PG-2 asociar la presencia de elementos tectónicos en el sitio. Estas evidencias coinciden con los estudios geológicos superficiales llevados a cabo en el sector que indican la presencia de lineamientos regionales asociados a una tectónica activa post-Cretácica

Hidrológicamente la única unidad que puede considerarse potencialmente acuífera, son los cuerpos aluviales, que, aunque presenta poco espesor, presentan una granulometría y comportamiento apropiado para la acumulación y transmisividad de agua. Las unidades geológicas dos y tres, no se consideran unidades potencialmente acuíferas dado que correspondiente a los materiales saprolíticos, por su fina granulometría, presentan condiciones muy pobres de almacenamiento de aguas subterráneas.

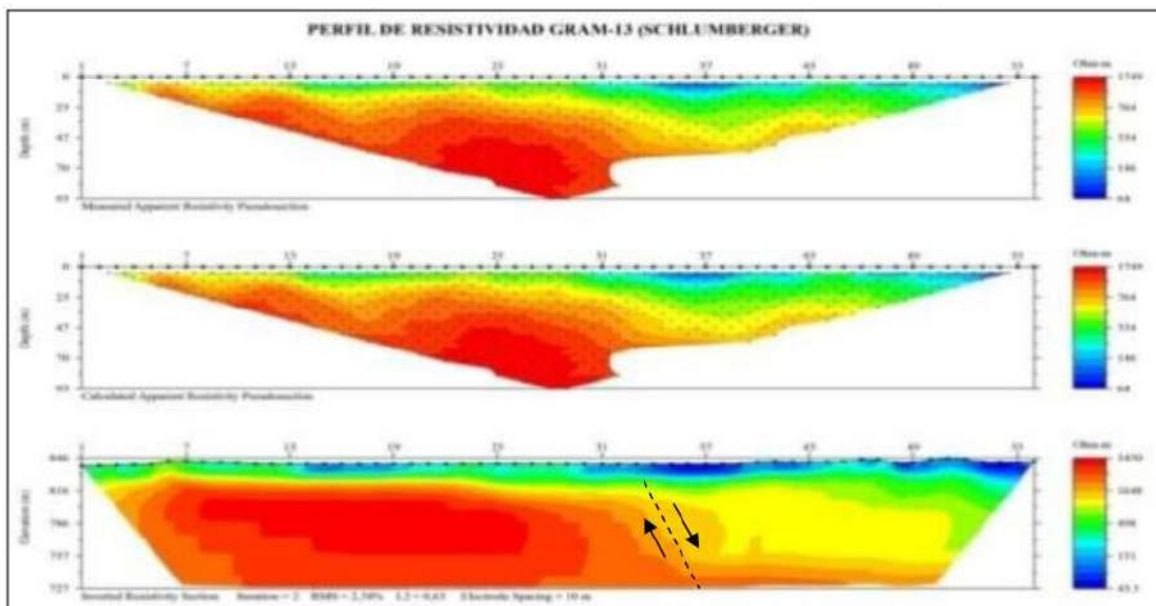


Figura 5.1.6.17 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-13 (M-M')

Fuente: Integral S.A., 2018

XIV. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-14 (N-N')

Perfil ubicado en el sector denominado “El Banco” al Occidente de las instalaciones del campamento del proyecto Gramalote. Se levanta sobre potreros en donde no se observan afloramientos de roca. En general la cobertura corresponde a material saprolítico conformado por arena arcillosa seca de color, a una altitud cercana a los 850 msnm. El espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo casi norte - sur. La profundidad máxima de exploración es cercana a los 110,0 m., aproximadamente (Figura 5.1.6.18).

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado en comando Dipolo-Dipolo se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 3,59%.

La primera unidad geológica-geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales muy superficiales que presentan rangos entre 1.550 y 2.350 Ohm-m, representados en el perfil por la tonalidades rojizas y amarillentas que afloran entre los intervalos de electrodos No.16 al No.55. Hacia el lado occidental del perfil, entre los electrodos No.1 al No.15 representada por la gama azul, refleja valores de resistividad de 150 Ohm-m. Sus espesores son variables, pero no superan los 10,0 m. La correlación geológica para esta unidad se asocia con fragmentos de rocas ígneas de poco diámetro embebidos dentro de una matriz saprolítica.

La segunda unidad geológica-geoelectrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m.). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 112 Ohm-m hasta los 350 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde a material saprolítico muy alterado como a depósitos de paleocauces que han sido rellenados por sedimentos areno limosos.

La tercera unidad está representada por el rango de resistividades que va desde los 400 Ohm-m hasta los 2.000 Ohm-m (rango de tonalidades verdes y amarillas), distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores promedios de 25,0 m. Geológicamente corresponde al Saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie, especialmente hacia el lado izquierdo del perfil.

La cuarta unidad geológica-geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores. El rango de resistividad oscila desde los 4.000 hasta los 7.500 Ohm-m, representado por las gammas rojizas. Dicha unidad es correlacionable con el Batolito Antioqueño. A lo largo del perfil N-N' se presentan las unidades expuestas discordantemente. La morfología corresponde a relieves de colinas donde no se evidencian estructuras tectónicas. Por la litología fina a media predominante en las unidades expuestas, permite colegir que presentan una moderada capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

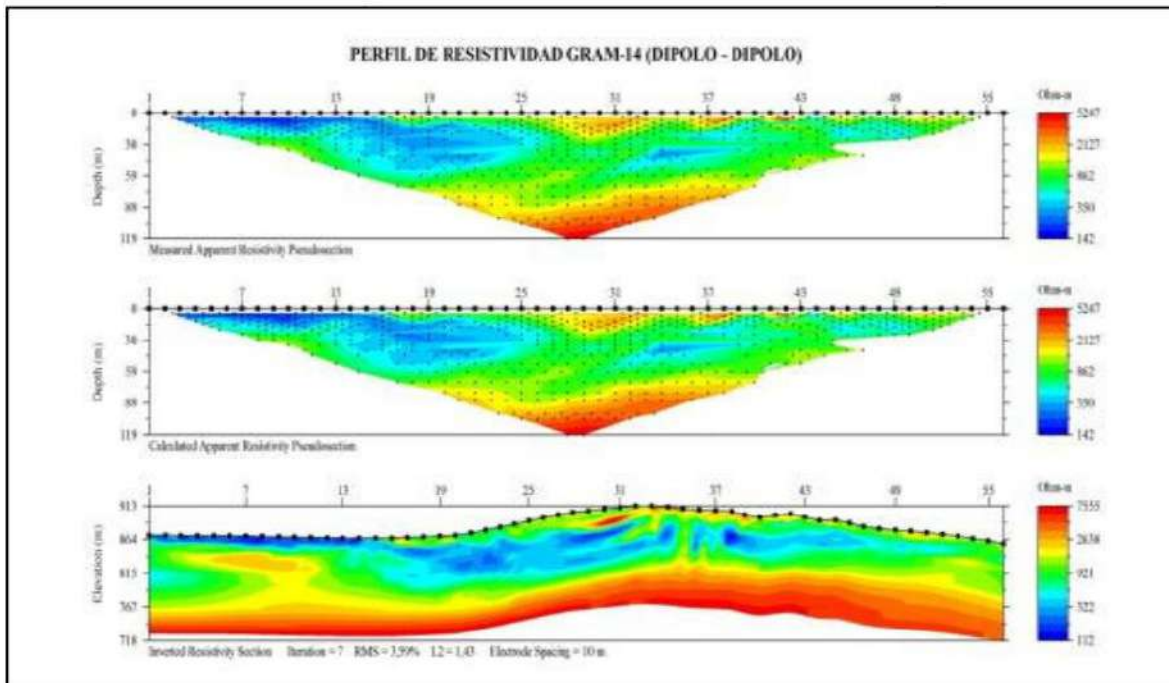


Figura 5.1.6.18 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-14 (N-N')

Fuente: Integral S.A., 2018

XV. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-15 (O-O')

Está ubicado hacia el sector denominado “Manizales” sobre potreros de pendiente pronunciada en donde no se observan afloramientos de roca. En general corresponden a material saprolítico compuesto por limos arcillosos de color marrón claro. A partir del electrodo No. 47 se aprecian cárcavas de meteorización, reflejadas por matices azules que presentan valores de resistividad bajos, del orden de 65 Ohm-m. El mencionado perfil (Figura 5.1.6.19) se dispuso con un rumbo de N 26°E y tiene una longitud de 550 m.,

logrando un espaciamiento entre electrodos de 10,0 m., para alcanzar una profundidad aproximada a los 110,0 m en las partes topográficamente más altas.

La corrida se realiza bajo el comando Wenner. En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente dos (2) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo, del orden de 2,73%. Se puede observar que en la parte superior de la Figura aflora una unidad geoeléctrica caracterizada por resistividades que van desde 480 hasta los 820 Ohm-m, representada por las tonalidades amarillentas y verdes con espesores aproximados a los 30,0 m. Esta unidad geoeléctrica es correlacionable a una secuencia geológica dominada por material saprolitizado, cuyo protolito ígneo corresponde a la unidad geoeléctrica más inferior

La unidad geoeléctrica inferior está representada por la variación de las tonalidades amarillas hasta las rojas con resistividades entre los 850 Ohm-m y los 3.500 Ohm-m, la cual no aflora, presentando una discontinuidad lateral a partir del electrodo No.37 que puede corresponder zona de fracturamiento de dirección N60°E. Dicha unidad geoeléctrica se correlaciona con el basamento ígneo, constituido por tonalitas, y cuarzodioritas poco y no meteorizados.

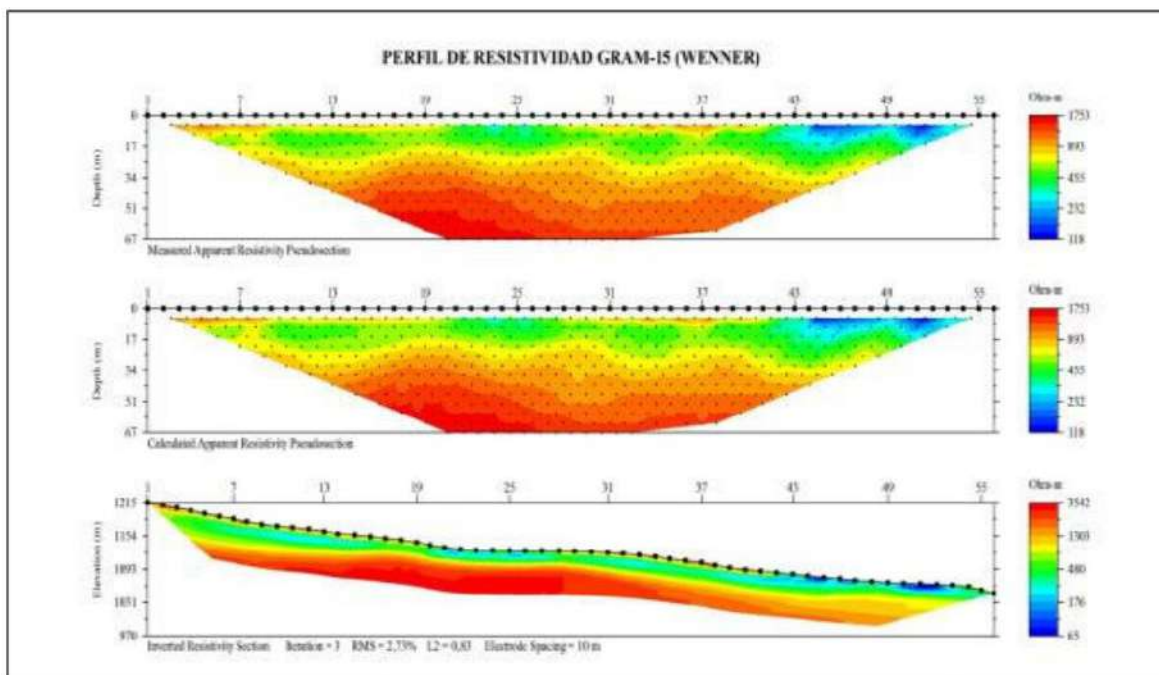


Figura 5.1.6.19 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-15 (O-O')

Fuente: Integral S.A., 2018

XVI. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-16 (P-P')

Este perfil (Figura 5.1.6.20) ubicado en el sector conocido como Peñas Azules, es propuesto para investigar el extremo sur central del área de influencia directa de Gramalote, hacia las partes altas de la quebrada La Palestina, a una altitud cercana a los 1.011 msnm. La morfología es abrupta con colinas de fuerte pendientes, extendiéndose la línea sobre una zona de potreros con cobertura saprolítica. El espaciamiento entre cada electrodo es

de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total 550,0 m lineales con rumbo este-oeste. La profundidad máxima de exploración cercana a los 110,0 m aproximadamente.

En el modelo geológico-geoeléctrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 3,30%.

La primera unidad geológica-geoeléctrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos desde 1.700 hasta 2.600 Ohm-m, representados en la parte central del perfil (Figura) por la tonalidades pardo-amarillentas, las cuales afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 45 y del No. 46 al No. 56 por matices azules con resistividades bajas del orden de 98 Ohm-m. Sus espesores son variables, pero no superan los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con bloques de rocas ígnea de tamaños métricos embebidos dentro de una matriz saprolítica que han sido trasladados por gravedad, como se puede observar en algunos afloramientos existentes en el sector y hacia el extremo oriental la presencia de limos arenosos.

La segunda unidad geológica-geoeléctrica se presenta hacia el centro del perfil y hacia el lado izquierdo con espesores importantes (30,0 m.). Los valores de resistividad son bajos y van desde los 98 Ohm-m hasta los 290 Ohm-m, representados por las gamas azules y celestes. Geológicamente corresponde a material saprolítico muy alterado de granulometría fina.

La tercera unidad está representada por el rango resistividades de 870 Ohm-m, representado por la gama verdes, distribuida a lo largo de todo el perfil con espesores promedios de 40,0 m. Geológicamente corresponde al saprolito con una meteorización diferencial hacia la superficie.

La cuarta unidad geológica-geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en la zona de meteorización incipiente del basamento ígneo propiamente dicho, el cual está compuesto por materiales más compactos que los anteriores y ocurre hacia los bordes del perfil. El rango de resistividad oscila entre 1.720 y 2.590 representado por las gamas café-amarillentas. A lo largo del perfil P-P' se presentan las unidades expuestas discordantemente y no existen fallamientos asociados a la tectónica predominante de la región. Por la litología fina a muy fina predominante en las unidades expuestas, permite inferir que presentan una pobre capacidad de almacenamiento de aguas subterráneas.

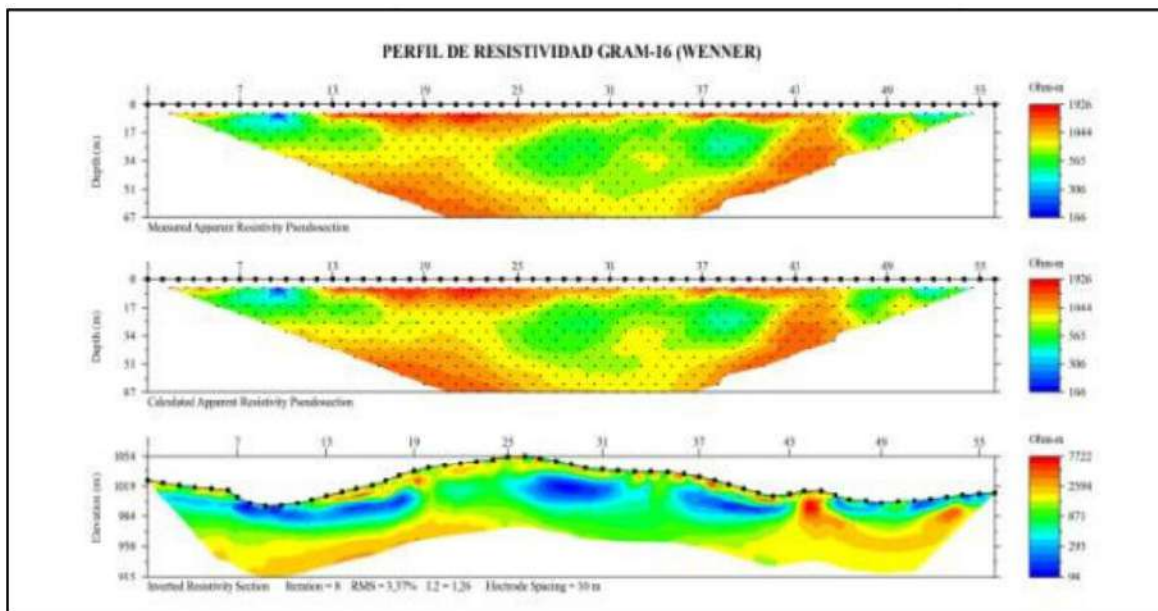


Figura 5.1.6.20 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-16 (P-P')

Fuente: Integral S.A., 2018

XVII. Lectura del perfil geoelectrica continua PG-17 (Q-Q')

Este perfil (Figura 5.1.6.21) se levanta en el sector de la pequeña central Hidroeléctrica La Cascada, cruzando la Quebrada Guacas hacia el cerro Gramalote. En general se observa hacia la izquierda del perfil las terrazas aluviales y hacia la derecha la cobertura de roca saprolitizada, poco consolidada, con una altitud promedio de 910 msnm. Se utilizó el arreglo de Wenner con un espaciamiento entre cada electrodo es de 10,0 m, llegando a alcanzar una longitud total de 550 m lineales con rumbo N80°E.

En el modelo geológico-geoelectrico interpretado se diferencian principalmente cuatro (4) unidades, definidas por los valores de resistividad real obtenidos con un Error Medio Porcentual (RMS) bajo de 2,95%.

La primera unidad geoelectrica diferenciada por los contrastes de resistividades, corresponde a los materiales superficiales que presentan rangos de resistividad entre 44 y 170 Ohm-m representados en el perfil por los tonos azul y celeste y que afloran entre los intervalos de electrodos No. 1 al No. 6 y del No. 20 al. No.48. Sus espesores son variables, pero se estima que no exceden los 10,0 m., en las partes más altas. La correlación geológica para esta unidad se asocia con material saprolítico de granulometría fina. Entre los electrodos 7 y 19 que corresponde al cruce de la Quebrada Guacas, la resistividad aumenta al rango de 500 Ohm-m, equivalente a sedimentos de arenas y grava de la terraza aluvial, representada por la gama verde claro.

La segunda unidad que infrayace a la anterior, se caracteriza por ocurrir a lo largo de todo el perfil, alcanzando a aflorar entre los electrodos No.49 al No.55, representado por el tono verde que corresponde al material saprolítico más arenoso, reflejando valores de resistividad alrededor de los 650 Ohm-m. El espesor promedio no supera los 20,0 m.

La tercera unidad geológica-geoeléctrica se encuentra representada por el rango de resistividades que va desde los 1.900 hasta los 2.580 Ohm-m, representado por las tonalidades amarilla y café-amarillentas, distribuida hacia los bordes del perfil con espesores mayores de 50,0 m. Geológicamente corresponde a la roca ígnea que va alterando su textura conforme alcanza la superficie del terreno.

La cuarta unidad geoeléctrica corresponde a los valores de resistividad que se enmarcan en el basamento ígneo propiamente dicho. El rango de resistividad se encuentra entre los 2.600 y los 10.000 Ohm-m y simbolizado por las tonalidades rojizas. Dicha unidad es correlacionable con rocas frescas del Batolito Antioqueño. En esta roca posiblemente exista una estructura de falla hacia el sector del electrodo No.37, la cual puede estar asociada al tren de fallas que existe entre las quebradas Guacas y La Colorada.

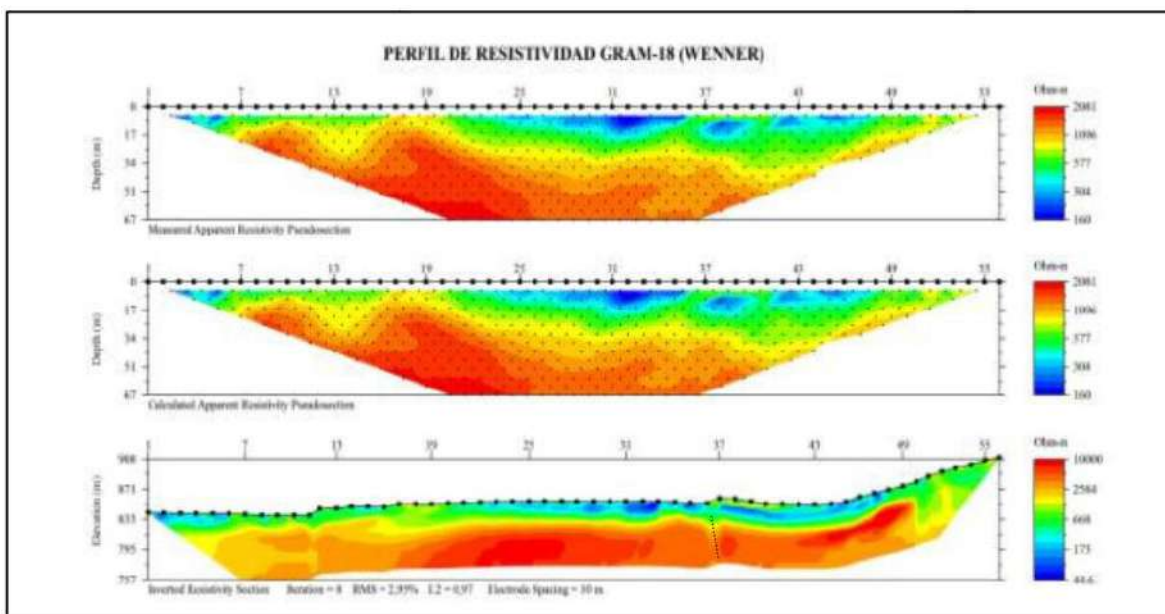


Figura 5.1.6.21 Imagen de resistividad generada del perfil geoelectrico PG-17 (Q-Q')

Fuente: Integral S.A., 2018

C. Ensayos de refracción sísmica y MASW Inteinsa, 2025

En la Tabla 5.1.6.5 y Figura 5.1.6.22 se presentan los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo por Inteinsa en el área de estudio del proyecto.

Tabla 5.1.6.5 Localización de las líneas de refracción sísmica Inteinsa, 2025

Ensayo	Coordenadas Punto inicial			Coordenadas punto final			Longitud
	Este (m)	Norte (m)	Z	Este (m)	Norte (m)	Z	
Línea 1	4.789.402	2.277.694	865	4.789.462	2.277.590	884	115
Línea 2	4.789.600	2.277.515	880	4.789.496	2.277.456	857	115
Línea 3	4.789.640	2.277.606	881	4.789.700	2.277.502	852	115
Línea 4	4.789.223	2.277.465	848	4.789.305	2.277.555	858	115

Fuente: Inteinsa, 2025

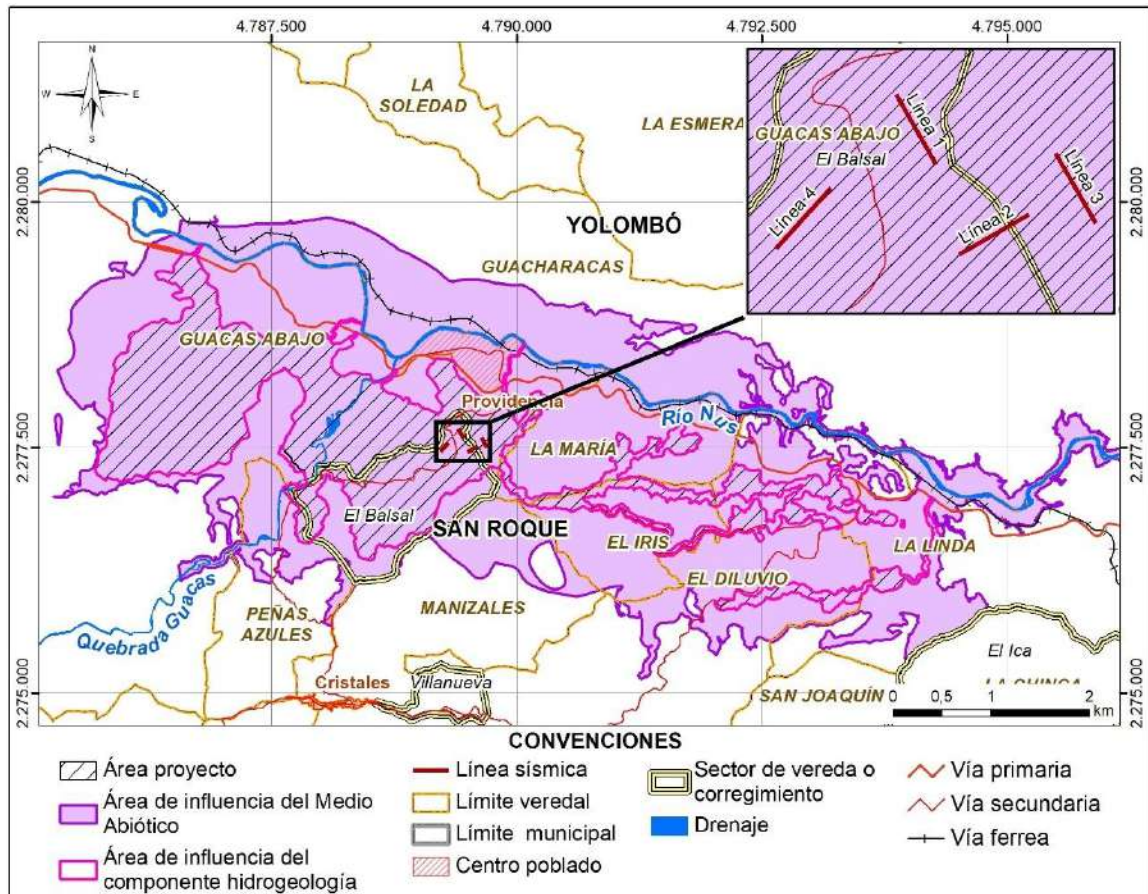


Figura 5.1.6.22 Localización en planta de los ensayos de refracción sísmica y MASW llevados a cabo en el área de interés del proyecto

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Inteinsa, 2025

a. Resultados Línea 1

I. Línea de refracción sísmica LRS-1

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG25-003B, muestran una estratigrafía compuesta por cuatro horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV) y roca parcialmente meteorizada a masiva (III-II).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 388 m/s para el suelo residual, 944 m/s para el saprolito, 1202 m/s para la zona de transición, y 1975 m/s para el horizonte rocoso.

La Figura 5.1.6.23 muestra la distribución metro a metro de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

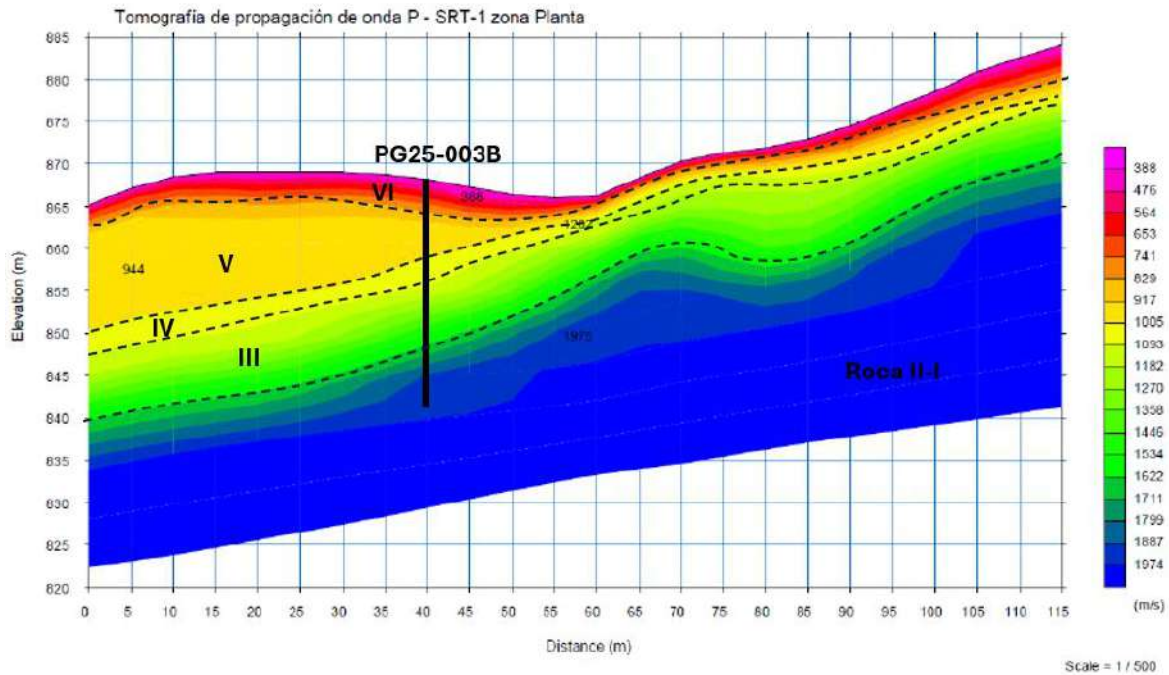


Figura 5.1.6.23 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-1

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-1

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_GEOFISICA_INTEINSA_2025, se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.24, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-1, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona.

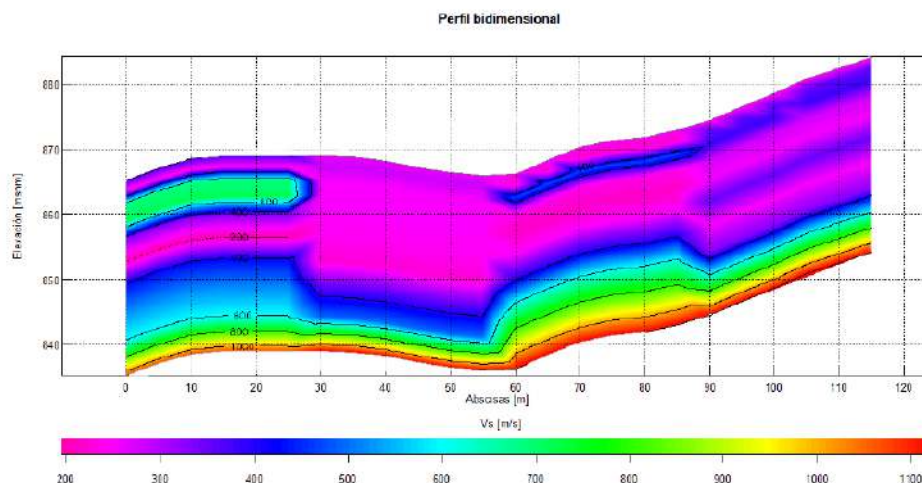


Figura 5.1.6.24 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-1

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad promedio de la onda S para la línea 1 es de 468 m/s.

b. Resultados Línea 2

I. Línea de refracción sísmica LRS-2

Los resultados obtenidos muestran una estratigrafía compuesta por cuatro horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo–roca (IV) y roca parcialmente meteorizada a masiva (III–II).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 427 m/s para el suelo residual, 998 m/s para el saprolito, 1427 m/s para la zona de transición, y 1855 m/s para el horizonte rocoso.

La Figura 5.1.6.25 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

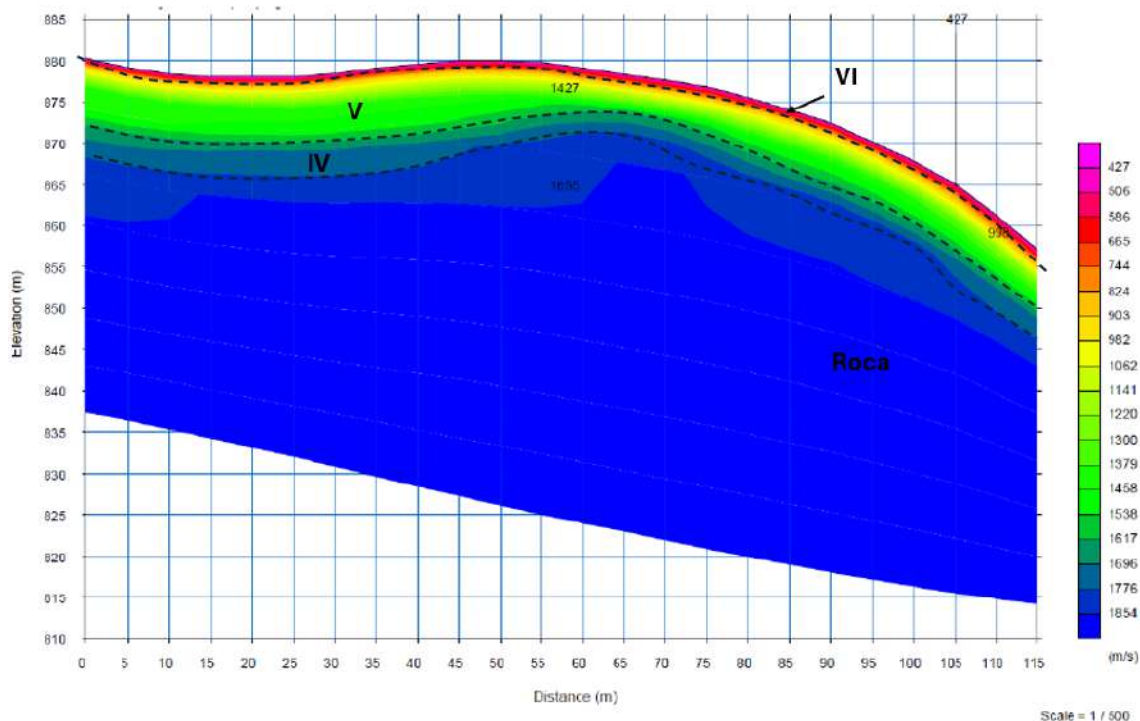


Figura 5.1.6.25 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-2

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-2

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_GEOFISICA_INTEINSA_2025 se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.26, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-2, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona.

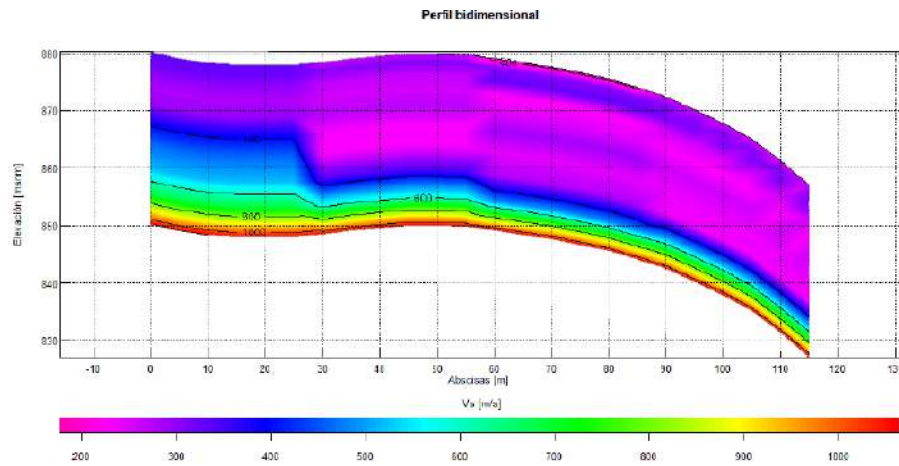


Figura 5.1.6.26 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-2

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad de onda S promedio para la Línea 2 es de 312 m/s.

c. Resultados Línea 3

I. Línea de refracción sísmica LRS-3

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG24-018, muestran una estratigrafía compuesta por cinco horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV), roca moderadamente meteorizada (III) y roca poco meteorizada a masiva (II - I).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 370 m/s para el suelo residual, 579 m/s para el saprolito, 927 m/s para la zona de transición, 1137 m/s para el horizonte roca tipo III y 1416 m/s para el horizonte rocoso tipo II-I.

La Figura 5.1.6.27 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

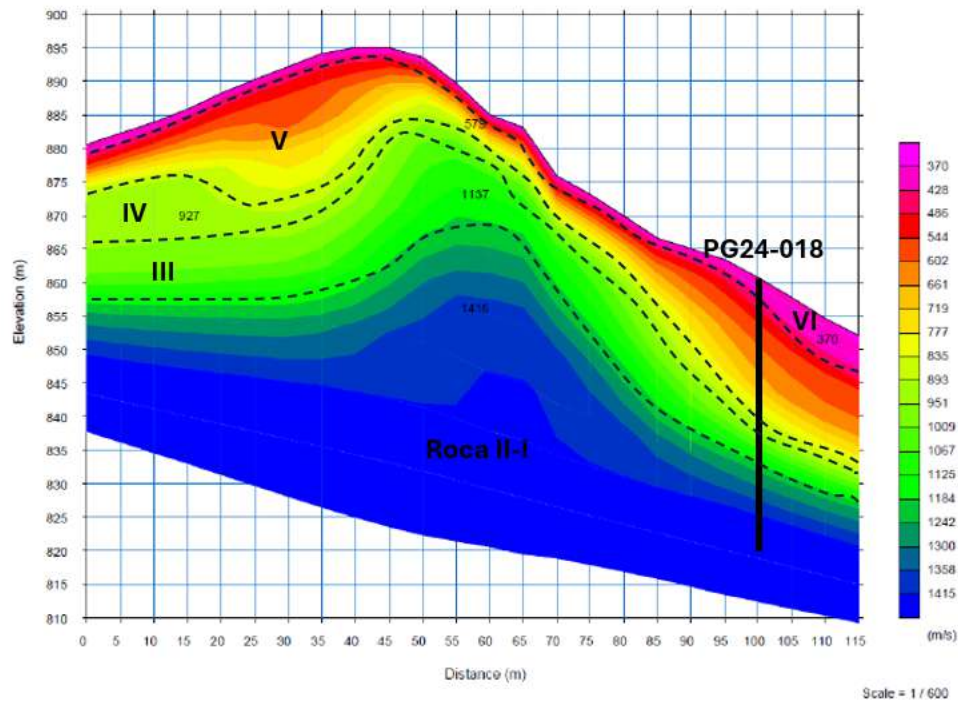


Figura 5.1.6.27 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-3

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-3

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_GEOFISICA_INTEINSA_2025, se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.28, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-3, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo.

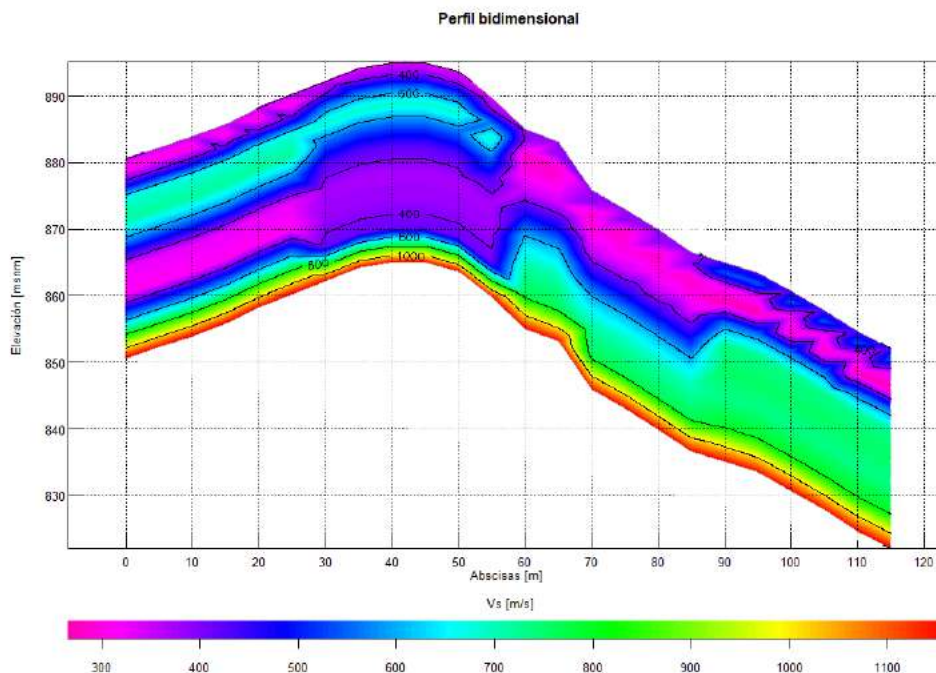


Figura 5.1.6.28 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-3

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad promedio de la onda S para la línea 3 es de 504 m/s.

d. Resultados Línea 4

I. Línea de refracción sísmica LRS-4

Los resultados obtenidos y en correlación con el sondeo PG25-001B, muestran una estratigrafía compuesta por cinco horizontes principales, cuya presencia es coherente con las condiciones geológicas de la zona. Estos estratos se asocian con los niveles de meteorización típicos del macizo rocoso: suelo residual (VI), saprolito (V), transición suelo-roca (IV), roca moderadamente meteorizada – III y roca poco meteorizada a masiva (II - I).

Cada unidad presenta velocidades promedio de propagación de ondas P características, con valores de 353 m/s para el suelo residual, 809 m/s para el saprolito y la transición, 1113 m/s para la zona de roca tipo III, y 1315 m/s para la roca poco meteorizada (II - I).

La Figura 5.1.6.29 muestra la distribución de la propagación sísmica, obtenida mediante el modelo de tomografía sísmica. En ella se evidencia la correspondencia entre las velocidades registradas y los diferentes grados de meteorización del subsuelo.

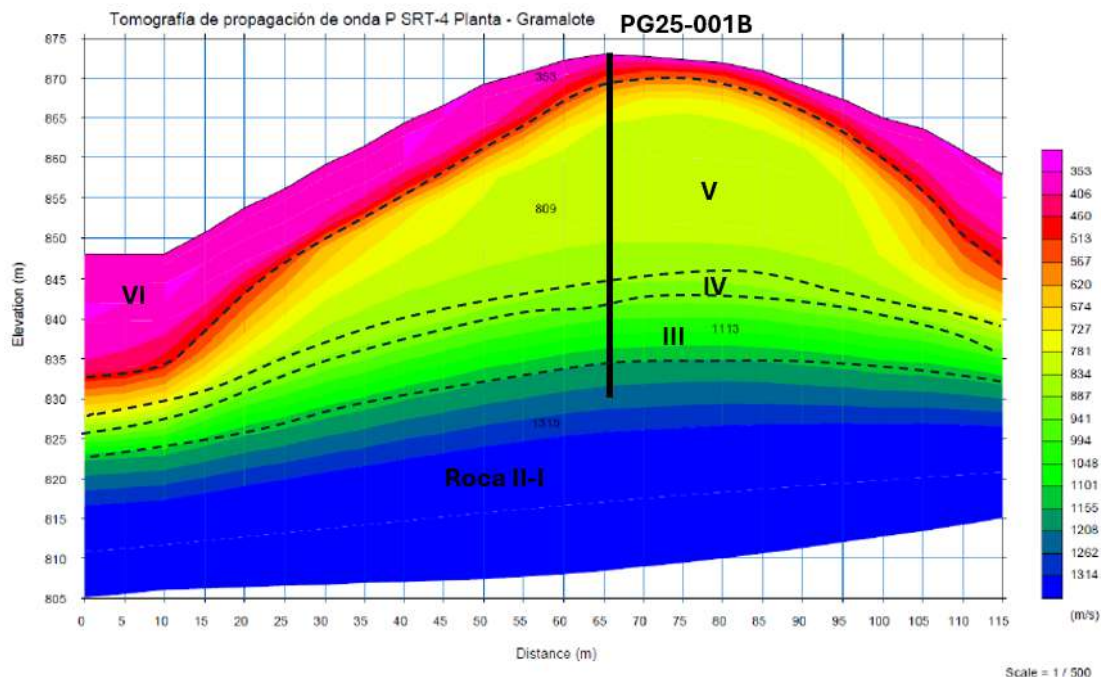


Figura 5.1.6.29 Tomografía de velocidad de las ondas P en la línea LRS-4

Fuente: Inteinsa, 2025

II. Ensayo MASW-4

Una vez obtenidos los perfiles unidimensionales que se muestran a detalle en el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_GEOFISICA_INTEINSA_2025 se realiza la interpolación de la información obtenida en todos los tendidos para la generación de la tomografía bidimensional. En la Figura 5.1.6.30, se presenta la tomografía bidimensional realizada para el ensayo MASW-4, de 110 m de longitud. Se puede ver que se obtuvo una información efectiva de 30 m de profundidad de acuerdo con la toma de datos en campo, lo cual está relacionado con la longitud total disponible para la ejecución del ensayo y el tipo de material en la zona.

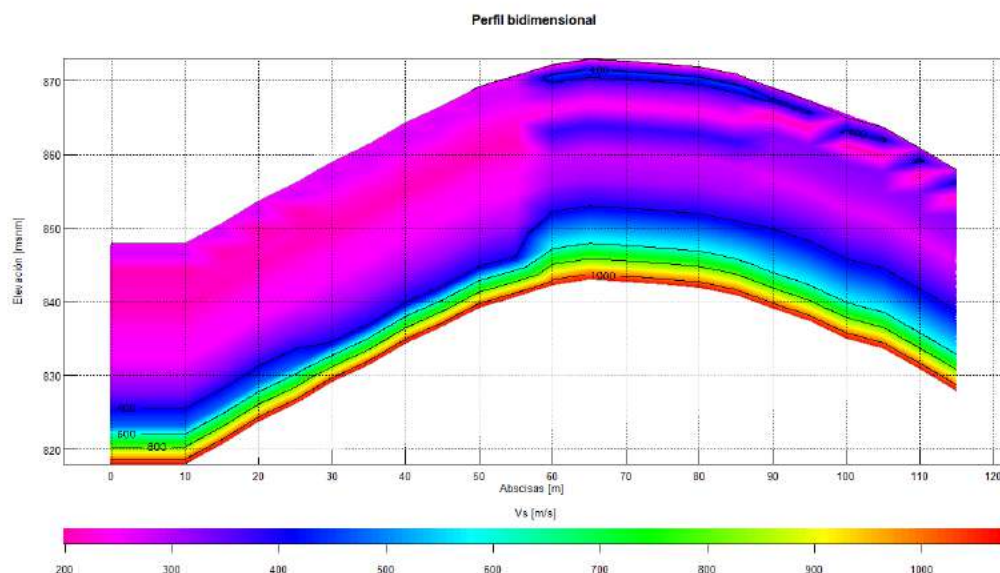


Figura 5.1.6.30 Tomografía de velocidad de propagación de onda de corte MASW-4

Fuente: Inteinsa, 2025

La velocidad promedio de la onda S para la línea 4 es de 304 m/s.

D. Interpretación a partir de la prospección geofísica

A partir de la información geofísica, y en correlación con los sondeos directos, en la Figura 5.1.6.31 se presenta el bloque diagrama geológico, integrando ambos conjuntos de datos.

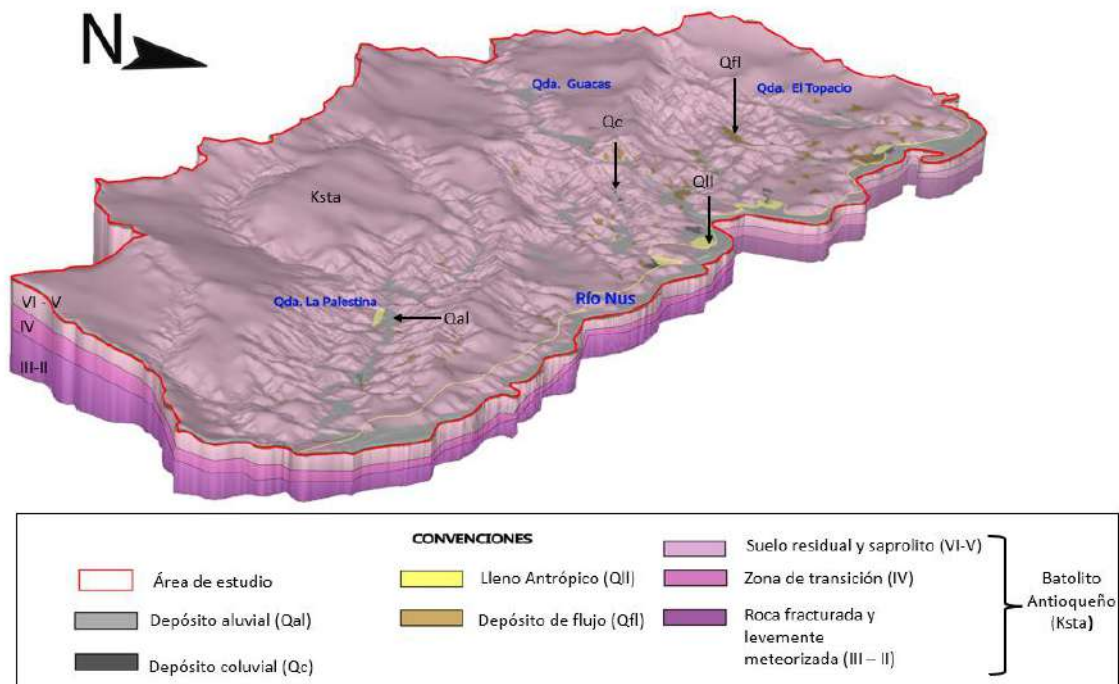


Figura 5.1.6.31 Bloque diagrama de unidades geológicas

Fuente: GCL, 2015 en Integral S.A., 2018

5.1.6.1.3 Evaluación hidrológica

A. Clasificación de cuerpos de agua superficial

Este apartado tiene la finalidad de clasificar los cuerpos de agua superficial en virtud de su conexión hidráulica con las unidades hidrogeológicas para comprender como es la relación entre la recarga, los cuerpos de agua y las unidades hidrogeológicas. Para revisar la fluctuación estacional se usarán los registros de los piezómetros asociados a cada cuerpo de agua.

Los cuerpos de agua superficial, objetos de clasificación, se describen ampliamente en el capítulo de hidrología y son: río Nus, quebrada el Topacio, quebrada San Antonio, quebrada Guacas, quebrada Palestina, quebrada La Colorada y su afluente el Balsal, quebrada La Maria, quebrada El Banco y afluente en el sector El Torito.

Se observa que el agua subterránea se direcciona siguiendo las pendientes del terreno, en sentido principal de sur a norte. La tendencia del flujo se direcciona hacia las corrientes superficiales, sugiriendo la posibilidad de que una parte del sistema hidrogeológico contribuye al aporte de agua a las corrientes superficiales, lo cual es confirmado por los niveles piezométricos que registran niveles en los depósitos aluviales del río Nus y la quebrada Guacas y quebrada Palestina.

Los sondeos exploratorios realizados permiten concluir que se han desarrollado perfiles de suelo, los cuales suelen contribuir a la infiltración de agua y acumulación de la transición suelo roca (horizonte IV).

El proyecto ha realizado mediciones quincenales en piezómetros entre febrero y junio de 2015 y con esta información se analizaron las fluctuaciones de los niveles de agua, en piezómetros cercanos a cuerpos de agua.

Los cuerpos de agua que serán potencialmente afectados por el proyecto son:

- Quebrada San Antonio, por la implantación del depósito San Antonio.
- Quebrada Guacas, por la construcción del canal de desvío de la quebrada Guacas.
- Quebrada Colorada y su afluente Balsal, por la implantación del depósito El Balsal.
- Quebrada La Palestina, por la implantación del depósito G, depósito O y depósito M.
- Afluente en el sector El Torito, por la implantación del depósito El Torito.
- Quebrada La María (afluente), por la implantación del depósito G.
- Afluente sin nombre entre la quebrada La María y quebrada La Colorada, por la implantación del depósito E.
- Afluente sin nombre a la derecha de la quebrada El Torito, por la implantación de depósito L.

La estimación de la conductancia hidráulica se obtendrá con los resultados obtenidos en el modelo numérico como un parámetro de calibración. La estimación de la recarga potencial desde o hacia dichas corrientes y su posible afectación por el proyecto, se presenta en el numeral B

La descripción litológica de los lechos de las principales corrientes es:

- Río Nus: El sustrato es de tipo rocoso-arenoso. aunque en algunas partes hay presencia de limo. Aguas abajo de la desembocadura de la quebrada La Bella. se observan abundantes rocas que hacen parte del sustrato rocoso en este punto. formando playas arenosas sobre el costado izquierdo.
- Quebrada La Colorada: El sustrato es de tipo rocoso y limoso.
- Quebrada El Balsal: El sustrato es principalmente arenoso con presencia de algunas rocas. Aguas abajo de la confluencia de las quebradas La Colorada y El Balsal. el sustrato en su mayoría es de tipo arenoso con fragmentos rocosos distribuidas en todo el lecho. hacia las orillas. en algunos puntos. se observa un sustrato limoso.
- Quebrada El Banco: El sustrato es de tipo arenoso y rocoso. con algunas zonas arcillosas.
- Quebrada San Antonio: El sustrato es de tipo rocoso-arenoso.
- Quebrada La Bella: El sustrato es de tipo arenoso-rocoso con presencia de cantos y bloques en la parte alta. en la parte baja de la quebrada el tamaño de las rocas corresponde a gravas finas a gruesas.
- Quebrada Guacas: El sustrato es de tipo rocoso y arenoso.

- Quebrada La Trinidad: Sustrato arenoso y rocoso.
- Quebrada El Topacio: Esta quebrada presenta características de planicie. ya que el flujo de agua es constante, pero de corriente débil y el sustrato combina limos. arenas finas y arenas de grano grueso.
- Quebrada La Palestina: Presenta sustrato de tipo rocoso-arenoso.

Con base en la descripción del material de los lechos de los ríos, se establece y se presenta en la Tabla 5.1.6.6 el valor de la conductividad hidráulica del lecho de las corrientes reportada por Hidrogeocol, (2012).

Tabla 5.1.6.6 Conductividad hidráulica del lecho de las corrientes superficiales

Cuerpo de agua superficial	Descripción lecho	K (m/d)
Río Nus	Rocoso-Arenoso con presencia de limo	0,5
Quebrada La Colorada	Rocoso-Limoso	0,5
Quebrada El Balsal	Arenoso	2,0
Quebrada El Banco	Arenoso y Rocoso con arcilla	0,1
Quebrada San Antonio	Rocoso-Arenoso	10,0
Quebrada La Bella	Arenoso-Rocoso	5,0
Quebrada Guacas	Rocoso-Arenoso	10,0
Quebrada La Trinidad	Arenoso-Rocoso	5,0
Quebrada El Topacio	Arenoso	2,0
Quebrada La Palestina	Rocoso-Arenoso	10,0

Fuente: Hidrogeocol, 2012

La clasificación de los cuerpos de agua superficial por conexión hidráulica con las aguas subterráneas se presenta en la Tabla 5.1.6.7.

Tabla 5.1.6.7 Clasificación de los cuerpos de agua superficial por conexión hidráulica con las aguas subterráneas

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Río Nus	Si	Se presenta fluctuación estacional en los piezómetros PZA-12-03 PZA-12-08	Recarga indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-3 Depósitos aluviales
Quebrada Topacio	Si	No registra fluctuación en los meses lluviosos PZS-12-12 No desarrolla deposito aluviales de espesor considerable	Recarga entre la UHG-5 y el cuerpo de agua. El nivel piezométrico fluctúa por encima de la cota del cauce	UHG-5 Saprolito arenoso

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Quebrada El Banco	Parcial (solo en los sectores donde hay depósito aluvial)	DH-WR-201 No tiene datos suficientes para determinar fluctuación. No se registran fluctuaciones PZS-12-03	Solo recarga en la parte baja de la quebrada entre el cuerpo de agua y la UHG- 3 (Aluvial). En la parte media de la quebrada no hay recarga entre el cuerpo e agua y la UHG-4	UHG-4 Suelo residual Los niveles se presentan a 2 m por debajo del cauce de la quebrada El Banco.
Quebrada San Antonio	No	No se registran fluctuaciones en los piezómetros DH-WR-203 y PZS-12-03 Ligeras fluctuaciones se registraron en PZR-12-02 y PZA-12-07.	Sin recarga entre el cuerpo de agua y la UHG- 5, UHG-6, UHG-7	UHG-5 Saprolito arenoso y UHG-6 zona de transición entre la roca fresca y el Saprolito. Todas las fluctuaciones de los niveles registradas en piezómetros se encuentran por debajo del cauce de la quebrada San Antonio.
Quebrada Guacas Se analizó en la parte alta, media y baja	Parcial (solo en los sectores donde hay depósito aluvial) en la parte media y en la parte baja de la quebrada Guacas	Se presenta fluctuación estacional en los piezómetros PZA-12-02 PZA-12-03 No se registran fluctuaciones en los piezómetros en roca PZR-13-05 PZR-13-07 PZR-13-09 No se registran fluctuaciones en los piezómetros en suelo PZS 13-17	Recarga indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-3 Depósitos aluviales y UHG-7 Roca Fresca fracturada UHG-6 zona de transición entre la roca fresca y el Saprolito.

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Quebrada La Colorada	Si En la Quebrada La Colorada parte alta, también se da en los sectores donde hay depósito aluvial	Se presenta fluctuación estacional en los piezómetros PZR-13-06	Recarga indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-7 Roca Fresca fracturada UHG-3 Depósitos aluviales
Quebrada La Maria	Si	La fluctuación en el piezómetro PZS-13-18 (Golder, 2017), localizado en la parte bajo muestra ascensos en mayo y noviembre, coincidiendo con el pico de lluvia. La fluctuación en el piezómetro BH-5M-08 (Golder, 2017), muestra ascenso en octubre, coincidiendo con el pico de lluvia. Los niveles de agua en los piezómetros BH-5M-08 y BH-5M-03, fluctúa en la misma cota que el cauce de la quebrada La Maria.		UHG-6 zona de transición entre la roca fresca y el Saprolito. El piezómetro BH-5M-03 (Golder, 2017), No muestra fluctuación.

Cuerpo de agua superficial	Conexión hidráulica	Fluctuación estacional de la conexión	Tipo de recarga potencial	Unidad hidrogeológica relacionada
Afluente sector El Torito	No	La fluctuación en el piezómetro PZR-12-04 (Golder, 2017) es suave y sin picos y refleja que no hay relación con las épocas lluviosas. Los niveles se presentan a 32 m por debajo del cauce del afluente del sector El Torito.	No recarga	UHG-7 Roca Fresca fracturada
Quebrada Palestina	Parcial (solo en los sectores donde hay depósito aluvial)	PZA-12-05 PZS-12-05 DH-TM-100 Los registros de Golder (2017) muestran fluctuación de niveles en los meses más lluviosos en el piezómetro PZA-12-05. La fluctuación en los piezómetros DH-TM-100 y PZS-12-05 (Golder, 2017) indica que no hay conexión entre las lluvias y la fluctuación de niveles, y los niveles registrados se encuentran 2m por debajo del cauce base de la quebrada Palestina.	Recarga indirecta (solo en el aluvial) hacia las aguas subterráneas y viceversa según época hidrológica.	UHG-3 Depósitos aluviales, en la parte baja de la quebrada. UHG-5 Saprolito arenoso.

Fuente: Integral S.A., 2025

B. Estimación de la recarga potencial

a. Balance Hídrico

El método de balance hídrico para la estimación de la recarga por precipitación utiliza el principio de la conservación de masa para un volumen definido, y es el resultado de la diferencia entre los flujos de entrada y salida del sistema, menos el cambio en el almacenamiento. Para su cálculo se hace uso de la Ecuación 5.1.6.1.

$$R = P - ESC - ETP - \Delta S_{max}$$

Ecuación 5.1.6.1 Recarga potencial

Donde:

R: recarga potencial, en mm/año

P: precipitación, en mm/año

ESC: escorrentía superficial, en mm/año

ETP: evapotranspiración potencial, en mm/año

ΔS_{max} : coeficiente de capacidad de almacenamiento

El cálculo de la escorrentía superficial (Ecuación 5.1.6.2) de la zona de interés se realizó mediante el método desarrollado por el Soil Conservation Service (S.C.S.), el cual relaciona la precipitación y el coeficiente de capacidad de almacenamiento S, teniendo en cuenta las pérdidas por infiltración, evapotranspiración y retención definidas según el método.

$$ESC = \frac{(P - 0,2 \times S)^2}{P + 0,8 \times S}$$

Ecuación 5.1.6.2 Escorrentía superficial o Precipitación efectiva

Dónde:

ESC: escorrentía superficial, en mm/día

P: precipitación diaria, en mm

ΔS_{max} : coeficiente de capacidad de almacenamiento

El coeficiente de capacidad de almacenamiento representa el almacenamiento máximo en un área determinada debido principalmente a fenómenos de infiltración, y en menor medida a la detención, intersección y evaporación. Esta variable está relacionada con la definición del número de curva (CN), que a su vez es función de las siguientes características: (1) Cobertura vegetal, (2) Tipo y uso del suelo, (3) Impermeabilidad y (4) Humedad antecedente (Chow, Maidment, & Mays, 1994). Para este proceso se utilizó la Ecuación 5.1.6.3.

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254$$

Ecuación 5.1.6.3 Coeficiente de capacidad de almacenamiento

Para la definición del número de curva, se clasificó el tipo de suelo en cuatro categorías hidrológicas, según el método del S.C.S. (Tabla 5.1.6.8). En orden decreciente de permeabilidad las categorías hidrológicas son: A, B, C y D, donde la categoría "A" corresponde a suelos gravosos y/o arenosos con una alta permeabilidad hidráulica y la

categoría “D” está conformada por suelos arcillosos altamente plásticos (Chow, Maidment, & Mays, 1994).

Tabla 5.1.6.8 Descripción del grupo de suelo

Grupo de suelo	Descripción
A	Arena profunda, suelos profundos depositados por el viento, limos agregados
B	Suelos poco profundos depositados por el viento, marga arenosa
C	Margas arcillosas, margas arenosas poco profundas, suelos con bajo contenido orgánico y suelos con alto contenido de arcilla.
D	Suelos que se expanden significativamente cuando se moja, arcillas altamente plásticas y ciertos suelos salinos

Fuente: Hidrología aplicada (Chow, Maidment, & Mays, 1994)

Según la litología del suelo, en la zona de estudio se encuentran depósitos coluviales y coluvio-aluviales, rocas ígneas, sedimentos coluvio-aluviales, zonas urbanas y cuerpos de agua. Los cuales en términos de permeabilidad se pueden definir con una capacidad media, lo cual hace alusión a tipo de suelo C (Figura 5.1.6.32).

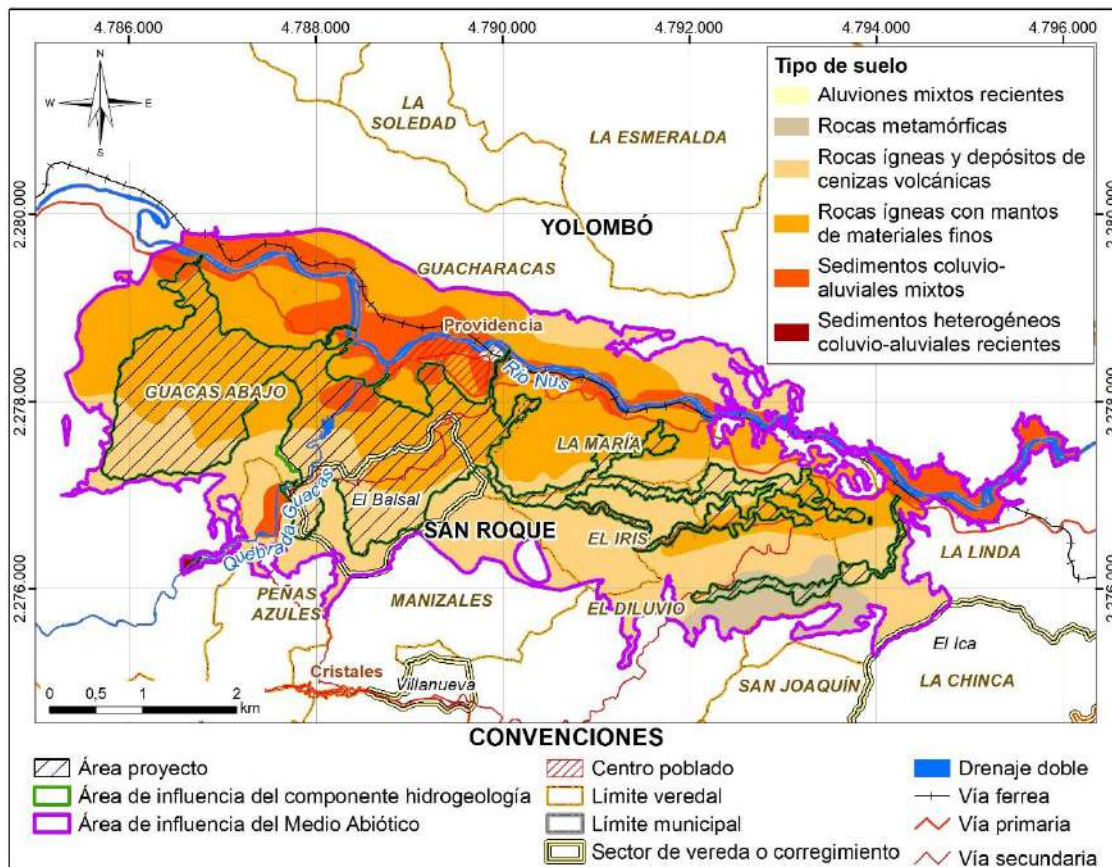


Figura 5.1.6.32 Mapa de grupos hidrológicos en el área de influencia

Fuente: Integral S.A., 2025

En la Figura 5.1.6.33 se presentan las coberturas encontradas en el área de estudio.

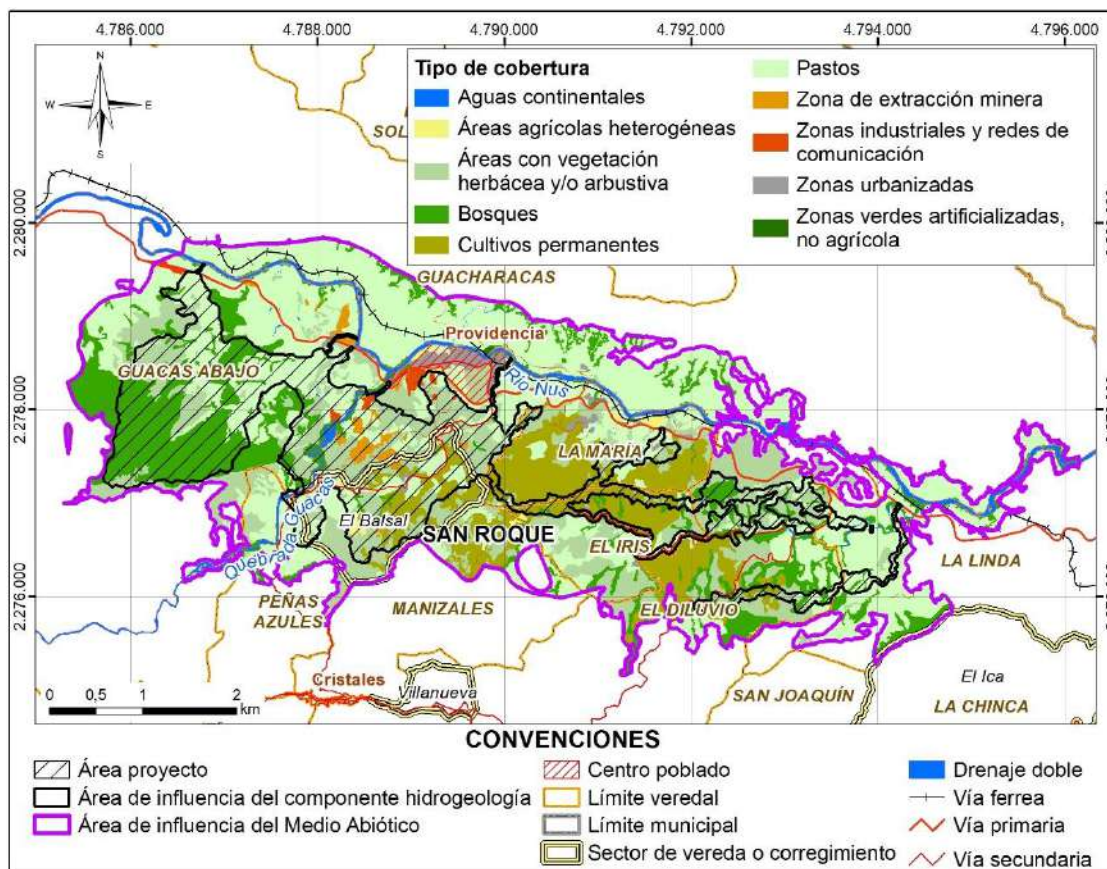


Figura 5.1.6.33 Mapa de coberturas de suelo en el área de estudio

Fuente: Integral S.A., 2025

De acuerdo con las coberturas de suelo y los grupos hidrológicos encontrados en el análisis se definieron los números de curva según el método del S.C.S., utilizando valores de CN entre 71 y 94 coherentes con la cobertura Figura 5.1.6.33. Una vez definidos los números de curva para cada zona se calcula el coeficiente de capacidad de almacenamiento (Smax) -Ver Ecuación 5.1.6.3.

Con el fin de estimar la recarga bajo las tres condiciones extremas (normal, cálida y húmeda), se analizaron los registros de precipitación mensual de las estaciones de precipitación cercanas a la zona de estudio a partir de los índices de fenómenos macroclimáticos ONI (Índice Oceánico del Niño), el cual es el índice estándar que utiliza la NOAA para identificar eventos cálidos (El Niño) y fríos (La Niña) en el océano Pacífico tropical, y el MEI (Índice Multivariado del Fenómenos de El Niño) que a partir de una combinación de seis variables atmosféricas y marinas, reconoce las anomalías características del fenómeno ENSO

A partir de esa comparación, se caracteriza como escenario medio o normal, el año 2020 como un año neutro cuyo comportamiento es similar a las condiciones medias de los datos históricos analizados. Definido el periodo de análisis, se realizó un análisis espacial de la

lluvia, con las estaciones con información disponible para este año mediante la aplicación de los polígonos de Thiessen. En la Tabla 5.1.6.9 se muestra las áreas aferentes de cada estación y su porcentaje de influencia, con estos valores se estimó la serie de precipitación para el año de análisis.

Tabla 5.1.6.9 Áreas aferentes por polígonos de Thiessen

Estación	San Roque	Santo Domingo	Guayabito	Yolombo	Granja Exp. El Nus
Área aferente (m ²)	138.296.992,90	20.498.730,88	54.264.863,71	45.068.110,17	41.623.970,97
%Área	46,14%	6,84%	18,10%	15,04%	13,89%

Fuente: Integral S.A., 2025

Con la serie de precipitación diaria definida, se realizó el cálculo de la escorrentía (Ver Ecuación 5.1.6.2) con base en la abstracción inicial (i_a) asumida como el 20% del almacenamiento potencial (S). El resultado a escala diaria de esta variable fue acumulado para obtener el valor mensual de la escorrentía para cada área. Posteriormente se realizó la estimación de la infiltración, a nivel mensual, como la diferencia entre la precipitación y la escorrentía.

Una vez se estiman la infiltración y la evapotranspiración potencial a nivel mensual se evalúa la humedad del suelo como la diferencia entre estas dos variables, con el fin de verificar la posibilidad de que se presente recarga.

En la Figura 5.1.6.34 se presentan los resultados obtenidos para la zona de estudio.

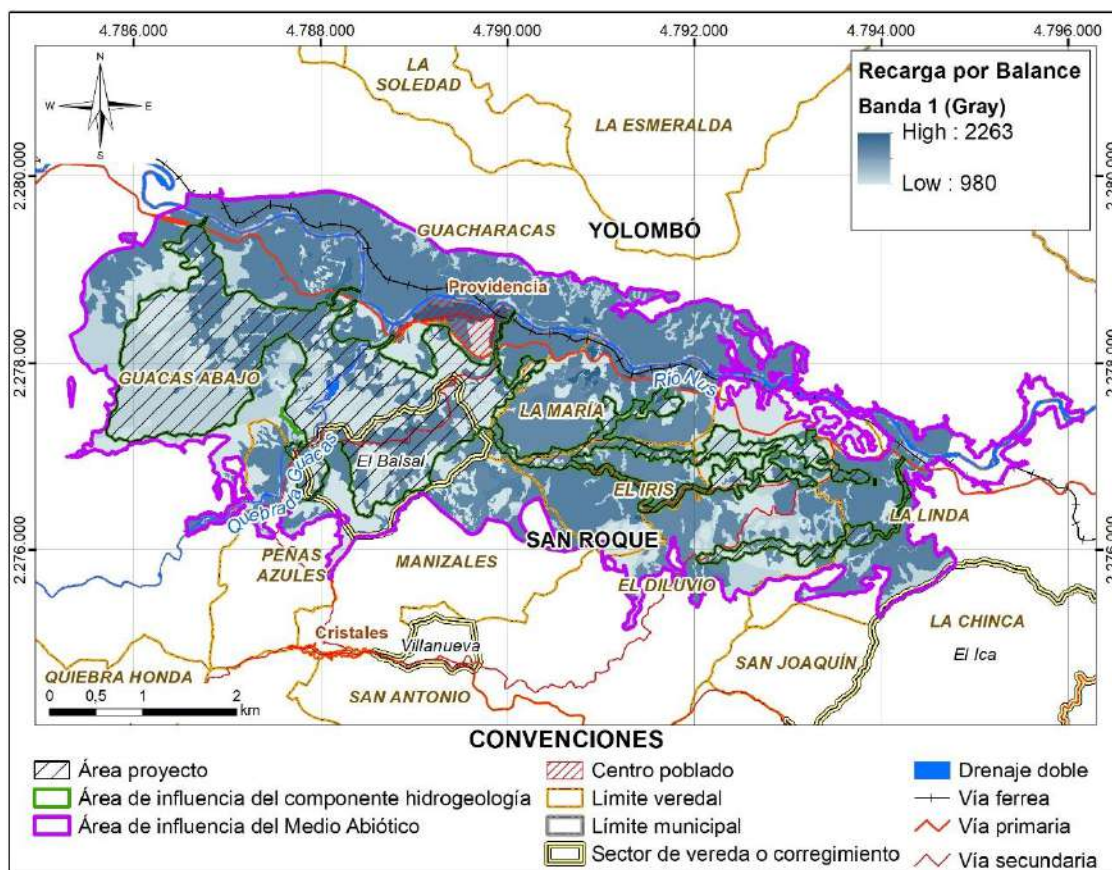


Figura 5.1.6.34 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Balance Hídrico para el área de influencia

Fuente: Integral S.A., 2025

Como se observa en la Figura 5.1.6.34, los valores de recarga para la zona de estudio varían entre 980 y 2.263 mm/año, con un valor medio de 1.622 mm/año, donde los valores más bajos se encuentran en las zonas más cercanas a los afluentes presentes en la zona de estudio (río Nus y quebradas aferentes) y algunas zonas en la parte alta de la cuenca, y los valores más altos se presentan en los sectores cuyas coberturas corresponden a áreas agrícolas, bosques y áreas de pastizales.

b. Método de Kennessey

Por otra parte, se calculó la recarga hídrica a partir del método desarrollado por (Kennessey, 1930). Este método ha sido aplicado con resultados exitosos y es particularmente versátil, ya que, permite cuantificar la recarga a partir de los elementos principales que influyen en el proceso de escorrentía, como: (1) Pendiente del terreno, (2) Permeabilidad, (3) Cobertura vegetal, (4) Uso del suelo, (5) Precipitación y (6) Temperatura presente en la zona de estudio.

El método permite calcular el coeficiente de escorrentía (CK), definido como la capa de agua que fluye sobre la superficie, el cual es determinado por la suma de tres componentes: (1) Pendiente del terreno (CA), (2) Distribución de la cobertura vegetal (CV) y (3)

Permeabilidad de la roca y terrenos aflorantes (CP); esto se hace mediante la aplicación de la Ecuación 5.1.6.4.

$$CK = CA + CV + CP$$

Ecuación 5.1.6.4 Coeficiente de escorrentía

En la Tabla 5.1.6.10 se presenta la clasificación de los componentes con cada una de sus categorías; estos son utilizados para asignar los coeficientes de acuerdo con lo propuesto por Kennessey, esto partiendo del Índice de Aridez (Ia) calculado para el área de estudio. De acuerdo con lo propuesto por (Tardi & Vittorini, 1977) el la valorado con el Método de (Martonne, 1926), es el parámetro en función del cual se hace la elección del coeficiente de escorrentía (CK). El Ia se calcula aplicando la Ecuación 5.1.6.5.

$$Ia = \frac{\left[\frac{P}{T + 10} + 12 \frac{p}{t} \right]}{2}$$

Ecuación 5.1.6.5 Índice de Aridez

Donde:

Ia : Índice de Aridez medio anual

P : precipitación media anual, en mm

T : temperatura media anual, en °C

p : precipitación media mensual, en mm

t : temperatura media mensual, en °C

El cálculo del Índice de Aridez dio como resultado 90, por lo tanto, se toman los valores resaltados de la Tabla 5.1.6.10.

Tabla 5.1.6.10 Clasificación de componentes del coeficiente de escurrimiento

Índice de aridez		<25	25 - 40	>40
Pendiente (CA)				
Ca1	A > 35%	0,22	0,26	0,30
Ca2	10% < A < 35%	0,12	0,16	0,20
Ca3	3,5% < A < 10%	0,01	0,03	0,05
Ca4	A < 3,5%	-	0,01	0,03
Cobertura vegetal (CV)				
Cv1	Roca desnuda	0,26	0,28	0,30
Cv2	Pastizales	0,17	0,21	0,20
Cv3	Tierra de cultivo, bosques	0,07	0,11	0,15
Cv4	Bosque de árboles altos	0,03	0,04	0,05
Permeabilidad (CP)				
Cp1	Impermeable	0,21	0,26	0,30
Cp2	Media	0,12	0,16	0,20
Cp3	Buena	0,06	0,08	0,10
Cp4	Elevada	0,03	0,04	0,05

Fuente: (Tardi & Vittorini, 1977)

La asignación del coeficiente CA se realiza a partir de las pendientes encontradas en el área de estudio. Los valores por facilidad de cálculos fueron reclasificados de la siguiente manera:

- $0,0 \% \leq P < 3,5 \%$ corresponde a 1.
- $3,5 \% \leq P \leq 10,0 \%$ corresponde a 2.
- $10,0 \% \leq P \leq 35,0 \%$ corresponde a 3.
- $P \geq 35 \%$ corresponde a 4

En la Tabla 5.1.6.11 se presentan los valores de pendientes reclasificados y el correspondiente valor de coeficiente CA

Tabla 5.1.6.11 Pendientes en la zona de estudio.

Pendiente (%)	Coeficiente CA
1	0,02
2	0,05
3	0,1

Fuente: Integral S.A., 2025

Por otra parte, para tomar el valor correspondiente al coeficiente CV se categorizó el tipo de coberturas establecidos en esta metodología. En la Tabla 5.1.6.12 se presentan las coberturas finales obtenidas y la asignación de cada valor de coeficiente CV.

Tabla 5.1.6.12 Tipos de coberturas en la zona de estudio

Coberturas Cv	Coefficiente CV
Bosque de árboles altos	0,05
Pastizales	0,2
Roca desnuda	0,3

Fuente: Integral S.A., 2025

Para encontrar el valor del coeficiente CP se hizo uso del grupo hidrológico (suelo tipo C para toda el área de estudio), cuyo valor correspondiente fue estimado en 0,2.

Después de calcular todos los índices se hizo uso de la Ecuación 5.1.6.4 para obtener el coeficiente CK. Una vez calculado se procedió a estimar la escorrentía superficial considerando la precipitación media a partir de la Ecuación 5.1.6.6, esta estimación se hizo a través de la herramienta “calculadora ráster” del software QGis versión 3.38.0.

$$ESC = CK \times P$$

Ecuación 5.1.6.6 Escorrentía superficial.

Donde:

ESC: escorrentía superficial, en mm/año

CK: coeficiente de escorrentía

P: Precipitación media anual, en mm/año

Utilizando la misma herramienta anterior, se calculó la recarga anual en el subsuelo a través de la aplicación de la Ecuación 5.1.6.7.

$$R = P - ETR - ESC$$

Ecuación 5.1.6.7 Balance hidrológico – Infiltración

Donde:

R: recarga anual en el subsuelo, en mm/año

P: precipitación media anual, en mm/año

ETR: evapotranspiración real media anual, en mm/año

ESC: escorrentía superficial o escurrimiento medio anual, en mm/año

En la Figura 5.1.6.35 se presenta el ráster de la recarga anual en el subsuelo estimada para el área de estudio por el método de Kennesey (ver mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-REC-CN1).

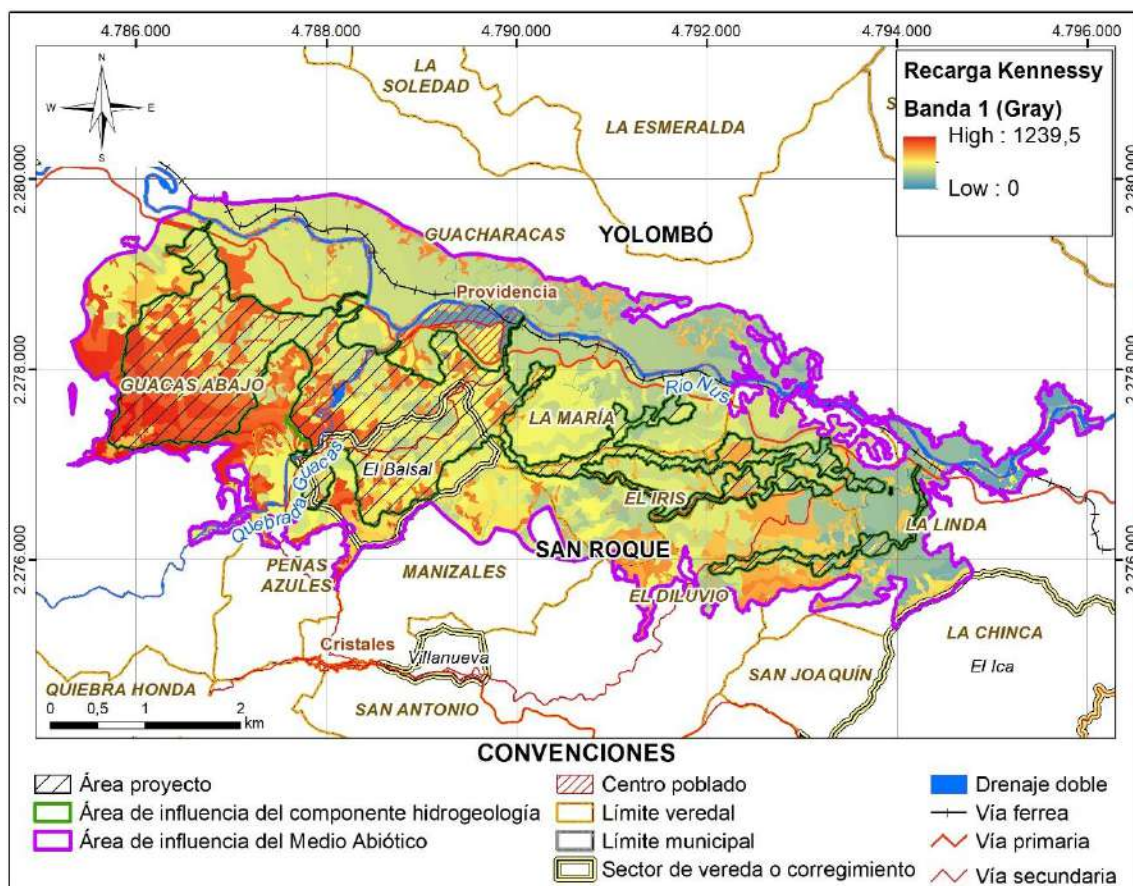


Figura 5.1.6.35 Distribución espacial de la recarga anual por el método de Kennessey para el área de influencia

Fuente: Integral S.A., 2025

Como se observa en la Figura 5.1.6.35, los valores de recarga para la zona de estudio varían entre 43,5 y 1.926 mm/año, con un valor medio de 985 mm/año, donde al igual que con el cálculo de recarga por el método de balance hídrico, los valores más bajos se encuentran en los sectores más cercanos a los afluentes presentes en la zona de estudio (río Nus y quebradas aferentes), mientras que los valores más altos se presentan en sitios cuyas coberturas corresponden a bosques y pastos.

- Análisis de recarga

Los resultados obtenidos mediante la metodología de balance hídrico y la metodología Kennessey permiten identificar diferencias significativas en la interpretación del proceso de recarga. La metodología Kennessey, al incluir la pendiente del terreno como una de sus variables, proporciona una mejor interpretación de la recarga asociada al terreno. Esto se debe a que la pendiente influye directamente en el proceso de recarga, permitiendo una evaluación más precisa y detallada de cómo el agua se infiltra y se almacena en el suelo. En el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_RECARGA se presentan los archivos para el cálculo de la recarga.

Para la clasificación cualitativa de la recarga hídrica estimada mediante el método de Kennessy, se adoptaron rangos porcentuales basados en la relación entre la recarga efectiva (mm/año) y la precipitación media anual (mm/año). Esta clasificación se fundamenta en los criterios técnicos establecidos por el IDEAM en el Estudio Nacional del Agua 2018 (IDEAM, 2018), donde se categoriza la recarga como un componente fundamental de la oferta hídrica subterránea.

Los rangos se presentan a continuación, y su clasificación se presentan en la Figura 5.1.6.36.

- Muy Alta: >40%,
- Alta: 25-40%,
- Moderada: 15-25%,
- Baja: 5-15%,

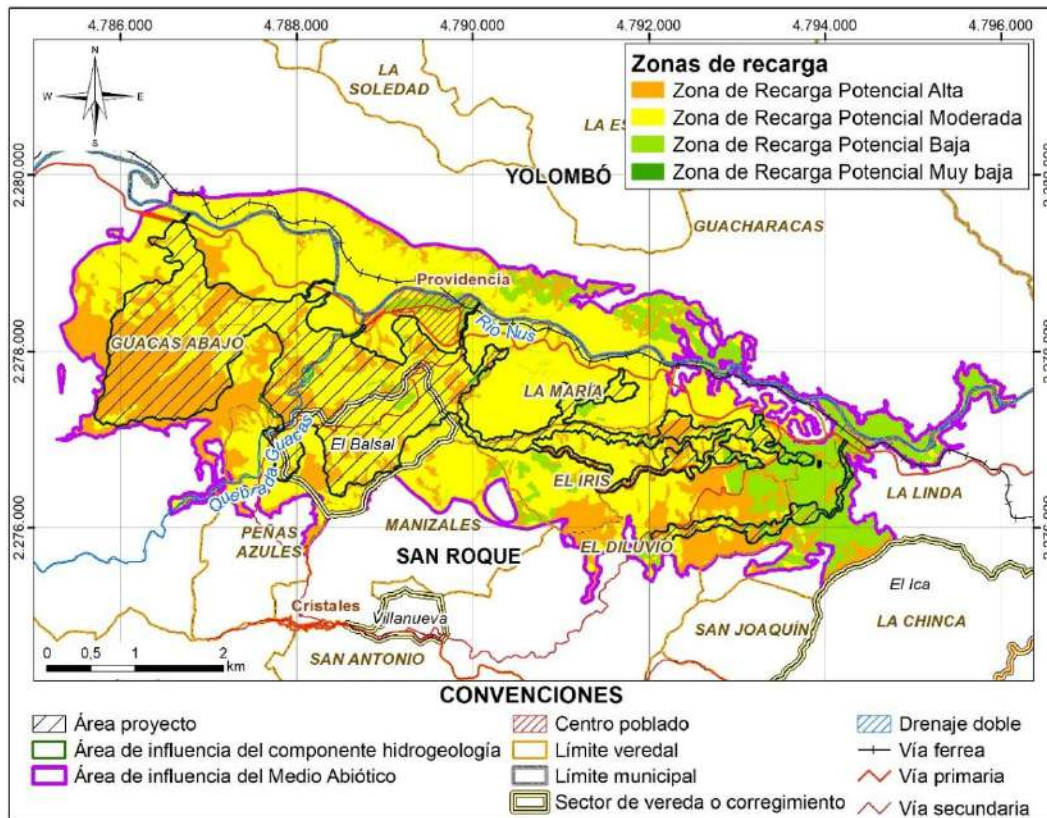


Figura 5.1.6.36 Zonas de recarga

Fuente: Integral S.A., 2025

C. Inventario de puntos de agua

El principal objetivo del inventario de puntos de agua es obtener información básica del agua subterránea, que permita el entendimiento de los flujos en el área de influencia del medio abiótico del proyecto.

En la Tabla 5.1.6.14 se presenta el listado de los datos registrados en cada punto inventariado. Además, se llevó a cabo la caracterización in situ de las propiedades fisicoquímicas del agua, como la temperatura (°C), pH, conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$), salinidad (PSU) y STD (mg/l) por medio de una sonda multiparámetro portátil HANNA HI98195 en aquellos puntos en donde fue posible tomar dichos parámetros.

Tabla 5.1.6.13 Datos tomados durante el inventario de puntos de agua

DATOS GENERALES	Identificación
	Fecha del inventario (día/mes/año)
	Coordenada Este
	Coordenada Norte
	Cota msnm.
PARÁMETROS FISICOQUÍMICOS	Temperatura agua (°C)
	pH
	Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
	Salinidad (psu)
	STD (mg/l)
	Análisis de potencial de oxido – reducción (ORP)

Fuente: Integral S.A. 2025

El inventario de puntos de agua se llevó a cabo en dos campañas de campo, la primera realizada entre el 23 y 28 de enero, y la segunda entre el 17 y 19 de febrero del 2025. Dentro del área de influencia del medio abiótico se llevó a cabo el levantamiento de los puntos hidrogeológicos como son manantiales, aljibes y piezómetros.

En total, fueron visitados 121 puntos hidrogeológicos, correspondientes a un aljibe, un reservorio artificial de agua, 67 manantiales y 52 piezómetros. En el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_INVENTARIOSPAGUA se encuentran los respectivos formatos FUNIAS debidamente diligenciados.

Es importante resaltar que, de estos 121 puntos, tres (3) manantiales se encuentran en el predio Las Margaritas en el cual no se tiene permiso de ingreso y no pudieron ser visitados, cuatro (4) manantiales no pudieron ser levantados debido a las condiciones topográficas y de acceso asociado con vegetación boscosa, siete (7) manantiales se encuentran secos, 14 piezómetros no fueron encontrados y siete (7) se encuentran secos u obstruidos. Por lo que el análisis de parámetros fisicoquímicos se llevó a cabo para un total de 86 puntos.

En la Tabla 5.1.6.14 se muestran un resumen de los puntos inventariados con sus respectivas observaciones de campo. En la Figura 5.1.6.37 se muestra su localización en planta (ver mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-PHIDRO).

Tabla 5.1.6.14 Puntos de agua subterránea levantados en campo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	822,16	4.789.186,43	2.278.003,58	Sin observación	28/01/2025	Monitoreo
2	Aljibe La Mayoría	Aljibe	819,82	4.789.157,00	2.278.274,00	Sin observación	27/01/2025	Monitoreo
3	M18	Manantial	860,62	4.785.026,00	2.279.282,00	Sin observación	26/01/2025	Reserva
4	M20	Manantial	894,31	4.784.820,00	2.279.262,00	Sin observación	26/01/2025	Reserva
5	M22	Manantial	1.076,35	4.785.560,76	2.276.890,75	Sin observación	23/01/2025	Reserva
6	M23	Manantial	1.101,62	4.785.574,08	2.276.970,71	Sin observación	23/01/2025	Reserva
7	M24	Manantial	1.096,38	4.785.601,02	2.276.953,60	Sin observación	23/01/2025	Reserva
8	M25	Manantial	1.071,29	4.785.684,61	2.276.847,25	Sin observación	23/01/2025	Reserva
9	M84	Manantial	883,08	4.790.944,26	2.277.048,48	Sin observación	28/01/2025	Reserva
10	M85	Manantial	853,99	4.791.007,05	2.276.993,23	Sin observación	28/01/2025	Reserva
11	M86	Manantial	880,64	4.791.134,24	2.277.037,73	Sin observación	28/01/2025	Reserva
12	M87	Manantial	901,56	4.791.172,47	2.277.086,67	Sin observación	28/01/2025	Reserva
13	M88	Manantial	902,54	4.791.253,45	2.277.087,27	Sin observación	28/01/2025	Reserva
14	M89	Manantial	865,82	4.793.019,72	2.277.092,28	Sin observación	17/02/2025	Reserva
15	M90	Manantial	906,62	4.791.355,27	2.277.035,86	Sin observación	28/01/2025	Reserva
16	M91	Manantial	899,30	4.791.703,07	2.276.972,47	Sin observación	28/01/2025	Reserva
17	M92	Manantial	909,62	4.791.736,15	2.276.993,34	Sin observación	28/01/2025	Reserva
18	M99	Manantial	1.025,24	4.788.428,44	2.276.433,33	Sin observación	27/01/2025	Reserva
19	M100	Manantial	1.073,01	4.788.591,86	2.276.281,66	Sin observación	27/01/2025	Reserva
20	M101	Manantial	1.017,03	4.788.747,93	2.276.546,09	Sin observación	27/01/2025	Reserva
21	M103	Manantial	962,42	4.788.767,44	2.276.673,03	Sin observación	27/01/2025	Reserva
22	M104	Manantial	905,02	4.788.766,21	2.276.867,07	Sin observación	27/01/2025	Reserva
23	M105	Manantial	868,70	4.788.588,48	2.277.196,82	Seco. Se verificó desde la parte superior debido a que no había acceso. Sin embargo, este estaba seco.	26/01/2025	Reserva
24	M108	Manantial	913,27	4.788.421,98	2.277.329,50	Sin observación	26/01/2025	Reserva

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
25	M109	Manantial	908,90	4.788.330,48	2.277.458,89	Sin observación	26/01/2025	Reserva
26	M110	Manantial	944,81	4.789.191,23	2.276.856,39	Seco. No se puede acceder a la ubicación exacta del punto, sin embargo, se verificó aguas arriba y aguas abajo y no se ve rastros de agua.	27/01/2025	Reserva
27	M113	Manantial	890,86	4.789.366,75	2.276.980,71	No hay acceso al punto. Pendiente abrupta. Mucha maleza.	27/01/2025	
28	M116	Manantial	836,53	4.789.984,76	2.277.717,38	Sin observación	27/01/2025	Reserva
29	M118	Manantial	838,83	4.790.870,00	2.277.586,00	Sin observación	29/01/2025	Reserva
30	M121	Manantial	846,63	4.790.623,00	2.277.240,00	Sin observación	28/01/2025	Reserva
31	M124	Manantial	926,40	4.789.841,30	2.277.101,85	Sin observación	18/02/2025	Reserva
32	M128	Manantial	962,24	4.787.647,95	2.277.353,57	Sin observación	19/02/2025	Reserva
33	M145	Manantial	1.042,42	4.785.933,94	2.276.920,27	Sin permisos para el acceso al predio.		
34	M147	Manantial	1.051,23	4.785.933,19	2.276.982,29	Sin permisos para el acceso al predio.		
35	M148	Manantial	1.056,91	4.785.911,76	2.276.623,31	Sin permisos para el acceso al predio.		
36	M180	Manantial	859,21	4.785.832,23	2.278.512,96	No acceso. Mucha maleza.	24/01/2025	
37	M181	Manantial	949,54	4.785.000,26	2.277.800,12	El manantial se identificó a aprox. 90 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	24/01/2025	Reserva
38	M182	Manantial	939,55	4.785.046,50	2.277.859,95	Sin observación	24/01/2025	Reserva
39	M183	Manantial	953,66	4.784.961,97	2.277.730,26	Sin observación	24/01/2025	Reserva
40	M184	Manantial	963,15	4.784.935,73	2.277.670,36	Sin observación	24/01/2025	Reserva

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
41	M189	Manantial	862,80	4.791.361,59	2.277.365,17	Sin observación	28/01/2025	Reserva
42	M192	Manantial	962,96	4.785.521,77	2.277.399,99	No hay acceso. Mucho bosque.	23/01/2025	
43	M193	Manantial	936,30	4.785.486,97	2.277.453,14	Sin observación	23/01/2025	Reserva
44	M194	Manantial	938,05	4.785.644,05	2.277.719,56	Sin observación	24/01/2025	Reserva
45	M195	Manantial	887,67	4.785.309,35	2.278.313,99	Sin observación	24/01/2025	Reserva
46	M196	Manantial	974,03	4.785.315,45	2.277.329,79	Seco.	23/01/2025	Reserva
47	M197	Manantial	914,26	4.785.793,93	2.277.933,01	Sin observación	24/01/2025	Reserva
48	M200	Manantial	959,10	4.786.407,76	2.277.359,48	Se toman los parámetros hasta donde se pudo acceder. Una Cascada impide el paso.	25/01/2025	Reserva
49	M201	Manantial	1.031,69	4.786.406,20	2.277.217,46	No hay acceso. Afloramiento rocoso con pendientes verticales.	25/01/2025	
50	M203	Manantial	865,74	4.786.693,34	2.277.997,46	El manantial se identificó aprox. 60 m aguas abajo del punto original definido en el inventario.	25/01/2025	Reserva
51	M205	Manantial	970,45	4.786.721,71	2.277.332,23	No hay acceso al punto, por tanto, se toma muestra hasta donde se pudo acceder.	25/01/2025	
52	M206	Manantial	948,94	4.786.824,02	2.277.406,84	No hay acceso al punto, por tanto, se toma muestra hasta donde se pudo acceder.	25/01/2025	

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
53	M207	Manantial	906,32	4.787.130,78	2.277.584,66	El cauce del manantial M207 se encontró completamente seco desde su desembocadura hasta el punto definido en el inventario, donde se encontraba su nacimiento.	25/01/2025	Reserva
54	M208	Manantial	848,06	4.787.204,63	2.278.303,48	Sin observación	25/01/2025	Reserva
55	M212	Manantial	877,11	4.786.220,14	2.277.969,32	El manantial se identificó a aprox. 100 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	25/01/2025	Reserva
56	M213	Manantial	936,01	4.786.138,04	2.277.441,56	El manantial se identificó a aprox. 40 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	23/01/2025	Reserva
57	M215	Manantial	1.037,33	4.785.857,12	2.277.220,63	Por dificultades en el acceso al punto exacto donde se encuentra el manantial, se tomaron los parámetros fisicoquímicos aguas abajo de este, aprox. a 50 m del nacimiento y del punto definido en el inventario.	23/01/2025	
58	M216	Manantial	964,07	4.786.012,65	2.277.349,04	Seco.	23/01/2025	Reserva
59	M217	Manantial	956,24	4.786.034,72	2.277.364,95	Seco.	23/01/2025	Reserva
60	M 219	Manantial	883,37	4.786.032,00	2.278.195,11	Sin observación	26/01/2025	Reserva
61	M 220	Manantial	861,36	4.786.019,55	2.278.332,18	Sin observación	26/01/2025	Reserva

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
62	M222	Manantial	889,34	4.792.247,91	2.277.167,34	Sin observación	28/01/2025	Reserva
63	M226	Manantial	844,87	4.793.626,02	2.276.386,79	Sin observación	17/02/2025	Reserva
64	M228	Manantial	904,69	4.788.771,20	2.276.865,05	Pared húmeda. No se alcanza a tomar muestra para toma de parámetros.	27/01/2025	
65	M229	Manantial	947,58	4.788.930,93	2.276.790,41	Sin observación	27/01/2025	Reserva
66	M230	Manantial	899,74	4.789.056,43	2.276.911,93	Sin observación	27/01/2025	Reserva
67	M233	Manantial	897,24	4.788.618,36	2.276.912,66	Sin observación	27/01/2025	Reserva
68	M242	Manantial	845,98	4.787.071,94	2.278.639,06	El manantial se identificó aprox. 60 m aguas arriba del punto original definido en el inventario.	25/01/2025	Reserva
69	M250	Manantial	894,90	4.787.588,90	2.277.595,84	Sin observación	19/02/2025	Reserva
70	PZA 12 01	Piezómetro	822,79	4.789.697,28	2.277.901,69	Sin observación		Monitoreo
71	PZA 12 02	Piezómetro	933,53	4.787.620,27	2.276.874,59	Sin tapa metálica y sin tapón, recibe aguas lluvias.	26/01/2025	Monitoreo
72	PZA 12 03	Piezómetro	819,16	4.788.695,00	2.278.385,00	Piezómetro con tapa metálica, con tapón y sin candado, se encuentra en explanación antrópica de suelos residuales del Batolito Antioqueño y en cobertura vegetal de pastos.	27/01/2025	Monitoreo
73	PZA 12 05	Piezómetro	814,01	4.793.048,54	2.276.687,07	El bayler no alcanza a tomar agua. Al parecer el piezómetro se encuentra sedimentado.	28/01/2025	Inactivo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
74	PZA 12 06	Piezómetro	831,32	4.787.563,80	2.278.148,99	Con tapa metálica. Sin tapón. Sin candado.	25/01/2025	Monitoreo
75	PZA 12 08	Piezómetro	819,30	4.786.818,00	2.279.510,00	Sin candado. Con tapa metálica. Con tapón.	24/01/2025	Monitoreo
76	PZS-12-03	Piezómetro	901,95	4.786.574,24	2.277.991,01	Sin candado, con tapa metálica. Con tapón. En suelo residual.	25/01/2025	Monitoreo
77	PZS 12 05	Piezómetro	832,46	4.794.234,12	2.276.778,46	Sin candado. Con tapa metálica y sin tapón.	28/01/2025	Monitoreo
78	PZS 12 09	Piezómetro	805,20	4.794.373,00	2.276.956,00	Sin tapa metálica, sin tapón. recibe aguas lluvias.	28/01/2025	Monitoreo
79	PZS 12 10	Piezómetro	829,05	4.791.419,07	2.276.561,94	Piezómetro obstruido a los 11,1 m y seco. Con tapa, sin candado y con tapón.	18/02/2025	Inactivo
80	PZS 12 11	Piezómetro	888,27	4.786.086,58	2.278.740,95	Piezómetro no encontrado.	26/01/2025	Inactivo
81	PZS 12 12	Piezómetro	833,94	4.785.710,98	2.279.056,64	Con tapa metálica. Sin tapón. Sin candado.	23/01/2025	Monitoreo
82	PZS 12 14	Piezómetro	818,42	4.789.241,20	2.278.423,32	Con candado, con tapón.	27/01/2025	Monitoreo
83	PZS 13 15	Piezómetro	868,04	4.788.999,08	2.278.089,34	No se encontró.	26/01/2025	Inactivo
84	PZS 13 17	Piezómetro	818,00	4.788.803,74	2.278.276,30	Con tapa y cerrado con tornillos	18/02/2025	Monitoreo
85	PZR 12 02	Piezómetro	831,60	4.787.574,08	2.278.157,17	Sin observación	25/01/2025	Monitoreo
86	PZR 12 03	Piezómetro	867,94	4.789.858,95	2.277.757,94	Sin observación		Monitoreo
87	PZR 12 04	Piezómetro	857,85	4.791.548,81	2.277.500,72	Seco. Sin candado, con tapa, profundidad 22,67 m. Posiblemente se encuentra obstruido.		Inactivo
88	PZR 12 08	Piezómetro	849,12	4.791.389,69	2.276.621,12	No se encontró.	18/02/2025	Inactivo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
89	PZR 13 05	Piezómetro	818,03	4.788.795,74	2.278.273,32	Con tapa y cerrado con tornillos.	19/02/2025	Monitoreo
90	PZR 13 06	Piezómetro	928,26	4.788.519,39	2.277.683,17	Con tornillos. Con tapa metálica. Sin tapón.	26/01/2025	Monitoreo
91	PZR 13 07	Piezómetro	914,16	4.788.059,71	2.277.532,15	Debido a actividades mineras informales excavaron la zona donde se encuentra el piezómetro dejando 1 m de tubería del piezómetro expuesto.	26/01/2025	Monitoreo
92	PZR 13 09	Piezómetro	824,66	4.788.416,71	2.278.012,22	Sin observación	26/01/2025	Monitoreo
93	BH-2-1	Piezómetro	880,91	4.789.033,24	2.277.118,05	Sin observación		Monitoreo
94	BH-01	Piezómetro	958,02	4.790.522,57	2.277.026,38	Con tapa, tapón y candado, en suelo residual.	18/02/2025	Monitoreo
95	BH 5M 01	Piezómetro	909,34	4.789.872,30	2.277.228,02	Seco. Sin candado y sin con tapa, profundidad 28,9 m	18/02/2025	Inactivo
96	BH-5M-03	Piezómetro	872,01	4.790.577,00	2.277.496,00	Con tapa metálica, con tapón y candado dañado, se encuentra en el tope de una colina, en suelos residuales del Batolito Antioqueño y en cobertura de pastos y bosque.	29/01/2025	Monitoreo
97	BH-5M-08	Piezómetro	866,39	4.790.827,00	2.277.484,00	Con tapa metálica, con tapón y candado dañado, se encuentra en tope de una colina, en suelos residuales del Batolito Antioqueño	29/01/2025	Monitoreo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
						y en cobertura de pastos.		
98	DH FS 307	Piezómetro	937,01	4.790.622,17	2.277.039,76	Sin observación		Monitoreo
99	DH FS 309	Piezómetro	916,16	4.792.271,49	2.277.047,34	Sin tapa metálica , sin tapón. Recibe aguas lluvias.	29/01/2025	Monitoreo
100	DH FS 315	Piezómetro	808,75	4.794.134,26	2.276.696,50	Sin tapa metálica, con tapón.	28/01/2025	Monitoreo
101	DH TM 01	Piezómetro	860,40	4.792.603,32	2.276.750,88	Sin tapa metálica, con tapón.	28/01/2025	Monitoreo
102	DH TM 02	Piezómetro	866,63	4.792.586,14	2.276.355,58	Sin candado, con tapa metálica. Sin tapón.	28/01/2025	Monitoreo
103	DH TM 03	Piezómetro	822,79	4.793.387,38	2.276.723,32	No se encontró.	28/01/2025	Inactivo
104	DH TM 04	Piezómetro	966,88	4.791.234,97	2.277.217,36	No se encontró.	29/01/2025	Inactivo
105	DH TM 10	Piezómetro	838,20	4.792.884,72	2.276.589,88	Sin tapa metálica, con tapón. Inclinado 45.	28/01/2025	Monitoreo
106	DH TM 100	Piezómetro	814,11	4.793.025,14	2.276.684,86	Sin tapa metálica, con tapón.	28/01/2025	Monitoreo
107	DH TM 109	Piezómetro	954,60	4.792.557,35	2.276.001,96	Sin observación		Monitoreo
108	DH TM 110	Piezómetro	954,61	4.792.028,19	2.276.993,19	Seco	29/01/2025	Inactivo
109	DH TM 115	Piezómetro	864,77	4.791.211,87	2.276.181,30	Con tornillos y tapón. Huele fétida, color café.	28/01/2025	Monitoreo
110	DH TM 116	Piezómetro	832,93	4.791.458,52	2.276.589,38	Obstruido a las 2 m.		Inactivo
111	DH TM 123	Piezómetro	945,79	4.790.856,42	2.277.093,84	Sin observación		Monitoreo
112	DH WR 09	Piezómetro	871,00	4.785.657,63	2.278.437,37	No se encontró.	24/01/2025	Inactivo
113	DH WR 201	Piezómetro	822,45	4.786.607,73	2.279.278,00	Con tapa y sin candado.	19/02/2025	Monitoreo
114	DH WR 203	Piezómetro	868,63	4.786.840,96	2.278.147,90	Con tapa metálica, con tapón y sin candado, se encuentra en el tope de un lomo y en cobertura	25/01/2025	Monitoreo

No.	Id	Tipo	Cota*	Coord. Este	Coord. Norte	Observación	Fecha levantamiento	Condición
						vegetal de pastos limpios.		
115	DH WR 204	Piezómetro	951,61	4.785.556,48	2.277.577,88	No se encontró.	23/01/2025	Inactivo
116	DH GA 501	Piezómetro	808,84	4.793.974,28	2.276.694,45	Sin tapa metálica, con tapón. Agua color café debido a coloides.	28/01/2025	
117	DH GA 503	Piezómetro	940,84	4.792.370,45	2.277.046,84	El byler no alcanza a recuperar muestra de agua para parámetros. La poca agua que rescata es de color café olor fétida.	29/01/2025	Inactivo
118	DH GA 504	Piezómetro	944,38	4.792.169,50	2.277.065,64	El byler no alcanza a recuperar muestra de agua para parámetros. La poca agua que rescata es de color gris olor fétida.	29/01/2025	Inactivo
119	DH GA 506	Piezómetro	867,31	4.791.604,72	2.276.889,85	Sin observación		Monitoreo
120	DH GA 509	Piezómetro	872,05	4.792.482,12	2.276.453,32	Con tornillos en la tapa metálica. Sin tapón.	28/01/2025	Monitoreo
121	PZ4	Piezómetro	939,09	4791328,00	2277254,00	Sin observación	02/2025	Monitoreo

*Las cotas de los puntos levantados se obtuvieron a partir del Modelo Digital de Elevación (DEM) generado con la topografía LIDAR

Fuente: Integral S.A. 2025

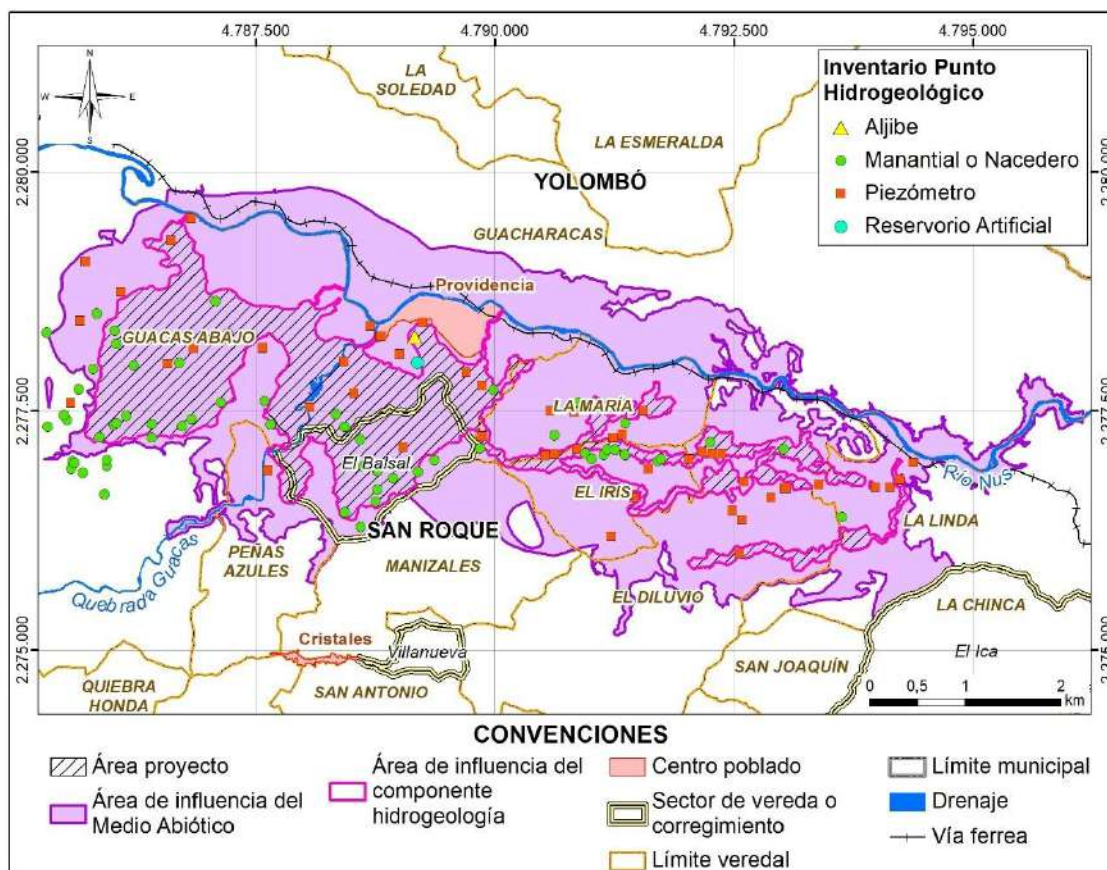


Figura 5.1.6.37 Inventario de puntos de agua realizado enero y febrero del 2025

Fuente: Integral S.A., 2025

a. Aljibes

En el área de estudio se identificó un aljibe que suministra agua para las actividades domesticas del campamento de Gramalote “La Mayoría”. En la Fotografía 5.1.6.1 se muestra el aljibe en mención.



Fotografía 5.1.6.1 Aljibe localizado en el campamento La Mayoría

Fuente: Integral S.A. 2025

b. Piezómetros

Estos puntos son utilizados para el monitoreo de las aguas subterráneas para fines hidrogeológicos en el sector de interés (Fotografía 5.1.6.2). De los sitios no se hace ningún tipo de extracción de agua. Quince (15) de estos piezómetros hacen parte de la Red de Monitoreo.

En total fueron inventariados 52 piezómetros de los cuales siete (7) se encuentran obstruidos y 14 no fueron encontrados.



Fotografía 5.1.6.2 Piezómetro PZS 12 12 en el sector del Topacio

Fuente: Integral S.A. 2025

c. Manantiales

En el área de estudio fueron levantados 67 manantiales, de los cuales siete (7) son estacionales, dado que en esta inspección se encontraban secos, tres (3) en el predio de Las Margaritas no se visitaron debido a que no se cuenta con permiso de ingreso y cuatro (4) no pudieron ser visitados teniendo en cuenta las condiciones topográficas y boscosas.

En la Fotografía 5.1.6.3 se muestra el manantial M100 localizado en la vereda de Guacas abajo.



Fotografía 5.1.6.3 Manantial M100 localizado en la vereda Guacas abajo

Fuente: Integral S.A. 2025

En el área de estudio del proyecto también fue levantado un reservorio artificial de agua, localizado en las inmediaciones del campamento la Mayoría, cerca al Aljibe.

En el diagrama de la Figura 5.1.6.38 se presenta la distribución porcentual de los manantiales según unidad geológica superficial donde afloran.

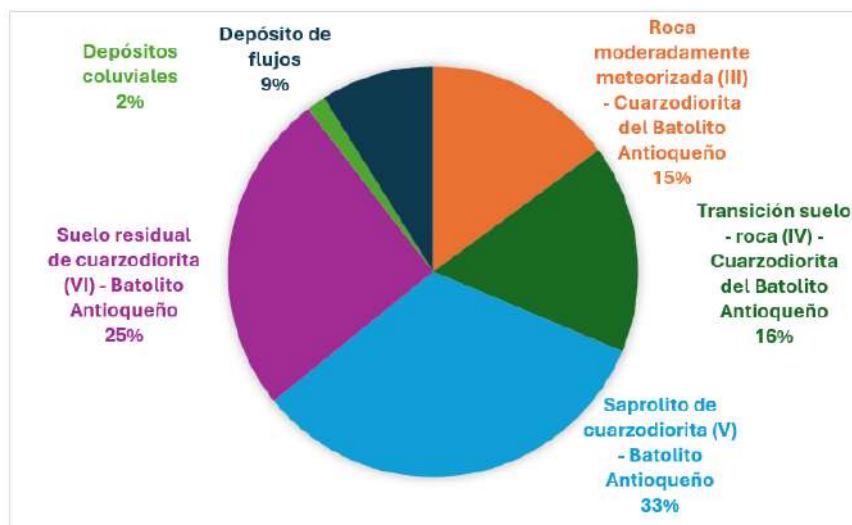


Figura 5.1.6.38 Unidad geológica superficial donde afloran los manantiales

Fuente: Integral S.A. 2025

d. Parámetros fisicoquímicos in situ

A continuación, se presenta el monitoreo reciente de los parámetros fisicoquímicos tomados en el área de estudio del proyecto Gramalote. Entre el 23 y 29 de enero y el 17 y 19 de febrero se realizó el monitoreo y los análisis in situ de las muestras identificadas como manantiales, piezómetros y aljibes; con el principal objetivo de actualizar la información de los puntos hidrogeológicos dentro del área de estudio. Es relevante mencionar que también fue monitoreado el reservorio artificial.

La caracterización fisicoquímica de los parámetros de campo: pH, conductividad eléctrica (CE), potencial de óxido reducción (redox), temperatura (T), sólidos disueltos totales (SDT) y oxígeno disuelto (OD) se realizó con una sonda multiparamétrica marca Hanna HI98195 y HI98194.

De los 121 puntos verificados, se pudo realizar toma de parámetros fisicoquímicos in situ en 85 puntos. En los 36 puntos restantes, no fue posible, debido a las restricciones de acceso por parte de los propietarios, obstrucciones en algunos piezómetros y otros no fueron encontrados.

De los puntos analizados, 53 corresponden a manantiales, 30 a piezómetros, un aljibe y un reservorio artificial al cual también se le tomaron parámetros in situ.

En la Tabla 5.1.6.15 se muestra el resumen de los parámetros obtenidos.

Tabla 5.1.6.15 Resultados de parámetros fisicoquímicos in situ. pH: potencial hidrógeno; ORP: potencial de óxido – reducción; CE: conductividad eléctrica, Tds: sólidos disueltos totales; S: salinidad; T: Temperatura.

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μS/cm)	Tds	S (PSU)	T(°C)
1	M18	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Topacio)		6,67	374,00	118	59	0,05	21,71
2	M20	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Topacio)		6,37	368,60	93	46	0,04	22,25
3	M22	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		6,82	419,10	365	182	0,17	22,20
4	M23	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		7,08	482,80	173	86	0,08	22,12
5	M 24	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		7,01	450,80	142	71	0,07	21,75
6	M25	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Sector Monjas)		6,46	413,10	686	343	0,33	23,29
7	M84	Manantial	Vereda El Iris		6,72	310,00	586	293	0,28	23,60
8	M85	Manantial	Vereda El Iris		6,65	291,50	742	371	0,36	23,55
9	M86	Manantial	Vereda El Iris		7,46	301,10	280	140	0,13	23,29
10	M87	Manantial	Vereda El Iris		6,63	309,50	257	129	0,12	23,91
11	M88	Manantial	Vereda El Iris		6,92	315,40	240	120	0,11	23,64
12	M89	Manantial	Vereda El Diluvio		6,43	202,00	401	201	0,19	24,27
13	M90	Manantial	Vereda El Iris		6,47	314,70	217	109	0,10	23,70
14	M91	Manantial	Vereda El Iris		7,19	321,30	153	76	0,07	23,93
15	M92	Manantial	Vereda El Iris		7,51	329,50	207	104	0,10	23,92
16	M99	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		7,15	233,40	432	216	0,21	22,86
17	M100	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,19	278,10	267	134	0,13	23,03

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μS/cm)	Tds	S (PSU)	T(°C)
18	M101	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,88	296,70	206	103	0,10	22,75
19	M103	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,34	270,00	176	88	0,08	23,62
20	M104	Manantial	Quebrada el Balsal		8,07	180,80	367	183	0,18	22,72
21	M108	Manantial	Quebrada el Balsal		7,97	134,00	138	69	0,06	22,39
22	M109	Manantial	Quebrada el Balsal		7,72	115,30	175	88	0,08	22,99
23	M116	Manantial	Quebrada la Colorada		8,08	181,20	141	71	0,07	23,59
24	M118	Manantial	Vereda La María		6,96	285,50	382	191	0,18	23,35
25	M121	Manantial	Vereda La María		6,24	319,00	156	78	0,07	23,13
26	M124	Manantial	Vereda La María		7,41	151,20	263	131	0,12	23,71
27	M128	Manantial	San Antonio - El Balsal		6,53	135,30	125	63	0,06	22,88
28	M181	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		5,49	502,70	105	53	0,05	22,14
29	M182	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		6,49	506,50	112	56	0,05	21,78
30	M183	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		6,12	514,60	141	70	0,07	22,63
31	M184	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		6,16	509,80	100	50	0,05	22,51
32	M189	Manantial	Vereda La María		6,62	373,10	213	107	0,10	23,68
33	M193	Manantial	Topacio		7,56	200,00	243	122	0,12	21,81
34	M194	Manantial	Topacio		8,13	189,70	150	75	0,07	21,97

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μ S/cm)	Tds	S (PSU)	T(°C)
35	M 195	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Topacio)		5,30	518,90	50	25	0,02	23,33
36	M197	Manantial	Topacio		8,17	187,10	247	123	0,12	22,22
37	M200	Manantial	San Antonio		8,04	163,90	181	90	0,08	21,76
38	M 203	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)		5,44	413,40	76	38	0,03	22,76
39	M205	Manantial	San Antonio		7,68	145,70	145	73	0,07	23,52
40	M206	Manantial	San Antonio		7,98	184,00	469	234	0,23	23,05
41	M208	Manantial	San Antonio		7,74	209,90	256	128	0,12	24,24
42	M 212	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)		6,65	382,70	218	109	0,10	21,82
43	M 213	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Banco)		6,65	495,80	200	100	0,09	22,39
44	M 215	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada El Banco)		6,87	481,20	93	47	0,04	22,26
45	M 219	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Banco)		6,47	361,70	104	52	0,05	22,26
46	M 220	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Banco)		6,64	304,40	89	45	0,04	22,33
47	M222	Manantial	Vereda el Diluvio		6,76	300,40	170	85	0,08	22,87
48	M226	Manantial	Palestina		6,11	196,30	436	218	0,21	25,02
49	M229	Manantial	Quebrada el Balsal		7,94	203,70	266	133	0,13	23,44
50	M230	Manantial	Quebrada el Balsal		7,64	221,30	210	105	0,10	24,22

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μS/cm)	Tds	S (PSU)	T(°C)
51	M 233	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Cuenca de la quebrada El Balsal)		6,91	322,70	70	35	0,03	22,99
52	M 242	Manantial	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)		5,76	343,90	187	93	0,09	22,63
53	M250	Manantial	San Antonio		7,19	129,40	168	84	0,08	22,45
54	PZA 12 02	Piezómetro	Peñas azules	2,20	7,13	249,10	432	216	0,21	25,06
55	PZA 12 03	Piezómetro	Vereda Guacas Abajo (Cerca del corregimiento de Providencia, margen izquierda del puente de la quebrada Guacas)	6,31	5,45	270,00	128	64	0,06	26,46
56	PZA 12 06	Piezómetro	San Antonio	4,14	7,04	2,66	203	102	0,10	25,86
57	PZA 12 08	Piezómetro	Báscula	3,00	7,28	100,30	181	90	0,08	26,21
58	PZS-12-03	Piezómetro	San Antonio	45,98	6,94	-18,00	445	222	0,21	23,75
59	PZS 12 05	Piezómetro	Palestina	28,23	7,57	196,40	566	283	0,27	24,79
60	PZS 12 09	Piezómetro	Vereda La Linda (Quebrada la Palestina)	3,55	7,30	189,30	519	259	0,25	24,93
61	PZS 12 12	Piezómetro	Topacio	4,05	7,16	222,00	328	164	0,16	25,56
62	PZS 12 14	Piezómetro	Providencia	1,54	7,34	235,00	158	79	0,07	26,85
63	PZS 13 17	Piezómetro	Obras públicas	3,65	5,88	196,90	152	76	196,90	26,54
64	PZR 12 02	Piezómetro	San Antonio	4,40	5,17	385,20	99	49	0,05	24,77
65	PZR 13 05	Piezómetro	Obras públicas	3,76	7,38	145,50	555	278	0,27	25,90
66	PZR 13 06	Piezómetro	Mirador	44,00	7,60	-106,50	476	238	0,23	24,52
67	PZR 13 07	Piezómetro	Garrucha	1,00	8,00	71,00	255	127	0,12	23,63
68	PZR 13 09	Piezómetro	La Bateita	8,60	7,76	5,00	347	173	0,16	26,88
69	BH-01	Piezómetro	El Iris - La Maria	37,67	6,62	-77,10	559	279	0,27	24,90

	ID	Tipo	Vereda	Nivel estático (m)	pH	ORP	CE (μS/cm)	Tds	S (PSU)	T(°C)
70	BH-5M-03	Piezómetro	Vereda La María	42,74	6,20	286,80	174	87	0,08	24,10
71	BH-5M-08	Piezómetro	Vereda La María	27,74	6,98	288,90	738	369	0,36	24,82
72	DH FS 309	Piezómetro	Diluvio Medio	19,45	7,83	251,50	60	30	0,03	23,07
73	DH FS 315	Piezómetro	Palestina	3,49	7,63	83,90	322	161	0,15	25,20
74	DH TM 01	Piezómetro	Diluvio Medio	39,64	8,13	197,20	215	107	0,10	25,43
75	DH TM 02	Piezómetro	Diluvio Medio	30,00	7,86	184,80	359	179	0,17	24,21
76	DH TM 10	Piezómetro	Palestina	27,86	7,63	196,30	431	216	0,21	25,95
77	DH TM 100	Piezómetro	Palestina	2,23	7,52	200,00	172	86	0,08	25,94
78	DH TM 115	Piezómetro	La Unión	8,27	8,08	115,50	81	40	0,04	24,42
79	DH WR 201	Piezómetro	El Banco (ceca a la báscula)	2,48	6,66	-70,60	127	63	0,06	25,31
80	DH WR 203	Piezómetro	Vereda Guacas Abajo (Cuenca de la Quebrada San Antonio)	30,43	5,81	325,10	597	298	0,29	25,22
81	DH GA 501	Piezómetro	Palestina	2,82	7,73	173,90	386	193	0,18	25,52
82	DH GA 509	Piezómetro	Diluvio Medio	33,91	7,32	223,30	101	51	0,05	24,41
83	Aljibe	Aljibe	Vereda Guacas Abajo (Sector La Mayoría)	0,25	7,73	113,90	85	42	0,04	24,07
84	Reservorio artificial	Reservorio artificial	Vereda Guacas Abajo (Sector La Mayoría)		6,55	358,90	41	21	0,02	23,95
85	PZ4	Piezómetro	Vereda la María	18	6,4	23,7	176	107	-	23,4

Fuente: Integral S.A., 2025

I. Sólidos disueltos totales (Tds)

Los parámetros de STD (Sólidos Totales Disueltos) y conductividad eléctrica, son indicadores del grado de mineralización del agua. A partir de la medición de los puntos inventariados en la zona del proyecto, las concentraciones de sólidos disueltos se encuentran entre 30 y 369 mg/l, para los piezómetros (Figura izquierda) siendo el valor más bajo para el punto DH FS 309 y los más alto para el piezómetro BH-5M-08.

Para el caso de los manantiales los valores se encuentran entre 25 y 371 mg/l, siendo este último valor del manantial M85 sobresaliente con respecto al rango de los demás datos (Figura 5.1.6.39 derecha).

Según (Fetter, C., 2001) estos valores de sólidos totales disueltos que no superan los 1000 mg/l permiten clasificar el agua como “agua dulce”.

El valor de sólidos disueltos para el aljibe y reservorio artificial es de 42 mg/l y 21 mg/l respectivamente.

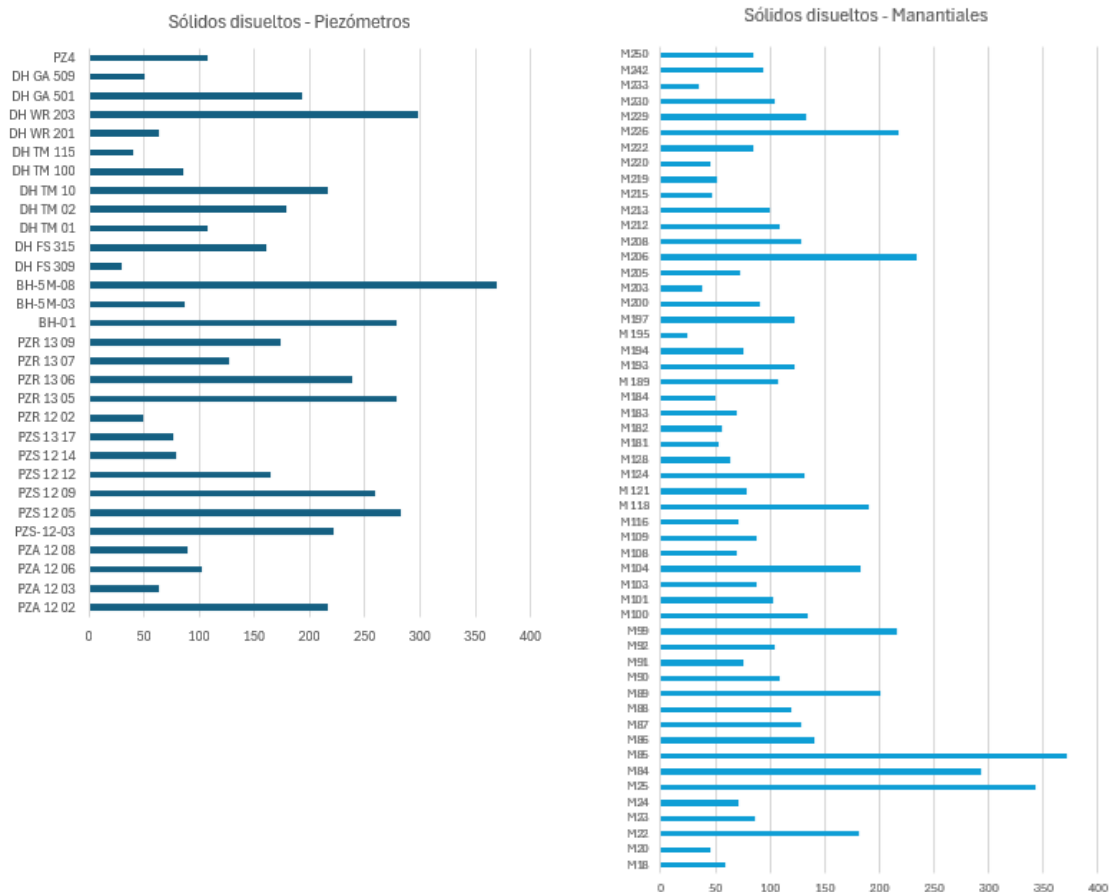


Figura 5.1.6.39 Valores de sólidos totales disueltos para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2025

En la Figura 5.1.6.40 se presenta la distribución espacial de los valores de sólidos disueltos totales.

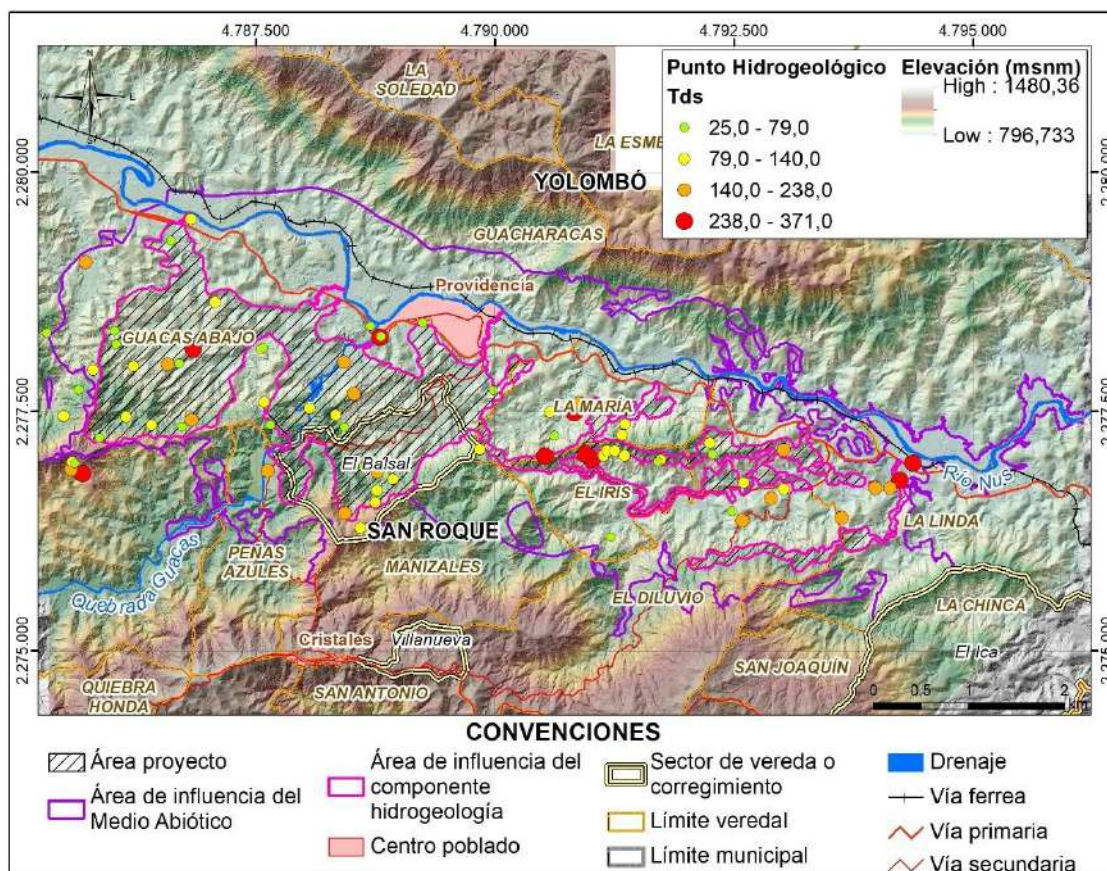


Figura 5.1.6.40 Distribución espacial de los valores de Tds de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A., 2025

II. Conductividad eléctrica

Como consecuencia de su contenido iónico, el agua se hace conductora de la electricidad. A medida que la concentración iónica aumenta, también aumenta hasta cierto límite la conductividad o capacidad de un agua para conducir la corriente eléctrica. La unidad de medida de conductividad es el $\mu\text{S}/\text{cm}$ (microsiemens/centímetro). Los valores de este parámetro varían entre 60 y 738 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para los piezómetros, siendo el piezómetro DH FS 309 el de menor valor y el más alto el BH-5M-08 (Figura 5.1.6.41 izquierda).

Para el caso de los manantiales el rango de valores está entre 50 y 742 $\mu\text{S}/\text{cm}$ siendo menor para el manantial 195 y mayor para M85 (Figura 5.1.6.41 derecha), correspondiendo así con el análisis realizado para los sólidos totales disueltos.

El valor de la conductividad eléctrica para el aljibe y reservorio artificial es de 85 mg/l y 41 mg/l respectivamente.

Mediciones de la conductividad eléctrica solo en los piezómetros (durante las 13 campañas analizadas) indican que esta se mantiene estable, con valores entre 49,0 y 333,00 $\mu\text{S}/\text{cm}$,

correspondientes a mineralizaciones de muy débiles a medias. Presentando variaciones generalmente menores a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ entre las diferentes campañas. Los puntos que registraron los mayores cambios en este parámetro corresponden al punto PZA 12-08 y BH-5M-03 llegando a presentar variaciones mayores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tanto positivas como negativas, que pueden indicar una mayor sensibilidad a las fluctuaciones en el aporte de agua de recarga reciente o ingreso de agua contaminada. Sin embargo, para la mayoría de los puntos este parámetro muestra variaciones pequeñas. (SHI, 2025).

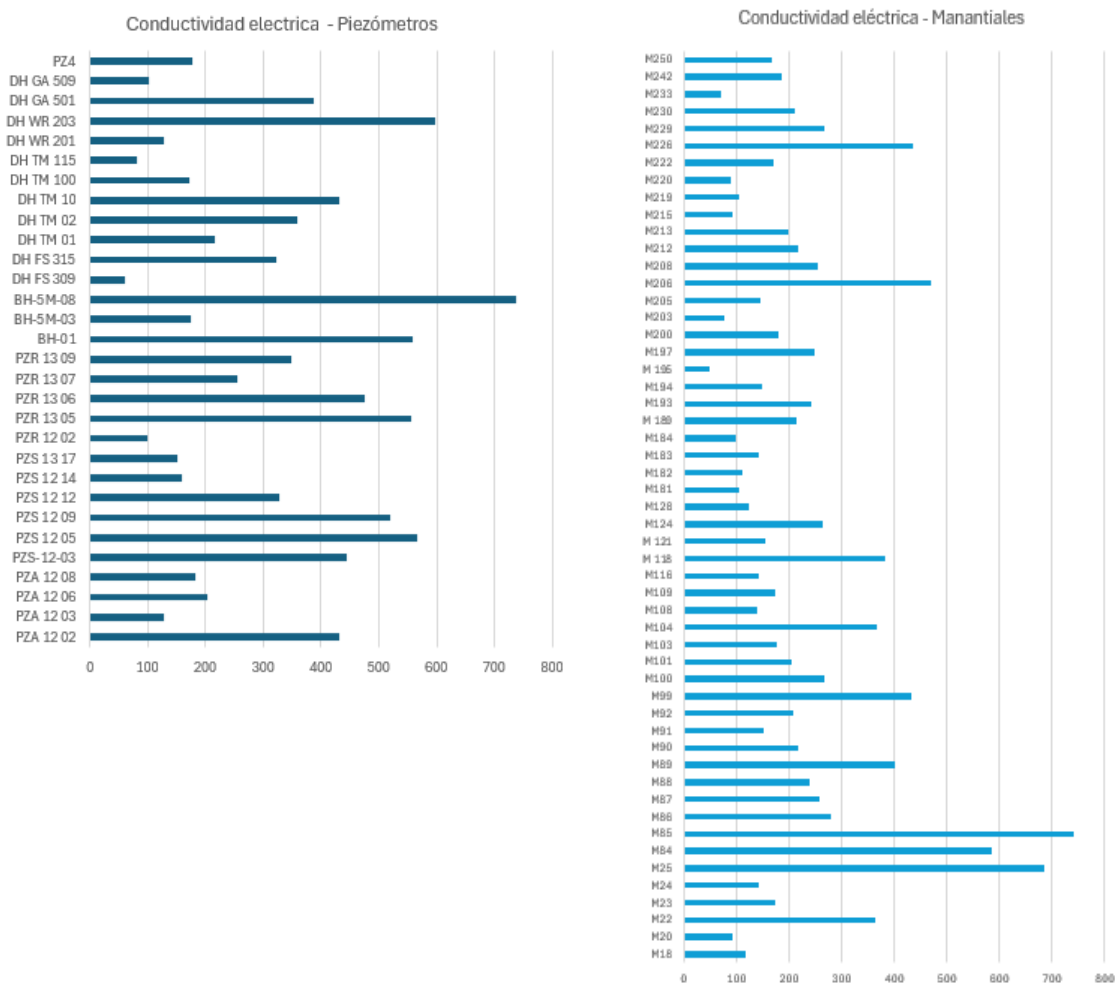


Figura 5.1.6.41 Valores de conductividad eléctrica para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2025

La distribución espacial de la conductividad eléctrica según este inventario de puntos de agua se puede ver en la Figura 5.1.6.42.

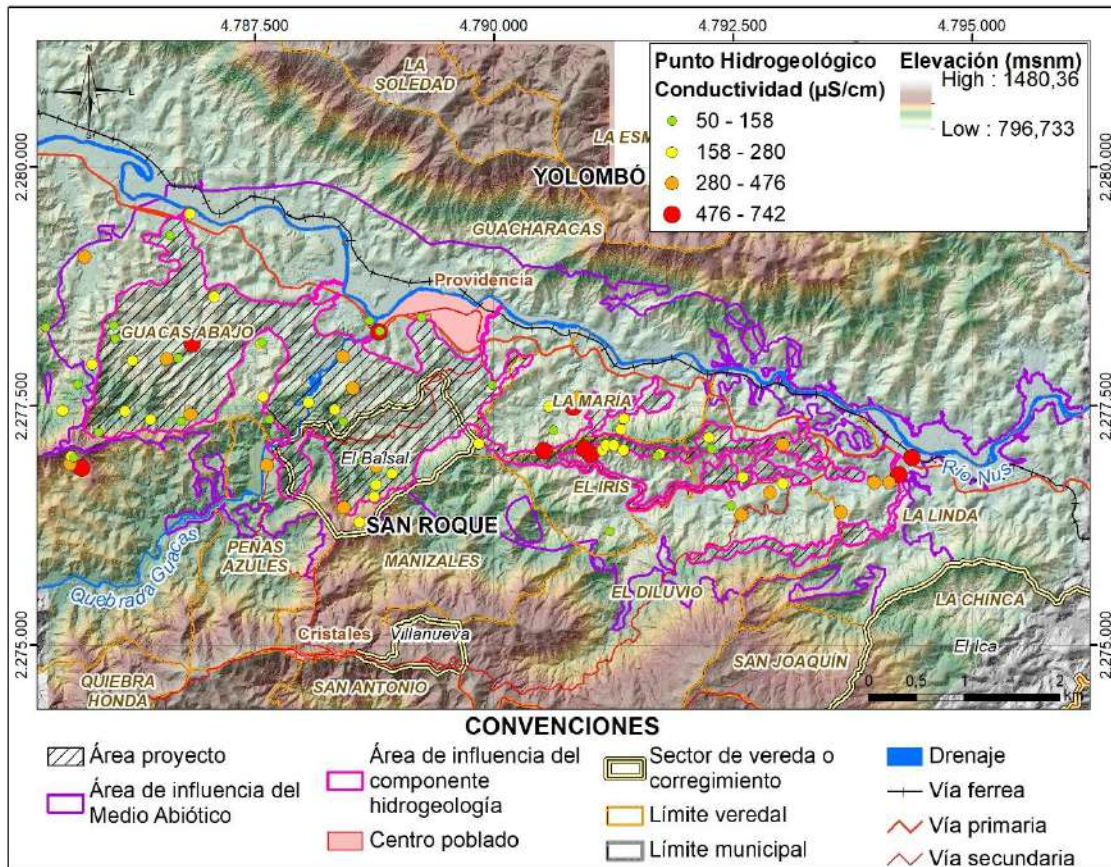


Figura 5.1.6.42 Distribución espacial de los valores de conductividad eléctrica de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A., 2025

III. Potencial de hidrogeno (pH)

El valor del pH define la acidez del agua, siendo para aguas neutras $\text{pH}=7$, para aguas ácidas $\text{pH}<7$ y para aguas básicas $\text{pH}>7$. El pH juega un papel importante en muchos procesos químicos y biológicos de las aguas subterráneas naturales (equilibrio carbonatado, procesos redox, etc.); es fácilmente alterable por lo que su determinación debe hacerse en el momento de la toma de muestra.

En la Figura 5.1.6.43 se presentan los valores medidos en campo, que, para el caso de piezómetros (Figura 5.1.6.43 izquierda), varían entre 5 y 8 unidades de pH, indicando que estas muestras varían de ligeramente ácidas / neutras a ligeramente básicas, con un predominio de aguas neutras y básicas. Por otro lado, los manantiales (Figura 5.1.6.43 derecha) tienen un rango de variación es el mismo, entre 5 y 8 unidades de pH, con un predominio de aguas neutras.

El pH para el aljibe y el reservorio artificial localizado en los campamentos la Mayoría es de 8 y 7 respectivamente.



Figura 5.1.6.43 Valores de pH para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2025

En la Figura 5.1.6.44 se muestra la distribución espacial:

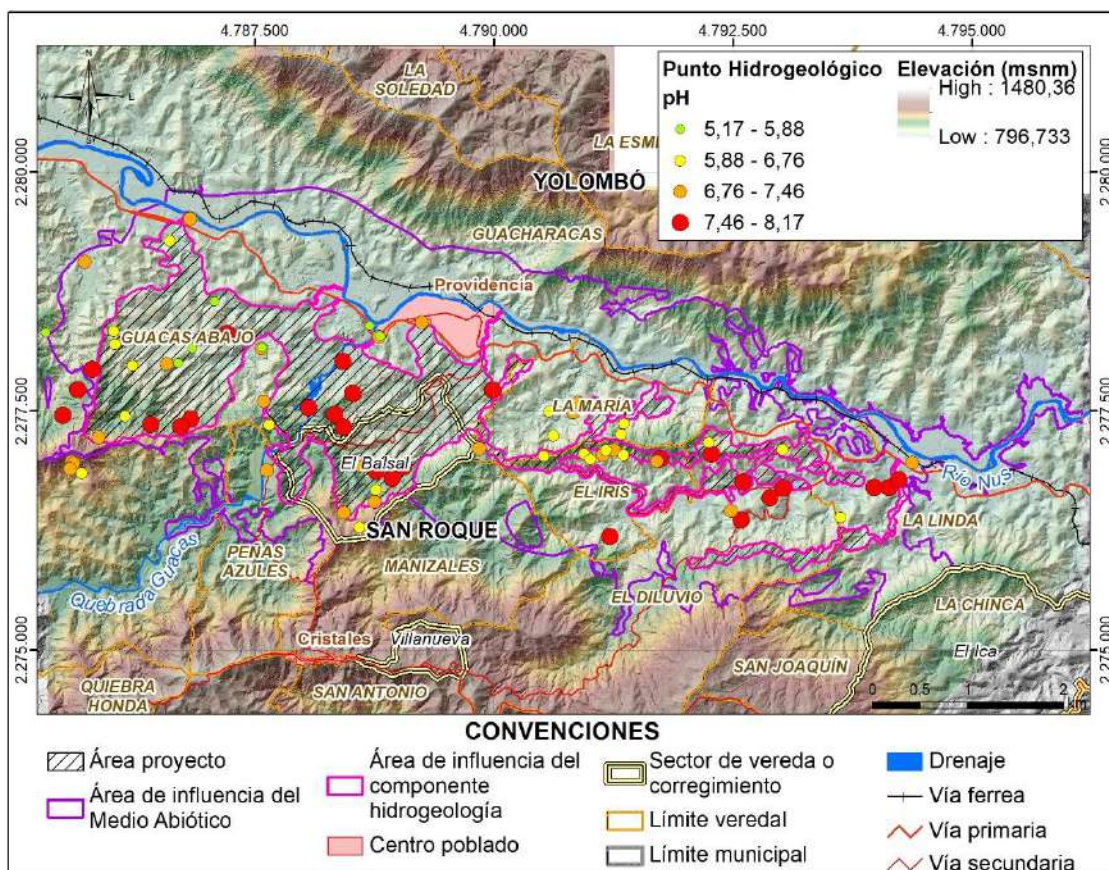


Figura 5.1.6.44 Distribución espacial de los valores de pH de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2025

IV. Temperatura

La temperatura del agua subterránea, en un punto y momento determinado, representa un estado de equilibrio entre los "aportes" y las "extracciones" caloríficas en ese punto. La distribución espacial de temperaturas en un acuífero depende de la conductividad térmica e hidráulica del medio, de la relación longitud/profundidad de la cuenca, configuración del nivel freático, distribución de la temperatura ambiente respecto a las zonas de recarga y descarga, etc.

La temperatura en los piezómetros monitoreados varía entre 23 y 27°C (Figura 5.1.6.45 izquierda), y para los manantiales entre 22 y 25°C (Figura 5.1.6.45 derecha). Los valores de este parámetro para el aljibe y el reservorio artificial es de 24°C.



Figura 5.1.6.45 Valores de temperatura para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2025

En la Figura 5.1.6.46 se presenta la distribución espacial de los puntos:

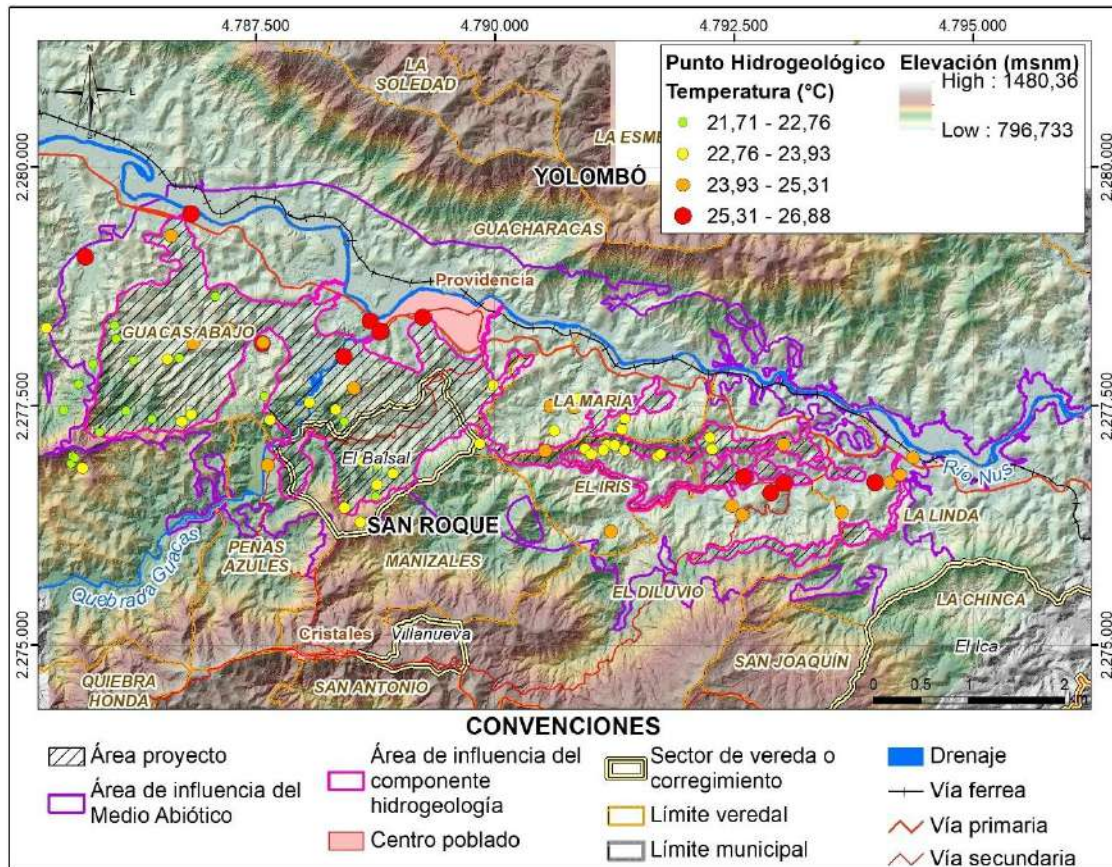


Figura 5.1.6.46 Distribución espacial de los valores de temperatura de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A., 2025

V. Potencial de óxido – reducción (ORP)

El potencial de óxido reducción es un conjunto general de reacciones químicas que pueden describirse como la transferencia de electrones de los átomos de una especie química a los átomos de otra. Algunas sustancias o elementos donan o pierde electrones y se le conoce como reductor, mientras que la sustancia que los roba o recibe se denomina el oxidante.

Al realizar una medición de ORP, si se presenta el caso de que la muestra de agua sea más oxidante que el electrodo, habrá un potencial redox positivo como es el caso de todos los manantiales inventariados (Figura 5.1.6.47 derecha), mientras que, si la muestra juega el papel de reductor, se medirá un potencial redox negativo (Microlab Industrial, 2017), como es el caso de los piezómetros DH WR 201, BH-01, PZR 13 06 y PZS-12-03 (Figura 5.1.6.47 izquierda). Esto significa que hay una menor cantidad de oxígeno disponible para la oxidación de sustancias. La materia orgánica presente en el suelo o en la zona de saturación puede ser degradada por microorganismos, consumiendo oxígeno y generando condiciones reductoras. La presencia de sulfatos, hierro o manganeso también puede contribuir a un ORP bajo, ya que pueden ser reducidos a sulfuros, hierro ferroso o manganeso soluble, respectivamente. (Freeze Cherry, 1979)

El valor de este parámetro para el aljibe y el reservorio artificial es de 113,9 y 358,9 respectivamente.

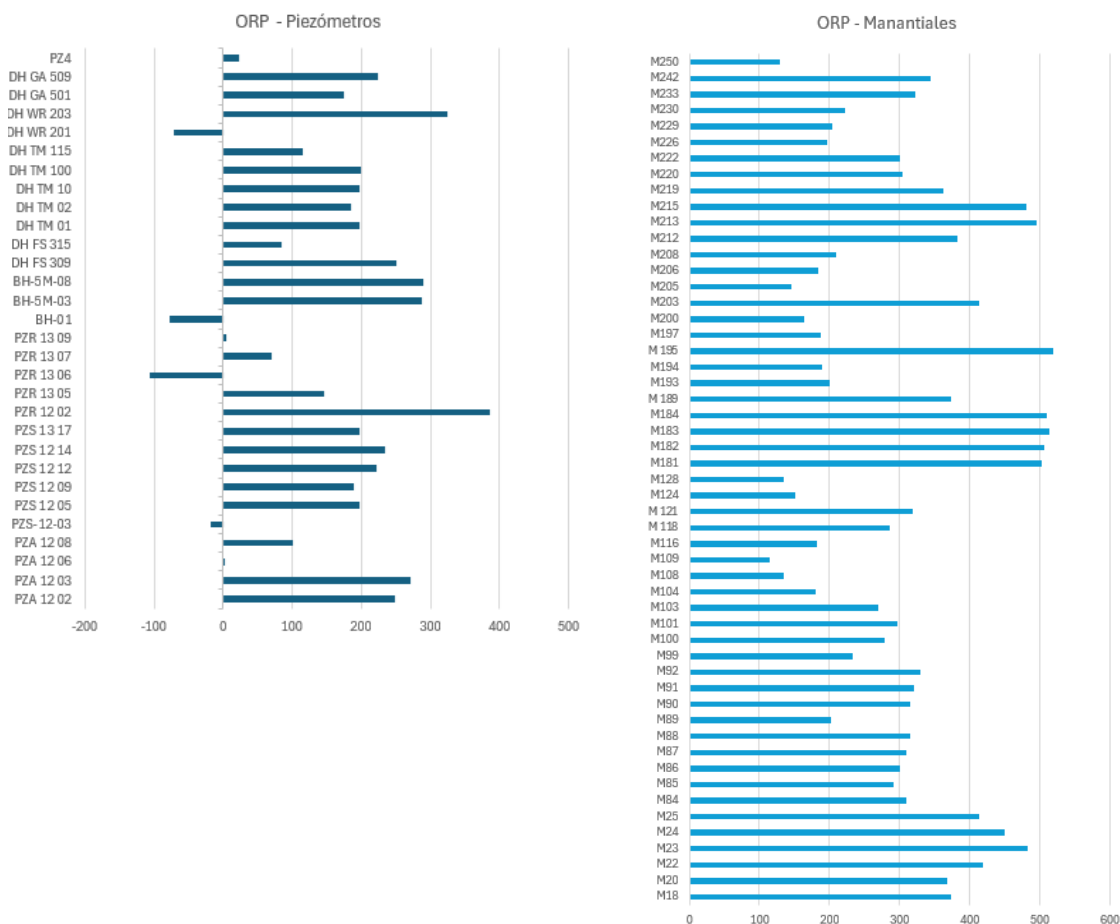


Figura 5.1.6.47 Valores de óxido - reducción para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2025

La distribución espacial de los puntos inventariados se muestra en la Figura 5.1.6.48:

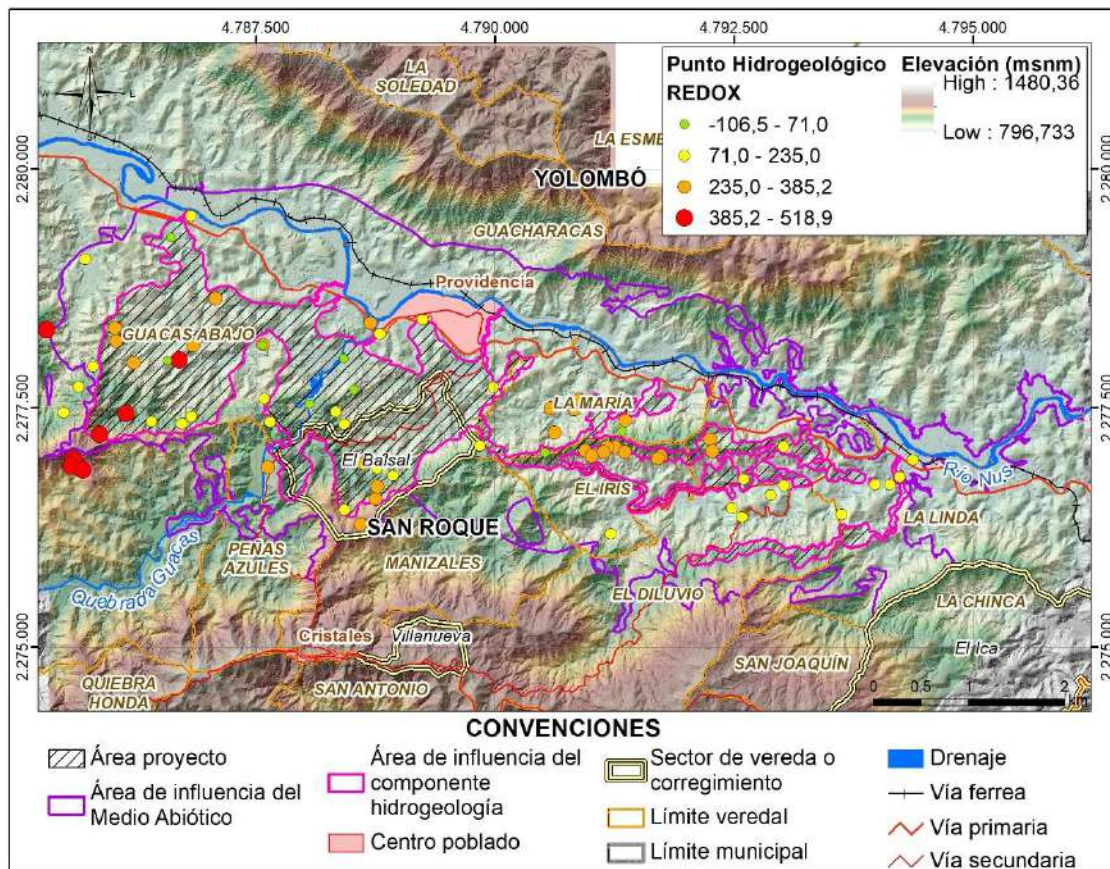


Figura 5.1.6.48 Distribución espacial de los valores de óxido - reducción de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A., 2025

VI. Salinidad

El agua en forma líquida es un compuesto con una gran capacidad para disolver sales que inicialmente se hallaban en fase sólida e incorporarlas al medio acuoso. La salinidad es la suma de la totalidad de los iones inorgánicos disueltos, en la naturaleza la mayor contribución a dicho valor la realizan los compuestos mayoritarios (Ribera, 2016).

La profundidad del agua subterránea se relaciona directamente con la salinidad de esta, sin embargo, bajo determinadas condiciones hidrogeológicas naturales, como elevados tiempos de residencia, muy bajos gradientes geológicos, existencia de fracturas que conecten niveles a profundidades diversas, variaciones locales en el grado de confinamiento, etc., pueden existir aguas muy salinas incluso en bajas profundidades (Ribera, 2016).

Con base a los datos obtenidos en campo en la Figura 5.1.6.49 se presentan los valores de salinidad obtenidos en el levantamiento de los manantiales y piezómetros, con un patrón bastante similar a los valores de conductividad. En la Figura 5.1.6.50 se muestra su distribución espacial en el área de estudio.

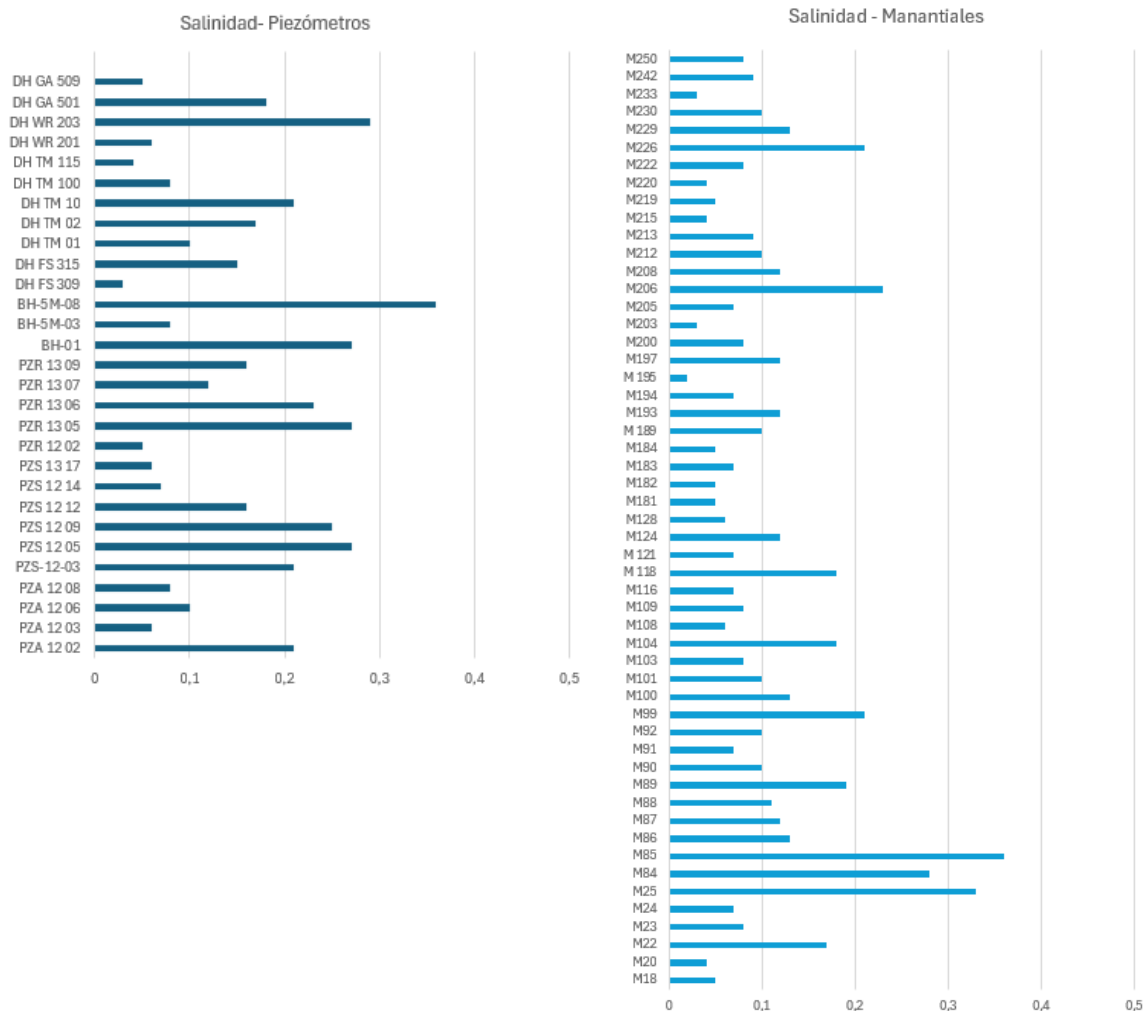


Figura 5.1.6.49 Valores de salinidad para los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A.,2025

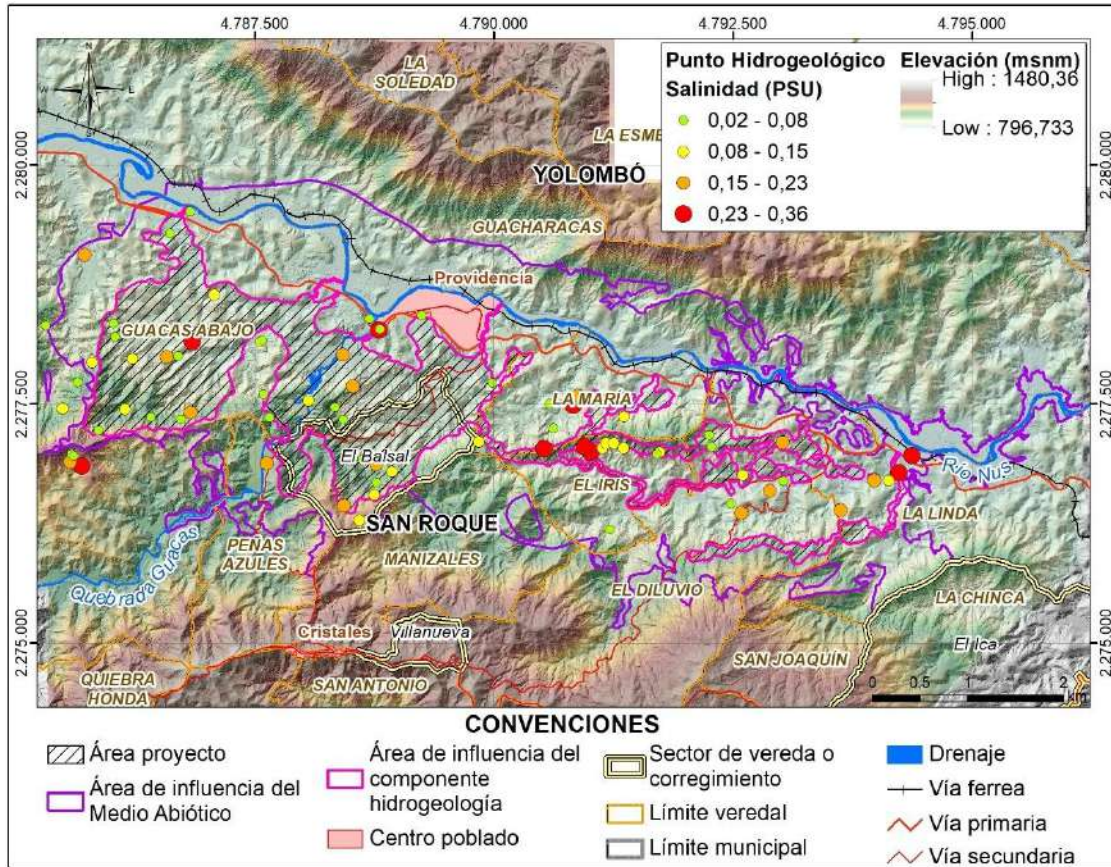


Figura 5.1.6.50 Distribución espacial de los valores de salinidad de los puntos inventariados

Fuente: Integral S.A., 2025

D. Sistema de flujo subterráneo

Con la finalidad de conocer la profundidad de la superficie piezométrica y sus variaciones en el tiempo, la zona de estudio cuenta con 15 piezómetros que hacen parte de la red de monitoreo y se encuentran distribuidos en diferentes sectores como se presenta en la Figura 5.1.6.51. De los cuales, tres captan de la unidad hidrogeológica depósito aluvial (UHG-3), seis captan de la unidad hidrogeológica saprolito arenoso (UHG-5) y seis de la unidad hidrogeológica Roca Fresca Fracturada (UGH-7).

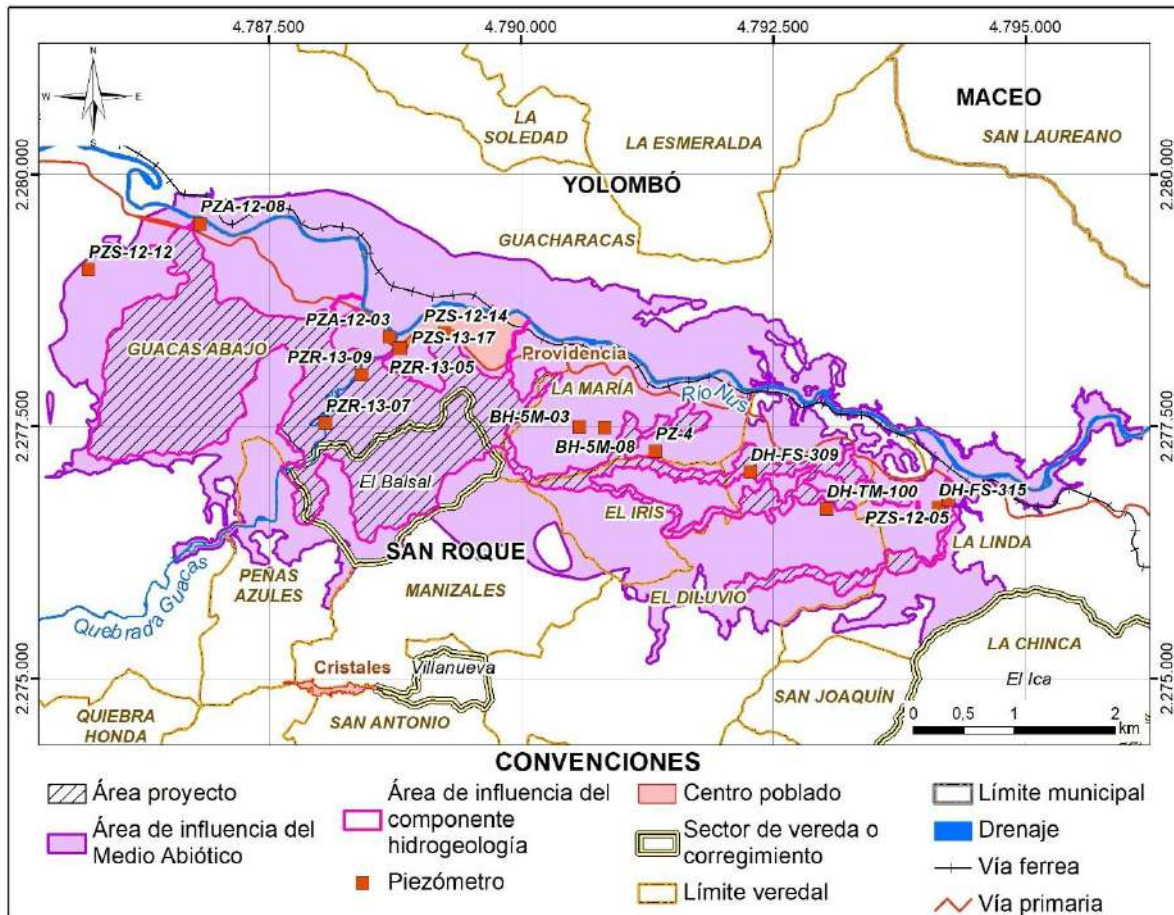


Figura 5.1.6.51 Ubicación de piezómetros para análisis de flujo subterráneo

Fuente: Integral S.A., 2025

En la Tabla 5.1.6.16 se muestra un resumen de las características de los piezómetros empleados para el análisis. Y en el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_PIEZOMETROS se presenta la información compilada de los piezómetros y los niveles históricos que se han registrado desde el año 2016. Para efectos de actualización de línea base, desde febrero de 2025 hasta la fecha los 15 piezómetros mencionados tienen medición de niveles con frecuencia quincenal.

Tabla 5.1.6.16 Resumen de las características de los piezómetros analizados para el sistema de flujo subterráneo

ID Piezómetro	Este	Norte	Cota (m.s.n.m)	Prof. (m)	Prof. Rejilla (m)	Saliente (m)*	Diámetro (in)	Unidad Hidrogeológica	Sector
PZA12-03	4.788.695,00	2.278.385,00	819,60	9,50	2-9	0,59	4	UHG-3 Depósito aluvial	Guacas Abajo
PZA12-08	4.786.818,00	2.279.510,00	819,30	7,00	1-6	0,24	4	UHG-3 Depósito aluvial	Guacas Abajo
DH-FS-315	4.794.134,26	2.276.696,50	808,75	24,60	4-7	0,25	1,5	UHG-3 Depósito aluvial	La Linda
PZS12-12	4.785.710,98	2.279.056,64	833,94	13,00	5-13	0,40	4	UHG-5 Saprolito arenoso	Guacas Abajo
PZS12-14	4.789.241,20	2.278.423,32	818,42	9,90	0-10,5	0,40	4	UHG-5 Saprolito arenoso	Guacas Abajo
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	814,11	21,90	3-10	0,10	1	UHG-5 Saprolito arenoso	El Diluvio
PZS-12-05	4.794.234,12	2.276.778,46	832,46	39,00	13-33	0,28	2	UHG-5 Saprolito arenoso	La Linda
PZ4	4791328,00	2277254,00	939,09	38,00	20-39	0,20	4	UHG-5 Saprolito arenoso	La María
PZS 13-17	4.788.803,74	2.278.276,30	818,00	15,21	9-15	0,10	4	UHG-5 Saprolito arenoso	Guacas Abajo
PZR 13-05	4.788.795,74	2.278.273,32	818,03	151,00	55- 145	0,00	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	Guacas Abajo
PZR 13-07	4.788.059,71	2.277.532,15	914,16	150,00	53-133	0,10	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	Guacas Abajo
PZR 13-09	4.788.416,71	2.278.012,22	824,66	150,00	60-140	0,08	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	Guacas Abajo

ID Piezómetro	Este	Norte	Cota (m.s.n.m)	Prof. (m)	Prof. Rejilla (m)	Saliente (m)*	Diámetro (in)	Unidad Hidrogeológica	Sector
DH-FS-309	4.792.271,49	2.277.047,34	916,16	42,00	17-28	0,20	1,5	UHG-7 Roca fresca fracturada	El Diluvio
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	872,01	50,00	43-48	0,22	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	La María
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	866,39	56,90	41-56	0,46	2	UHG-7 Roca fresca fracturada	La María

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Golder Associates, (2017)

a. Variación de niveles piezométricos

El análisis de la variación piezométrica se llevó a cabo a partir de la medición de niveles en 15 piezómetros activos que se encuentran distribuidos en el sector. Dichos puntos presentan datos desde febrero del año 2016 hasta junio del 2025. Aunque entre mayo del 2018 y entre enero del 2025 solo se presentan cinco mediciones; en el mes de noviembre 2019, junio, septiembre y octubre del 2020 y enero del 2021.

A continuación, en la Tabla 5.1.6.17 se presenta el resumen estadístico de los datos de profundidad del nivel de agua.

Tabla 5.1.6.17 Resumen estadístico de la cota piezométrica

Piezómetro	Cota piezométrica (m.s.n.m)					Unidad hidrogeológica
	# de datos	Promedio	máximo	mínimo	Mediana	
PZA12-03	38	812,72	813,68	812,32	812,61	UHG-3 Depósito aluvial
PZA12-08	39	816,77	817,23	816,36	816,69	
DH-FS-315	39	780,59	780,75	780,05	780,60	
PZS 13-17	41	816,00	817,57	814,53	816,09	UHG-5 Saprolito arenoso
PZS-12-05	39	779,39	779,74	777,97	779,42	
PZS12-12	39	929,72	929,94	929,45	929,75	
PZS12-14	38	817,08	817,55	816,67	817,08	
DH-TM-100	42	786,61	787,18	786,00	786,59	
PZ4	10	929,75	936,92	928,37	929,03	UHG-7 Roca fresca fracturada
PZR 13-07	38	910,36	911,22	909,49	910,37	
PZR 13-09	38	816,38	817,26	815,82	816,34	
BH-5M-03	42	834,07	835,51	833,36	833,75	
BH-5M-08	23	838,74	839,58	838,43	838,66	
DH-FS-309	42	876,11	877,55	875,04	876,02	
PZR 13-05	38	815,83	816,27	815,35	815,84	

Fuente: Integral S.A. 2025

A continuación, se presentan las gráficas de la variación temporal de los niveles freáticos en los piezómetros en mención y la precipitación con registros mensuales de las estaciones Providencia (entre febrero del 2025 y junio del 2025), y GJA EXP. EL NUS del IDEAM (entre febrero del 2016 a septiembre del 2024). Entre octubre del 2016 a agosto del 2017, septiembre y noviembre del 2018, marzo del 2018, agosto del 2022 y octubre del 2024 hasta enero del 2025 no se tienen datos de precipitación en la estación GJA EXP. EL NUS.

Los piezómetros fueron agrupados por la Unidad Hidrogeológica de la cual captan agua. Para el caso de análisis se tienen tres piezómetros en la UHG-3 – Depósitos aluviales (Figura 5.1.6.52), seis piezómetros en la UHG-5 – Saprolito arenoso (Figura 5.1.6.53 y Figura 5.1.6.54) y seis piezómetros en la UHG-7 (Figura 5.1.6.55 y Figura 5.1.6.56).

Los puntos que captan en la UHG-3 presentan variaciones en la cota piezométrica que oscilan entre 817 y 780 m.s.n.m (Figura 5.1.6.52), con variaciones en el nivel freático entre 2,50 y 6,78 m en las últimas mediciones llevadas a cabo entre febrero y junio del 2025

(gráficas a la derecha en la Figura 5.1.6.52). En términos generales, entre 2016 y 2018 se observan bajas fluctuaciones con un comportamiento en el nivel constante.

En las lecturas efectuadas en el 2025 se observan algunas variaciones en el nivel freático cuyos picos en los piezómetros PZA12-03 y DH-FS-315 concuerdan con los registros de mayores precipitaciones registradas en la estación Providencia, que corresponde a los meses de abril, mayo y junio. En cuanto al piezómetro PZA12-08 el incremento es paulatino a partir del mes de abril, lo cual también se ajusta a las épocas lluviosas en el sector.

Es importante mencionar que la ubicación del piezómetro DH-FS-315 se encuentra en la vereda La Linda en inmediaciones de la quebrada La Palestina, cuya ubicación topográfica es más baja en comparación a los otros dos piezómetros que captan de la misma unidad hidrogeológica. Por tanto, su cota piezométrica se observa un poco más profunda en la Figura 5.1.6.52. No obstante, sus fluctuaciones en el nivel se mueven alrededor de los 3,80 y 3,90 m.

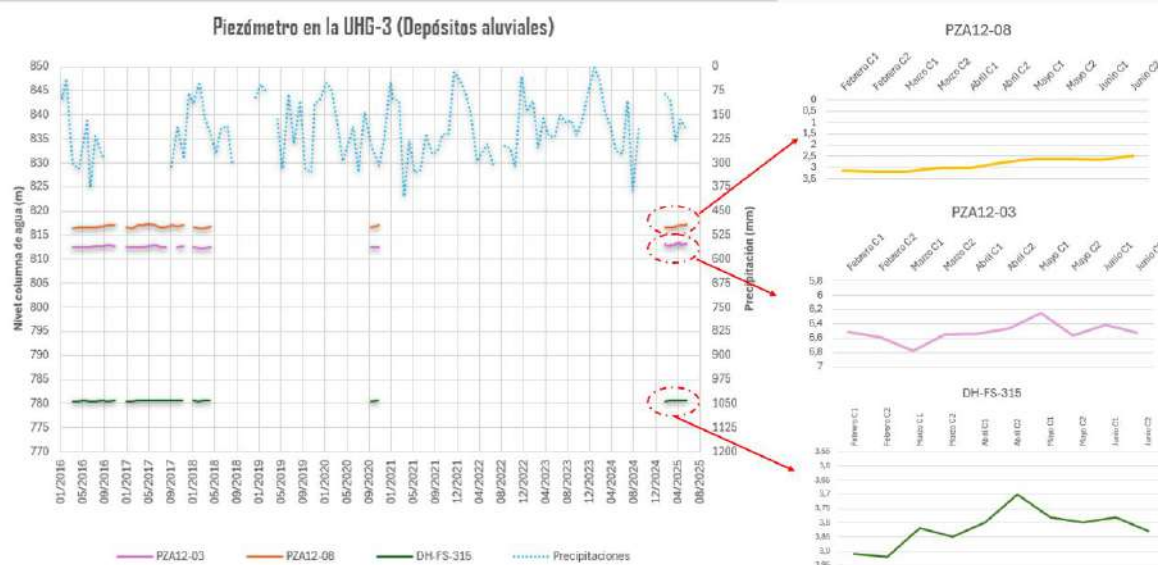


Figura 5.1.6.52 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-3 – Depósitos aluviales

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

En cuanto a los seis piezómetros que captan de la UHG-5 – Saprolito arenoso, se observa un comportamiento en la cota piezométrica entre 830 y 937 msnm., con variaciones en el nivel freático en las últimas mediciones llevadas a cabo entre febrero y junio del 2025, entre 1,5 y 4,6 m (gráficas a la derecha en la Figura 5.1.6.53 y Figura 5.1.6.54), a excepción de los piezómetros PZ4 y PZS13-12 que oscilan entre 10 y 28 m, en estos piezómetros las rejillas se localizan a mayor profundidad.

En términos generales, el comportamiento en los niveles entre el 2016 y 2018 es más o menos homogéneo, sin embargo, en las últimas mediciones efectuadas, entre febrero y junio del 2025 se evidencian unos incrementos en los niveles en los puntos PZS12-12, PZ4 y PZS12-14 (gráficas a la derecha en la Figura 5.1.6.53) en los meses de abril y mayo cuyo comportamiento se relaciona con las épocas de lluvia registradas en la estación

Providencia. En cuanto a los otros piezómetros presentados en la Figura 5.1.6.54 no hay relación del nivel con el régimen de lluvias.

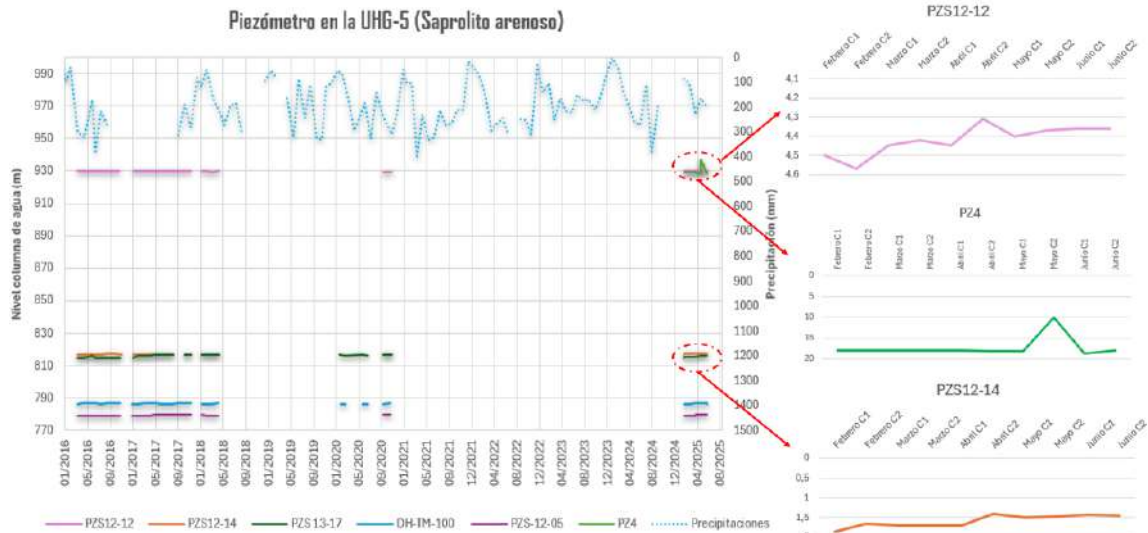


Figura 5.1.6.53 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 12-12, PZ4 y PZS 12-14

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

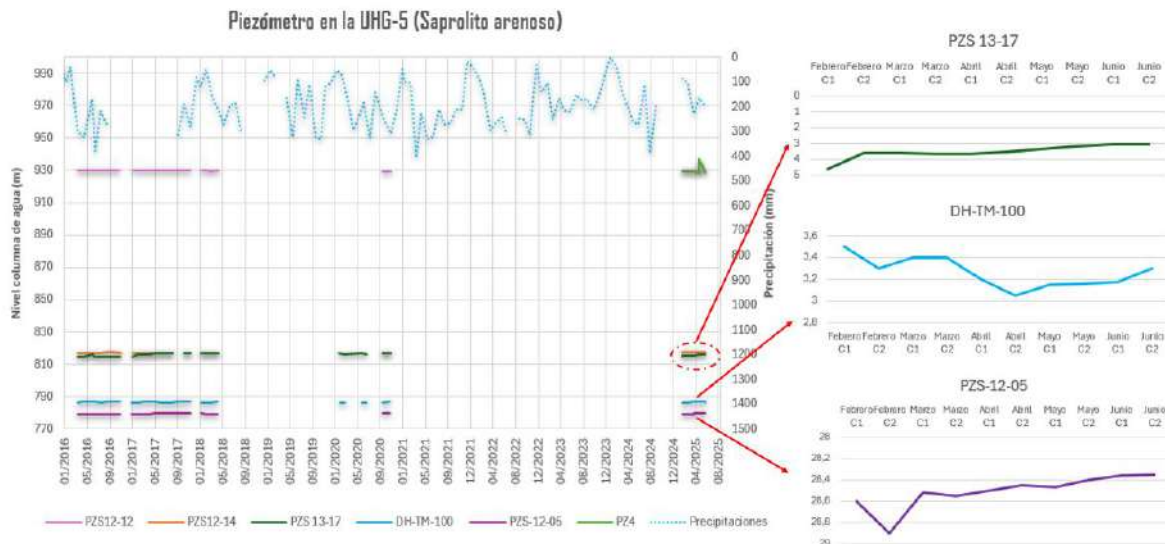


Figura 5.1.6.54 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-5 – Saprolito arenoso. Piezómetros PZS 13-17, DH-TM-100 y PZS-12-05

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

Finalmente, el comportamiento de la cota piezométrica de los seis puntos que captan de la UHG-7 – Roca fresca fracturada, oscila entre 849 y 911 msnm., con variaciones en el nivel estático entre 1,5 y 9,5 m y 20,0 y 38,0 m (graficas a la derecha en la Figura 5.1.6.55 y Figura 5.1.6.56).

En términos generales en los datos de niveles entre 2016 y 2018 parece mostrar un comportamiento constante, sin drásticas variaciones. En las últimas mediciones efectuadas, entre febrero y junio del 2025, no se evidencia un comportamiento relacionado con régimen de lluvias registrado en la estación Providencia.

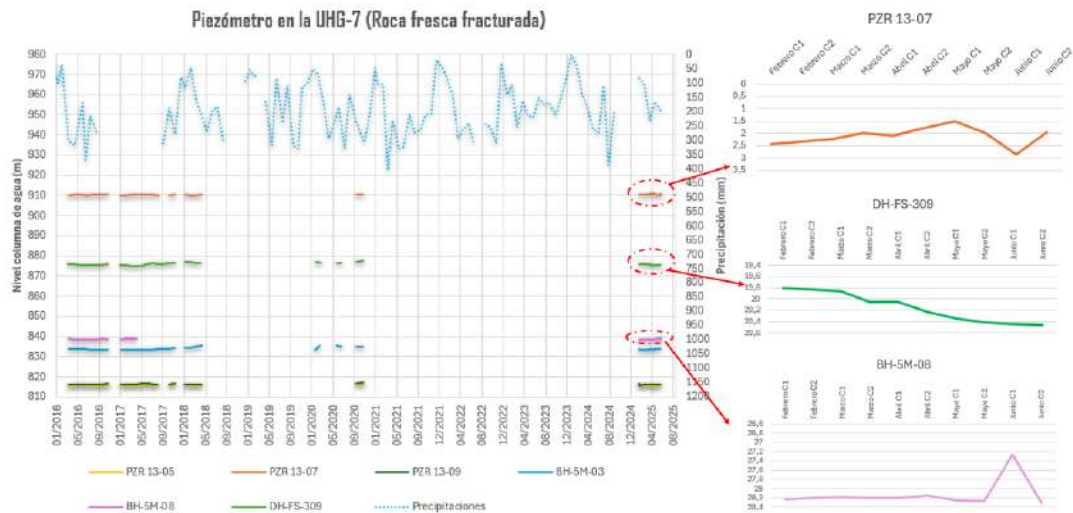


Figura 5.1.6.55 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros PZR 13-07, DH-FS-309 y BH-5M-08

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

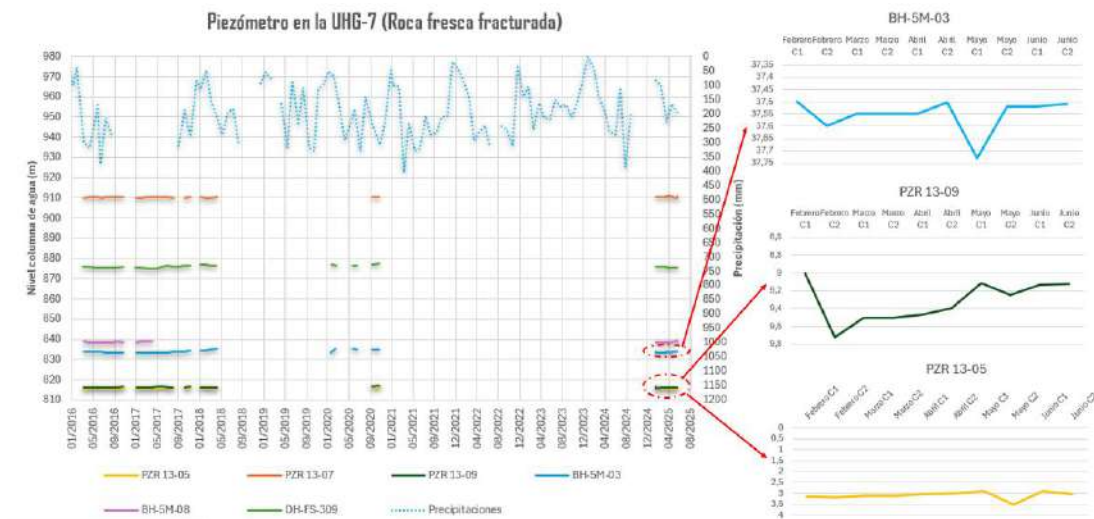


Figura 5.1.6.56 Variación temporal de la cota piezométrica en los piezómetros que captan de la unidad hidrogeológica UHG-7 – Roca fresca fracturada. Piezómetros BH-5M-03, PZR 13-09 y PZR 13-05

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI, (2025) y Gramalote_Groundwater Level_Data 06-2021

El monitoreo de niveles piezométricos realizado entre febrero y agosto de 2025 evidencia una estabilidad general en los niveles, con variaciones mínimas entre campañas. No obstante, se identificó que las variaciones puntuales en el punto PZ4 son transitorios, ya que los registros en la campaña 10 demuestra que la columna de agua vuelve a su profundidad habitual. Estos cambios repentinos, aunque aislados, resaltan la importancia de mantener un monitoreo continuo y detallado para detectar posibles alteraciones en el sistema acuífero, ya sea por causas naturales o antrópicas. (SHI, 2025).

La comparación entre los niveles piezométricos registrados durante las campañas de 2025 y los eventos de precipitación sugiere que el sistema hidrogeológico presenta un comportamiento mayormente estable frente a variaciones climáticas. A pesar de su naturaleza heterogénea y anisotrópica, evidenciada por la amplia variabilidad en los niveles estáticos, la respuesta general del acuífero ante la lluvia ha sido leve, con fluctuaciones menores a 1 m. Solo un punto, como PZ4, presentaron cambios atípicos que requieren seguimiento. En conjunto, los resultados respaldan la necesidad de continuar con el monitoreo periódico para confirmar estas tendencias y comprender mejor la dinámica del flujo subterráneo bajo distintos escenarios hidrológicos. (SHI, 2025).

b. Mapa piezométrico y direcciones de flujo

La configuración de la red de flujo se determinó a partir de los piezómetros de la red de monitoreo dentro del área de influencia abiótica, dado que son los puntos con mayor número de mediciones. Para la interpolación se empleó la técnica “Spline with Barriers”; la cuál interpola una superficie ráster, utilizando barreras, mediante la técnica de curvatura mínima. La Figura 5.1.6.57 y el mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISOP muestra la red de flujo generada.

El agua subterránea se desplaza en la dirección de mayor a menor nivel piezométrico, las líneas de flujo son perpendiculares a las líneas equipotenciales en los medios isótropos como se puede observar en la Figura 5.1.6.57 . En términos generales, la dirección de flujo en la zona oeste del área de influencia abiótica va de sur a norte, descargando en el río Nus; mientras que en la zona este sigue una dirección este-oeste, paralela con el curso del río Nus.

En la zona central hacia el norte del área de influencia abiótica se observa una variación en las isopiezas que podría estar relacionada con condiciones locales no completamente caracterizadas, lo que sugiere que la interpolación podría no representar con total precisión el comportamiento real.

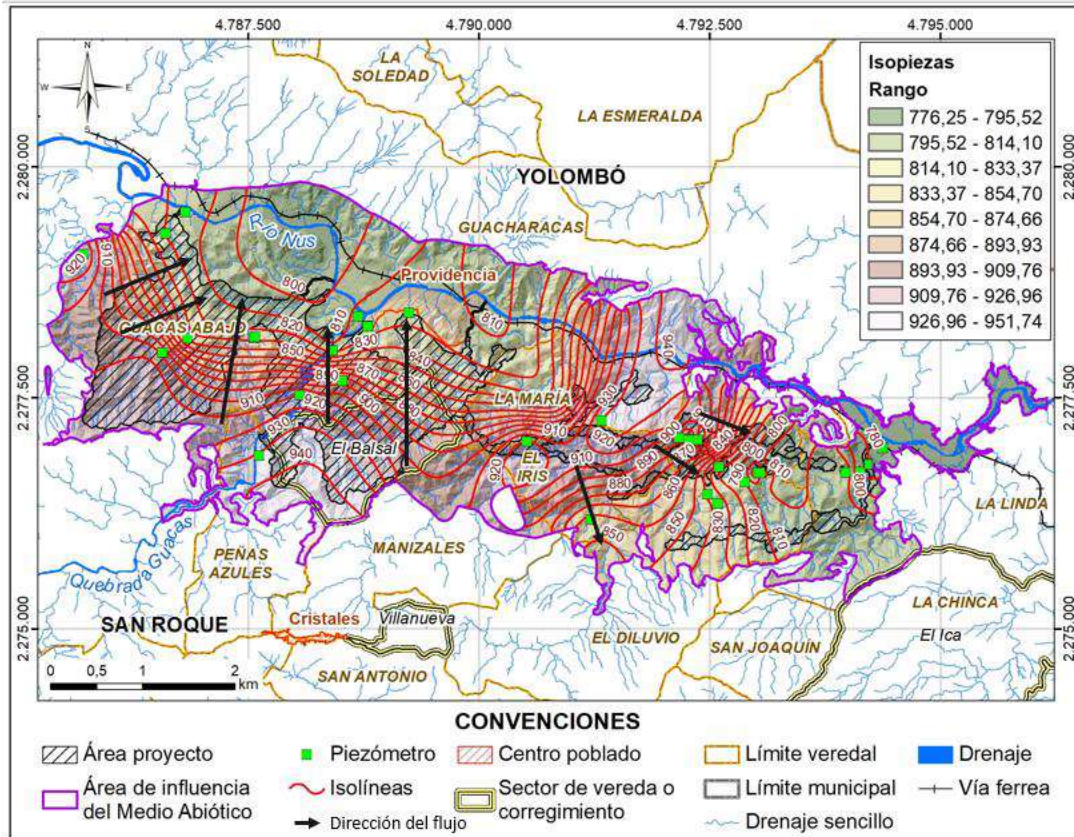


Figura 5.1.6.57 Mapa de isopiezas

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.2 Evaluación hidráulica

En el área de interés, se han realizado ensayos hidráulicos para determinar los parámetros hidrogeológicos de las unidades hidrogeológicas, entre los que se cuenta con ensayos Slug, Lefranc, Lugeon y pruebas de bombeo. El mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-PERF presenta el compilado de la evaluación hidráulica ejecutada en el proyecto.

5.1.6.2.1 Pruebas de permeabilidad

Las pruebas de permeabilidad realizadas en campo corresponden a ensayos de tipo slug, Lefranc y Lugeon.

A. Pruebas tipo slug en piezómetros GEOSUB y PERFOTEC, 2012

Para este tipo de pruebas se presentan los ensayos realizados por las empresas GEOSUB y PERFOTEC en los meses de mayo y julio del año 2012.

El cálculo de la permeabilidad o conductividad hidráulica en las unidades hidrogeológicas del área se determina en varios casos mediante pruebas Slug Falling head. Esta prueba se lleva cabo si el volumen extraído con un bayler, (1 litro), es inferior al 10% del volumen

almacenado en el piezómetro, se adiciona agua al piezómetro, generando un ascenso en el nivel de agua, y se toman los datos de recuperación hasta que se alcanza nuevamente el nivel estático.

En la Tabla 5.1.6.18 y Figura 5.1.6.58 se muestran los piezómetros en los cuales se llevaron a cabo las pruebas.

Tabla 5.1.6.18 Pruebas Slug en piezómetros. GEOSUB y PERFOTEC, 2012

Id piezómetro	Coordenadas		Prof (m)	Diámetro (pulg)	Total, filtros (m)	Tipo de prueba	Unidad captada
	Este	Norte					
PZS-12-03	4.789.070,11	2.278.069,81	60	2	35	Slug Falling Head	Saprolito
PZS-12-05	4.793.423,93	2.276.372,13	38	2	20	Slug Falling Head	Saprolito
PZS-12-12	4.787.949,01	2.277.838,28	13	4	6	Slug Falling Head	Saprolito
PZR-12-02	4.787.949,01	2.277.842,28	46	2	9	Slug Falling Head	Roca Ígnea
PZR-12-03*	4.790.234,36	2.277.442,54	66,7	2	13	Slug Falling Head	Roca Ígnea
PZR-12-08*	4.791.765,39	2.276.305,68	56,4	2	22	Slug Falling Head	Roca Ígnea

Nota: Los piezómetros con () indican que, durante la campaña de campo de inventario de puntos de agua llevada a cabo entre enero y febrero del año 2025, no fueron encontrados.

Fuente: Modificado de Integral S.A., (2018)

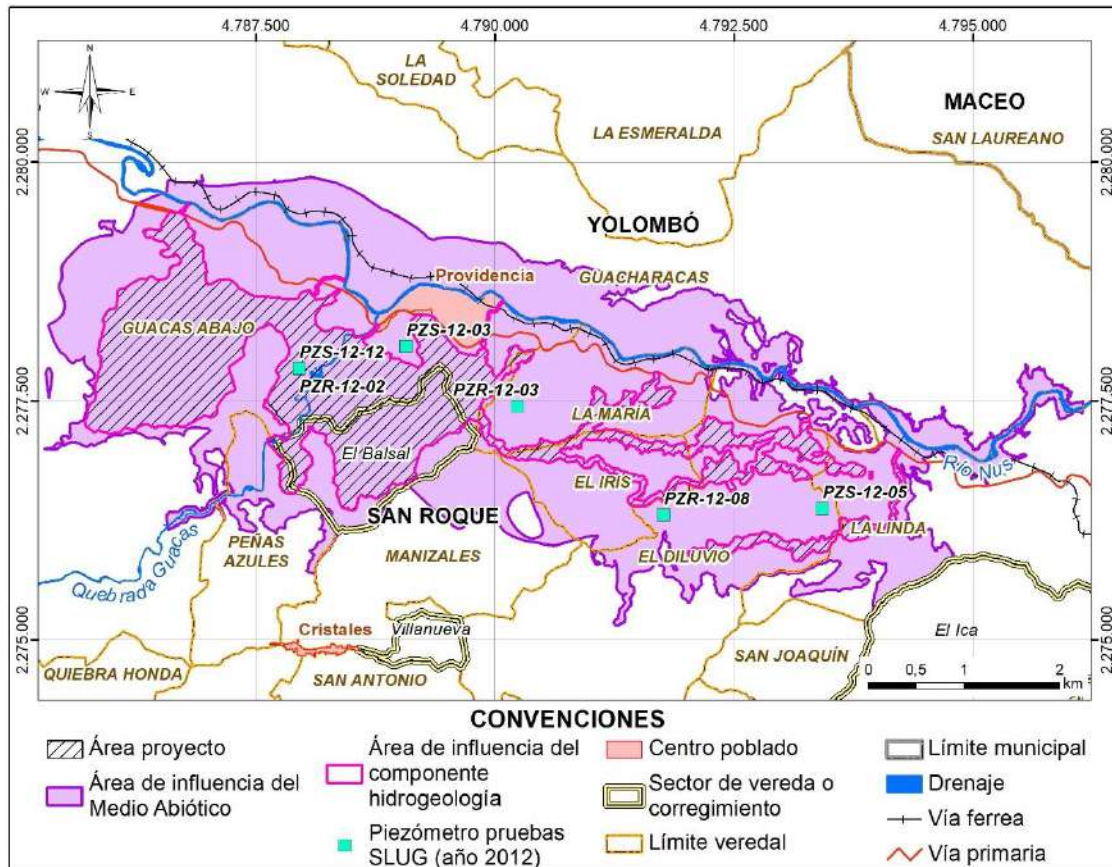


Figura 5.1.6.58 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Slug – GEOSUB y PERFOTEC 2012

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Integral S.A., 2018

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas slug llevadas a cabo:

En la Tabla 5.1.6.19 se muestra el resumen de las pruebas Slug realizadas y los resultados de conductividad hidráulica obtenidos.

Tabla 5.1.6.19 Resumen pruebas Slug en las UHG-5 y UHG-7

Identificación	Profundidad (m)	Tipo de prueba	Tiempo de prueba	Nivel estático (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	UHG
PZS-12-03	60,0	Slug Falling Head	256	44,7	2,08E-03	UHG-5 – Saprolito arenoso
PZS-12-05	38,0	Slug Falling Head	327	27,8	1,20E-03	UHG-5 – Saprolito arenoso
PZS-12-12	13,0	Slug Falling Head	108	4,2	3,01E-02	UHG-5 – Saprolito arenoso
PZR-12-02	46,0	Slug Falling Head	92	3,72	1,44E-02	UHG-7 – Roca fresca fracturada
PZR-12-03	66,7	Slug Falling Head	250	39,48	3,86E-02	UHG-7 – Roca fresca fracturada
PZR-12-08	56,4	Slug Falling Head	109	19,24	3,17E-02	UHG-7 – Roca fresca fracturada

Fuente: Modificado de Integral S.A., (2018)

B. Pruebas de tipo Lefranc y Lugeon, 2012 y 2013

En el año 2012 y 2013, dentro de la investigación geotécnica en las áreas de las diferentes facilidades mineras del proyecto, se realizaron pruebas hidráulicas tipo Falling Head Test (Lefranc) y ensayos Lugeon (ensayos Packer) en el saprolito y en la roca respectivamente, con el fin de estimar la conductividad hidráulica de estas unidades.

En la Tabla 5.1.6.20 se muestra el resumen de los resultados obtenidos de la conductividad hidráulica. Y la localización espacial de los pozos donde se efectuaron los ensayos se muestran en la Figura 5.1.6.59.

Tabla 5.1.6.20 Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2012 y 2013

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lefranc	suelo residual	3,5	5	1,5	3,02E-01	3,50E-06
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lefranc	saprolito	8,7	10	1,3	8,04E-02	9,31E-07
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lefranc	saprolito	13,5	15	1,5	1,73E-02	2,00E-07
BH-01	4.790.522,57	2.277.026,38	Lugeon	tonalita	46,25	50,15	3,9	1,47E-01	1,70E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lefranc	suelo residual	3,5	5	1,5	1,04E-01	1,20E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lefranc	saprolito	8,5	10	1,5	2,07E-01	2,40E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lefranc	saprolito	13,2	15	1,8	1,12E-01	1,30E-06
BH-2-1	4.789.033,24	2.277.118,05	Lugeon	quarzodiorita	35,63	40,3	4,67	7,43E-02	8,60E-07
BH-5M-01	4.789.872,30	2.277.228,02	Lefranc	saprolito	7,4	8	0,6	8,04E-02	9,31E-07
BH-5M-01	4.789.872,30	2.277.228,02	Lugeon	quarzodiorita	37	40,1	3,1	5,44E-03	6,30E-08
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lefranc	suelo residual	8,1	9,6	1,5	2,85E-02	3,30E-07
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lefranc	suelo residual	13,9	15,9	2	3,02E-02	3,50E-07
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lugeon	tonalita	42,5	48,5	6	2,16E-01	2,50E-06
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	Lugeon	tonalita	46,6	50	3,4	8,29E-03	9,59E-08
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	Lefranc	saprolito	20,3	21,6	1,3	2,68E-02	3,10E-07
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	Lugeon	quarzodiorita	50,3	54,3	4	5,36E-03	6,20E-08
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	Lugeon	quarzodiorita	53,7	56,9	3,2	1,15E-01	1,33E-06
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lefranc	suelo residual-saprolito	0,4	2,65	2,25	6,05E-02	7,00E-07
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lefranc	saprolito-saprock	9	17	8	3,46E-02	4,00E-07
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lugeon	tonalita	52,6	56,6	4	1,47E-02	1,70E-07
DH-TM-01	4.792.603,32	2.276.750,88	Lugeon	tonalita	57,7	65	7,3	7,78E-03	9,00E-08

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lefranc	suelo residual-saprolito	3,2	5,6	2,4	5,18E-01	6,00E-06
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lefranc	saprolito	7,2	10,8	3,6	4,32E-01	5,00E-06
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lugeon	tonalita	32,9	37,5	4,6	8,64E-04	1,00E-08
DH-TM-02	4.792.586,14	2.276.355,58	Lugeon	tonalita	38,3	45,5	7,2	8,64E-04	1,00E-08
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lefranc	suelo residual	0	7	7	8,64E-03	1,00E-07
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lefranc	saprock	8,5	17	8,5	1,73E-02	2,00E-07
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lugeon	tonalita	33	39	6	2,25E-03	2,60E-08
DH-TM-03	4.793.387,38	2.276.723,32	Lugeon	tonalita	42,9	49,9	7	1,47E-02	1,70E-07
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lefranc	suelo residual-saprolito	0	7,5	7,5	4,32E-03	5,00E-08
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lefranc	saprock	7	14,4	7,4	7,78E-02	9,00E-07
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lugeon	tonalita	42,5	46,5	4	2,07E-02	2,40E-07
DH-TM-04	4.791.234,97	2.277.217,36	Lugeon	tonalita	46,5	50,4	3,9	2,33E-02	2,70E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lefranc	suelo residual	0,3	6,8	6,5	1,73E-02	2,00E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lefranc	suelo residual	5,2	15,6	10,4	2,59E-02	3,00E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	39	43	4	4,41E-03	5,10E-08
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	43	47	4	7,95E-03	9,20E-08

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	47,5	51,5	4	8,29E-03	9,59E-08
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	57	61	4	8,64E-04	1,00E-08
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	67,5	71,5	4	1,38E-02	1,60E-07
DH-TM-10	4.792.884,72	2.276.589,88	Lugeon	tonalita	70,5	74,5	4	1,30E-02	1,50E-07
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	Lefranc	aluvial-saprolito	0	7,2	7,2	2,59E-02	3,00E-07
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	Lugeon	tonalita	13,1	17,1	4		
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	Lugeon	tonalita	16,7	21,9	5,2	9,50E-02	1,10E-06
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lefranc	suelo residual-saprolito	0	6,2	6,2	1,73E-02	2,00E-07
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lefranc	saprolito-saprock	7,5	16,3	8,8	3,46E-03	4,00E-08
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lugeon	tonalita	16	20,7	4,7	1,12E-01	1,30E-06
DH-TM-109	4.792.557,35	2.276.001,96	Lugeon	tonalita	20,6	26,3	5,7	2,59E-01	3,00E-06
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lefranc	suelo residual	0	5	5	3,46E-03	4,00E-08
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lefranc	suelo residual-saprolito	5,4	12	6,6	1,73E-01	2,00E-06
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lugeon	tonalita	41,6	46,1	4,5	3,20E-02	3,70E-07
DH-TM-110	4.792.028,19	2.276.993,19	Lugeon	tonalita	47,6	52,3	4,7	9,50E-05	1,10E-09
DH-TM-115	4.791.211,87	2.276.181,30	Lefranc	saprock	0	5	5	2,59E-02	3,00E-07

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-TM-115	4.791.211,87	2.276.181,30	Lugeon	tonalita	14,4	18,6	4,2	9,50E-02	1,10E-06
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lefranc	suelo residual	0	5,5	5,5	6,91E-03	8,00E-08
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lefranc	saprock	9	15	6	3,46E-02	4,00E-07
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lugeon	tonalita	26,8	31,4	4,6	1,21E-03	1,40E-08
DH-TM-123	4.790.856,42	2.277.093,84	Lugeon	tonalita	29,8	34,6	4,8	8,64E-04	1,00E-08
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lefranc	saprolito	0,4	4	3,6	3,46E-02	4,00E-07
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lefranc	saprolito-saprock	6	15	9	1,73E-02	2,00E-07
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lugeon	tonalita	29,5	35,5	6	3,54E-02	4,10E-07
DH-WR-09	4.785.657,63	2.278.437,37	Lugeon	tonalita	33,5	39,5	6	1,81E-03	2,09E-08
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lefranc	material removido	0	4,3	4,3	4,32E-02	5,00E-07
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lefranc	saprock	9,2	12,6	3,4	1,73E-02	2,00E-07
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lugeon	tonalita	25,8	28,8	3	3,46E-02	4,00E-07
DH-WR-201	4.786.607,73	2.279.278,00	Lugeon	tonalita	28,7	32,6	3,9	4,92E+01	5,69E-04
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lefranc	suelo residual	0	4,4	4,4	6,91E-03	8,00E-08
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lefranc	saprock	21	35,3	14,3	1,73E-02	2,00E-07
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lugeon	tonalita	42,4	46,4	4	8,64E-04	1,00E-08

Perforación	Coordenada Este	Coordenada Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo Superior (m)	Tramo ensayo Inferior (m)	Longitud (m)	Conductividad hidráulica (m/d)	Conductividad hidráulica (m/s)
DH-WR-203	4786840,96	2.278.147,90	Lugeon	tonalita	44	49	5	6,65E-03	7,70E-08
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lefranc	saprock	0	4,9	4,9	8,64E-03	1,00E-07
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lefranc	saprock	7,5	11,7	4,2	6,05E-03	7,00E-08
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lugeon	tonalita	21,4	25,9	4,5	3,72E-02	4,31E-07
DH-WR-204	4785556,48	2.277.577,88	Lugeon	tonalita	24,8	29	4,2	9,50E-03	1,10E-07

Fuente: Modificado de Intgral S.A., 2018

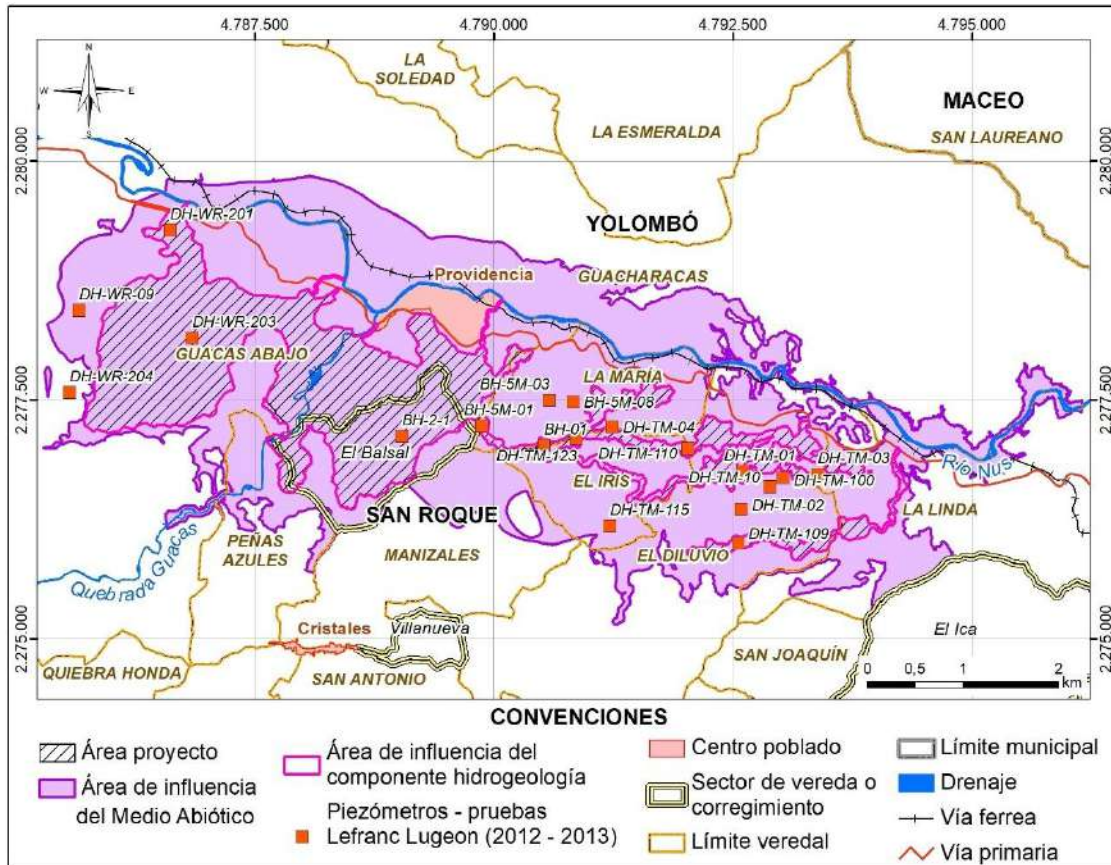


Figura 5.1.6.59 Distribución espacial de los piezómetros en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2012 y 2013

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de Integral S.A., 2018

C. Pruebas de tipo Lefranc y Lugeon 2024-2025

Dentro de los estudios actuales de Diseño del proyecto, Geodrill llevó a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon en suelo y roca respectivamente para determinar el valor de permeabilidad de los materiales. En la Tabla 5.1.6.21 se muestra un resumen de las pruebas llevadas a cabo en las diferentes perforaciones ejecutadas y en la Figura 5.1.6.60 su ubicación espacial (Ver ANEXO_CHARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_PRUEBASPERMEABILIDAD).

Tabla 5.1.6.21 Resultados pruebas Lefranc y Lugeon, 2024 y 2025

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
PG24_006	4.789.689,62	2.277.555,77	Lefranc	Saprolito (V)	15,60	16,70	1,10	3,60E-06
PG24_010	4.789.860,08	2.277.665,12	Lefranc	Saprolito (V)	22,40	23,40	1,00	2,13E-06
PG24_010	4.789.860,08	2.277.665,12	Lugeon	Roca moderadamente meteorizada (III)	28,30	30,70	2,40	0,00E+00
PG24_009	4.789.859,89	2.277.615,11	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	8,80	10,00	1,20	4,65E-08
PG24_008	4.789.779,87	2.277.615,43	Lefranc	Saprolito (V)	17,90	19,50	1,60	3,53E-07
PG24_008	4.789.779,87	2.277.615,43	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	34,00	36,01	2,01	5,01E-08
PG24_018	4.789.689,47	2.277.515,77	Lefranc	Saprolito (V)	13,20	13,80	0,60	6,87E-08
PG24_018	4.789.689,47	2.277.515,77	Lugeon	Roca fresca meteorizada (I)	38,17	39,17	1,00	2,76E-07
PG24_013	4.789.689,62	2.277.555,77	Lefranc	Saprolito (V)	13,40	15,10	1,70	4,43E-06
PG24_013	4.789.689,62	2.277.555,77	Lefranc	Saprolito (V)	23,20	24,10	0,90	8,33E-07
PG24_013	4.789.689,62	2.277.555,77	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	57,05	59,20	2,15	3,93E-08
PG25_017	4.789.629,46	2.277.516,01	Lefranc	Saprolito (V)	28,20	29,50	1,30	6,12E-06
PG25_017	4.789.629,46	2.277.516,01	Lefranc	Saprolito (V) - Transición (IV)	34,20	35,00	0,80	6,84E-06
PG25_017	4.789.629,46	2.277.516,01	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II) - Roca fresca (I)	38,50	41,00	2,50	4,65E-08
PG25_012	4.789.629,62	2.277.556,01	Lefranc	Saprolito (V)	13,20	15,00	1,80	3,80E-06

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
PG25_012	4.789.629,62	2.277.556,01	Lefranc	Saprolito (V)	23,70	25,00	1,30	6,98E-07
PG25_012	4.789.629,62	2.277.556,01	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	37,63	40,73	3,10	2,97E-09
PG25_016	4.789.569,45	2.277.516,24	Lefranc	Saprolito (V)	29,70	31,00	1,30	2,74E-06
PG25_016	4.789.569,45	2.277.516,24	Lefranc	Saprolito (V)	34,20	36,00	1,80	1,01E-05
PG25_016	4.789.569,45	2.277.516,24	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	41,51	45,11	3,60	0,00E+00
PG25_011	4.789.569,45	2.277.516,24	Lefranc	Saprolito (V)	28,20	30,00	1,80	2,03E-06
PG25_019B	4.789.542,10	2.277.465,48	Lefranc	Saprolito (V)	14,50	16,00	1,50	2,07E-06
PG25_019B	4.789.542,10	2.277.465,48	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	34,20	37,25	3,05	9,88E-09
PG25_020	4.789.629,30	2.277.476,00	Lefranc	Saprolito (V)	8,70	10,00	1,30	2,58E-06
PG25_020	4.789.629,30	2.277.476,00	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	21,65	25,15	3,50	1,22E-08
PG25_015B	4.789.424,63	2.277.574,15	Lefranc	Saprolito (V)	9,00	10,00	1,00	8,48E-06
PG25_015B	4.789.424,63	2.277.574,15	Lefranc	Saprolito (V)	19,00	20,00	1,00	4,86E-07
PG25_015B	4.789.424,63	2.277.574,15	Lugeon	Roca fresca (I)	30,58	33,08	2,50	0,00E+00
PG25_021	4.789.689,31	2.277.475,76	Lefranc	Depósito aluvial (Ambiente lagunar)	1,50	2,00	0,50	3,97E-06
PG25_021	4.789.689,31	2.277.475,76	Lugeon	Roca fresca (I)	13,00	15,00	2,00	3,93E-08
PG25_003B	4.789.419,24	2.277.658,54	Lefranc	Saprolito (V)	9,00	10,00	1,00	7,44E-06
PG25_026	4.789.665,51	2.277.457,18	Lefranc	Saprolito (V)	11,1	11,90	0,80	4,07E-06
PG25_026	4.789.665,51	2.277.457,18	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	20,07	22,35	2,28	Red de r

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
PG25_001B	4.789.270,14	2.277.510,62	Lefranc	Saprolito (V)	12,20	13,20	1,00	3,16E-06
PG25_001B	4.789.270,14	2.277.510,62	Lefranc	Saprolito (V)	33,35	34,35	1,00	1,01E-04
PG25_001B	4.789.270,14	2.277.510,62	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	41,15	43,15	2,00	8,13E-08
PG25_025	4.789.637,93	2.277.394,52	Lefranc	Saprolito (V)	14,00	15,00	1,00	4,19E-05
PG25_025	4.789.637,93	2.277.394,52	Lugeon	Roca ligeramente meteorizada (II)	32,00	34,00	2,00	3,93E-08
PG25_004B	4.789.710,13	2.277.540,32	Lefranc	Saprolito (V)	4,7	5,50	0,80	1,63E-05
TG25-BH-01	4.788.905,07	2.277.197,28	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	4,1	5,1	1,00	4,3E-06
TG25-BH-01	4.788.905,07	2.277.197,28	Lugeon	Roca	13,05	15,05	2,00	9,88E-09
TG25-BH-02	4.788.811,42	2.277.086,19	Lefranc	Grano grueso con limos y arcilla en tramos puntuales	5,25	6,25	1,00	2,20E-03
TG25-BH-02	4.788.811,42	2.277.086,19	Lugeon	Roca	22,8	25	2,2	0,00E+00
TG25-BH-02	4.788.811,42	2.277.086,19	Lefranc	Grano grueso con limos y arcilla en tramos puntuales	10,1	11,1	1,00	2,21E-05
TG25-BH-03	4.788.747,33	2.277.052,4	Lefranc	Material compuesto por Bloques y arenas	5,5	6,5	1,00	5,73E-06
TG25-BH-05	4.788.672.64	2.277.086.24	Lugeon	Roca	8,5	10,4	1,5	0,00E+00
TG25-BH-07	4.789.121,66	2.277.181,09	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	6,05	7,05	1,00	1,88E-05
TG25-BH-07	4.789.121,66	2.277.181,09	Lugeon	Roca	22,9	23,9	1,00	4,50E-09

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
TG25-BH-06	4.788.860,42	2.276.866,77	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	4,25	5,25	1,00	5,43E-06
TG25-BH-04	4.788.987,02	2.277.015,23	Lefranc	Material arenoso y bloques de roca	8,2	9,2	1,00	1,43E-05
TG25-BH-04	4.788.987,02	2.277.015,23	Lugeon	Roca	11,45	13,45	2,00	0,00E+00
TG25-BH-08-01	4.792.718,51	2.276.652,72	Lefranc	Intercalación de material arenoso y arcillo-limoso	4,30	5,30	1,00	3,45E-07
TG25-BH-08-02	4.792.718,51	2.276.652,72	Lefranc	Material arenoso con fracciones de finos	8,55	10,05	1,50	4,97E-07
TG25-BH-08-03	4.792.718,51	2.276.652,72	Lefranc	Zona de transición y roca muy fracturada	13,95	15,10	1,15	2,29E-08
TG25-BH-08A-01	4.792.718,77	2.276.653,74	Lefranc	Material compuesto por arcillas y limos	0,20	1,50	1,30	5,33E-07
TG25-BH-08A-02	4.792.718,77	2.276.653,74	Lefranc	Material compuesto por arcillas y limos	1,7	3,00	1,30	4,80E-07
TG25-BH-09-01	4.792.840,66	2.276.745,09	Lefranc	Material compuesto por finos con fracciones de arena	7,95	9,45	1,50	9,99E-08
TG25-BH-09-02	4.792.840,66	2.276.745,09	Lefranc	Material compuesto por arenas	20,05	21,05	1,00	1,34E-04
TG25-BH-10-01	4.792.959,4	2.276.672,57	Lefranc	Material compuesto por finos con	2,6	3,6	1,00	3,44E-07

Perforación	Este	Norte	Prueba hidráulica	Litología-ensayo	Tramo ensayo			Conductividad hidráulica (m/s)
					Superior (m)	Inferior (m)	Longitud (m)	
				fracciones de arena				
TG25-BH-10-02	4.792.959,40	2.2766.72,57	Lefranc	Material compuesto por arenas	8,85	10,9	2,05	2,50E-07
TG25-BH-09	4.792.840,66	2.276.745,09	Lugeon	Roca	29,74	31,74	2,00	4,47E-05

Fuente: Fuente: Integral S.A., 2025 a partir anexos de ensayos de permeabilidad Geodrill
(ANEXO_CHARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_PRUEBASPERMEABILIDAD)

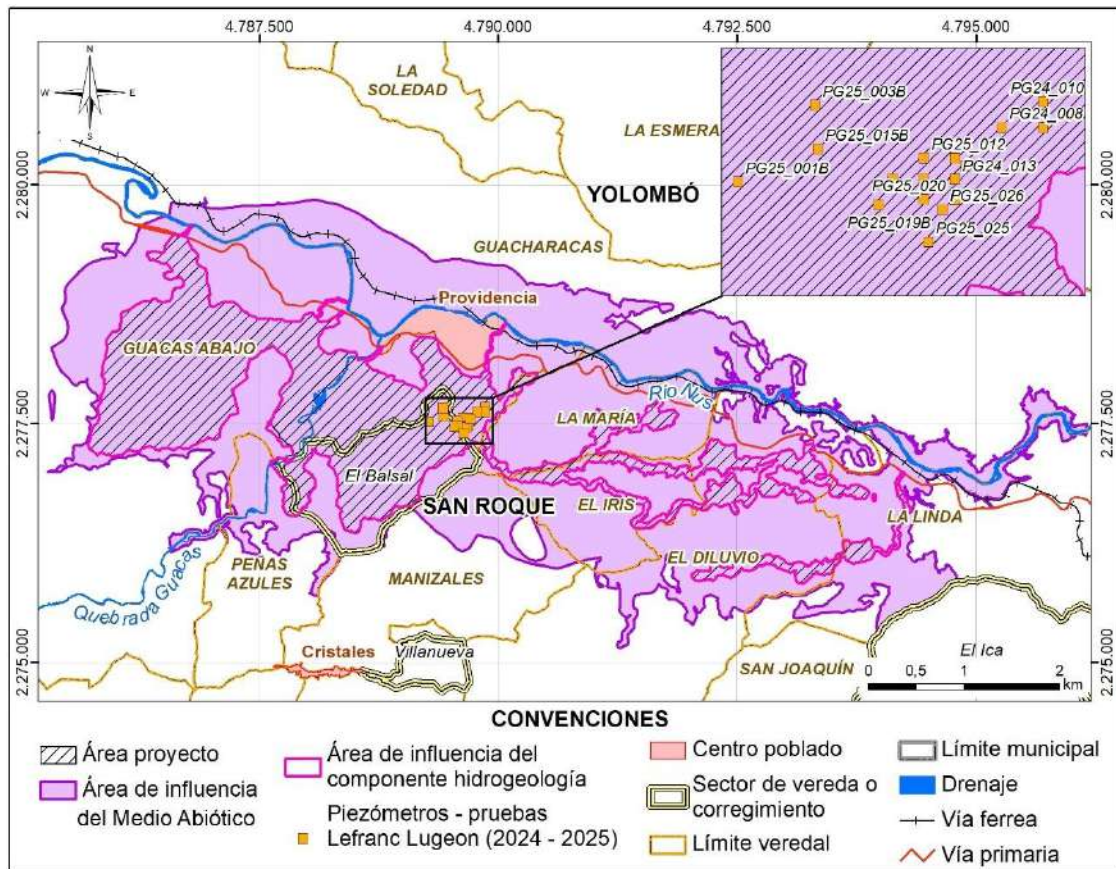


Figura 5.1.6.60 Distribución espacial de las perforaciones en los que se llevaron a cabo pruebas de tipo Lefranc y Lugeon – 2024 - 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir anexos de ensayos de permeabilidad Geodrill

5.1.6.2.2 Pruebas de Bombeo, GEOSUB 2012

En el año 2012 GEOSUB llevó a cabo la construcción de los pozos de bombeo y piezómetros que se muestran en la Tabla 5.1.6.22 y Figura 5.1.6.61.

Tabla 5.1.6.22 Resumen de los pozos de bombeo con pruebas a caudal constante, GEOSUB 2012

Id	Localiz.	Coordenadas		Prof. (m)	Diámetro (pulg)	Total filtros (m)	Tipo de prueba	Unidad captada
		Este	Norte					
POZO PZA-12-01	Margen Izquierda Q. La Colorada	4.790.072, 72	2.277.586, 84	9	4	6	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza Q. La Colorada
POZO PZA-12-03	Desembocadura Q. Guacas al R. Nus	4.789.070, 11	2.278.069, 81	9	4	6	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza Q. Guacas
POZO PZA-12-06	La Estrella	4.787.563, 80	2.278.148, 99	7,5	4	3	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza Q. San Antonio
POZO PZA-12-08	Sector El Banco	4.787.193, 17	2.279.194, 42	6	4	4,5	Constante Y Recuperación	Depósito de Terraza R. Nus
POZO PZS-12-10	Finca La Estrella	4.791.794, 25	2.276.246, 64	8,5	4	6	Constante Y Recuperación	Saprolito
POZO PZS-12-11	Sector San Antonio	4.786.086, 58	2.278.740, 95	14	4	6	Constante Y Recuperación	Saprolito
POZO PZS-12-14	Providencia	4.789.617, 00	2.278.108, 62	9	4	6	Constante Y Recuperación	Saprolito

Fuente: Modificado de Integral S.A., 2018

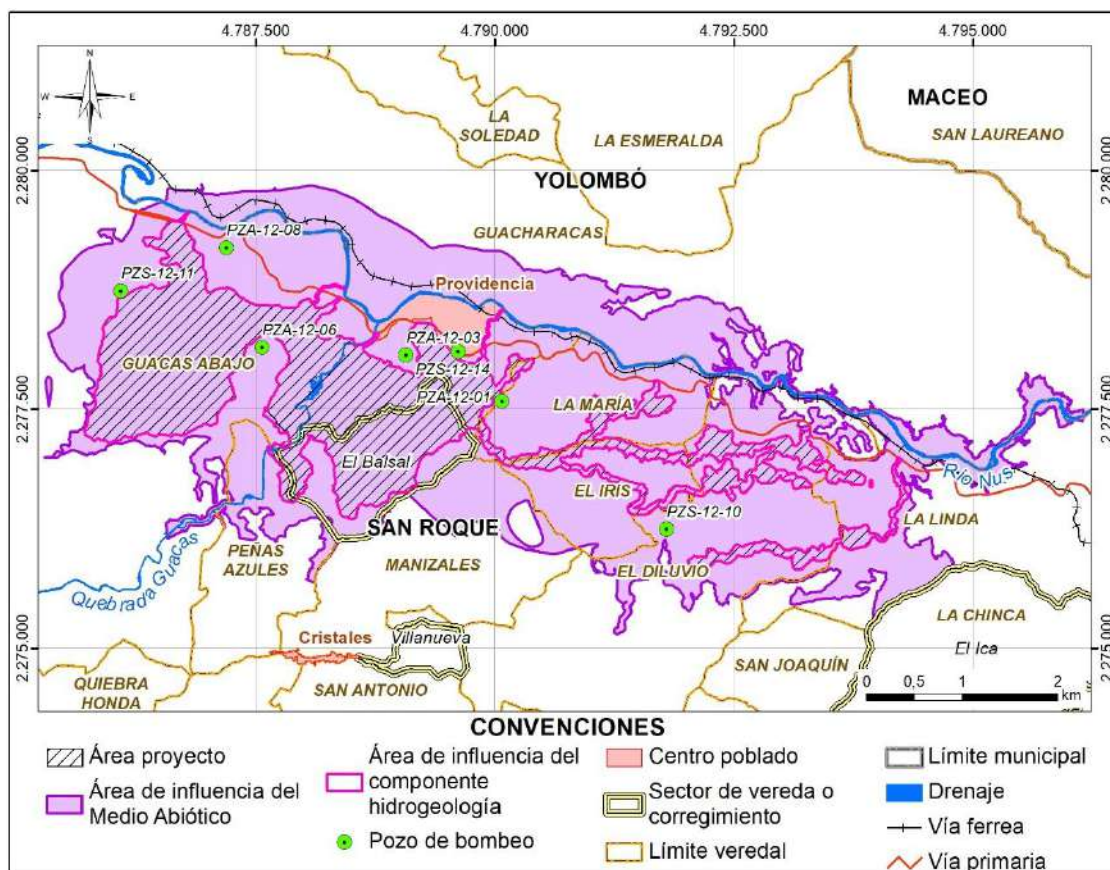


Figura 5.1.6.61 Distribución espacial de los puntos donde se llevaron a cabo las pruebas de bombeo – GEOSUB 2012

Fuente: Integral S.A., a partir de Integral S.A., 2018

Los resultados de las pruebas de bombeo se presentan en la Tabla 5.1.6.23 hasta la Tabla 5.1.6.29

Tabla 5.1.6.23 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-01 y el piezómetro PZA-12-01-1

Identificador	Piezómetro				Promedio
	PZA 12-01 -1	PZA 12-01 -1	Pozo PZA 12-01	PZA 12-01 -1	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,40	0,40	0,40	0,40	
Tiempo prueba (min)	720	720	60	60	

Identificador	Piezómetro				Promedio
	PZA 12-01 -1	PZA 12-01 -1	Pozo PZA 12-01	PZA 12-01 -1	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	Theis Recovery	Theis Recovery	
T (m ² /día)	15,60	14,20	24,40	20,30	20,0
S		2,65 E-01			2,65E-01
K. real (m/día)	2,60	2,37	4,07	3,39	3,0
Porosidad eficaz (%)		0,26			0,26

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.24 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-03 y el piezómetro PZA-12-03-1

Captación	Piezómetro PZA 12-03 -1	Piezómetro PZA 12-03 -1	Pozo PZA 12-03	PROMEDIO
Aparato o medida de nivel	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperac,	
Caudal (l/s)	0,26	0,26	0,26	
Tiempo de prueba(min)	720	720	300	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	Theis Recovery	
T (m ² /día)	59,2	63,40	63,20	60,0
S		3,01 E-01		3,01E-01
K. real (m/día)	9,87	10,60	10,50	10,0
Porosidad eficaz (%)		0,30		0,30

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.25 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-06 y el piezómetro PZA-12-06-1

Captación	Piezómetro PZA 12-06 -1	Piezómetro PZA 12-06 -1	Pozo PZA 12-06	Piezómetro PZA 12-06-1	Promedio
Aparato o medida de nivel	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,20	0,20	0,20	0,20	
Tiempo de prueba(min)	1440	1440	60	60	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	Theis Recovery	Theis Recovery	
T (m ² /día)	24,40	22,20	23,40	24,50	23,6
S	1,86 E-01	1,74 E-01			1,80 E-01
K. real (m/día)	8,13	7,42	7,79	8,17	7,85
Porosidad eficaz (%)	0,18	0,17			0,17

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.26 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZA-12-08 y el piezómetro PZA-12-08-1

Captación	Aparto de medida de nivel	Tipo de prueba	Caudal	Tiempo de prueba	Método de interpretación	T (m ² /día)	S	K. Real	Resistencia hidráulica	Porosidad eficaz (%)
			(l/s)	(min)				(m/día)	(min)	
Pozo PZA12-08	Sonda Eléctrica	Caudal Constante	0,86	720	Walton	48,8	1,09 E-03	10,9	6,64 E+3	
Piezómetro PZA12-08 - 1	Sonda Eléctrica	Caudal Constante (Sector Confinado)i	0,86	720	Neuman	58		13		
Piezómetro PZA 12-08 -1	Sonda Eléctrica	Caudal Constante (Sector Libre)i	0,86	720	Neuman	49,9	1,31 E-01	11,1		0,13
Pozo PZA 12-08	Sonda Eléctrica	Recuperac.	0,86	420	Theis Recovery	60,3		13,4		
Promedio						54	1,31 E-01	12	6,64 E+3	0,13

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.27 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-10

Captación	Pozo PZS 12-10	Pozo PZS 12-10	Pozo PZS 12-10	Promedio
Aparato medida de nivel	Diver	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante	Caudal Constante	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,1	0,1	0,1	
Tiempo prueba (min)	480	480	60	
Método de interpretación	Theis	Theis	Theis Recovery	
T (m ² /día)	3,63	3,49	2,5	3,2
S	1,44 E-05	2,29 E-05		1,86 E-05
K. Real (m/día)	0,6	0,58	0,41	0,52

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.28 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-11 y el piezómetro PZS-12-11-1

Captación	Piezómetro PZA 12-11 -1	Pozo PZA 12-11	Pozo PZA 12-11	Piezómetro PZA 12-11 -1	Promedio
Aparato medida de nivel	Sonda Eléctrica	Diver	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante	Recuperación	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,19	0,19	0,19	0,19	
Tiempo prueba (min)	720	720	720	720	
Método de interpretación	Theis	Theis Recovery	Theis Recovery	Theis Recovery	
T (m ² /día)	92,4	83	84,6	85,7	86,5
S	9,80 E -04				9,80E -04
K. Real (m/día)	15,4	13,8	14,1	14,3	14,5

Fuente: Integral S.A., 2018

Tabla 5.1.6.29 Pruebas de bombeo interpretadas y valores de los parámetros hidráulicos obtenidos en el Pozo PZS-12-14 y el piezómetro PZS-12-14-1

Captación	Piezómetro PZS 12-14 -1	Piezómetro PZS 12-14 -1	Pozo PZS12-14	Piezómetro PZS 12-14 -1	Promedio
Aparato Medida del Nivel	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	Sonda Eléctrica	
Tipo de prueba	Caudal Constante (Sector Confinado)	Caudal Constante (Sector Libre)	Recuperación	Recuperación	
Caudal (l/s)	0,17	0,17	0,17	0,17	
Tiempo de prueba(min)	720	720	120	120	
Método de interpretación	Neuman	Neuman	TheisRecovery	TheisRecovery	
T (m ² /día)	52,8	44,9	44,5	53,2	48
S		1,09 E-01			1,0 E-01
K. Real (m/día)	4,8	4,09	4,05	4,84	4,45
Resistencia hidráulica (min)		0,1			0,1

Fuente: Integral S.A., 2018

5.1.6.2.3 Resumen de resultados de valores de conductividad hidráulica

Para caracterizar las propiedades hidráulicas de las unidades geológicas en la zona de estudio, se recopiló información proveniente de pruebas hidráulicas orientadas a estimar la conductividad hidráulica (K) de los materiales presentes. Estas pruebas fueron desarrolladas por Hidrogeocol (2012), Knight Piésold (2013), Golder (2013) y Gramalote (2016), y se encuentran consignadas en los informes técnicos de Gramalote (2018) y Golder (2020). Adicionalmente, se dispone de información más reciente proveniente de los ensayos realizados por Geodrill S.A.S. en 2025.

En el marco del plan minero se proyecta el desarrollo de 13 zonas de disposición de material. Para estos depósitos, se ha estimado una conductividad hidráulica entre 8,6 y 8,6E-2 m/día (INTEGRAL S.A., 2025), basada en la granulometría y el tipo de material que se prevé disponer, compuesto principalmente por limos con arenas limosas y arcillosas (SHI SAS, 2025).

Hidrogeocol (2012) reportaron seis pruebas de bombeo realizadas en piezómetros instalados en diferentes depósitos de terrazas aluviales del río Nus y de las quebradas Guacas, San Antonio y La Colorada. Estas pruebas arrojaron una conductividad hidráulica promedio de 10,1 m/día para esta unidad.

También se cuenta con datos de seis pruebas slug realizadas en el horizonte de suelo residual del Batolito Antioqueño, y siete pruebas de bombeo ejecutadas en el saprolito de esta misma unidad, también reportadas por Hidrogeocol (2012). Los valores promedio obtenidos fueron de 4,53E-03 m/ día para el suelo residual y 6,96 m/día para el saprolito (SHI SAS, 2025).

En estudios posteriores, se han realizado pruebas hidráulicas de tipo Lefranc y pruebas de infiltración en las unidades de depósitos aluviales, suelo residual y saprolito. Estos ensayos son de corta duración y permiten evaluar la capacidad de infiltración de la capa superficial (zona vadosa), y la permeabilidad de los materiales de forma local, a diferencia de las pruebas de bombeo y slug, en las que se observa la variación del nivel del agua durante varias horas o incluso días, permitiendo evaluar la conductividad hidráulica de la unidad de interés a una escala más regional. Por esta razón, se decide priorizar los valores obtenidos mediante pruebas de bombeo y slug para estas unidades, al considerarse más representativos del comportamiento hidrogeológico a gran escala (SHI SAS, 2025).

En 2025, Geodrill S.A.S. desarrolló pruebas hidráulicas alrededor de la zona de planta de beneficio, enfocadas principalmente en la caracterización de las unidades de saprolito y roca mediante ensayos Lefranc y Lugeon, respectivamente. Se realizaron dos ensayos Lefranc en la zona de transición (horizontes IC-IIA), con un valor promedio de conductividad hidráulica de 0,39 m/día; un ensayo Lefranc en el horizonte de roca moderadamente meteorizada que arrojó un valor de 0,195 m/día; y once ensayos Lugeon en horizontes de roca sana a levemente meteorizada, los cuales arrojaron un valor promedio de 0,0029 m/día. Adicionalmente se cuenta con el resultado de un ensayo Lefranc realizado en depósitos coluviales que presentó un valor de 0,343 m/día. La Tabla 5.1.6.30 resume las propiedades hidráulicas de las diferentes unidades analizadas.

Tabla 5.1.6.30. Resumen de parámetros hidráulicos de las unidades de la zona de estudio

Litología	Horizonte		Conductividad Hidráulica (m/día)			Número de ensayos
	BS 5930	Deere y Patton	Max	Min	Media Geom.	
Depósitos antrópicos (ZODMES)	-	-	8,64	8,64E-02	0,864	-
Depósitos coluviales y de flujo	-	-	-	-	0,343	1
Depósitos aluviales	-	-	45,0	3,0	10,1	6
Suelo residual	VI	IB	0,03	0,001	0,0045	6
Saprolito	V	IC	50,0	0,52	6,96	7
Zona de transición	IV	IC-IIA	4,48	0,073	0,57	2
Roca moderadamente meteorizada	III	IIA	-	-	0,195	1
Roca sana y levemente meteorizada	II y I	IIB y III	0,007	0,00026	0,0029	4

Fuente: (SHI SAS, 2025) partir de Hidrogeocol (2012) y Geodrill (2025)

5.1.6.3 Evaluación Hidrogeoquímica e Isotópica

5.1.6.3.1 Red de monitoreo hidrogeoquímico e isotópico

La red de monitoreo para el MEIA en el año 2025 consiste en 37 puntos que se presentan en la Tabla 5.1.6.31. En la columna 3 se presenta el tipo de punto al que pertenece.

La red de monitoreo tuvo en cuenta los puntos que se han monitoreado en campañas anteriores en otras fases del proyecto. En la Figura 5.1.6.62 se presenta la distribución de estos.

Tabla 5.1.6.31 Red de monitoreo hidrogeoquímico e isotópico

Numero*	Nombre del punto	Tipo de Punto	Magna Sirgas – Origen Nacional		Elevación (msnm.)
			Este (m)	Norte (m)	
1	Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	4.789.186,43	2.278.003,58	822,16
2	Aljibe La Mayoría	Aljibe	4.789.157,00	2.278.274,00	819,82
3	M18	Manantial	4.785.026,00	2.279.282,00	860,62
4	M20	Manantial	4.784.820,00	2.279.262,00	894,31
5	M87	Manantial	4.791.172,47	2.277.086,67	901,56
6	M118	Manantial	4.790.870,00	2.277.586,00	838,83
7	M121	Manantial	4.790.623,00	2.277.240,00	846,63
8	M189	Manantial	4.791.361,59	2.277.365,17	862,80
9	M242	Manantial	4.787.071,94	2.278.639,06	845,98
10	M233	Manantial	4.788.618,36	2.276.912,66	897,24
11	M100	Manantial	4.788.591,86	2.276.281,66	1.073,01
12	M195	Manantial	4.785.309,35	2.278.313,99	887,67
13	M215	Manantial	4.785.857,12	2.277.220,63	1.037,33
14	M222	Manantial	4.792.247,91	2.277.167,34	889,34
15	PZA12-03	Piezómetro	4.788.695,00	2.278.385,00	819,16
16	PZA12-08	Piezómetro	4.786.818,00	2.279.510,00	819,30
17	PZS12-12	Piezómetro	4.785.710,98	2.279.056,64	833,94
18	PZS12-14	Piezómetro	4.789.241,20	2.278.423,32	818,42
19	PZR 13-05	Piezómetro	4.788.795,74	2.278.273,32	818,03
20	PZR 13-07	Piezómetro	4.788.059,71	2.277.532,15	914,16
21	PZR 13-09	Piezómetro	4.788.416,71	2.278.012,22	824,66
22	PZS 13-17	Piezómetro	4.788.803,74	2.278.276,30	818,00
23	DH-FS-309	Piezómetro	4.792.271,49	2.277.047,34	916,16
24	DH-FS-315	Piezómetro	4.794.134,26	2.276.696,50	808,75

Numero*	Nombre del punto	Tipo de Punto	Magna Sirgas – Origen Nacional		Elevación (msnm.)
			Este (m)	Norte (m)	
25	DH-TM-100	Piezómetro	4.793.025,14	2.276.684,86	814,11
26	BH-5M-03	Piezómetro	4.790.577,00	2.277.496,00	872,01
27	BH-5M-08	Piezómetro	4.790.827,00	2.277.484,00	866,39
28	PZS 12-05	Piezómetro	4.794.234,12	2.276.778,46	832,46
29	PZ4	Piezómetro	4.791.328,00	2.277.254,00	939,09
30	Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	4.789.134,00	2.278.266,00	836,00
31	Totalizador 2 Manizales	Lluvia	4.789.432,00	2.275.309,00	1.260,00
32	Totalizador 3 La Bella	Lluvia	4.782.560,00	2.277.999,00	1.301,00
33	Quebrada Palestina	Agua Superficial	4.794.124,00	2.276.916,00	841,00
34	Quebrada Topacio	Agua Superficial	4.785.448,00	2.280.030,00	836,00
35	Quebrada San Antonio	Agua Superficial	4.788.129,00	2.278.624,00	844,00
36	Quebrada El Balsal	Agua Superficial	4.789.274,00	2.277.710,00	856,00
37	Quebrada El Banco	Agua Superficial	4.786.606,00	2.278.560,00	878,00

*La columna número corresponde a las etiquetas en la Figura 5.1.6.62

Fuente: Integral S.A., 2025

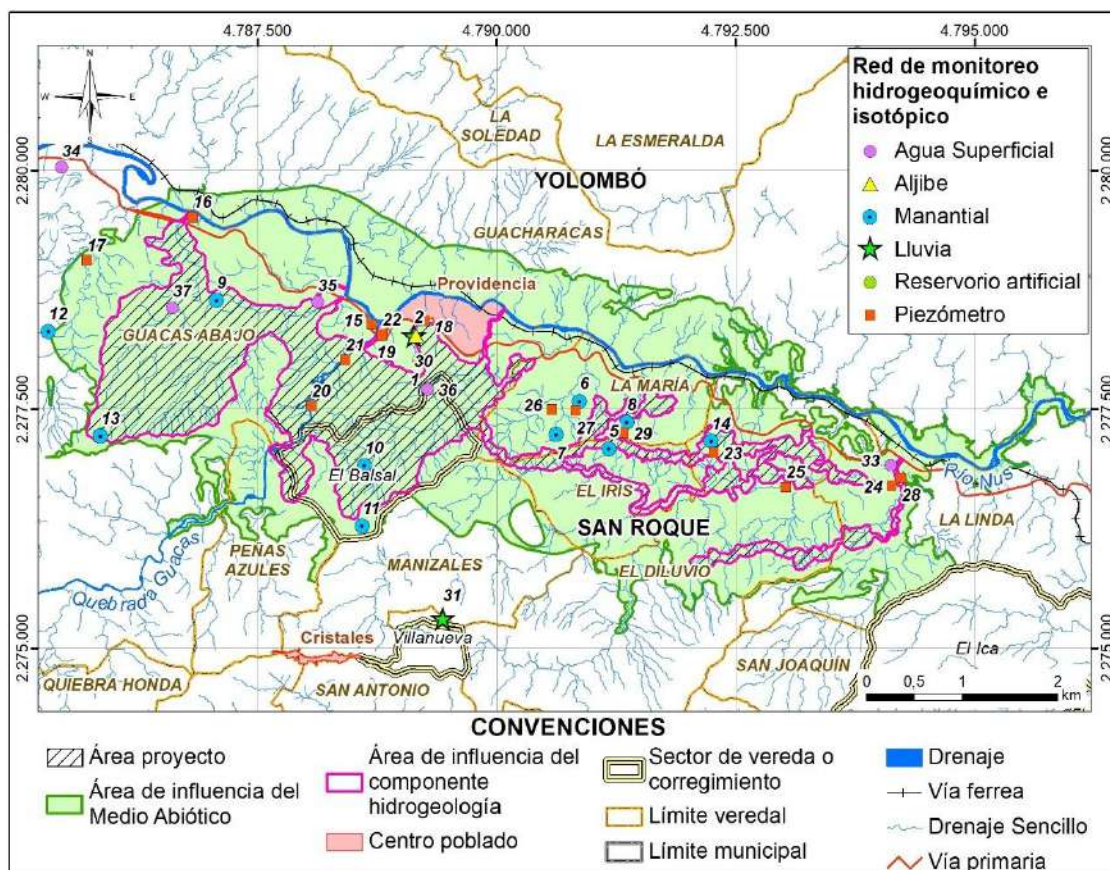


Figura 5.1.6.62 Puntos de la red de Monitoreo

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.3.2 Parámetros fisicoquímicos

La medición de parámetros in situ de los puntos de la red de monitoreo, como el pH y la conductividad eléctrica, es esencial para entender el comportamiento de las aguas subterráneas y los valores necesarios para los análisis isotópicos e hidroquímicos. Estos valores pueden proporcionar información sobre las condiciones fisicoquímicas del sistema hidrogeológico, reflejando procesos de interacción agua-roca, posibles influencias antrópicas y la dinámica del flujo subterráneo. Así mismo, contribuyen a la identificación de fuentes potenciales de contaminación y permiten inferir el origen y evolución del agua dentro del sistema hidrogeológico.

En el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_HIDROGEOQUIMICA E ISOTOPIA se presentan los resultados de los laboratorios de las campañas realizadas.

A. Metodologías medición de parámetros de campo

a. pH

El principio básico de la medida electrométrica del pH es la determinación de la actividad de los iones hidrógeno por medición potenciométrica, usando un electrodo estándar de

hidrógeno y un electrodo de referencia. La fuerza electromotriz (FEM) producida sobre el vidrio del electrodo varía linealmente con el pH. Esta relación lineal es descrita graficando la FEM medida contra el pH de diferentes sustancias buffers. El pH de la muestra es determinado por extrapolación.

El valor de pH se midió siguiendo el procedimiento 4500-H⁺ B (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2023) utilizando una sonda tipo PHC301 marca HACH.

b. Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es el inverso de la resistencia específica, y se expresa en micromho por centímetro ($\mu\text{mho/cm}$), equivalentes a microsiemens por centímetro ($\mu\text{S/cm}$) en el Sistema Internacional de Unidades. La conductividad, k , es una medida de la capacidad de una solución acuosa para transportar la corriente eléctrica. Esta habilidad depende de la presencia de iones; de su concentración total, movilidad, y valencia; y de la temperatura de la medición. Soluciones cuya composición es en mayor parte de compuestos inorgánicos son relativamente buenas conductoras. Consecuentemente, moléculas de compuestos orgánicos que no se disocian en solución acuosa conducen muy pobremente la corriente eléctrica.

La conductividad eléctrica se midió siguiendo el procedimiento 2510 B (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2023) utilizando una sonda tipo CDC301 marca HACH.

c. Temperatura

Las sondas de pH (PHP-301), conductividad eléctrica (CDC301) y oxígeno disuelto (LDO101) cuentan con sensor de temperatura incorporado con resolución de medida, $0,1^{\circ}\text{C}$, sin embargo, cada sensor cuenta con un rango de medición distinto.

La temperatura se midió siguiendo el procedimiento 2550 B (American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, 2023) y el valor reportado es el del sensor de la sonda de pH. Periódicamente se prueba la desviación de los dispositivos contra una referencia certificada como estrategia de control de calidad.

SHI S.A.S realizó 4 campañas, una cada mes entre febrero y mayo de 2025.

B. Medición de parámetros fisicoquímicos

a. Campaña 1

A continuación, se presentan los resultados de la campaña de los parámetros fisicoquímicos medidos en estos puntos entre el 4 de febrero y 20 de febrero de 2025, debido a que aportan información adicional para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterránea.

Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo se presentan en la Tabla 5.1.6.32.

Tabla 5.1.6.32 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[µS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/2/2025	24,9	6,43	72,2
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/2/2025	27,4	6,57	85,8
M18	Manantial	4/2/2025	24,9	7,28	75,7
M20	Manantial	4/2/2025	23,5	7,27	75,2
M87	Manantial	13/02/2025	24,6	7,06	177,3
M118	Manantial	12/2/2025	24,2	6,60	154,8
M121	Manantial	11/2/2025	25,1	7,61	151,8
M189	Manantial	13/02/2025	22,2	7,02	176,7
M242	Manantial	10/2/2025	22,9	6,58	58,9
M233	Manantial	9/2/2025	23,1	6,57	62,5
M100	Manantial	9/2/2025	22,7	6,03	104
M195	Manantial	5/2/2025	El punto de muestreo se encuentra seco		
M215	Manantial	5/2/2025	23,5	6,88	91,5
M222	Manantial	11/2/2025	23,2	6,59	133,8
PZA12-03	Piezómetro	11/2/2025	25,1	6,31	57,9
PZA12-08	Piezómetro	7/2/2025	28,1	6,36	214,2
PZS12-12	Piezómetro	7/2/2025	28,7	6,40	242
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025	27,5	5,97	128,3
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025	25,1	7,51	229
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025	24,7	7,81	283
PZR 13-09	Piezómetro	12/2/2025	25,7	6,77	221
PZS 13-17	Piezómetro	10/2/2025	28,7	6,28	72,3
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025	23,3	6,40	197,4
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025	26,7	6,47	170,7
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025	26,9	6,51	160,1
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025	26,3	7,06	254
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025	26,6	6,96	256
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025	26,7	6,77	150,1
PZ4	Piezómetro	20/02/2025	23,4	6,36	176
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/02/2025	27,1	6,47	23,6
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/02/2025	24,3	6,58	27,9

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[µS/cm]
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/02/2025	23,9	6,45	37,8
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/2/2025	25,6	7,96	128,5
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/2/2025	34,8	7,16	91,3
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	7/2/2025	28,4	7,20	89,4
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	9/2/2025	23,5	7,74	226
Quebrada El Banco	Agua Superficial	6/2/2025	26,8	7,21	93,5

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Se resalta que el manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo.

La temperatura del agua en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.63) varía entre 22,2 y 34,8 °C, con valores que reflejan la influencia de las condiciones meteorológicas al momento del muestreo. En el caso de los puntos de agua subterránea estos valores se pueden asociar con sistemas hidrogeológicos superficiales y poco profundos, donde la temperatura del agua puede verse afectada por la interacción con la radiación solar.

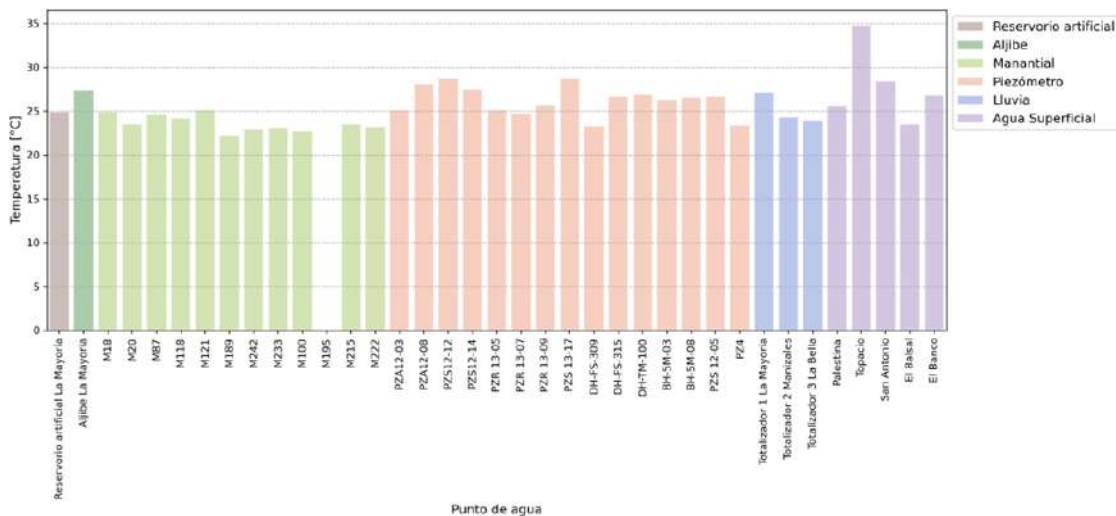


Figura 5.1.6.63 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El pH registrado (Figura 5.1.6.64) oscila entre 5,97 y 7,96 unidades de pH, lo que indica un carácter ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Estos valores son característicos de

sistemas hidrogeológicos donde el agua mantiene una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación.

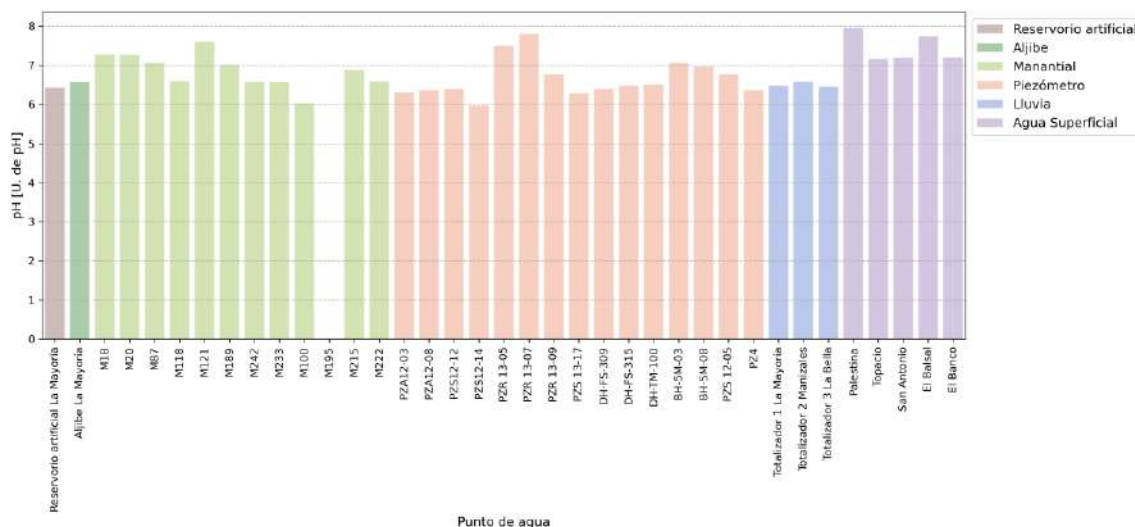


Figura 5.1.6.64 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Al considerar la conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.65), se puede evidenciar que el agua recolectada en los totalizadores presenta los valores más bajos de este parámetro, con un rango entre 23,6 y 37,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que es característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 89,4 y 226 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más alta, entre todas las aguas superficiales.

El reservorio artificial La Mayoría presenta una conductividad eléctrica de 72,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga reciente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 58,9 y 177,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 72,2 – 283 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, la mayoría de estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (283 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y PZS12-12 (242 $\mu\text{S}/\text{cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (72,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y en el aljibe La Mayoría (85,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente.

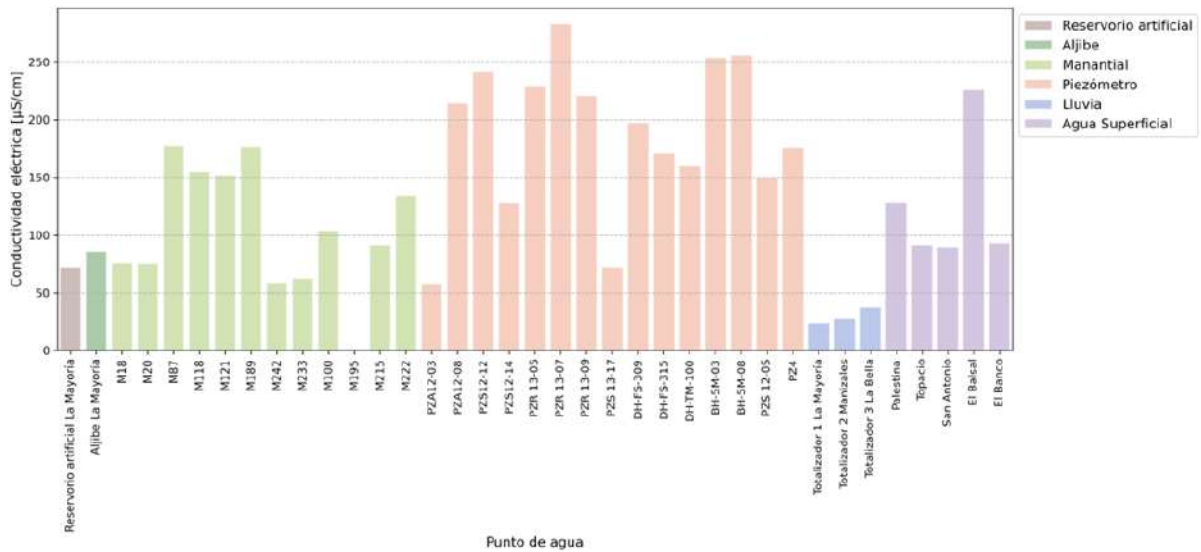


Figura 5.1.6.65 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1

Fuente: SHI S.A.S, 2025

b. Campaña 2

A continuación, se presentan los resultados obtenidos durante la segunda campaña de medición de parámetros fisicoquímicos, realizada entre el 10 y el 16 de marzo de 2025, los cuales ofrecen datos adicionales para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Los resultados de estas mediciones de campo se detallan en la Tabla 5.1.6.33.

Tabla 5.1.6.33 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[µS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	11/3/2025	23,8	6,41	75,8
Aljibe La Mayoría	Aljibe	11/3/2025	23,6	6,63	79,7
M18	Manantial	11/3/2025	22,9	7,30	81,1
M20	Manantial	11/3/2025	23,2	7,39	87,4
M87	Manantial	16/03/2025	24,6	7,01	171,1
M118	Manantial	14/03/2025	24,9	6,86	154,8
M121	Manantial	14/03/2025	26,5	7,84	143,3
M189	Manantial	15/03/2025	22,7	7,27	171,5
M242	Manantial	13/03/2025	22,0	6,81	60,7
M233	Manantial	13/03/2025	25,1	7,17	62,1

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
M100	Manantial	14/03/2025	23,2	6,36	99,9
M195	Manantial	15/03/2025	26,4	6,63	69,9
M215	Manantial	11/3/2025	21,9	6,91	95,7
M222	Manantial	15/03/2025	23,3	5,63	130,3
PZA12-03	Piezómetro	10,/03/2025	26,4	6,35	88,7
PZA12-08	Piezómetro	10/3/2025	27,1	6,42	214,9
PZS12-12	Piezómetro	10/3/2025	27,7	6,67	149,8
PZS12-14	Piezómetro	23/03/2025	26,8	5,92	113,1
PZR 13-05	Piezómetro	10/3/2025	25,5	7,31	264,0
PZR 13-07	Piezómetro	13/03/2025	24,0	7,75	318,0
PZR 13-09	Piezómetro	13/03/2025	25,5	6,50	202,0
PZS 13-17	Piezómetro	15/03/2025	26,0	6,12	79,6
DH-FS-309	Piezómetro	15/03/2025	25,6	6,72	185,5
DH-FS-315	Piezómetro	13/03/2025	25,5	6,65	186,5
DH-TM-100	Piezómetro	13/03/2025	26,1	6,37	163,6
BH-5M-03	Piezómetro	14/03/2025	23,8	6,64	106,5
BH-5M-08	Piezómetro	14/03/2025	25,8	7,19	222,0
PZS 12-05	Piezómetro	15/03/2025	25,6	6,59	130,8
PZ4	Piezómetro	15/03/2025	26,4	6,57	169,7
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/03/2025	27,2	6,38	11,17
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/03/2025	24,7	6,86	15,22
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/03/2025	25,1	6,97	6,87
Quebrada Palestina	Agua Superficial	15/03/2025	27,3	7,85	137,7
Quebrada Topacio	Agua Superficial	10/3/2025	29,2	7,32	84,6
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	10/3/2025	28,9	7,29	88,2
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	13/03/2025	27,1	7,92	277,0
Quebrada El Banco	Agua Superficial	11/3/2025	23,8	6,41	75,8

Fuente: SHI S.A.S, 2025

La temperatura del agua en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.66) oscila entre 21,9 y 29,2 °C, es importante destacar que, los valores dependen de las condiciones climáticas presentes durante el muestreo. En los puntos de agua subterránea, estos rangos de

temperatura pueden estar relacionados con sistemas hidrogeológicos superficiales y poco profundos, donde la temperatura del agua se ve influenciada por la interacción con la radiación solar. Adicionalmente, el valor más alto lo sigue registrando la quebrada el Topacio (29,2 °C), aunque en comparación con la campaña anterior registra una disminución considerable.

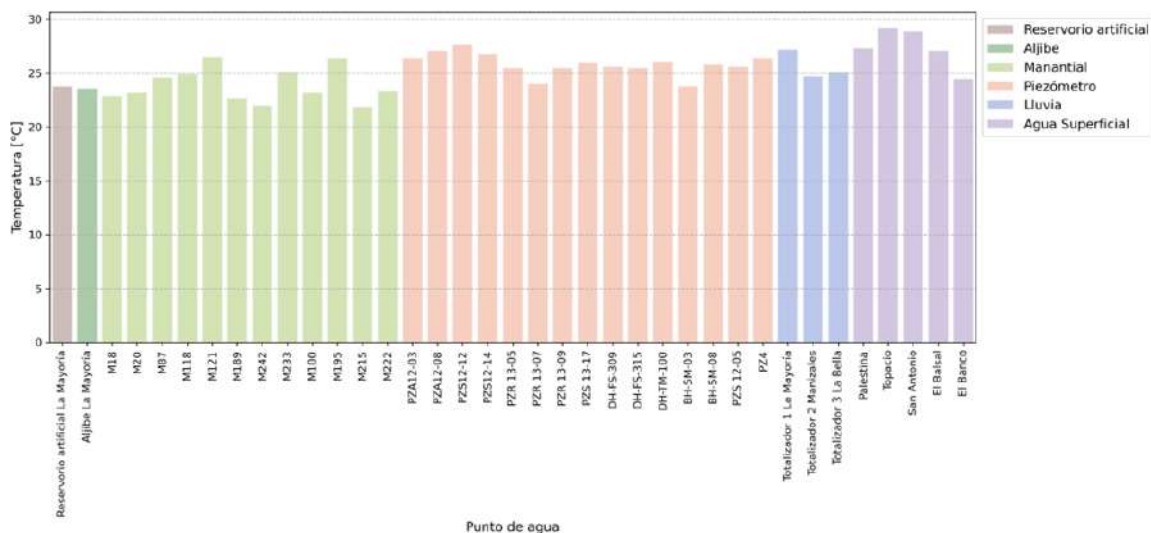


Figura 5.1.6.66 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El pH observado (Figura 5.1.6.67) varía entre 5,63 y 7,92 unidades, lo que sugiere un carácter que va de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Al igual que la campaña anterior, estos valores son típicos de sistemas hidrogeológicos en los que el agua presenta una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin mostrar indicios evidentes de procesos de acidificación intensos.

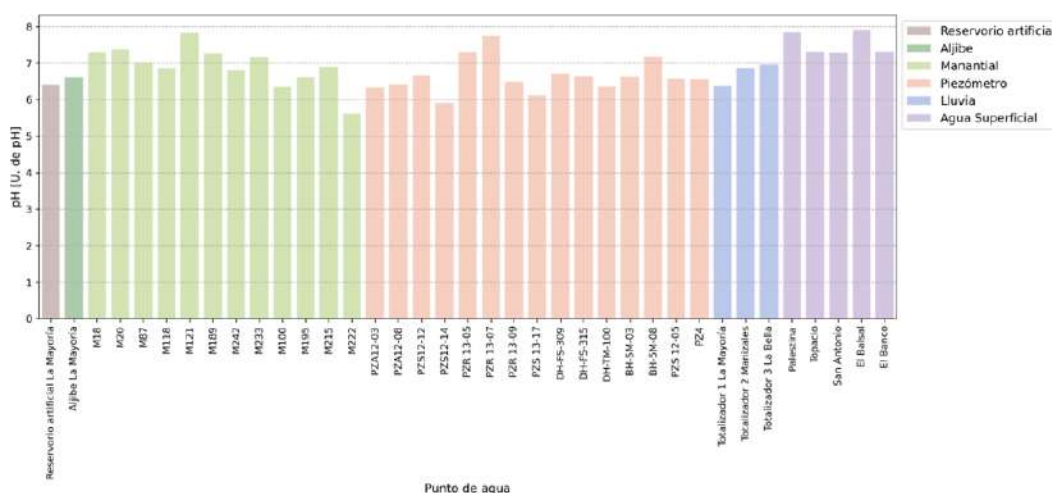


Figura 5.1.6.67 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los resultados de conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.68), permite confirmar un comportamiento similar a la campaña anterior, en donde el agua recolectada en los totalizadores presenta los valores más bajos de este parámetro, con un rango entre 6,87 y 15,22 $\mu\text{S/cm}$, lo que es característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 75,8 y 277 $\mu\text{S/cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más. El reservorio artificial La Mayoría y la quebrada el Banco presentan una conductividad eléctrica de 75,8 $\mu\text{S/cm}$, lo que sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga recientemente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 60,7 y 171,1 $\mu\text{S/cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 79,6 – 318 $\mu\text{S/cm}$. Sin embargo, la mayoría de estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S/cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (318 $\mu\text{S/cm}$) y PZR 13-05 (264 $\mu\text{S/cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (79,6 $\mu\text{S/cm}$) y en el aljibe La Mayoría (79,7 $\mu\text{S/cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente.

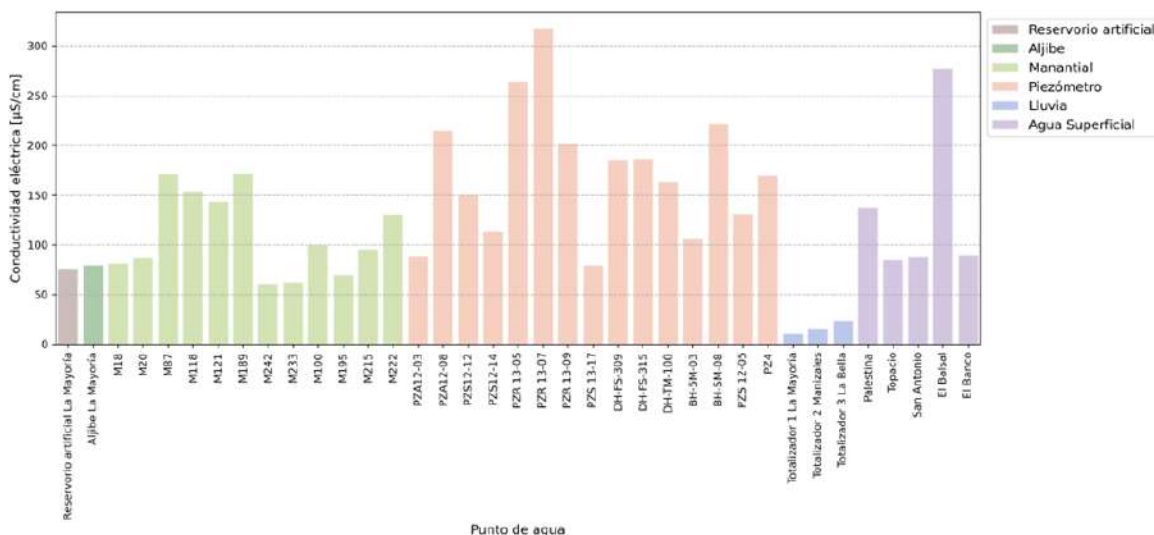


Figura 5.1.6.68 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

c. Campaña 3

A continuación, se presenta los resultados obtenidos durante la tercera campaña de medición de parámetros fisicoquímicos, realizada entre el 23 y el 29 de abril de 2025, los cuales ofrecen datos adicionales para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Los resultados de estas mediciones de campo se detallan en la Tabla 5.1.6.34.

Cabe anotar que en esta campaña se encontró el Totalizador 2 con la caneca protectora fuera de su posición y destapada, sin agua en su interior, lo que sugiere que pudo haber sido manipulada o saqueada. Adicionalmente, en el punto M195 no se evidenciaba flujo de agua.

Tabla 5.1.6.34 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	23/04/2025	24,7	6,7	32,5
Aljibe La Mayoría	Aljibe	23/04/2025	25,3	6,79	34,7
M18	Manantial	23/04/2025	23	7,03	66,6
M20	Manantial	23/04/2025	23,1	7,03	82,6
M87	Manantial	24/04/2025	25,1	6,95	209,9
M118	Manantial	27/04/2025	24,1	6,81	142,6
M121	Manantial	27/04/2025	25	7,18	152,5
M189	Manantial	27/04/2025	24,6	7,00	182,7
M242	Manantial	26/04/2025	23,1	6,86	36
M233	Manantial	27/04/2025	23,6	7,09	56,2
M100	Manantial	26/04/2025	23,4	6,42	110,5
M195	Manantial	26/04/2025	El punto de muestreo se encuentra seco		
M215	Manantial	25/04/2025	23,3	6,79	85,1
M222	Manantial	29/04/2025	23,9	6,27	113,1
PZA12-03	Piezómetro	28/04/2025	25,3	6,41	82,7
PZA12-08	Piezómetro	28/04/2025	23,6	6,28	219
PZS12-12	Piezómetro	28/04/2025	23,5	6,26	144,6
PZS12-14	Piezómetro	28/04/2025	25,8	5,92	98,3
PZR 13-05	Piezómetro	28/04/2025	25,5	7,31	266
PZR 13-07	Piezómetro	28/04/2025	25,6	7,41	314
PZR 13-09	Piezómetro	28/04/2025	24,8	6,58	245
PZS 13-17	Piezómetro	28/04/2025	24,8	6,26	92,6
DH-FS-309	Piezómetro	29/04/2025	24,5	6,28	192,9
DH-FS-315	Piezómetro	28/04/2025	24,9	6,17	190
DH-TM-100	Piezómetro	28/04/2025	23,3	6,4	153,1
BH-5M-03	Piezómetro	29/04/2025	25,1	6,21	97
BH-5M-08	Piezómetro	29/04/2025	26,0	6,89	229
PZS-12-05	Piezómetro	28/04/2025	23,5	6,42	139,9

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
PZ4	Piezómetro	29/04/2025	25,2	6,23	175,1
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	24/04/2025	27,6	6,40	7,94
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	24/04/2025	La caneca protectora estaba fuera de su posición y destapada, sin agua en su interior, posiblemente manipulada o saqueada		
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	24/04/2025	24,3	6,61	17,46
Quebrada Palestina	Agua Superficial	25/04/2025	27,2	7,47	138,2
Quebrada Topacio	Agua Superficial	23/04/2025	29,7	7,01	65,6
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	25/04/2025	30,5	6,98	88,7
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	27/04/2025	23,2	7,44	439
Quebrada El Banco	Agua Superficial	26/04/2025	23,6	7,00	84,6

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo.

La temperatura del agua en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.69) oscila entre 23,0 y 30,5 °C, es importante destacar que, los valores dependen de las condiciones climáticas presentes durante el muestreo. En los puntos de agua subterránea, estos rangos de temperatura pueden estar relacionados con sistemas hidrogeológicos poco profundos, donde la temperatura del agua se ve influenciada por la interacción con la radiación solar. Adicionalmente, el valor más alto se presenta en la quebrada San Antonio (30,5 °C), registrando un aumento de aproximadamente dos grados en comparación con la anterior campaña.

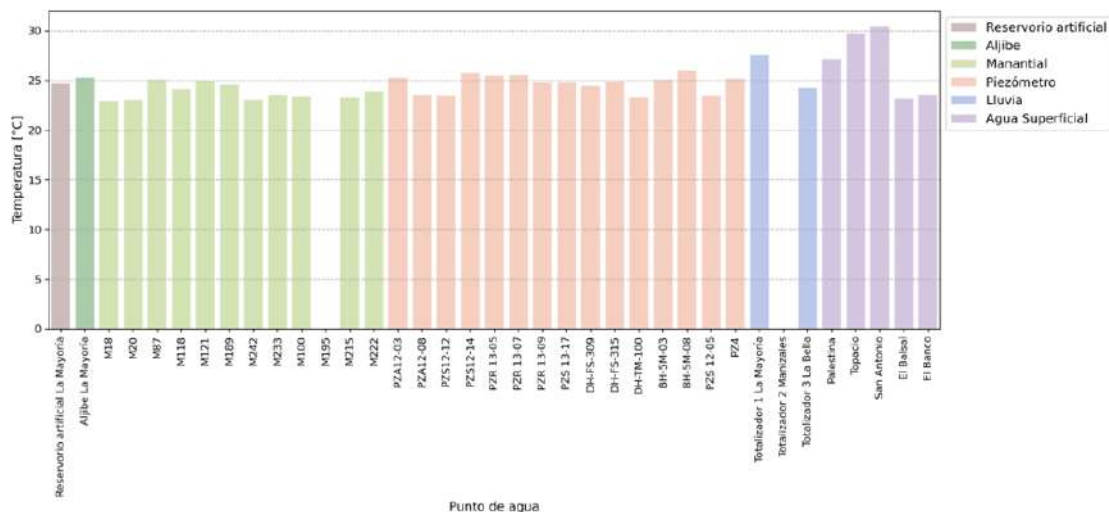


Figura 5.1.6.69 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El pH observado (Figura 5.1.6.70) varía entre 5,92 y 7,47, presentando un carácter que va de ligeramente ácido a ligeramente alcalino. Al igual que la campaña anterior, estos valores son típicos de sistemas hidrogeológicos en los que el agua presenta una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin mostrar indicios evidentes de procesos de acidificación intensos.

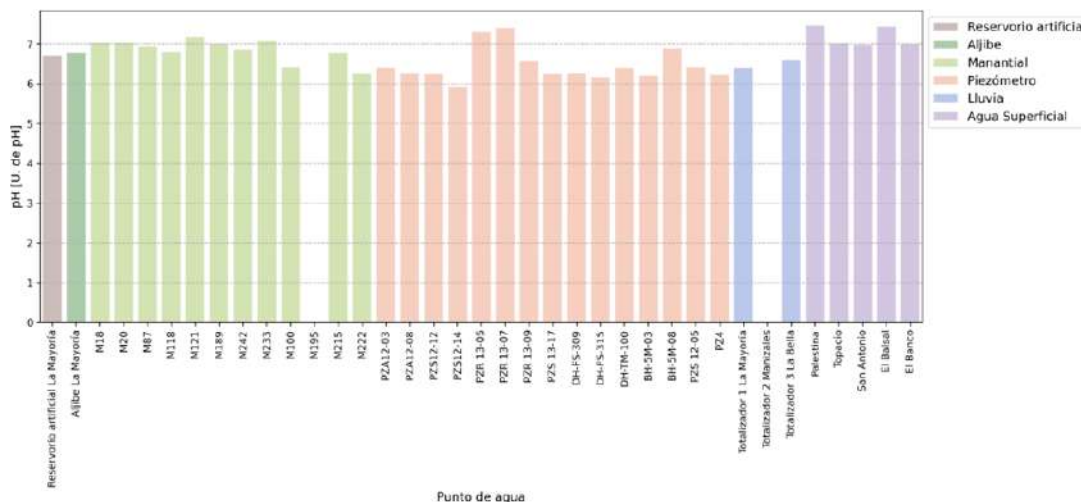


Figura 5.1.6.70 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3. pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los resultados de conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.71), mantienen un comportamiento similar a la campaña anterior, en donde el agua recolectada en los totalizadores presenta los valores más bajos de este parámetro, con un rango entre 7,94 y 17,46 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que es característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 32,5 y 439 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más alta y registrando un aumento de 162 $\mu\text{S}/\text{cm}$ desde la campaña anterior. Por su parte el punto de agua superficial con menor conductividad eléctrica es el reservorio artificial La Mayoría, el cual presentan una conductividad eléctrica de 32,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, disminuyendo en 42,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$ con respecto a la anterior campaña. Esto sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga recientemente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 36,0 y 209,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo y medio para el caso del punto M87, lo que puede sugerir un tiempo de residencia en el medio ligeramente mayor o condiciones de contaminación en el punto.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 34,7 – 314 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Sin embargo, la mayoría de

estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S/cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (314 $\mu\text{S/cm}$) y PZR 13-05 (266 $\mu\text{S/cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (92,6 $\mu\text{S/cm}$) y en el aljibe La Mayoría (34,7 $\mu\text{S/cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente, en especial en el último en donde se registra una disminución de 45 $\mu\text{S/cm}$ desde la anterior campaña.

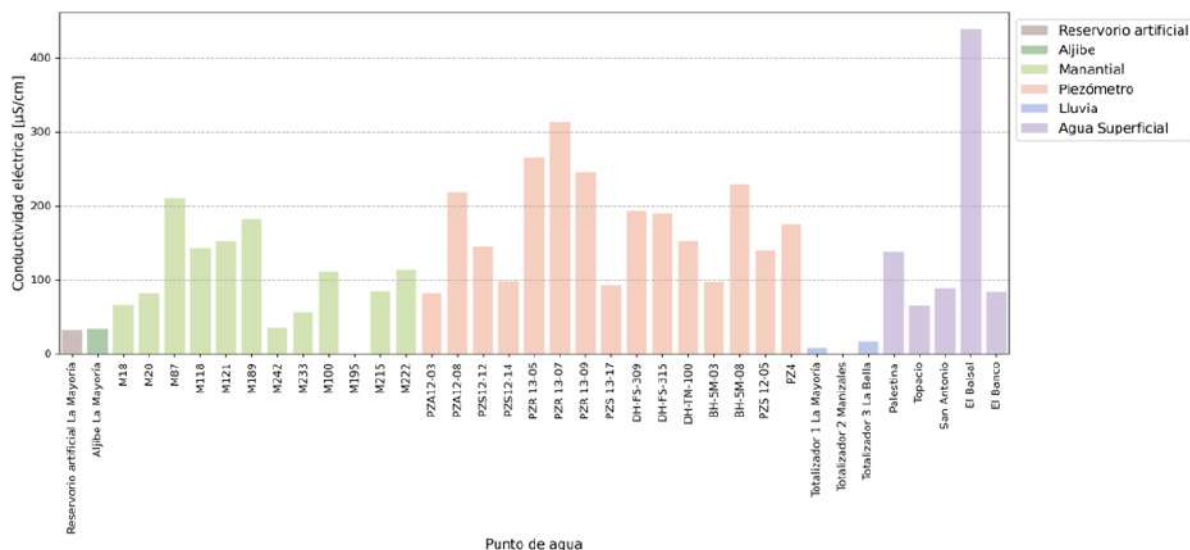


Figura 5.1.6.71 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 3

Fuente: SHI S.A.S, 2025

d. Campaña 4

Este capítulo presenta los resultados obtenidos durante la cuarta campaña de medición de parámetros fisicoquímicos, realizada entre el 4 y el 20 de mayo de 2025, los cuales ofrecen datos adicionales para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterráneas. Los resultados de estas mediciones de campo se detallan en la Tabla 5.1.6.35. Es importante señalar que en esta campaña se encontró el manantial M195 seco, por lo cual no es posible realizar la toma de muestra y la medición de parámetros fisicoquímicos de este punto.

Tabla 5.1.6.35 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[µS/cm]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	27,1	6,78	64,1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	25,4	6,52	61,4

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
M18	Manantial	5/5/2025	22,8	7,43	73,4
M20	Manantial	5/5/2025	23,1	7,5	73,5
M87	Manantial	19/5/2025	24,3	7,01	162,1
M118	Manantial	14/5/2025	24,1	6,97	134,8
M121	Manantial	13/5/2025	26,0	7,75	174,6
M189	Manantial	15/5/2025	24,2	7,81	140,3
M242	Manantial	9/5/2025	24,0	7,11	43,7
M233	Manantial	19/5/2025	24,2	7,42	45,5
M100	Manantial	18/5/2025	22,8	6,26	99,5
M195	Manantial	15/5/2025	El punto de muestreo se encuentra seco		
M215	Manantial	6/5/2025	22,7	6,93	70,7
M222	Manantial	16/5/2025	23,5	6,46	125,7
PZA12-03	Piezómetro	7/5/2025	24,6	6,58	74,1
PZA12-08	Piezómetro	4/5/2025	27,5	6,01	106,1
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	24,6	6,48	175,9
PZS12-14	Piezómetro	12/5/2025	26,9	6,06	98,6
PZR 13-05	Piezómetro	11/5/2025	29,7	7,61	223
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	24,4	7,63	274
PZR 13-09	Piezómetro	7/5/2025	24,0	6,66	235
PZS 13-17	Piezómetro	11/5/2025	28,8	6,33	84,2
DH-FS-309	Piezómetro	16/5/2025	23,8	6,51	188,4
DH-FS-315	Piezómetro	18/5/2025	25,4	6,49	198
DH-TM-100	Piezómetro	4/5/2025	25,1	6,31	147,9
BH-5M-03	Piezómetro	13/5/2025	24,4	6,88	164,5
BH-5M-08	Piezómetro	14/05/2025	24,4	7,22	225
PZS-12-05	Piezómetro	13/5/2025	26,7	6,6	133
PZ4	Piezómetro	15/05/2025	24,3	6,57	153
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	20/5/2025	27,5	5,66	14,69
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	25,2	5,07	10,09
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	23,5	5,98	8,47
Quebrada Palestina	Agua Superficial	5/5/2025	25,9	7,82	126,6
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/5/2025	27,8	7,33	69,6

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temperatura	pH	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	[°C]	[U. de pH]	[μS/cm]
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	8/5/2025	26,3	7,44	73,3
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	19/5/2025	22,8	7,44	151,8
Quebrada El Banco	Agua Superficial	9/5/2025	26,4	6,8	74,4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo.

Las temperaturas registradas en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.72) se encuentran en un rango de 22,7 a 29,7 °C. Estos valores están fuertemente influenciados por las condiciones atmosféricas al momento del muestreo, especialmente dado que la mayoría de los puntos representan sistemas hidrogeológicos someros.

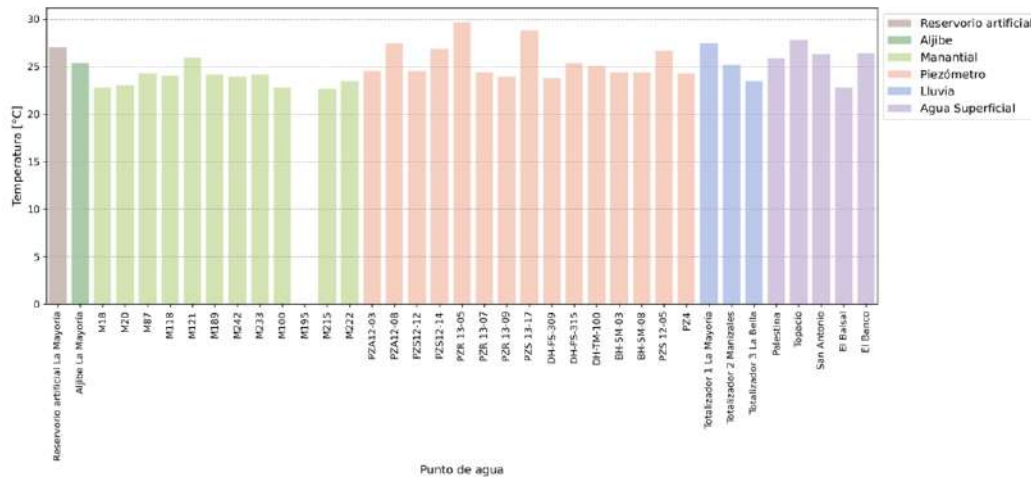


Figura 5.1.6.72 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

En cuanto al pH (Figura 5.1.6.73), los valores obtenidos oscilan entre 5,07 y 7,82, lo que corresponde a aguas con características que van desde ligeramente ácidas hasta ligeramente alcalinas. Al igual que lo registrado en la campaña anterior, este comportamiento es indicativo de un sistema con interacción moderada entre el agua y los minerales del medio geológico, sin evidencias de procesos intensos de acidificación o alteración química significativa.

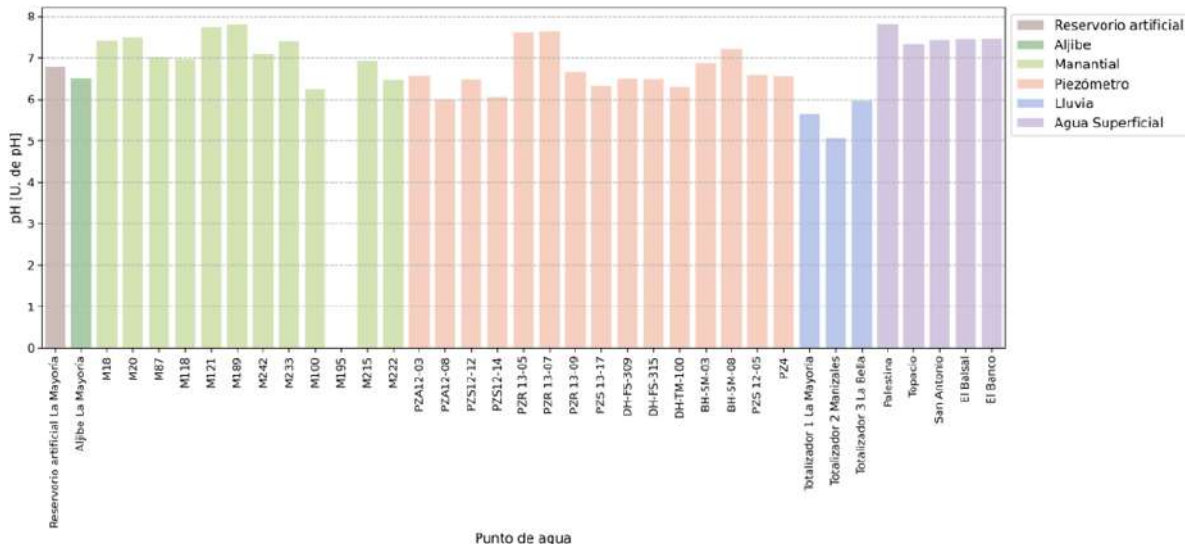


Figura 5.1.6.73 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos (Figura 5.1.6.74) reflejan una tendencia comparable a la observada en la campaña anterior. Las muestras recolectadas en los totalizadores presentan las conductividades más bajas del conjunto, con un rango que va de 8,47 a 14,69 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual es característico de aguas de precipitación reciente. En contraste, los puntos de agua superficial muestran una mayor dispersión en los valores, que oscilan entre 69,6 y 151,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, siendo la quebrada El Balsal la que registra el valor más elevado, mientras que el reservorio artificial La Mayoría presenta la menor conductividad eléctrica entre estos puntos, con 61,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

En cuanto a los manantiales, los valores registrados se sitúan en un rango de 43,7 a 174,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica un nivel de mineralización bajo. Sin embargo, en los puntos M121 y M87 se observa una ligera elevación de este parámetro, lo que podría estar relacionado con un mayor tiempo de permanencia del agua en el subsuelo.

Finalmente, los piezómetros y el aljibe presentan conductividades eléctricas ligeramente superiores a las de los manantiales, con valores que oscilan entre 61,4 y 274 $\mu\text{S}/\text{cm}$. La mayoría de las muestras se ubican entre 100 y 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que corresponde a aguas de baja a moderada mineralización. Los valores más altos se registran en los piezómetros PZR 13-07 (274 $\mu\text{S}/\text{cm}$), PZR 13-09 (235 $\mu\text{S}/\text{cm}$), BH-5M-08 (225 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y PZR 13-05 (223 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo cual sugiere una mayor interacción agua-roca y un tiempo de residencia más prolongado. Por el contrario, puntos como PZA 12-03 (74,1 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y el aljibe La Mayoría (61,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$) muestran una mineralización más baja, posiblemente asociada a una recarga reciente.

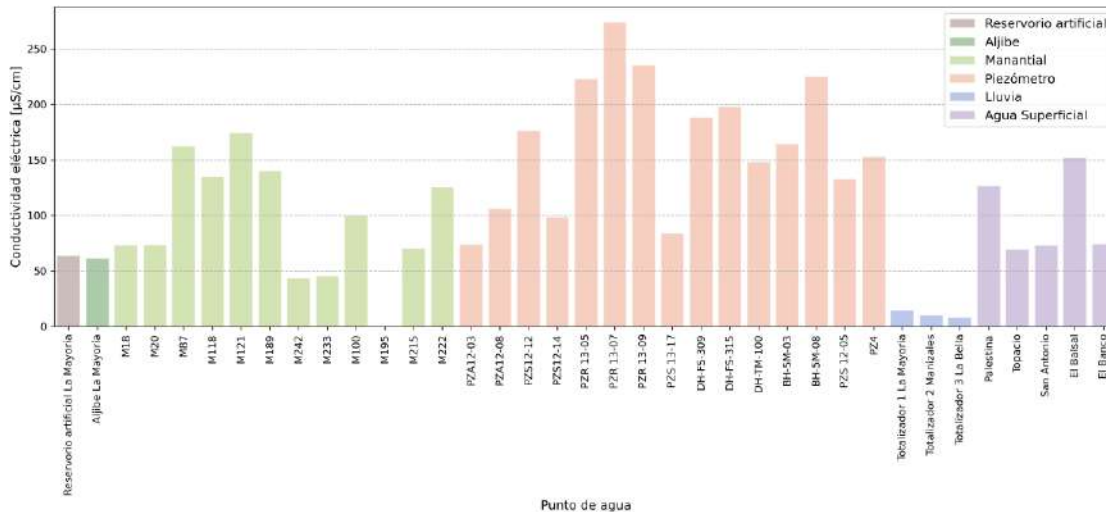


Figura 5.1.6.74 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

5.1.6.3.3 Caracterización hidrogeoquímica

A. Campañas anteriores a 2025

El análisis hidrogeoquímico de aguas subterráneas es una herramienta que permite comprender la interacción entre el agua y el medio geológico, identificar procesos de disolución, mezcla o contaminación, y caracterizar la calidad del recurso hídrico. Los diagramas de Stiff y Piper pueden ser empleados para analizar las características químicas del agua subterránea, permitiendo clasificar los tipos hidroquímicos y visualizar variaciones espaciales o temporales en la composición iónica de las muestras recolectadas.

Para la línea base, en el marco del Estudio de Impacto Ambiental, se llevaron a cabo 3 campañas de monitoreo y análisis de agua subterránea entre el 2012 y el 2014 con el objetivo de realizar la caracterización hidroquímica de las unidades hidrogeológicas dentro del área de influencia. Posteriormente, una vez obtenida la licencia ambiental, se realizaron otras campañas de monitoreo hidroquímico entre 2016 y 2017, con el objetivo de caracterizar el agua subterránea en la salida de las cuencas intervenidas con las facilidades mineras, como el pit Gramalote, la presa de relaves y el material estéril. El resumen de los puntos monitoreados en cada campaña se presenta en la Tabla 5.1.6.36. En la Tabla 5.1.6.37 se presenta el tipo de agua identificada en cada una de las campañas de monitoreo realizadas entre 2012-2017 (SHI SAS, 2025).

Tabla 5.1.6.36 Campañas de monitoreo hidroquímica anteriores a 2025

Número de campaña	Fecha de monitoreo	Periodo climático	Manantiales	Reservorio artificial	Aljibe	Piezómetros	Total puntos
1	Marzo – junio de 2012	Fin de periodo seco	12	1	1	15	29
2	Octubre de 2012	Periodo húmedo	11	1	1	17	30
3	Junio de 2014	Fin del periodo húmedo	3	1		17	21
4	Mayo 2016	Periodo húmedo	3	1		15	19
5	Octubre 2016	Periodo húmedo	6	1		17	24
6	Marzo 2017	Periodo seco	6	1		16	23

Fuente: SHI SAS, 2025

Tabla 5.1.6.37 Tipo de agua identificada para las distintas campañas de monitoreo hidroquímico (2012-2017)

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
Aljibe La Mayoría	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃				
Reservorio artificial La Mayoría		Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃		Ca-Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃
M100	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M105		Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M117	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃				
M120			Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Mg-Ca-Na-HCO ₃
M121	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M138	Na-HCO ₃					
M189	Ca-Mg-HCO ₃		Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃	Mg-HCO ₃
M219	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃				
M118					Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
M47	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M55	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M74	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M79	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M87	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Error Balance	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃
M92	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
M20					Ca-Na-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃
M18					Na-Ca-HCO ₃	Na-HCO ₃
BH-5M-03					Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
BH-5M-08					Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃
DH-FS-309			Error Balance	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃
DH-FS-315			Ca-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Mg-Ca-HCO ₃
DH-TM-100			Mg-Ca-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Mg-HCO ₃
PZA 12-01 P1*	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃	Na-Mg-HCO ₃			
PZA 12-01 P2**	Na-HCO ₃					
PZA 12-02	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃				
PZA 12-03	Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Na-HCO ₃
PZA 12-04 P1*	Ca-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Mg-Ca-HCO ₃			
PZA 12-04 P2**	Ca-HCO ₃					
PZA 12-05	Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
PZA 12-07 P1*	Ca-HCO ₃					
PZA 12-07 P2**	Na-Mg-HCO ₃					

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
PZA 12-08		Ca-Mg-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Na-Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃
PZR 12-01	Ca-Na-HCO ₃	Ca-HCO ₃				
PZR 12-02	Na-Ca-HCO ₃	Na-HCO ₃				
PZR 12-04	Ca-Mg-Na-HCO ₃		Error Balance			
PZR 12-08 P1*	Ca-Na-HCO ₃					
PZR 12-08 P2**	Ca-Mg-Na-HCO ₃					
PZR 12-04				Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃
PZR 13-05			Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃
PZR 13-06			Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄			
PZR 13-07			Ca-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃
PZR 13-09			Ca-Na-Mg-HCO ₃ -SO ₄	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃ -SO ₄
PZR 13-11				Ca-Na-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃
PZS 12-01	Ca-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃				
PZS 12-02	Ca-HCO ₃					
PZS 12-03	Ca-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Error Balance			
PZS 12-04		Ca-Mg-Na-HCO ₃				
PZS 12-05	Na-HCO ₃	Na-HCO ₃				
PZS 12-08		Na-HCO ₃				
PZS 12-09		Ca-Na-Mg-HCO ₃		Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Mg-HCO ₃
PZS 12-10	Ca-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃				
PZS 12-12		Na-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Ca-HCO ₃	Ca-Na-Mg-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃
PZS 12-13		Ca-Mg-Na-HCO ₃				
PZS 12-14				Ca-Na-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃	Na-Ca-HCO ₃

Punto	Campaña 1	Campaña 2	Campaña 3	Campaña 4	Campaña 5	Campaña 6
PZS 13-15			Error Balance			
PZS 13-17			Na-Ca-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Na-Mg-Ca-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃
PZS 13-18			Ca-Mg-HCO ₃	Ca-Na-HCO ₃	Ca-Mg-Na-HCO ₃	
* P1 indica muestra tomada antes de una prueba hidráulica ** P2 indica muestra tomada después de una prueba hidráulica						

Fuente: Modificado de (Gramalote Colombia Limited, 2018)

A partir de las distintas campañas de monitoreo, se puede evidenciar que el agua subterránea captada en el depósito aluvial se caracteriza por presentar la menor mineralización entre las unidades hidrogeológicas evaluadas. Su composición química varía entre bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sódica, con predominancia de calcio y sodio como cationes mayoritarios, seguidos de magnesio. La ausencia de sulfatos y cloruros es una característica que resalta en este tipo de aguas (SHI SAS, 2025). ver Figura 5.1.6.75, Figura 5.1.6.76 y Figura 5.1.6.77.

Adicionalmente, los análisis muestran que el contenido de sólidos disueltos en esta unidad es bajo, lo que sugiere tiempos de residencia cortos y una limitada interacción agua-roca. Además, las aguas con mayor presencia de sodio generalmente presentan una menor mineralización.

Por su parte, las aguas captadas en el saprolito presentan una mineralización superior a la del depósito aluvial, lo que se atribuye a un mayor tiempo de residencia del agua y, posiblemente, a una mayor solubilidad de los minerales presentes en esta unidad. La composición química predominante en esta unidad también es bicarbonatada cálcica y bicarbonatada sódica; no obstante, se registran concentraciones elevadas de hierro en comparación con otros cationes mayoritarios. La liberación de hierro en estas aguas podría estar relacionada con la alteración de minerales ferromagnesianos presentes en la matriz del saprolito (SHI SAS, 2025)..

Finalmente, las aguas subterráneas almacenadas en la roca ígnea presentan una composición similar a las del saprolito, predominando los tipos bicarbonatados cálcicos y bicarbonatados sódicos. En este caso, estas aguas muestran una mineralización levemente mayor que las del saprolito, lo que sugiere un mayor tiempo de residencia y una interacción más prolongada con la matriz rocosa. Además, se evidencia una tendencia al incremento de la mineralización con la profundidad.

La ausencia de sulfatos y cloruros en los análisis de laboratorio es una característica común en toda el área de influencia, mientras que los cationes predominantes son calcio, sodio y magnesio. Además, las mayores concentraciones de iones se identifican en la parte baja de la cuenca, en proximidad al río Nus. En particular, se observa una acumulación significativa de hierro y manganeso en estas zonas, lo que sugiere una dirección de flujo de agua subterránea predominantemente hacia el río (SHI SAS, 2025).

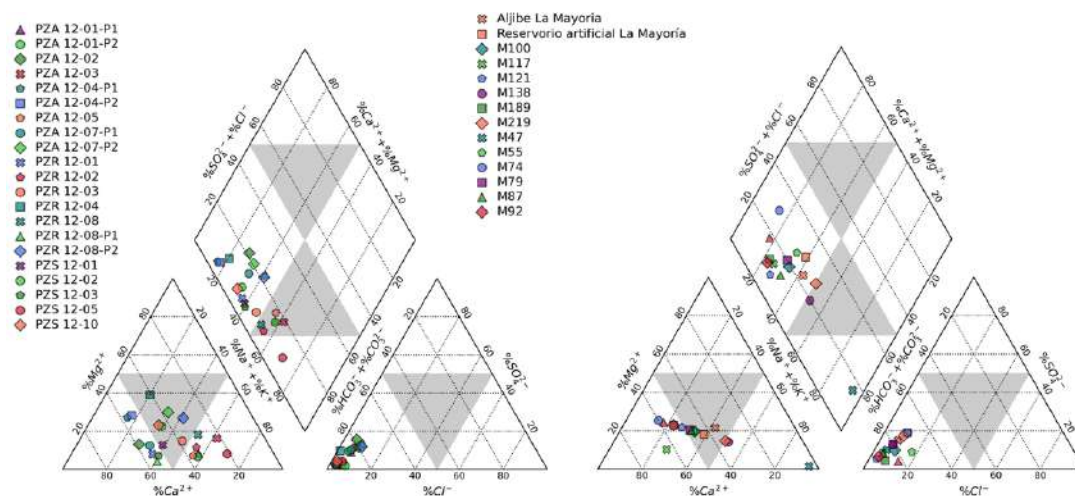


Figura 5.1.6.75 Diagrama de Piper. Campaña 1 (marzo 2012)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

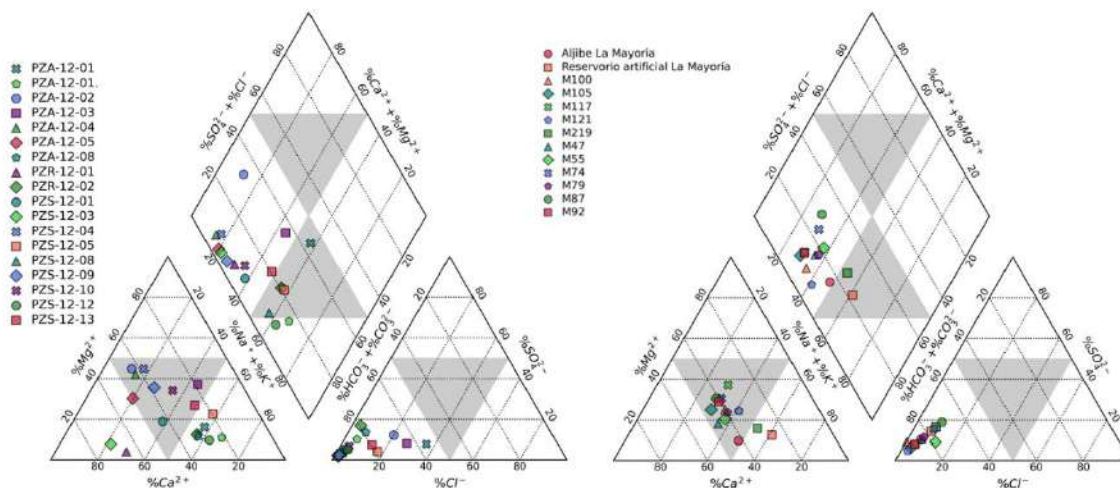


Figura 5.1.6.76. Diagrama de Piper. Campaña 2 (octubre 2012)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

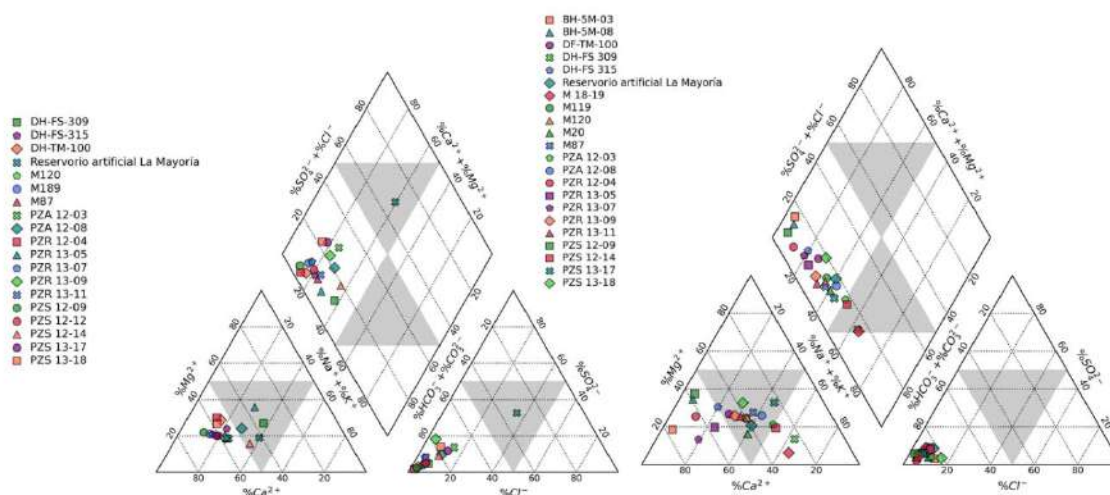


Figura 5.1.6.77 Diagrama de Piper. Campaña 4 (marzo 2016) y campaña 5 (noviembre 2016)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Es importante resaltar que los resultados de las campañas de monitoreo indican que la composición fisicoquímica del agua en manantiales y piezómetros se mantiene relativamente estable entre períodos seco y húmedo, lo que sugiere que las condiciones hidrogeoquímicas de las unidades hidrogeológicas permanecen constantes en el tiempo.

A lo largo de las distintas campañas de monitoreo, se ha evidenciado la presencia de contaminación microbiológica, especialmente en los manantiales, donde se han registrado concentraciones elevadas de coliformes totales, generalmente más de 5000 NMP/100ml, y *Escherichia coli*. Estos resultados sugieren una posible influencia de fuentes de contaminación de origen antrópico, como infiltración de aguas residuales domésticas o prácticas agrícolas inadecuadas. En el caso de los piezómetros, aunque también se detectan coliformes totales y *E. coli*, las concentraciones suelen ser menores.

En contraste, los análisis muestran concentraciones bajas de metales pesados y otros parámetros como nitratos, fenoles totales, grasas y aceites, berilio, estaño, aluminio, antimonio, cianuro, fluoruros, litio, molibdeno, plata, selenio, cadmio, cromo, cobalto, cobre y mercurio. Esto sugiere que, hasta el momento, no hay una afectación significativa por metales pesados (SHI SAS, 2025).

B. Monitoreo hidrogeoquímico – campaña 1, febrero 2025

Entre los días 4 y 20 de febrero de 2025 se llevó a cabo la primera campaña de monitoreo hidroquímico. Este proceso incluyó la medición de parámetros fisicoquímicos in situ tales como temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Además, se recolectaron muestras de agua para su análisis en laboratorio, con el objetivo de determinar las concentraciones de los principales iones, así como parámetros microbiológicos, grasas y aceites e hidrocarburos. Es importante señalar que el manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento del muestreo y, por lo tanto, no es posible realizar el monitoreo

hidroquímico. En la Tabla 5.1.6. y en la Tabla 5.1.6.39 se presentan los resultados del muestreo hidroquímico y microbiológico.

En términos generales, se observa que en la mayoría los puntos de muestreo no registran concentraciones de grasas y aceites; sin embargo, en el manantial M20, en los piezómetros DH-TM-100, DH-FS-309, PZR 13-07 y PZA 12-03 y en la quebrada Palestina se registran concentraciones de este parámetro, lo que sugiere una posible contaminación puntual de origen antrópico en estos puntos. De manera particular, la quebrada Palestina registra la concentración más elevada de grasas y aceites y es el único punto en donde se registran hidrocarburos, lo cual indica un posible grado de contaminación de origen antrópico más elevado.

Los niveles de nitratos en los puntos de monitoreo varían desde concentraciones bajas, incluso por debajo del límite de detección como en el punto PZA 12-08 y la quebrada Palestina, hasta valores elevados en ciertos piezómetros, como DH-FS-309 y PZS 12-05. Estas concentraciones más altas podrían estar relacionadas con fuentes antrópicas como el uso de fertilizantes agrícolas o infiltración de aguas residuales domésticas. En el resto de los puntos de monitoreo se evidencian valores bajos a moderados.

Al considerar los resultados de los parámetros microbiológicos se puede evidenciar que la mayoría de los puntos presenta algún tipo de microorganismo, exceptuando el piezómetro PZ4.

En los puntos de muestreo de agua superficial, los valores más elevados de coliformes totales se presentan en las quebradas El Balsal, El Banco y el Topacio, lo que indica una alta contaminación microbiológica. Asimismo, los valores de *Escherichia coli* son elevados en estos puntos, especialmente en El Balsal, sugiriendo contaminación de origen fecal.

Por su parte, los manantiales presentan una amplia variación en los niveles de contaminación microbiológica. Destaca el manantial M121, con valores extremadamente altos de coliformes totales y coliformes termotolerantes, seguido de los puntos M233 y M18, que también presentan altas concentraciones, indicando un elevado grado de contaminación. En contraste, algunos manantiales como M100 muestran valores indetectables de *Escherichia coli* y coliformes termotolerantes, evidenciando mejores condiciones en la calidad del agua.

En la mayoría de los piezómetros se registran niveles más bajos de contaminación microbiológica en comparación con los manantiales y aguas superficiales. Sin embargo, algunos presentan valores elevados, como DH-FS-309 y PZS12-12, lo que sugiere posibles influencias de fuentes contaminantes cercanas. En general, los piezómetros se caracterizan por presentar niveles bajos o indetectables de *Escherichia coli* y coliformes termotolerantes, lo que indica que la fuente de contaminación microbiológica no es de origen fecal. De igual forma, el aljibe presenta valores relativamente bajos de estos parámetros. De forma similar, el reservorio artificial La Mayoría muestra niveles moderados de coliformes totales, pero con ausencia de *Escherichia coli* y coliformes termotolerantes, lo que sugiere una fuente de contaminación no fecal.

Tabla 5.1.6.38 Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025)

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hydrocarburos totales (mg Hydrocarburos/l)	Solidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N-NO ₃ /l)	Nitratos (mg NO ₃ /l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
Reservorio artificial La Mayoría	<1.89	32,73	32,73	<4.0	<0.20	<0.20	40,00	0,7600	0,0589	0,26	2,39	4,21	4,3	1,3	1	6,51	3,58
Aljibe La Mayoría	<1.89	36,63	36,63	<4.0	<0.20	<0.20	44,00	0,8300	0,0903	0,4	1,66	6,523	2,835	1,434	0,983	6,361	3,44
M18	<1.89	27,96	27,97	<4.0	<0.20	<0.20	42,00	0,4800	0,0709	0,31	1,91	5,53	<0.090	1,46	2,46	9,34	17,09
M20	<1.89	26,01	26,01	<4.0	1,08	<0.20	43,00	0,6000	0,0551	0,24	2,77	4,86	<0.090	1,09	0,907	9,02	11,39
M87	<1.89	92,63	92,63	<4.0	<0.20	<0.20	100,00	1,0800	0,0468	0,21	3,2	12,8	<0.090	5,42	1,9	14,2	-5,37
M118	<1.89	79,12	79,12	<4.0	<0.20	<0.20	103,00	0,9800	0,0199	0,09	2,02	13,6	1,59	6,55	3,57	9,78	4,04
M121	<1.89	74,78	74,78	0,0	<0.20	<0.20	85,00	0,8200	0,77	0,34	2,47	15	<0.090	4,59	1,98	11,1	2,77
M189	<1.89	92,63	92,63	<4.0	<0.20	<0.20	98,00	2,1600	0,0272	0,12	2,76	16,3	0,522	6,62	2,56	10,1	-2,32
M242	<1.89	26,45	26,45	<4.0	<0.20	<0.20	33,00	1,9000	0,1032	0,46	1,58	4,4	<0.090	1,42	1,87	6,89	5,27
M233	<1.89	28,18	28,18	<4.0	<0.20	<0.20	37,00	1,8300	0,0737	0,33	2,23	4,07	0,164	1	2,06	7,52	0,70
M100	<1.89	46,17	46,17	<4.0	<0.20	<0.20	59,00	0,8600	0,3569	1,58	3,14	8,82	<0.090	3,82	1,21	6,82	3,29
M195	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---
M215	<1.89	29,26	29,26	<4.0	<0.20	<0.20	49,00	1,3000	0,1385	0,61	5,16	7,49	<0.090	1,37	0,24	8,08	7,29
M222	<1.89	63,98	63,98	<4.0	<0.20	<0.20	76,00	0,9700	0,0742	0,33	1,89	11,3	0,861	6,2	2,08	6,85	3,92
PZA12-03	<1.89	25,36	25,36	<4.0	1,00	<0.20	34,00	1,8500	0,0568	0,25	1,84	3,74	1,72	1,17	1,28	8,85	7,92
PZA12-08	<1.89	49,64	49,64	<4.0	<0.20	<0.20	67,00	1,2500	<0.0113	<0.05	<0.20	7,47	2,683	2,21	2,61	6,99	-0,43
PZS12-12	<1.89	101,88	101,88	<4.0	<0.20	<0.20	130,00	7,1800	0,5285	2,34	2,89	31	<0.090	3,22	1,61	12,8	2,33

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Solidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N-NO ₃ /l)	Nitratos (mg NO ₃ /l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
PZS12-14	<1.89	60,13	60,13	<4.0	<0.20	<0.20	72,00	3,0300	0,0327	0,14	3,37	5,15	<0.090	4,57	1,74	13	-4,43
PZR 13-05	<1.89	113,03	113,03	<4.0	<0.20	<0.20	126,00	2,3100	0,0513	0,23	7,15	26,6	<0.090	2,7	2,55	11,5	-7,84
PZR 13-07	<1.89	133,22	133,22	<4.0	0,41	<0.20	178,00	2,5900	0,037	0,16	12,8	21,355	2,783	5,345	6,524	15,356	-10,36
PZR 13-09	<1.89	70,45	70,45	<4.0	<0.20	<0.20	114,00	1,8500	0,0359	0,16	22,59	15,3	8,18	2,77	3,81	17,8	5,49
PZS 13-17	<1.89	22,76	22,76	<4.0	<0.20	<0.20	41,00	1,3000	0,4572	2,02	7,96	6,37	0,156	1,61	1,52	7,39	10,76
DH-FS-309	<1.89	92,42	92,42	<4.0	0,83	<0.20	124,00	4,4200	2,0423	9,04	4,85	11,65	0,34	6,611	3,6406	23,0224	3,67
DH-FS-315	<1.89	87,11	87,11	<4.0	<0.20	<0.20	99,00	2,4900	0,0735	0,33	5,12	15,3	0,102	7,28	3,14	7,34	-4,16
DH-TM-100	<1.89	76,91	76,91	<4.0	0,23	<0.20	97,00	3,0900	0,3994	1,77	3,89	9,631	1,823	5,663	7,291	16,455	5,74
BH-5M-03	<1.89	125,57	125,57	<4.0	<0.20	<0.20	154,00	1,6300	0,4626	2,05	2,13	16,763	2,782	6,456	4,873	13,764	-8,58
BH-5M-08	<1.89	137,89	137,89	<4.0	<0.20	<0.20	166,00	4,7000	0,2676	1,18	2,63	15,245	3,434	7,756	5,885	17,434	-9,57
PZS 12-05	<1.89	71,18	71,18	<4.0	<0.20	<0.20	86,00	4,1100	1,0019	4,43	3,63	12,9	<0.090	6,2	1,16	7,78	-2,97
PZ4	<1.89	92,63	92,63	<4.0	<0.20	<0.20	107,00	1,8100	0,2497	1,1	2,97	15,9	0,16	9,8	3,84	1,1	-5,75
Quebrada Palestina	<1.89	65,46	65,46	<4.0	1,41	0,52	80,00	1,2800	<0.0113	<0.05	0,39	13,7	0,24	5,64	2,11	8,3	7,45
Quebrada Topacio	<1.89	39,02	39,02	<4.0	<0.20	<0.20	46,00	1,1400	0,0596	0,26	1,78	5,63	0,289	1,54	1,79	8,51	-0,93
Quebrada San Antonio	<1.89	36,85	36,85	<4.0	<0.20	<0.20	45,00	0,4800	0,0469	0,21	1,69	5,64	0,767	1,7	1,56	8,96	5,57
Quebrada El Balsal	<1.89	84,54	84,54	<4.0	<0.20	<0.20	135,00	1,3100	0,4884	2,16	27,11	27,2	0,177	4,48	2,69	8,76	-2,47
Quebrada El Banco	<1.89	39,45	39,45	<4.0	<0.20	<0.20	48,00	0,3200	0,0491	0,22	1,73	6,25	0,215	1,65	2,1	8,19	1,84



Fuente: SHI S.A.S, 2025

Tabla 5.1.6.39 Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/02/2025	8164	<1	<1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/02/2025	980,4	41	41
M18	Manantial	04/02/2025	24196	4884	4884
M20	Manantial	04/02/2025	8930	96	163
M87	Manantial	13/02/2025	538	10	20
M118	Manantial	12/02/2025	7000	325	6131
M121	Manantial	11/02/2025	547500	3180	54750
M189	Manantial	13/02/2025	5630	189	189
M242	Manantial	10/02/2025	4550	52	63
M233	Manantial	09/02/2025	64200	6230	6230
M100	Manantial	09/02/2025	7270	<1	<1
M195	Manantial	05/02/2025	---	---	---
M215	Manantial	05/02/2025	6110	74	85
M222	Manantial	11/02/2025	2495	20,9	28,1
PZA12-03	Piezómetro	11/02/2025	110	<1	<1
PZA12-08	Piezómetro	07/02/2025	20	<1	10
PZS12-12	Piezómetro	07/02/2025	27550	200	200
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025	288	11	11
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025	52	<1	<1
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025	106	2	3
PZR 13-09	Piezómetro	12/02/2025	108	<1	<1
PZS 13-17	Piezómetro	10/02/2025	70,5	<1	<1
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025	365400	200	200
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025	72000	<1	<1

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025	52000	2	110
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025	41060	75	75
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025	49600	100	100
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025	1924	<1	<1
PZ4	Piezómetro	20/02/2025	<1	<1	<1
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/02/2025	24196	143,9	770,1
Quebrada Topacio	Agua Superficial	06/02/2025	54700	2075	3968
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	07/02/2025	24810	31	31
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	09/02/2025	155310	17329	17329
Quebrada El Banco	Agua Superficial	06/02/2025	120330	269	368

Fuente: SHI S.A.S, 2025

a. Parámetros fisicoquímicos

La medición de parámetros in situ, como el oxígeno disuelto, el pH y la conductividad eléctrica, es esencial en el estudio hidroquímico de las aguas subterráneas. Estos valores pueden proporcionar información sobre las condiciones fisicoquímicas del sistema hidrogeológico, reflejando procesos de interacción agua-roca, posibles influencias antrópicas y la dinámica del flujo subterráneo. Asimismo, contribuyen a la identificación de fuentes potenciales de contaminación y permiten inferir el origen y evolución del agua dentro del sistema hidrogeológico.

A pesar de que los totalizadores no forman parte de la red de monitoreo hidroquímico, en este capítulo se presentan los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en estos puntos, debido a que aportan información adicional para comprender las interacciones entre la precipitación y las fuentes de agua superficiales y subterránea. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo se presentan en la Tabla 5.1.6.40.

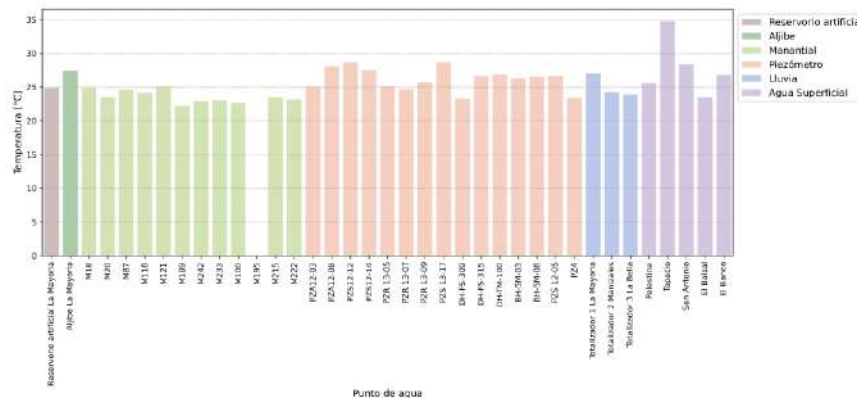
Tabla 5.1.6.40 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

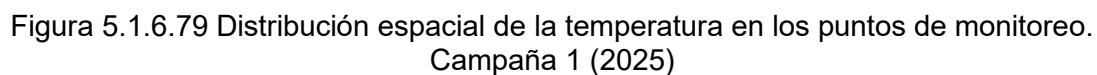
Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp.	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	µS/cm
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/02/2025	24,9	6,43	0,74	72,2
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/02/2025	27,4	6,57	6,56	85,8
M18	Manantial	4/02/2025	24,9	7,28	6,82	75,7
M20	Manantial	4/02/2025	23,5	7,27	6,82	75,2
M87	Manantial	13/02/2025	24,6	7,06	7,04	177,3
M118	Manantial	12/02/2025	24,2	6,60	0,55	154,8
M121	Manantial	11/02/2025	25,1	7,61	6,73	151,8
M189	Manantial	13/02/2025	22,2	7,02	5,56	176,7
M242	Manantial	10/02/2025	22,9	6,58	5,13	58,9
M233	Manantial	9/02/2025	23,1	6,57	0,41	62,5
M100	Manantial	9/02/2025	22,7	6,03	4,66	104
M195	Manantial	5/02/2025	-	-	-	-
M215	Manantial	5/02/2025	23,5	6,88	6,45	91,5
M222	Manantial	11/02/2025	23,2	6,59	2,25	133,8
PZA12-03	Piezómetro	11/02/2025	25,1	6,31	6,12	57,9
PZA12-08	Piezómetro	7/02/2025	28,1	6,36	0,58	214,2
PZS12-12	Piezómetro	7/02/2025	28,7	6,40	4,46	242
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025	27,5	5,97	4,07	128,3
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025	25,1	7,51	6,09	229
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025	24,7	7,81	7,85	283
PZR 13-09	Piezómetro	12/02/2025	25,7	6,77	1,88	221
PZS 13-17	Piezómetro	10/02/2025	28,7	6,28	3,88	72,3
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025	23,3	6,40	6,42	197,4
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025	26,7	6,47	1,64	170,7
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025	26,9	6,51	4,72	160,1
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025	26,3	7,06	6,00	254

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp.	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	µS/cm
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025	26,6	6,96	4,73	256
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025	26,7	6,77	4,80	150,1
PZ4	Piezómetro	20/02/2025	23,4	6,36	2,70	176
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/02/2025	27,1	6,47	7,00	23,6
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/02/2025	24,3	6,58	6,78	27,9
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/02/2025	23,9	6,45	6,90	37,8
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/02/2025	25,6	7,96	6,42	128,5
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/02/2025	34,8	7,16	7,04	91,3
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	7/02/2025	28,4	7,20	6,31	89,4
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	9/02/2025	23,5	7,74	2,95	226
Quebrada El Banco	Agua Superficial	6/02/2025	26,8	7,21	4,50	93,5

Fuente: SHI S.A.S, 2025

La temperatura del agua en los puntos de muestreo varía entre 22,2 y 34,8°C, con valores que reflejan la influencia de las condiciones meteorológicas al momento del muestreo (Figura 5.1.6.78 y Figura 5.1.6.79). En el caso de los puntos de agua subterránea estos valores se pueden asociar con sistemas hidrogeológicos superficiales y poco profundos, donde la temperatura del agua puede verse afectada por la interacción con la radiación solar.





El pH registrado oscila entre 5,97 y 7,96 unidades de pH, lo que indica un carácter ligeramente ácido a ligeramente alcalino (Figura 5.1.6.80 y Figura 5.1.6.81). Estos valores son característicos de sistemas hidrogeológicos donde el agua mantiene una interacción moderada con materiales orgánicos y minerales, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación.

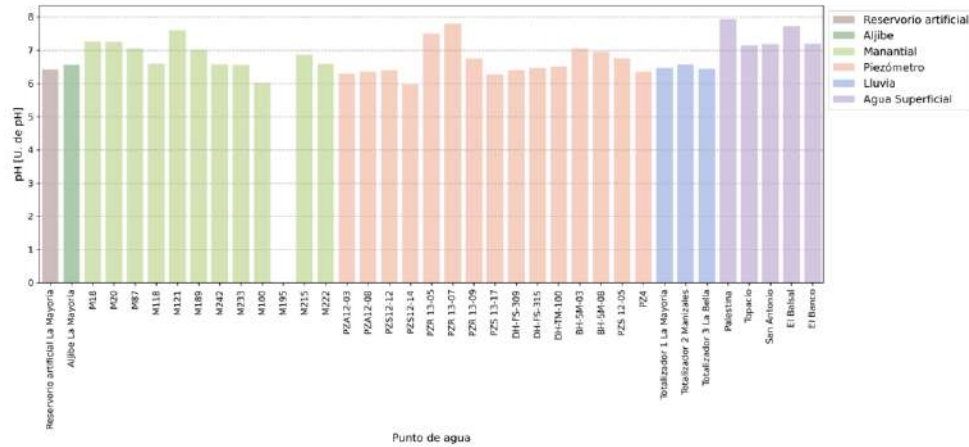


Figura 5.1.6.80 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

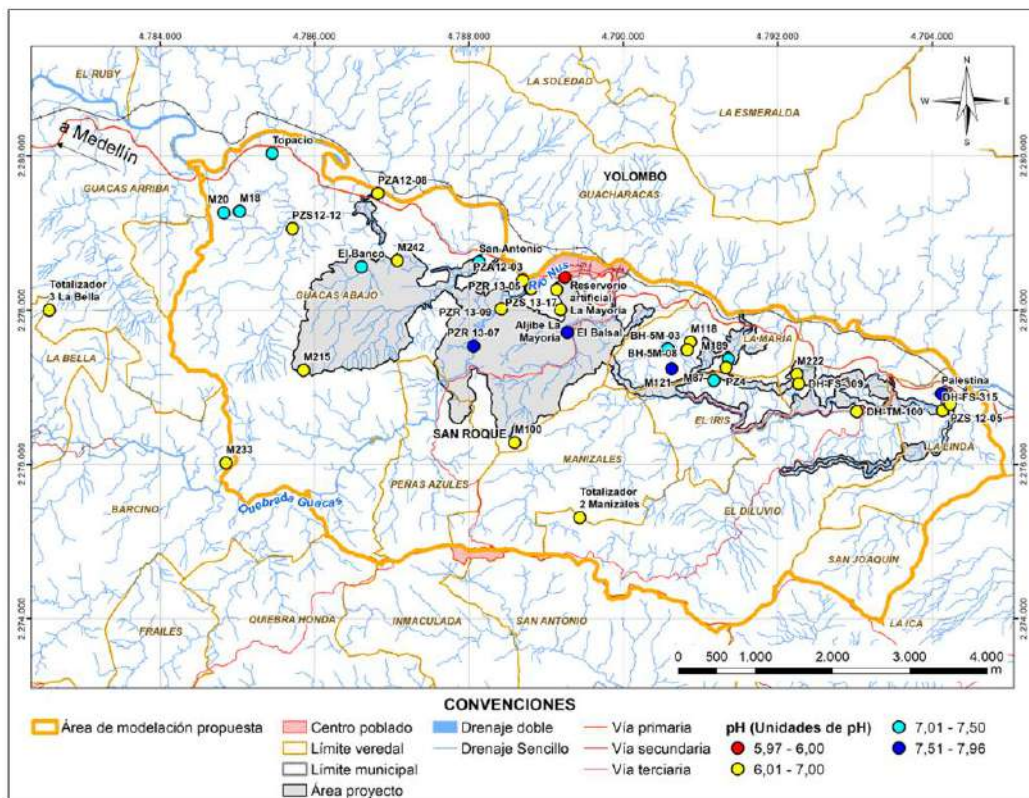


Figura 5.1.6.81 Distribución espacial del pH en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Al considerar la conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.82 y Figura 5.1.6.83) se puede evidenciar que el agua recolectada en los totalizadores presenta los valores más bajos de

este parámetro, con un rango entre 23,6 y 37,8 $\mu\text{S/cm}$, lo que es característico de este tipo de aguas. Por su parte, los puntos de aguas superficiales exhiben una mayor variabilidad, con valores entre 89,4 y 226 $\mu\text{S/cm}$, siendo la quebrada El Balsal el punto con la conductividad eléctrica más. El reservorio artificial La Mayoría presenta una conductividad eléctrica de 72,2 $\mu\text{S/cm}$, lo que sugiere una mineralización baja y una posible influencia de aguas de recarga reciente.

Los manantiales presentan valores de conductividad eléctrica bajo, los cuales varían entre 58,9 y 177,3 $\mu\text{S/cm}$, los cuales indican un grado de mineralización muy bajo a bajo, asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En los piezómetros y aljibe la conductividad eléctrica registrada es ligeramente más alta respecto a los manantiales, variando entre 57,9 – 283 $\mu\text{S/cm}$. Sin embargo, la mayoría de estos puntos se caracterizan por valores entre 100 – 300 $\mu\text{S/cm}$, asociados a un grado de mineralización bajo a medio. Los valores más elevados se registran en los piezómetros PZR 13-07 (283 $\mu\text{S/cm}$) y PZS12-12 (242 $\mu\text{S/cm}$), los cuales podrían estar captando aguas con mayor tiempo de residencia o con interacción con materiales más solubles. Por otro lado, valores bajos, como en PZS 13-17 (72,3 $\mu\text{S/cm}$) y en el aljibe La Mayoría (85,8 $\mu\text{S/cm}$), indican aguas menos mineralizadas, posiblemente de recarga reciente.

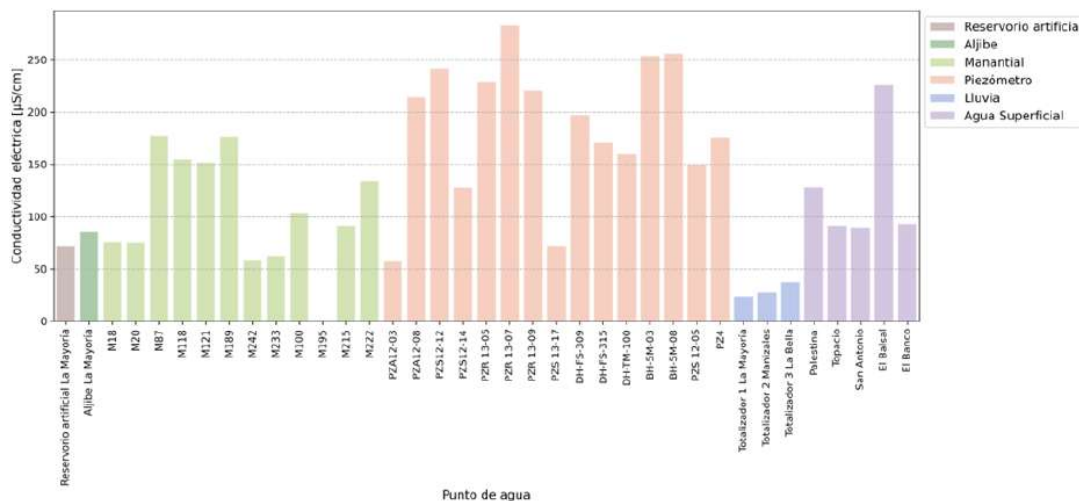
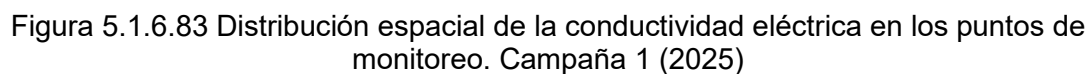


Figura 5.1.6.82 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025



En el caso del oxígeno disuelto (Figura 5.1.6.84 y Figura), se puede observar que los manantiales presentan una variabilidad importante, con un rango de 0,41 mg/l a 7,04 mg/l. La mayoría de los puntos muestran valores entre 4 y 7 mg/l, lo que indica condiciones de oxigenación moderada a alta, posiblemente asociadas con la infiltración reciente de aguas meteóricas con poco tiempo de tránsito en el medio subterráneo. Sin embargo, se destacan valores anómalamente bajos en M233 (0,41 mg/l) y M118 (0,55 mg/l), lo que puede sugerir aguas en contacto con materiales orgánicos.

Por su parte, los piezómetros y aljibe también exhiben un comportamiento variable en el oxígeno disuelto, con valores que oscilan entre 0,58 mg/l y 7,85 mg/l. En general, los valores más bajos de oxígeno disuelto se presentan en piezómetros PZA 12-08 y DH-FS 315 los cuales son de poca profundidad y captan unidades aluviales y suelos residuales. Esta baja concentración de oxígeno sugiere condiciones reductoras, posiblemente asociadas a procesos de degradación de materia orgánica y consumo de oxígeno; en el caso del punto PZR 13-09 también se registra un valor de oxígeno disuelto bajo, no obstante, en este caso, al ser un piezómetro profundo, es posible que este valor indique aguas con mayor tiempo de residencia en el medio subterráneo. En contraste, los valores más elevados de oxígeno disuelto, como en los piezómetros BH-5M-03, PZR 13-05, PZA 12-03, DH-FS-309 y PZR 13-07, podrían estar asociados a mayor recarga reciente y poco

tiempo de tránsito en el subsuelo. Los puntos restantes presentan condiciones que pueden considerarse intermedias entre aguas superficiales y subterráneas, lo que sugiere que el agua en estos puntos ha tenido un tiempo de residencia moderado, permitiendo cierto grado de intercambio con la atmósfera, pero sin alcanzar completamente las condiciones reductoras típicas de los sistemas subterráneos.

El reservorio artificial La Mayoría presenta un valor extremadamente bajo de oxígeno disuelto (0,74 mg/l), lo que indica condiciones reductoras, posiblemente relacionadas con acumulación de materia orgánica y descomposición anaerobia. En contraste, los cuerpos de agua superficiales (Topacio, San Antonio, Palestina) presentan valores entre 6 y 7 mg/l, lo que refleja una mayor aireación y mezcla con la atmósfera. Sin embargo, el punto El Balsal y el Banco presentan una oxigenación más baja de lo esperado, con valores de 2,95 mg/l y 4,5 mg/l respectivamente, lo que podría estar asociado a procesos biológicos o a procesos puntuales de contaminación, especialmente en el punto El Balsal, donde se ha evidenciado que el agua del cauce es turbia, de color gris y desarrollo de actividad minera artesanal.

Los totalizadores de agua lluvia presentan valores de oxígeno disuelto entre 6,78 mg/l y 7 mg/l, valores elevados coherentes con lo esperado en la saturación del agua en contacto con la atmósfera antes de su infiltración.

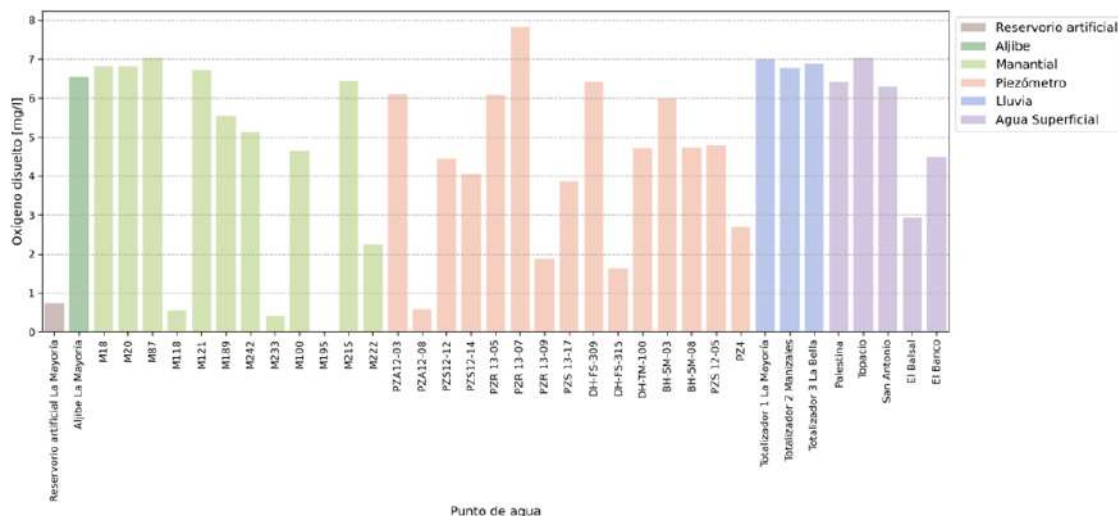


Figura 5.1.6.84 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

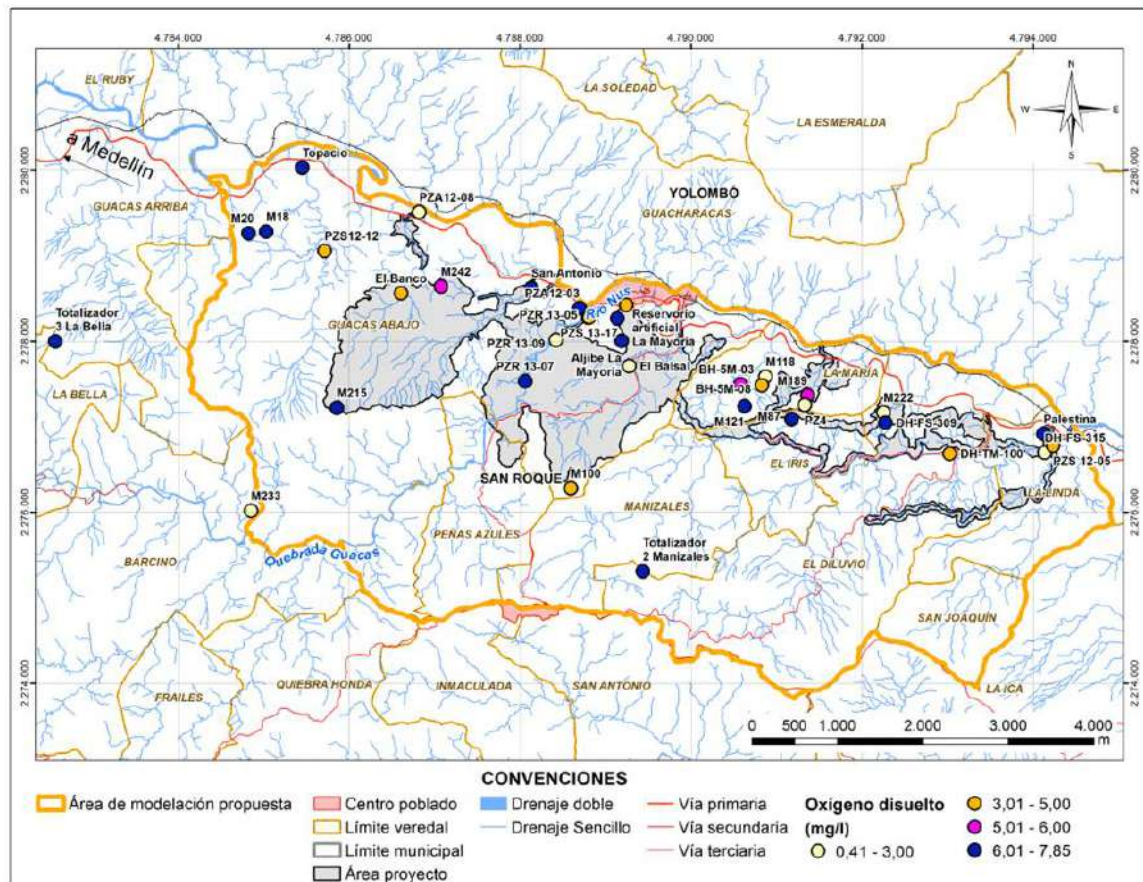


Figura 5.1.6.85 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo.
Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

b. Balance de electroneutralidad

El balance de electroneutralidad o iónico mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en miliequivalentes por litro [meq/l], determinados analíticamente y hace parte de un requerimiento mínimo que debe realizarse dentro de la evaluación del análisis químico para establecer que tan representativo es el muestreo en cuanto a las especies iónicas presentes en el agua. El error del balance iónico se calcula a partir de la Ecuación 5.1.6.8:

$$Error (\%) = \left(\frac{\sum \text{cationes} - \sum \text{aniones}}{\sum \text{cationes} + \sum \text{aniones}} \right) * 100$$

Ecuación 5.1.6.8 Error del balance iónico

El balance se hace empleando los iones mayoritarios o más abundantes en el agua, que son bicarbonatos (que el laboratorio reporta en unidades de CaCO_3 y es llevado a unidades de HCO_3^-), cloruros, sulfatos, sodio, calcio, magnesio y potasio, dado que las mayores concentraciones iónicas en el agua son las de estos elementos. Adicionalmente, se

incluyen la concentración de hierro y nitratos debido a que se registran concentraciones importantes de estos parámetros.

Aunque la Guía Técnica Colombiana GTC 30 (ICONTEC, 2014) indica que se deben emplear únicamente aquellas muestras con un error analítico menor o igual al 10%, los rangos de error aceptable del balance iónico dependen del valor de conductividad eléctrica. Esto se debe a que, a menor conductividad eléctrica, el error aceptable en el balance iónico es mayor (Custodio & Llamas, 1975; MADS, 2014), tal como se presenta en la Tabla 5.1.6.41.

En este caso, los puntos M18, M20, PZR 13-07 y PZS 13-17 presentan un error de balance iónico superior al umbral del 10% establecido por la GTC 30. En particular, los puntos M18, M20 y PZS 13-17 registran errores del 17,09%, 11,39% y 10,76%, respectivamente, con valores de conductividad eléctrica de 75,7 $\mu\text{S/cm}$, 75,2 $\mu\text{S/cm}$ y 72,3 $\mu\text{S/cm}$. Al evaluar estos resultados en función del criterio de error aceptable basado en la conductividad eléctrica, se evidencia que en todos los casos el error es bajo y se encuentra dentro del rango permitido. En el caso específico del punto PZR 13-07 el cual presenta una conductividad eléctrica de 283 $\mu\text{S/cm}$, aunque el error de balance iónico es ligeramente superior al 10% (10,4%), este valor se considera aceptable y no representa una desviación significativa en la calidad de los datos debido a que no se evidencia la omisión de especies químicas relevantes que pudieran comprometer la interpretación de los resultados hidroquímicos. El error de balance de iónico aceptable se presenta en la Tabla 5.1.6.41 y en la Figura 5.1.6.86.

Tabla 5.1.6.41 Error aceptable de balance iónico según la conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S/cm}$)	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	± 30	± 10	± 8	± 4	± 4

Fuente: Custodio & Llamas, (1975)

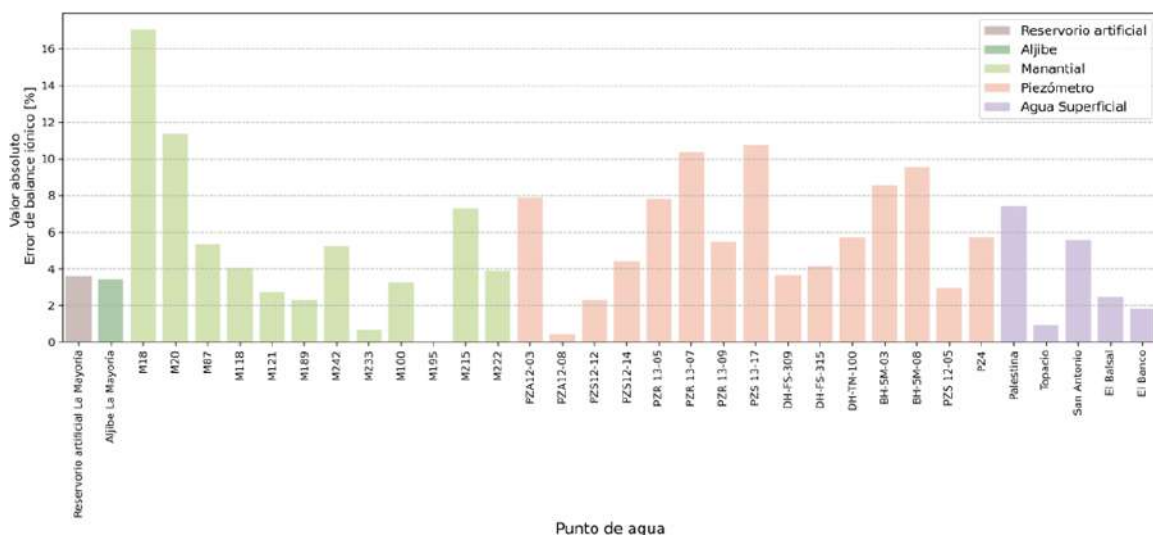


Figura 5.1.6.86 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Fuente: (SHI S.A.S., 2025)

c. Análisis hidrogeoquímico

A partir de los resultados del muestreo, se realizó una clasificación hidrogeoquímica de las muestras con base en sus principales componentes iónicos. Los cationes predominantes son sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), mientras que los aniones principales incluyen cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-). Para representar gráficamente la relación entre estos iones y facilitar su clasificación hidrogeoquímica, se emplean los diagramas de Stiff (Figura 5.1.6.87 a Figura 5.1.6.89) y Piper (Figura 5.1.6.90 a Figura 5.1.6.92).

En términos generales, se observa que el reservorio artificial La Mayoría y los puntos de agua superficial presentan un grado de mineralización bajo, donde los iones predominantes son sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y bicarbonato (HCO_3^-). Al comparar con las aguas superficiales en el caso de las quebradas Palestina y El Balsal se evidencia que el grado de mineralización es ligeramente más elevado y, aunque el anión bicarbonato sigue siendo el predominante, en este caso el catión principal es el calcio (Ca^{2+}). Adicionalmente, la quebrada El Balsal presenta una mayor concentración de sulfatos respecto al resto de puntos analizados, lo que puede estar asociado a contaminación antrópica proveniente de minería artesanal.

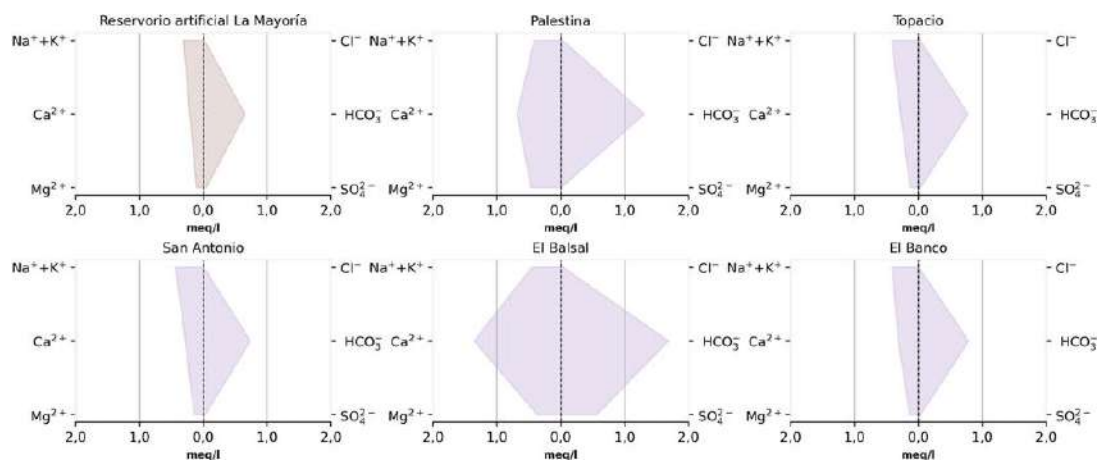


Figura 5.1.6.87 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Al considerar los manantiales, se pueden observar dos grandes grupos. El primer grupo incluye los puntos M18, M20, M242 y M233, los cuales presentan un grado de mineralización muy baja y donde los iones principales corresponden a $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ y HCO_3^- , similar a lo evidenciado en el caso de la mayoría de los puntos de agua superficial. Esto sugiere que tienen un tiempo limitado de residencia en el medio subterráneo, posiblemente provenientes de infiltración de recarga reciente. El segundo grupo está integrado por los puntos M87, M118, M121, M189 y M222, caracterizados por un grado de mineralización más elevado y donde se observa una mayor concentración de los cationes Ca^{2+} y Mg^{2+} . El aljibe y los puntos M100 y M215 evidencian un grado de mineralización intermedia entre los dos grupos.

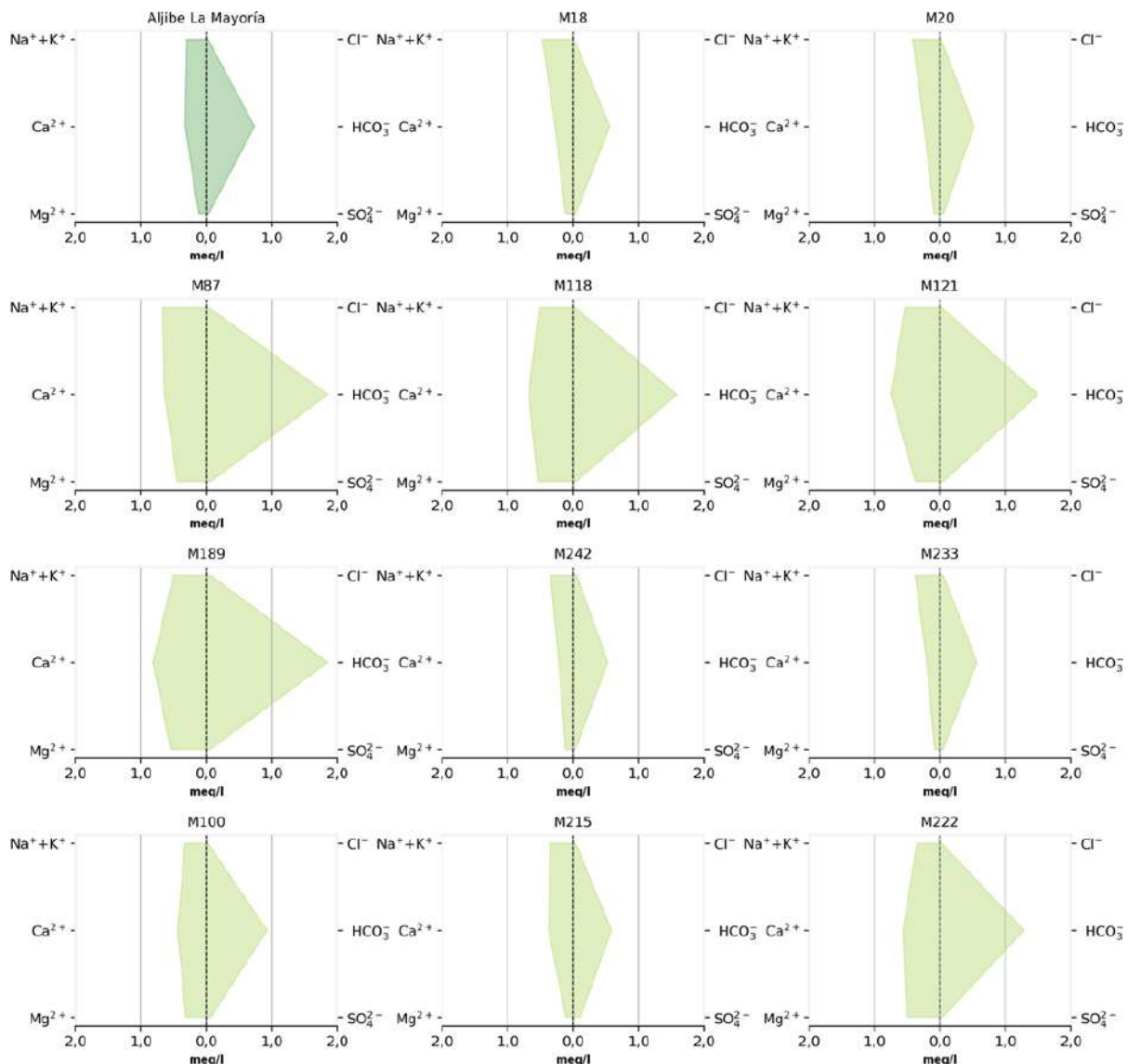


Figura 5.1.6.88 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 1. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Finalmente, en los piezómetros se observa una notable variabilidad en los diagramas de Stiff, a pesar de que en todos los casos el anión predominante es el bicarbonato (HCO_3^-). Los puntos PZS 12-12, PZR 13-05, PZR 13-07 y BH-5M-03 presentan un grado de mineralización moderado, con una mayor concentración de Ca^{2+} . Por su parte, los piezómetros BH-5M-08 y PZR 13-09, aunque exhiben una mineralización similar, muestran concentraciones más elevadas de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$.

En los puntos PZS 12-14, DH-FS-309 y DH-TM-100 se evidencia una menor mineralización, acompañada de una reducción en las concentraciones de Ca^{2+} respecto a $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Los piezómetros DH-FS-315, PZS 12-05 y PZ4 se caracterizan por una disminución en las

concentraciones de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, mientras que los puntos restantes presentan los niveles de mineralización más bajos del conjunto analizado.

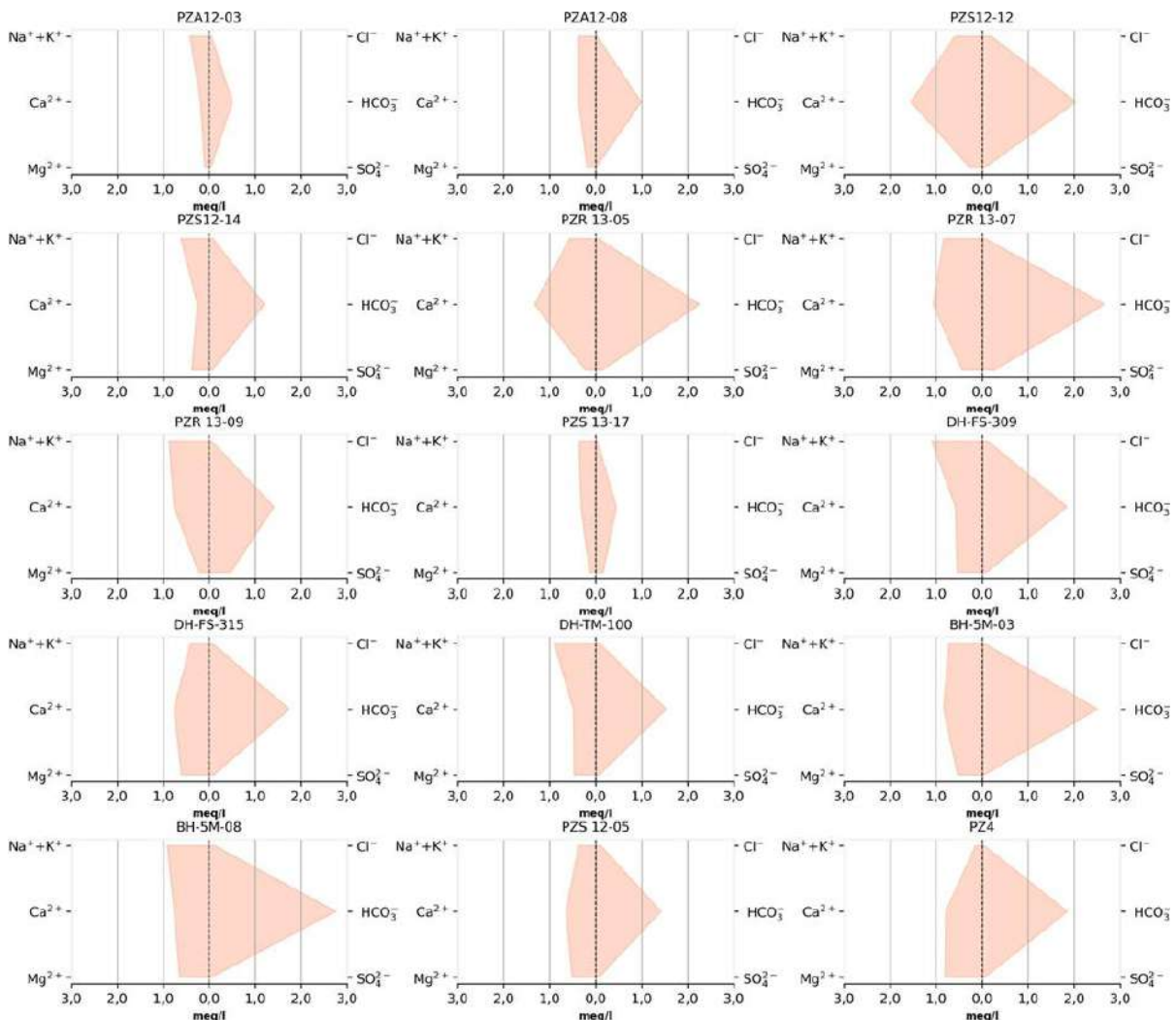


Figura 5.1.6.89 Diagramas de Stiff para los piezómetros. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El análisis de la composición química de los distintos puntos de monitoreo evidencia un comportamiento relativamente homogéneo en cuanto a la predominancia de bicarbonato (HCO_3^-) como anión principal en todas las muestras (Tabla 5.1.6.42). Esta característica sugiere una influencia significativa de recarga reciente, como se ha mencionado previamente, debido a que las aguas infiltradas a partir de la precipitación suelen presentar este anión como componente mayoritario.

En relación con los cationes, se identifican tres grupos principales: la mayoría de las aguas no presentan un catión dominante, mientras que una proporción menor muestra una composición sódica y otra, en menor cantidad, cálcica. Las aguas bicarbonatadas sódicas, identificadas en algunos manantiales y piezómetros, presentan valores de conductividad eléctrica relativamente bajos, lo que indica una menor mineralización. Esto sugiere un

tiempo de residencia corto y una menor interacción con la matriz geológica, reforzando la hipótesis de recarga reciente.

Por otro lado, las muestras en las que predomina calcio no evidencian catión dominante, exhiben valores de conductividad eléctrica ligeramente más elevados, lo que indica un mayor grado de mineralización. Esto puede atribuirse a un tiempo de residencia más prolongado en el subsuelo, lo que favorece procesos de disolución de minerales y mayor evolución hidrogeoquímica antes de la descarga en manantiales o su captación en piezómetros.

Tabla 5.1.6.42 Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 1 (2025)

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Aljibe La Mayoría	Aljibe	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M18	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M20	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M87	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M118	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M121	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M189	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M242	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M233	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M100	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M215	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M222	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZA12-03	Piezómetro	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
PZA12-08	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-12	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-14	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-05	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-07	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-09	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
PZS 13-17	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-FS-309	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-FS-315	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-TM-100	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-03	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-08	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS 12-05	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ4	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Palestina	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Topacio	Agua Superficial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada El Banco	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Fuente: SHI S.A.S, 2025

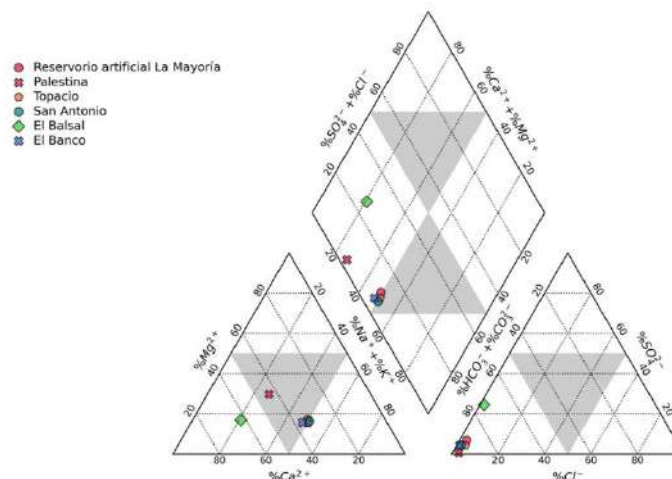


Figura 5.1.6.90 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

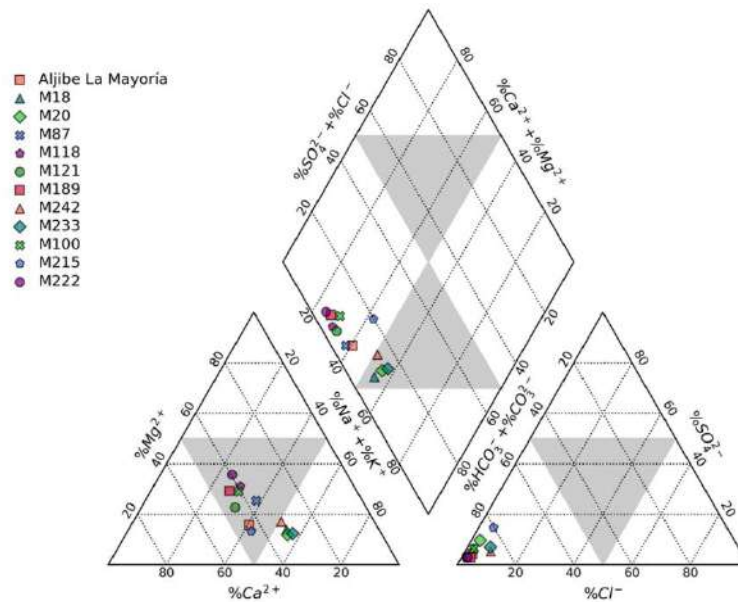


Figura 5.1.6.91 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 1 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

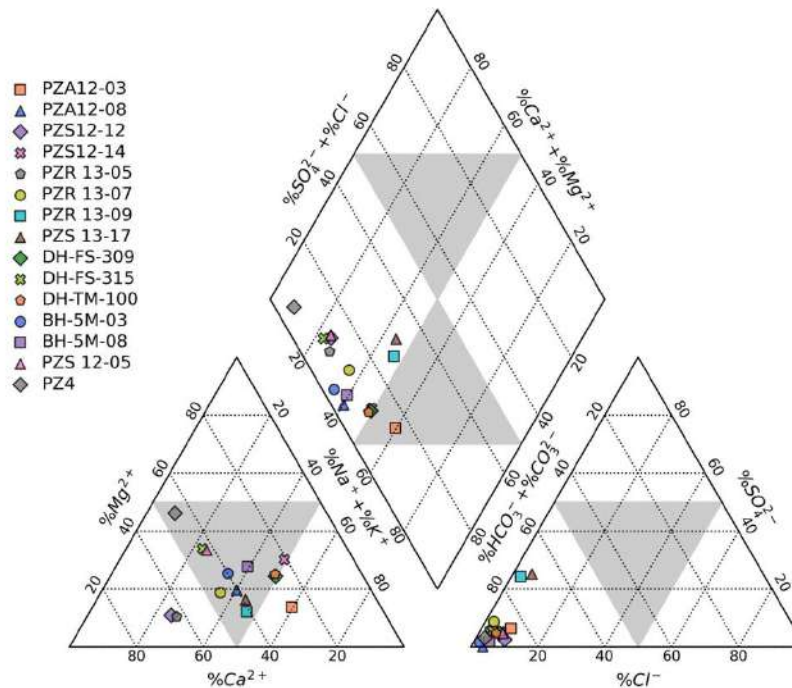


Figura 5.1.6.92 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 1. (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

A continuación, en la Figura 5.1.6.93 hasta la Figura 5.1.6.99 se presentan las isoconcentraciones de los iones mayoritarios para la campaña 1:

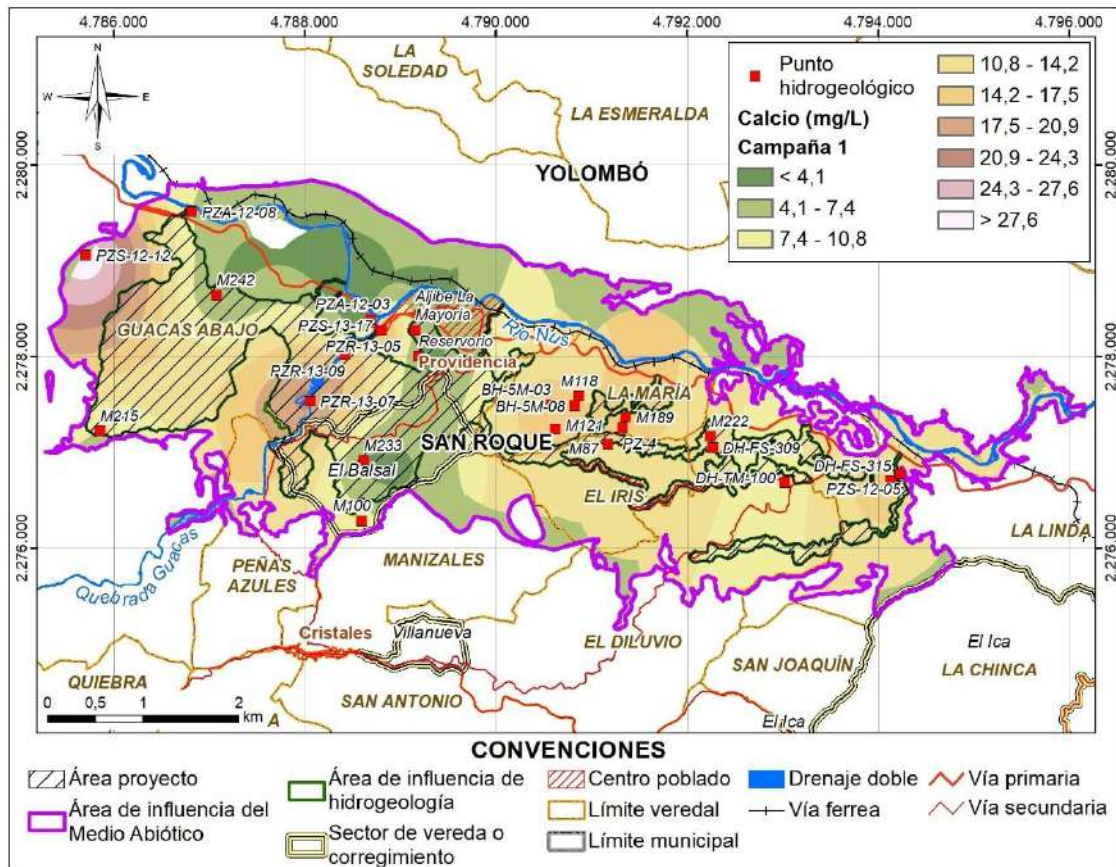


Figura 5.1.6.93 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

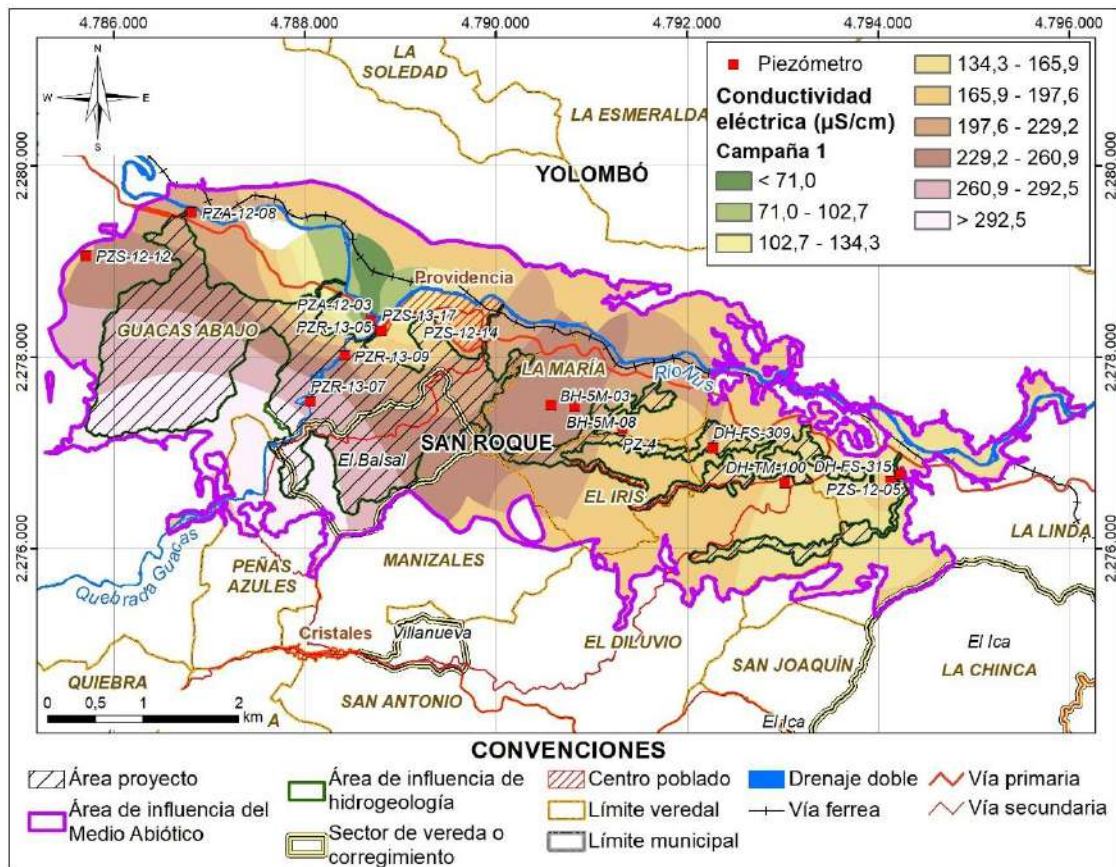


Figura 5.1.6.94 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

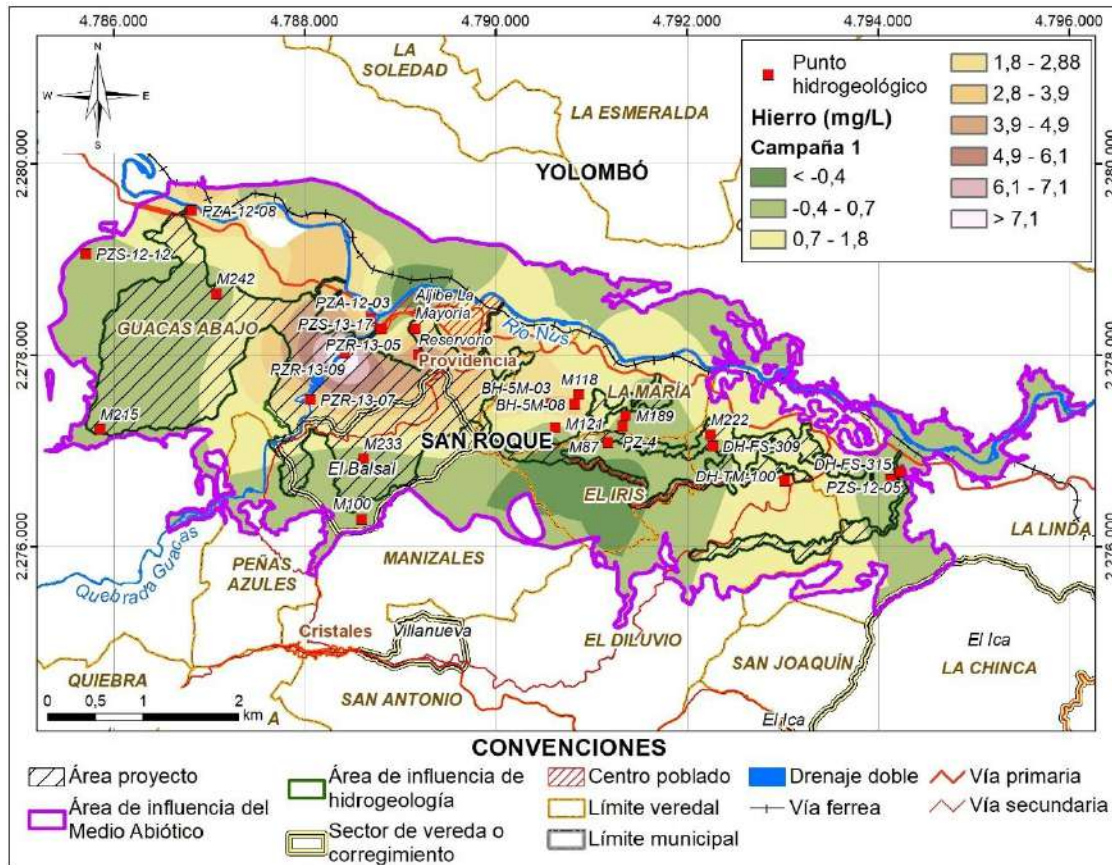


Figura 5.1.6.95 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

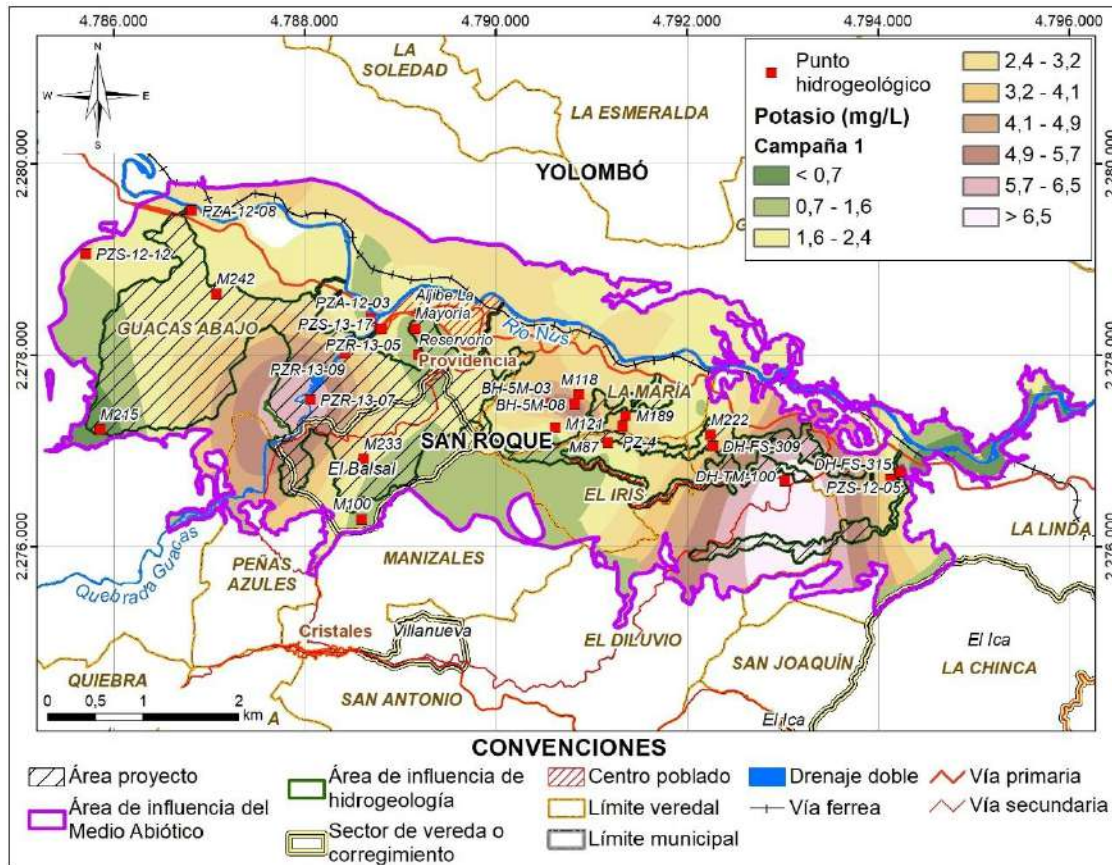


Figura 5.1.6.96 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

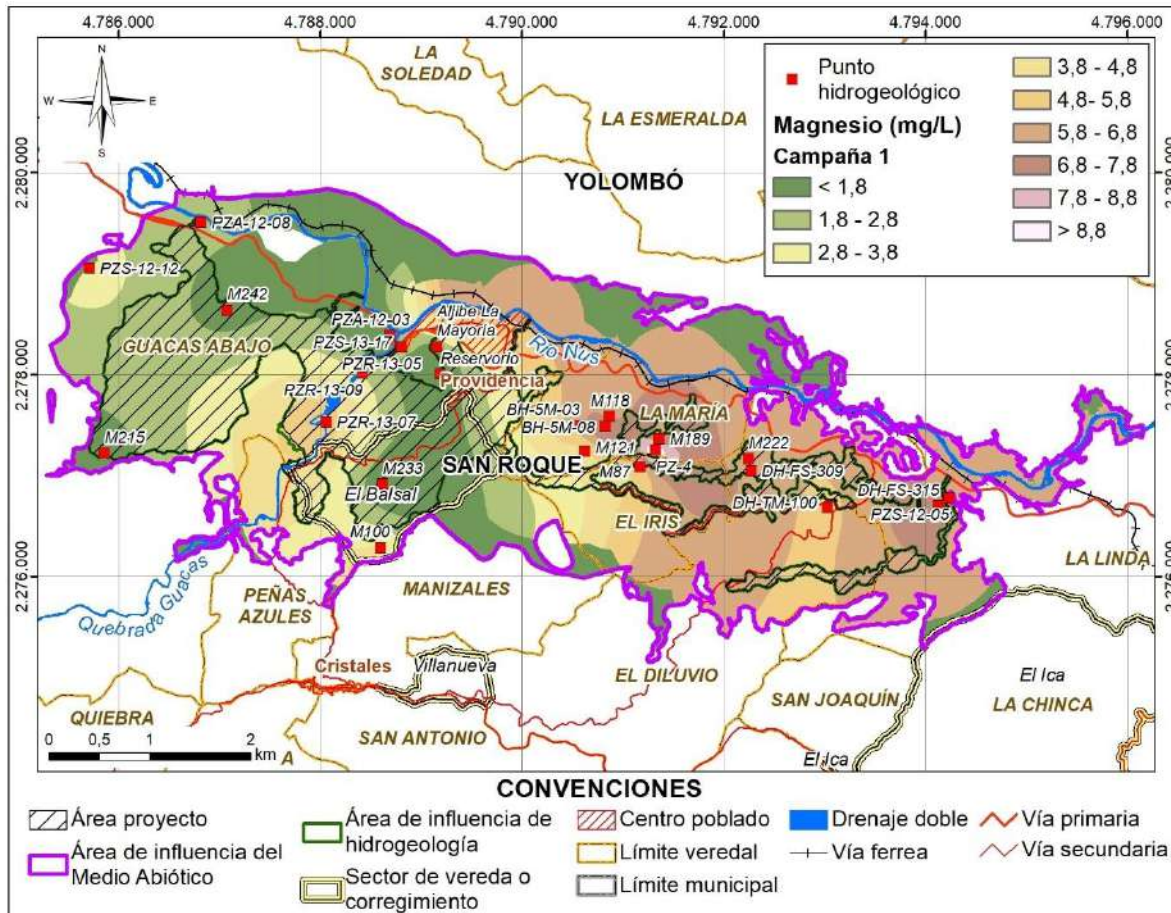


Figura 5.1.6.97 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

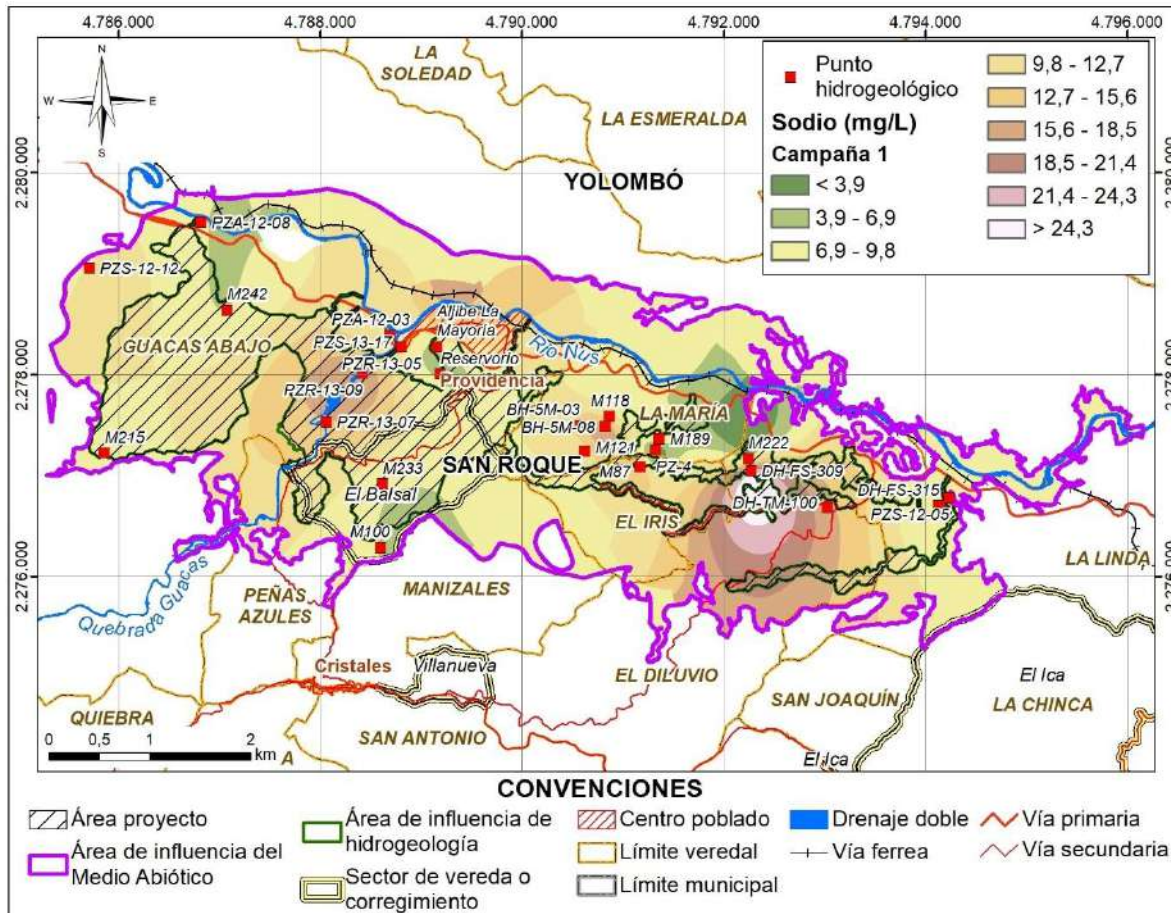


Figura 5.1.6.98 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

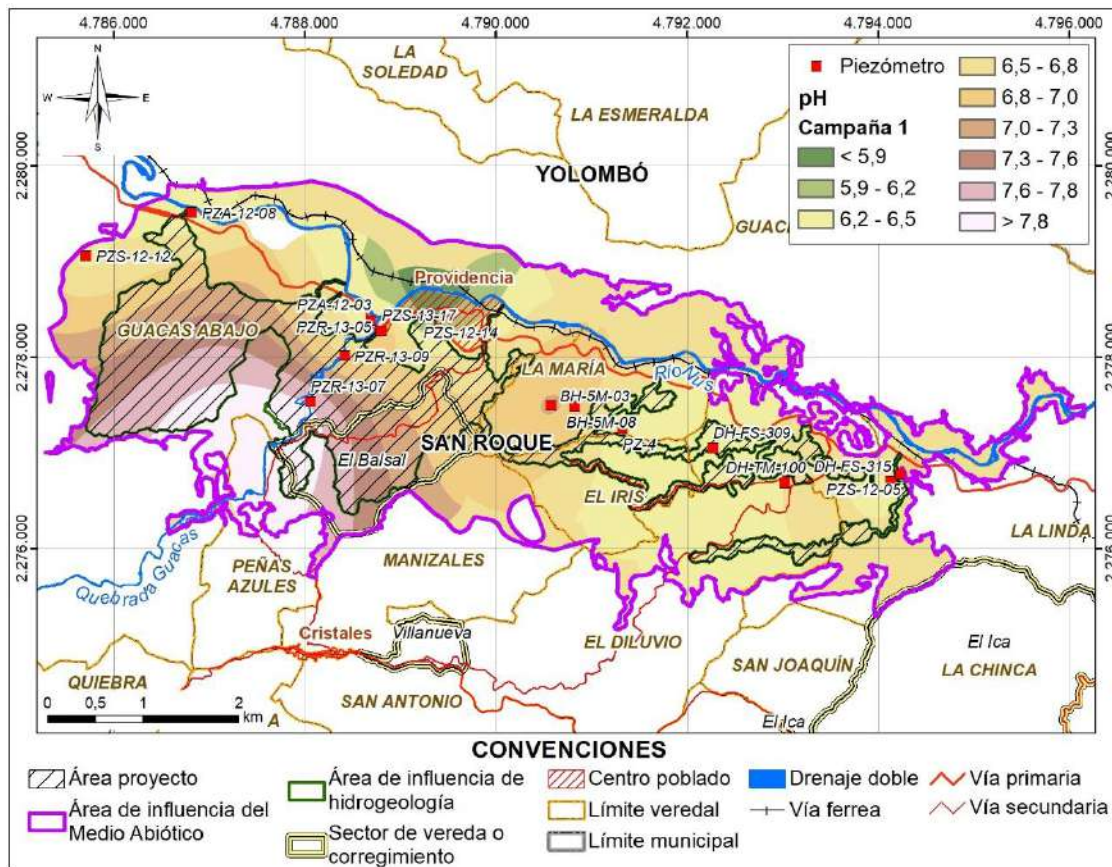


Figura 5.1.6.99 Isoconcentraciones de pH - Campaña 1 febrero 2025

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

C. Monitoreo hidrogeoquímico – campaña 2, mayo 2025

Entre el 4 y el 20 de mayo de 2025 se llevó a cabo la segunda campaña de monitoreo hidroquímico. Durante esta jornada también se realizó la medición in situ de parámetros fisicoquímicos como temperatura, pH, conductividad eléctrica y oxígeno disuelto. Asimismo, se recolectaron muestras de agua para análisis en laboratorio, con el objetivo de determinar las concentraciones de iones mayoritarios, así como parámetros microbiológicos, grasas, aceites e hidrocarburos. Es importante mencionar que el manantial M195 no presentaba flujo al momento del muestreo. En la Tabla 5.1.6.43 y Tabla 5.1.6.44 se presentan los resultados del muestreo hidroquímico y microbiológico respectivamente.

Al igual que en la campaña de febrero de 2025, la mayoría de los puntos de muestreo no presentan concentraciones detectables de grasas y aceites ni de hidrocarburos totales, lo cual indica una baja presencia de este tipo de compuestos en el sistema hidrogeológico. No obstante, se identificaron valores en el manantial M18, el piezómetro DH-FS-315 y la quebrada Palestina, lo que sugiere fuentes puntuales de contaminación de origen antrópico.

En cuanto a los nitratos, las concentraciones en la mayoría de los puntos se encuentran por debajo del límite de detección. Sin embargo, se destacan los puntos PZS 12-12 y DH-FS-

309, donde se registran las concentraciones más elevadas. Al igual que en la campaña previa, esto podría estar relacionado con infiltración de aguas residuales domésticas, uso de fertilizantes o procesos de lixiviación desde suelos agrícolas, lo que indica una posible influencia antrópica local.

El análisis de los parámetros microbiológicos evidencia que todos los puntos de muestreo registran presencia de algún tipo de microorganismo indicador de contaminación, aunque en magnitudes variables dependiendo del tipo de punto analizado.

En los puntos de agua superficial, se observaron las concentraciones más altas de coliformes totales en las quebradas Topacio y El Balsal, lo cual concuerda con lo observado en la primera campaña e indica altos niveles de contaminación microbiológica. Asimismo, los valores de *Escherichia coli* son significativamente elevados en estos puntos, así como en la quebrada Palestina, sugiriendo una fuerte influencia de descargas de aguas residuales o escorrentía contaminada.

En el caso de los manantiales, se observa una amplia variabilidad en la calidad microbiológica del agua. Los puntos M189, M118 y M87 presentan concentraciones extremadamente altas de coliformes totales (> 100.000 NMP/100 ml) y niveles elevados de *E. coli* y coliformes termotolerantes, lo que evidencia una contaminación fecal considerable y posiblemente reciente. En contraste, manantiales como M20 y M242 muestran niveles no detectables o muy bajos de estos parámetros, lo cual sugiere una menor exposición a fuentes de contaminación. No obstante, la variabilidad entre campañas indica que las condiciones de calidad del agua en estos manantiales no son estables en el tiempo, y pueden verse afectadas por la dinámica de recarga o actividades externas (domésticas y ganadería).

En los piezómetros, al igual que en la campaña previa, se registra en general una contaminación microbiológica menor en comparación con aguas superficiales y manantiales. No obstante, algunos puntos como PZR 13-05, BH-5M-08 y PZ4 muestran valores elevados de coliformes totales (> 100.000 NMP/100 ml), lo que sugiere una posible conexión con fuentes superficiales contaminadas. En contraste, piezómetros como PZS12-12, PZS12-14, PZR 13-07 y PZA12-08 exhiben valores bajos o no detectables de *E. coli* y coliformes termotolerantes.

En el caso del aljibe La Mayoría, es posible observar niveles intermedios de los parámetros microbiológicos, reflejando una cierta vulnerabilidad, pero sin alcanzar los niveles observados en aguas superficiales. Finalmente, a diferencia de la campaña anterior, el reservorio artificial La Mayoría mostró un incremento en los coliformes totales, aunque sin evidencia de contaminación fecal significativa.

Tabla 5.1.6.43 Resultados de laboratorio de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Solidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N/l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
Reservorio artificial La Mayoría	<1,89	36,75	36,75	<4,00	<0,20	<0,20	38	0,79	<1.129	0,96	6,68	1,81	1,84	1,12	7,21	6,86
Aljibe La Mayoría	<1,89	34,69	34,69	<4,00	<0,20	<0,20	37	2,54	<1.129	1,26	5,76	0,212	1,11	1,27	8,25	-0,89
M18	<1,89	36,17	37,17	<4,00	0,64	<0,20	19	16,17	<1.129	5,05	6,73	0,096	1,89	2,87	11,3	-10,36
M20	<1,89	37,39	37,39	<4,00	<0,20	<0,20	19	3,19	<1.129	3,38	6,43	0,105	1,56	1,14	12,8	6,71
M87	<1,89	91,82	91,82	<4,00	<0,20	<0,20	83	0,42	<1.129	2,1	15,031	<0,090	5,753	2,298	15,068	1,19
M118	<1,89	76,13	76,13	<4,00	<0,20	<0,20	50	1,71	<1.129	1,5	10,574	0,435	6,208	1,466	7,906	-5,49
M121	<1,89	82,13	82,13	<4,00	<0,20	<0,20	57	0,88	<1.129	3,26	12,359	<0,090	4,118	1,992	12,018	-6,31
M189	<1,89	80,72	80,44	<4,00	<0,20	<0,20	56	0,54	<1.129	1,86	15,1	<0,090	6,21	2,41	8,17	0,56
M242	<1,89	25,13	25,13	<4,00	<0,20	<0,20	22	6,55	<1.129	0,91	3,746	0,22	1,306	1,489	5,908	-8,36
M233	<1,89	23,33	23,25	<4,00	<0,20	<0,20	94	0,32	<1.129	1,24	4,191	<0,090	0,925	1,532	5,842	7,30
M100	<1,89	53,25	53,06	<4,00	<0,20	<0,20	38	1,61	<1.129	4,47	8,994	<0,090	3,987	1,113	7,838	-2,28
M195	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
M215	<1,89	35	35	<4,00	<0,20	<0,20	19	1,42	<1.129	5,2	8,52	0,266	1,5	0,346	9,4	6,99
M222	<1,89	70,75	70,75	<4,00	<0,20	<0,20	48	2,45	<1.129	4,32	10,612	0,188	6,226	1,973	6,925	-5,84
PZA12-03	<1,89	67,39	67,39	<4,00	<0,20	<0,20	47	2,66	<1.129	1,75	15,823	<0,090	2,34	3,126	16,889	10,36
PZA12-08	<1,89	46,12	46,12	<4,00	<0,20	<0,20	24	6,05	<1.129	4,03	6,523	13,668	1,837	2,835	3,593	0,76
PZS12-12	<1,89	93,91	93,91	<4,00	<0,20	<0,20	50	1,54	1,2	3,98	26,6	0,964	3,16	1,71	15,6	7,81

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Solidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N/l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
PZS12-14	<1,89	54,94	54,94	<4,00	<0,20	<0,20	60	3,78	<1.129	2	3,36	<0,090	3,78	1,51	15,8	-1,73
PZR 13-05	<1,89	117,56	117,56	<4,00	<0,20	<0,20	127	2,87	<1.129	6,83	35,7	<0,090	3,49	3,72	15,5	4,87
PZR 13-07	<1,89	140,06	140,06	<4,00	<0,20	<0,20	169	1,33	<1.129	18,37	45,2	<0,090	3,61	3,27	14,3	0,57
PZR 13-09	<1,89	31,04	31,04	<4,00	<0,20	<0,20	15	3,72	<1.129	1,57	2,785	6,025	0,945	1,169	7,874	2,97
PZS 13-17	<1,89	35,63	35,63	<4,00	<0,20	<0,20	48	3,97	<1.129	6,94	8,47	<0,090	2,1	2,16	9,83	5,33
DH-FS-309	<1,89	96,34	96,34	<4,00	<0,20	<0,20	76	2,27	1,3	4,32	12,58	0,109	5,82	3,389	21,791	1,52
DH-FS-315	<1,89	101,98	101,63	<4,00	0,26	<0,20	83,333	0,31	<1.129	2,04	16,811	2,164	9,081	3,17	7,366	-0,45
DH-TM-100	<1,89	80	80	<4,00	<0,20	<0,20	38	5,48	<1.129	2,67	14,8	0,094	7,99	3,19	11,1	4,07
BH-5M-03	<1,89	132,75	132,75	<4,00	<0,20	<0,20	109	1,49	<1.129	1,65	47,5	<0,090	4,99	1,68	5,87	5,99
BH-5M-08	<1,89	117,38	117,38	<4,00	<0,20	<0,20	96	1,41	<1.129	1,33	32,2	<0,090	4,8	2,4	6,14	-1,79
PZS 12-05	<1,89	69,99	69,75	<4,00	<0,20	<0,20	53	2,16	<1.129	3,46	15,785	<0,090	6,719	1,654	11,304	10,19
PZ4	<1,89	96,9	96,56	<4,00	<0,20	<0,20	71	0,21	<1.129	1,59	15,1	0,139	8,14	3,79	9,45	-0,87
Quebrada Palestina	<1,89	65,57	64,57	<4,00	0,42	<0,20	33	4,96	<1,129	1,09	14,7	0,266	6,77	3,04	9,44	10,32
Quebrada Topacio	<1,89	38,04	38,04	<4,00	<0,20	<0,20	18	3,36	<1,129	2,43	5,98	0,523	1,87	1,91	11,3	5,49
Quebrada San Antonio	<1,89	40,88	40,88	<4,00	<0,20	<0,20	24	4,17	<1,129	1,31	6,9	0,507	2,75	2,3	10,4	6,66
Quebrada El Balsal	<1,89	52,68	52,5	<4,00	<0,20	<0,20	22	0,61	<1,129	37,46	21,88	0,308	3,772	2,898	5,659	-3,19

Nombre del punto	Alcalinidad a la finalftaleina (mg CaCO ₃ /l)	Alcalinidad total (mg CaCO ₃ /l)	Bicarbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Carbonatos (mg CaCO ₃ /l)	Grasas y aceites (mg GyA/l)	Hidrocarburos totales (mg Hidrocarburos/l)	Sólidos Disueltos Totales (mg SDT/l)	Cloruros (mg Cl/l)	Nitratos (mg N/l)	Sulfatos (SO ₄ /l)	Calcio Disuelto (mg/l)	Hierro Disuelto (mg/l)	Magnesio Disuelto (mg/l)	Potasio Disuelto (mg/l)	Sodio Disuelto (mg/l)	Error de balance iónico (%)
Quebrada El Banco	<1,89	40,69	40,69	<4,00	<0,20	<0,20	21	4,88	<1,129	1,38	6,77	0,305	1,9	1,75	8,54	-3,10

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Tabla 5.1.6.44 Resultados de parámetros microbiológicos de los puntos de monitoreo. Campaña 2

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	38100	1	1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	1850	63	63
M18	Manantial	5/5/2025	1830	388	459
M20	Manantial	5/5/2025	3010	<1	<1
M87	Manantial	19/5/2025	110600	520	520
M118	Manantial	14/5/2025	197000	2000	2000
M121	Manantial	13/5/2025	93500	840	1200
M189	Manantial	15/5/2025	770100	4960	6870
M242	Manantial	9/5/2025	3873	1	1
M233	Manantial	19/5/2025	16100	100	100
M100	Manantial	18/5/2025	1723	20	20

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
M195	Manantial	Seco	--	--	--
M215	Manantial	8/5/2025	17850	31	63
M222	Manantial	6/5/2025	198630	2950	3310
PZA12-03	Piezómetro	16/5/2025	3230	100	310
PZA12-08	Piezómetro	7/5/2025	100	<1	<1
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	265	<1	<1
PZS12-14	Piezómetro	4/5/2025	51	1	1
PZR 13-05	Piezómetro	12/5/2025	241960	1	2
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	1190	<1	<1
PZR 13-09	Piezómetro	11/5/2025	216	100	200
PZS 13-17	Piezómetro	7/5/2025	6131	10	10
DH-FS-309	Piezómetro	11/5/2025	3680	100	100
DH-FS-315	Piezómetro	16/5/2025	6750	20	20
DH-TM-100	Piezómetro	18/5/2025	21430	122	148
BH-5M-03	Piezómetro	4/5/2025	7400	200	750
BH-5M-08	Piezómetro	13/5/2025	107600	41	359
PZS 12-05	Piezómetro	14/5/2025	61310	100	1000
PZ4	Piezómetro	18/5/2025	116000	30	30
Quebrada Palestina	Agua Superficial	20/5/2025	41060	1019	2909
Quebrada Topacio	Agua Superficial	5/5/2025	1119900	1460	92080
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	6/5/2025	22820	41	63
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	8/5/2025	120330	4352	5172
Quebrada	Agua Superficial	19/5/2025	16790	52	63

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Coliformes totales	Escherichia Coli	Coliformes Termotolerantes
		[dd/mm/aa]	NPM/100 ml	NPM/100 ml	NPM/100 ml
El Banco					

Fuente: SHI S.A.S, 2025

a. Parámetros fisicoquímicos

Como ya se mencionó, la medición de parámetros in situ, como el oxígeno disuelto, el pH y la conductividad eléctrica, es fundamental para caracterizar las condiciones fisicoquímicas del sistema hidrogeológico y entender procesos como la interacción agua-roca, posibles aportes antrópicos y la dinámica del flujo subterráneo. Aunque los totalizadores no hacen parte de la red de monitoreo, sus datos se incluyen por su valor complementario en el análisis de las interacciones entre la precipitación y las aguas superficiales y subterráneas. Los resultados de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo se presentan en la Tabla 5.1.6.45.

Tabla 5.1.6.45 Parámetros fisicoquímicos medidos in situ en los puntos de monitoreo. Campaña 2

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp .	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	µS/cm
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	27,1	6,78	2,87	64,1
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	25,4	6,52	1,24	61,4
M18	Manantial	5/5/2025	22,8	7,43	6,99	73,4
M20	Manantial	5/5/2025	23,1	7,5	7,18	73,5
M87	Manantial	19/5/2025	24,3	7,01	6,44	162,1
M118	Manantial	14/5/2025	24,1	6,97	3,76	134,8
M121	Manantial	13/5/2025	26,0	7,75	6,53	174,6
M189	Manantial	15/5/2025	24,2	7,81	7,35	140,3
M242	Manantial	9/5/2025	24,0	7,11	5,93	43,7
M233	Manantial	19/5/2025	24,2	7,42	7,36	45,5
M100	Manantial	18/5/2025	22,8	6,26	4,57	99,5
M195	Manantial	Seco	-	-	-	-
M215	Manantial	8/5/2025	22,7	6,93	6,89	70,7
M222	Manantial	6/5/2025	23,5	6,46	2,8	125,7
PZA12-03	Piezómetro	16/5/2025	24,6	6,58	1,08	74,1
PZA12-08	Piezómetro	7/5/2025	27,5	6,01	1,59	106,1
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	24,6	6,48	3,64	175,9
PZS12-14	Piezómetro	4/5/2025	26,9	6,06	2,61	98,6
PZR 13-05	Piezómetro	12/5/2025	29,7	7,61	1,99	223
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	24,4	7,63	4,11	274
PZR 13-09	Piezómetro	11/5/2025	24,0	6,66	1,51	235

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	Temp	pH	Oxígeno disuelto	Conductividad eléctrica
		[dd/mm/aa]	°C	U. de pH	mg/l	µS/cm
PZS 13-17	Piezómetro	7/5/2025	28,8	6,33	3,85	84,2
DH-FS-309	Piezómetro	11/5/2025	23,8	6,51	5,01	188,4
DH-FS-315	Piezómetro	16/5/2025	25,4	6,49	2,12	198
DH-TM-100	Piezómetro	18/5/2025	25,1	6,31	2,07	147,9
BH-5M-03	Piezómetro	4/5/2025	24,4	6,88	4,83	164,5
BH-5M-08	Piezómetro	13/5/2025	24,4	7,22	4,2	225
PZS 12-05	Piezómetro	14/5/2025	26,7	6,6	4,75	133
PZ4	Piezómetro	18/5/2025	24,3	6,57	2,52	153
Totalizado r 1 La Mayoría	Lluvia	15/5/2025	27,5	5,66	6,81	14,69
Totalizado r 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	25,2	5,07	7,04	10,09
Totalizado r 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	23,5	5,98	6,84	8,47
Quebrada Palestina	Agua Superficial	20/5/2025	25,9	7,82	7,19	126,6
Quebrada Topacio	Agua Superficial	5/5/2025	27,8	7,33	7,67	69,6
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	6/5/2025	26,3	7,44	7,06	73,1
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	8/5/2025	22,8	7,46	7,51	151,8
Quebrada El Banco	Agua Superficial	19/5/2025	26,4	7,47	6,8	74,4

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Las temperaturas registradas en los puntos de muestreo (Figura 5.1.6.100 y Figura 5.1.6.101) se encuentran en un rango de 22,7 a 29,7 °C. Estos valores están fuertemente influenciados por las condiciones atmosféricas al momento del muestreo, especialmente dado que la mayoría de los puntos representan sistemas hidrogeológicos someros.

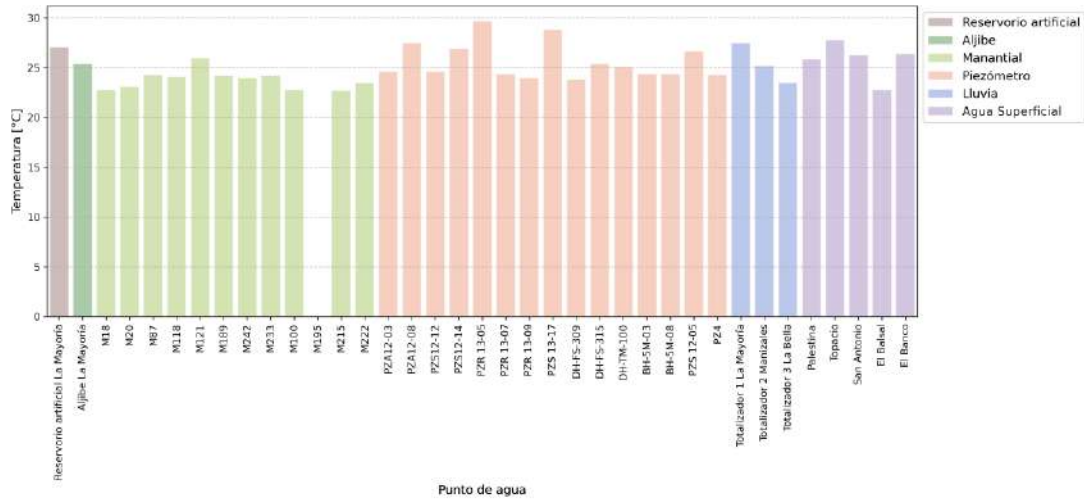


Figura 5.1.6.100 Temperatura registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

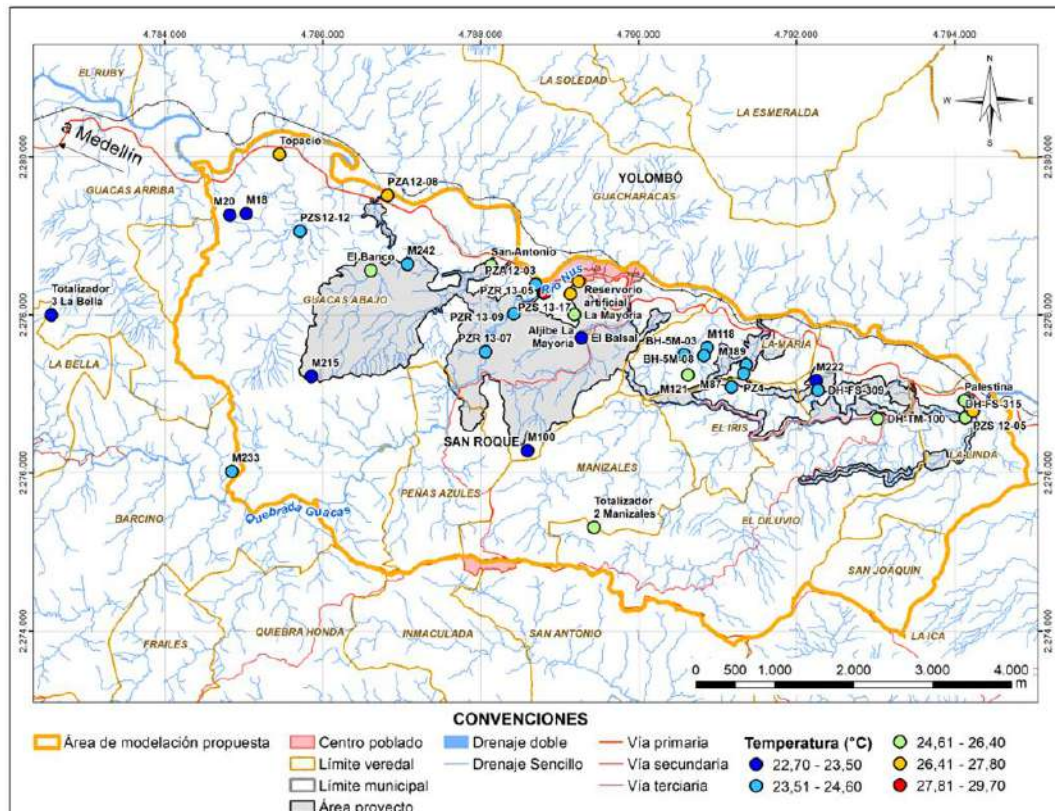


Figura 5.1.6.101 Distribución espacial de la temperatura en los puntos de monitoreo Campaña 2

Fuente: SHI S.A.S, 2025

En cuanto al pH (Figura 5.1.6.102 y Figura 5.1.6.103), los valores obtenidos oscilan entre 5,07 y 7,82 unidades de pH, lo que corresponde a aguas con características que van desde ligeramente ácidas hasta ligeramente alcalinas. Al igual que lo registrado en la campaña anterior, este comportamiento es indicativo de un sistema con interacción moderada entre el agua y los minerales del medio geológico, sin evidencias de procesos intensos de acidificación o alteración química significativa.

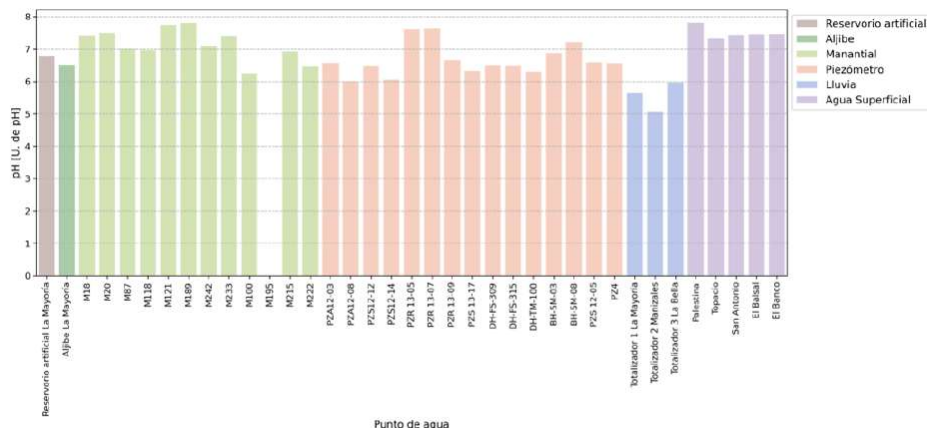


Figura 5.1.6.102 pH registrado en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

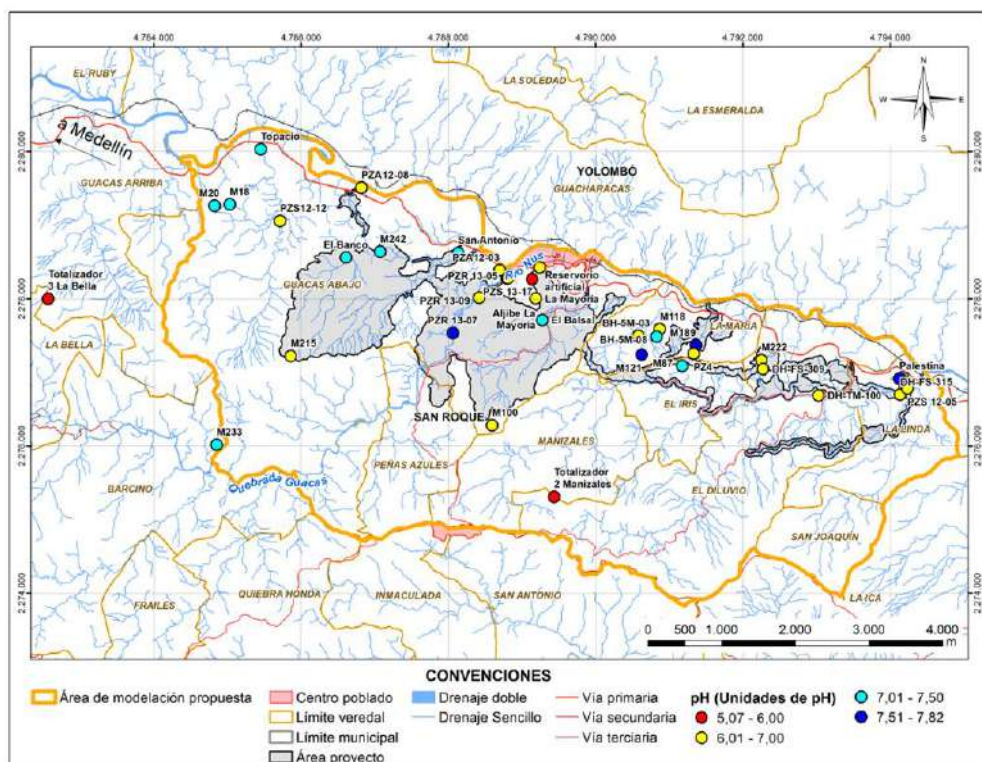


Figura 5.1.6.103 Distribución espacial del pH en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los valores de conductividad eléctrica obtenidos (Figura 5.1.6.104 y Figura 5.1.6.105) reflejan una tendencia comparable a la observada en la campaña anterior. Las muestras recolectadas en los totalizadores presentan las conductividades más bajas del conjunto, con un rango que va de 8,47 a 14,69 $\mu\text{S/cm}$, lo cual es característico de aguas de precipitación reciente. En contraste, los puntos de agua superficial muestran una mayor dispersión en los valores, que oscilan entre 69,6 y 151,8 $\mu\text{S/cm}$, siendo la quebrada El Balsal la que registra el valor más elevado, mientras que el reservorio artificial La Mayoría presenta la menor conductividad eléctrica entre estos puntos, con 61,4 $\mu\text{S/cm}$.

En cuanto a los manantiales, los valores registrados se sitúan en un rango de 43,7 a 174,6 $\mu\text{S/cm}$, lo que indica un nivel de mineralización bajo. Sin embargo, en los puntos M121 y M87 se observa una ligera elevación de este parámetro, lo que podría estar relacionado con un mayor tiempo de permanencia del agua en el subsuelo.

Finalmente, los piezómetros y el aljibe presentan conductividades eléctricas ligeramente superiores a las de los manantiales, con valores que oscilan entre 61,4 y 274 $\mu\text{S/cm}$. La mayoría de las muestras se ubican entre 100 y 200 $\mu\text{S/cm}$, lo que corresponde a aguas de baja a moderada mineralización. Los valores más altos se registran en los piezómetros PZR 13-07 (274 $\mu\text{S/cm}$), PZR 13-09 (235 $\mu\text{S/cm}$), BH-5M-08 (225 $\mu\text{S/cm}$) y PZR 13-05 (223 $\mu\text{S/cm}$), lo cual sugiere una mayor interacción agua-roca y un tiempo de residencia más prolongado. Por el contrario, puntos como PZA 12-03 (74,1 $\mu\text{S/cm}$) y el aljibe La Mayoría (61,4 $\mu\text{S/cm}$) muestran una mineralización más baja, posiblemente asociada a una recarga reciente.

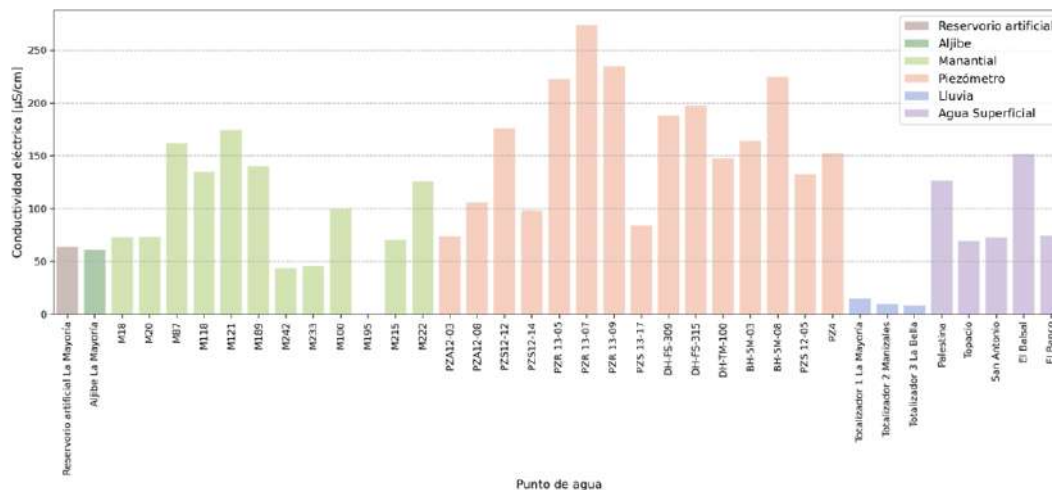


Figura 5.1.6.104 Conductividad eléctrica registrada en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

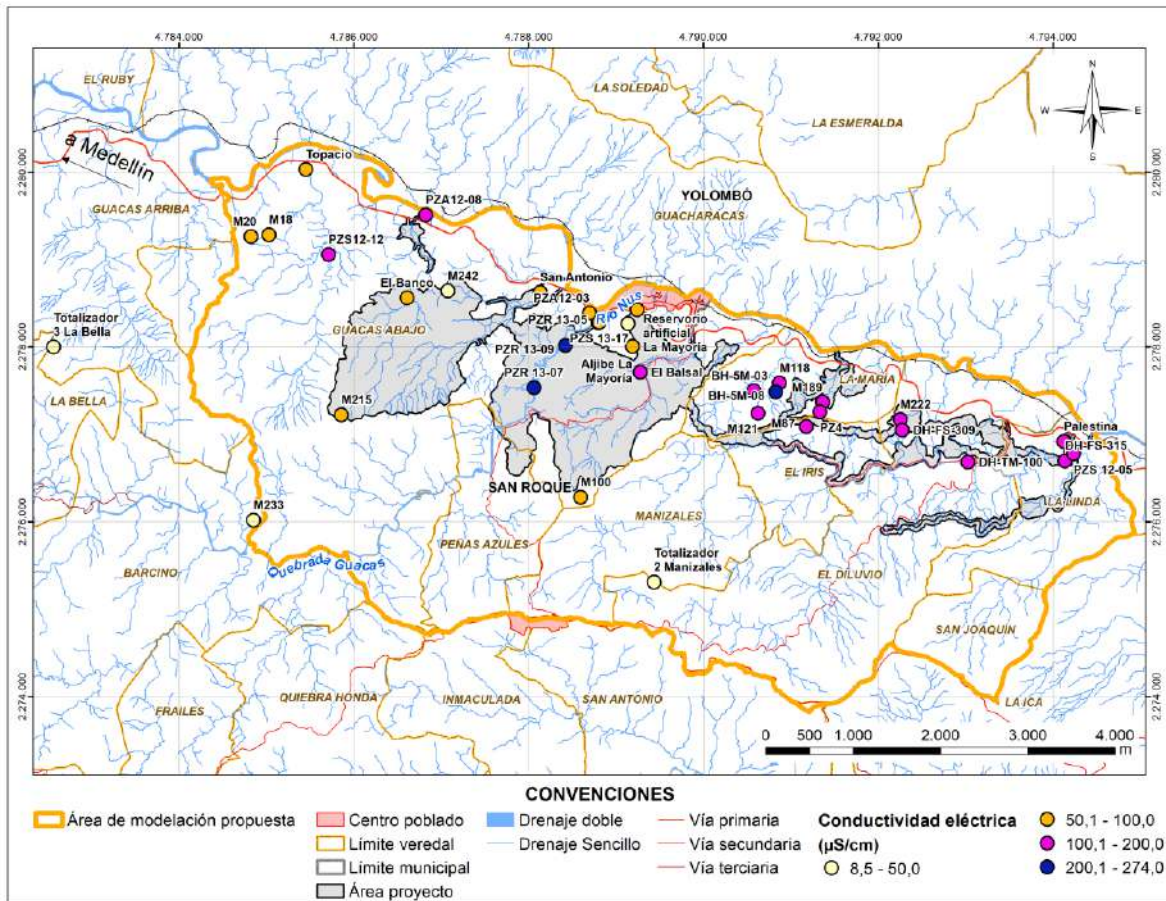


Figura 5.1.6.105 Distribución espacial de la conductividad eléctrica en los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2015)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

En el caso del oxígeno disuelto (Figura 5.1.6.106 y Figura 5.1.6.107), los valores medidos en los manantiales varían entre 2,80 mg/l y 7,36 mg/l. Aunque el rango es amplio, la mayoría de las muestras presentan concentraciones superiores a 5 mg/l, lo que indica condiciones de oxigenación moderada a alta, probablemente asociadas a la infiltración de precipitación reciente con un corto tiempo de tránsito subterráneo. Los valores más bajos se registran en los puntos M222 (2,80 mg/l) y M118 (3,76 mg/l), posiblemente como resultado de procesos de consumo de oxígeno, ya sea por actividad microbiológica o por interacción con materiales ricos en materia orgánica. A diferencia de la campaña anterior, no se identificaron valores extremadamente bajos, lo que podría reflejar una mayor tasa de recarga reciente.

En contraste, los piezómetros y el aljibe muestran concentraciones más bajas de oxígeno disuelto, con valores entre 1,08 mg/l y 5,01 mg/l. Los niveles más reducidos se observan en los piezómetros PZA 12-03, PZA 12-08, PZR 13-09 y en el aljibe La Mayoría. La mayoría de estos puntos son someros y captan unidades aluviales o suelos residuales, lo cual puede favorecer la degradación de materia orgánica y el consumo de oxígeno disuelto, un comportamiento similar al evidenciado en la primera campaña. En el caso del piezómetro

PZR 13-09, a pesar de su mayor profundidad, la baja concentración de oxígeno podría reflejar un mayor tiempo de residencia o una limitada recarga reciente, como se ha indicado anteriormente.

Por otro lado, los valores más altos en piezómetros, como en DH-FS-309, BH-5M-03, PZS 12-05 y BH-5M-08, podrían asociarse a una recarga reciente y a un tránsito subterráneo más corto. Los restantes puntos muestran condiciones intermedias entre aguas superficiales y subterráneas, lo que concuerda con los resultados obtenidos en la campaña anterior.

En cuerpos de agua superficial, las concentraciones de oxígeno disuelto fluctúan entre 6,80 mg/l y 7,67 mg/l, reflejando una alta aireación y el contacto constante con la atmósfera. A diferencia de la primera campaña, no se detectaron valores bajos que indiquen eventos puntuales de contaminación o procesos biológicos intensos. Finalmente, los totalizadores de lluvia reportan valores entre 6,81 mg/l y 7,04 mg/l, coherentes con aguas que han estado en contacto con la atmósfera.

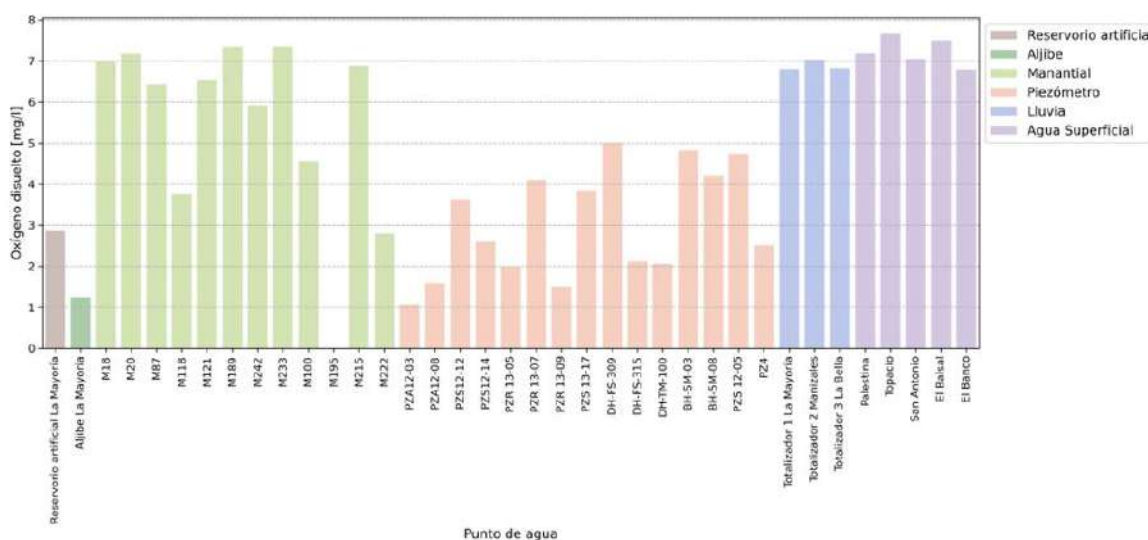


Figura 5.1.6.106 Oxígeno disuelto registrado en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

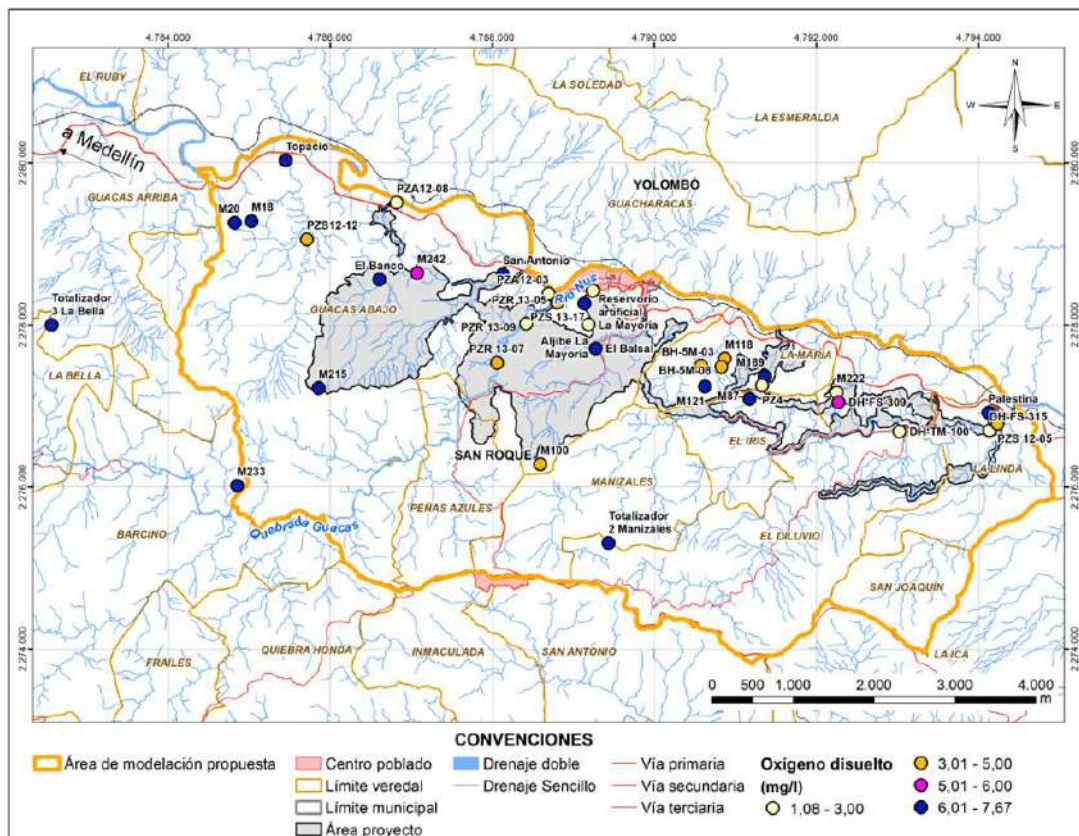


Figura 5.1.6.107 Distribución espacial del oxígeno disuelto los puntos de monitoreo.
Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S. 2025

b. Balance de electroneutralidad

Como se indicó anteriormente, el balance de electroneutralidad o iónico mide la diferencia entre el total de aniones y cationes expresados en miliequivalentes por litro [meq/l], el cual se calcula a partir de la Ecuación 5.1.6.8.

El balance se hace empleando los iones mayoritarios o más abundantes en el agua, que son bicarbonatos (que el laboratorio reporta en unidades de CaCO_3 y es llevado a unidades de HCO_3), cloruros, sulfatos, sodio, calcio, magnesio y potasio, dado que las mayores concentraciones iónicas en el agua son las de estos elementos.

Adicionalmente, se incluye la concentración de hierro disuelto debido a que se registran concentraciones significativas en algunas muestras.

De acuerdo con la Guía Técnica Colombiana GTC 30 (ICONTEC, 2014), solo deben considerarse aquellas muestras cuya desviación del balance iónico sea igual o inferior al 10%. En esta campaña, la mayoría de las muestras cumplen con este criterio, registrando errores de balance inferiores al umbral establecido. No obstante, se identifican algunas excepciones puntuales (M18, PZA 12-03, PZS 12-05 y la quebrada Palestina), las cuales presentan errores de balance iónico ligeramente superiores al 10%.

Para estos casos, se realizó una evaluación complementaria considerando el error aceptable en función de la conductividad eléctrica medida (Custodio & Llamas, 1975; MADS, 2014) como se muestra en la Tabla 5.1.6.46. Esta verificación permitió confirmar que, aunque los errores superan el límite sugerido por la GTC 30, se mantienen dentro de un rango permisible, sin indicar omisiones relevantes de especies químicas.

El error de balance de iónico aceptable se presenta en la Tabla 5.1.6.46 y en la Figura 5.1.6.108

Tabla 5.1.6.46 Error de balance iónico según la conductividad eléctrica

Conductividad eléctrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2000	>2000
Error aceptable (%)	± 30	± 10	± 8	± 4	± 4

Fuente: Custodio & Llamas, (1975)

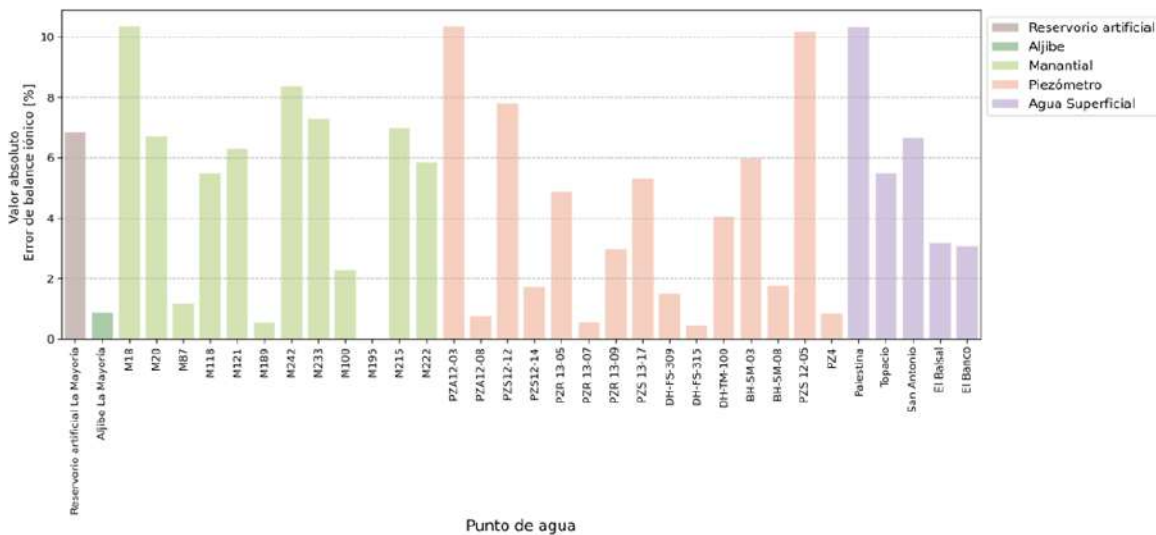


Figura 5.1.6.108 Valor absoluto del error de balance iónico en los puntos de monitoreo Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

c. Análisis hidrogeoquímico

A partir de los resultados del muestreo, se realizó una clasificación hidrogeoquímica de las muestras con base en sus principales componentes iónicos. Los cationes predominantes son sodio (Na^+), potasio (K^+), calcio (Ca^{2+}) y magnesio (Mg^{2+}), mientras que los aniones principales incluyen cloruros (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}) y bicarbonatos (HCO_3^-). Para representar gráficamente la relación entre estos iones y facilitar su clasificación hidrogeoquímica, se emplean los diagramas de Stiff (Figura 5.1.6.109 a Figura 5.1.6.111) y Piper (Figura 5.1.6.112 a Figura 5.1.6.114).

Los diagramas de Stiff obtenidos para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial (Figura 5.1.6.109) muestran una composición química similar a la observada en la primera campaña de muestreo. En la mayoría de los casos se puede evidenciar un bajo grado de mineralización, con el bicarbonato (HCO_3^-) como anión dominante y una mayor proporción

de sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), particularmente en el reservorio artificial y en las quebradas Topacio, San Antonio y El Banco.

En contraste, las quebradas Palestina y El Balsal presentan un leve incremento en el grado de mineralización. Aunque el bicarbonato continúa siendo el anión mayoritario, se observa un aumento en la concentración de calcio (Ca^{2+}), siendo más notable en la quebrada El Balsal.

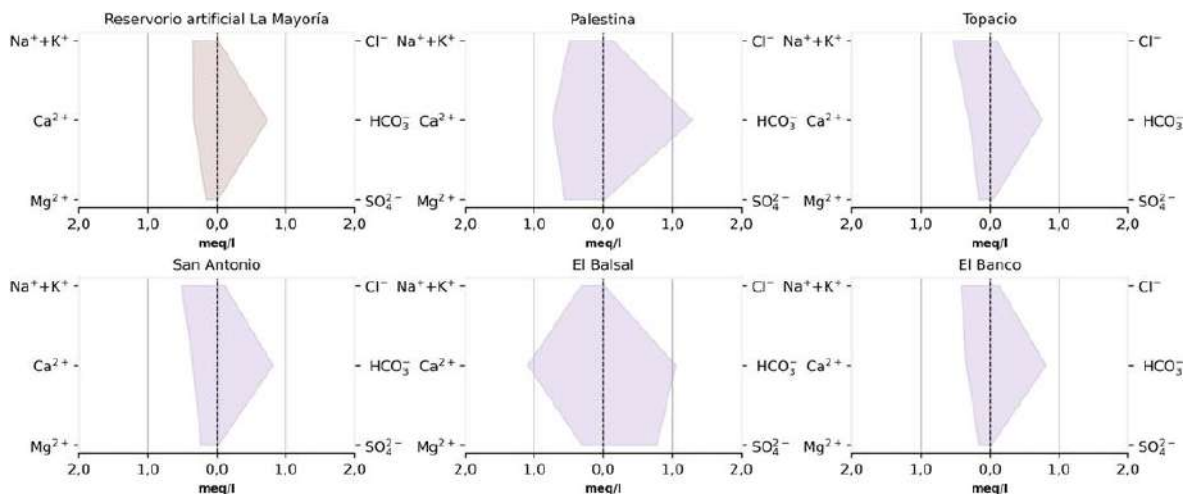


Figura 5.1.6.109 Diagramas de Stiff para el reservorio artificial y los puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

Los manantiales también conservan las características hidrogeoquímicas reportadas en la campaña 1 de febrero (2025), lo que permite conservar la misma agrupación realizada previamente en función del grado de mineralización y la composición iónica:

El primer grupo, conformado por los puntos M18, M20, M242 y M233, se caracteriza por un bajo contenido total de sólidos disueltos y una composición dominada por HCO_3^- y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, lo cual indica tiempos de residencia cortos y una posible influencia directa de recarga reciente por infiltración.

El segundo grupo, que incluye los puntos M87, M118, M121, M189 y M222, presenta una mayor mineralización relativa, con concentraciones elevadas de Ca^{2+} y Mg^{2+} , lo cual es consistente con una mayor interacción agua-roca y posiblemente tiempos de residencia más prolongados en el acuífero.

Los puntos M100, M215 y el aljibe presentan características intermedias entre ambos grupos, tanto en términos de mineralización como en la proporción relativa de cationes, lo que puede sugerir una mezcla de aguas o condiciones hidrogeoquímicas transicionales.

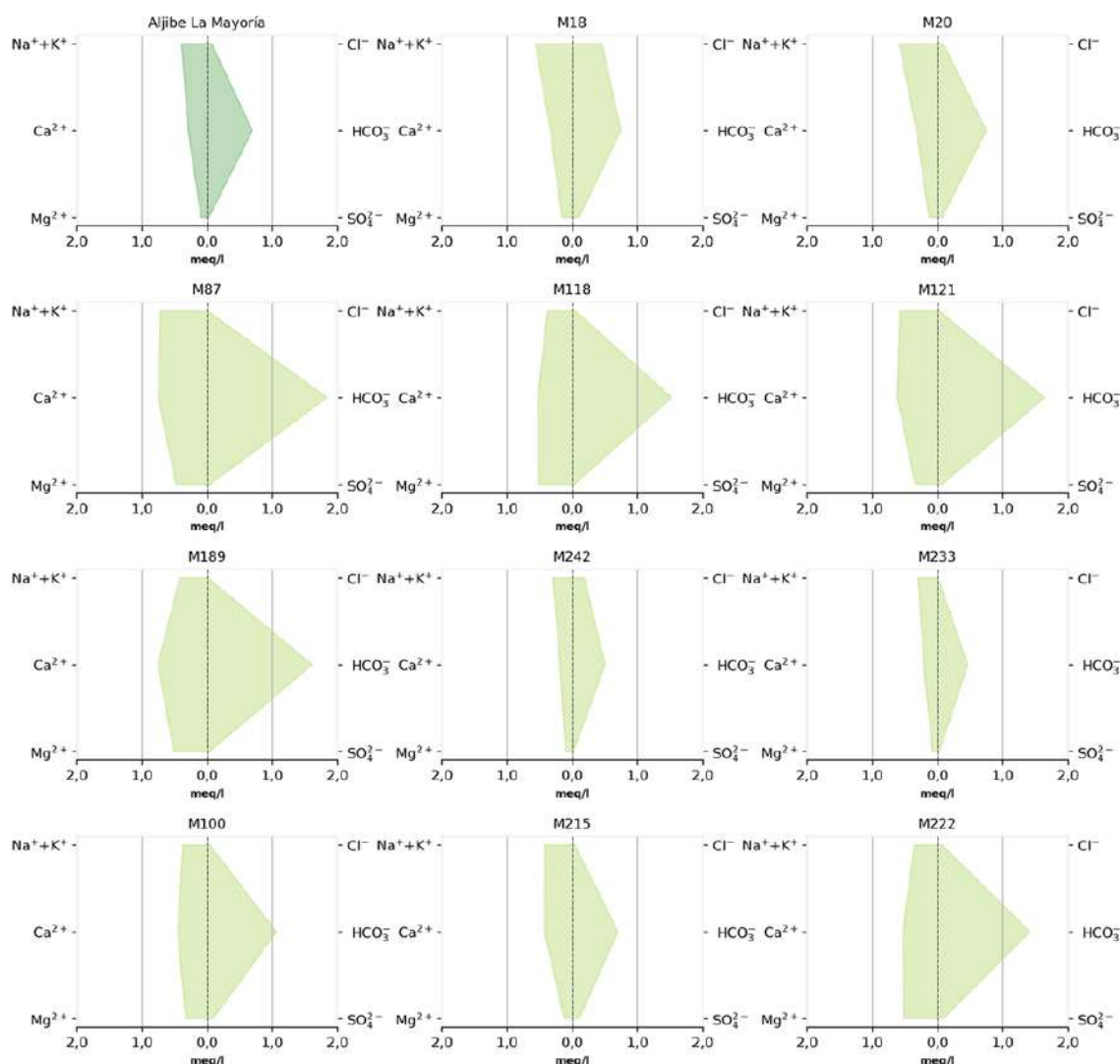


Figura 5.1.6.110 Diagramas de Stiff para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

En el caso de los piezómetros, al igual que en los puntos de agua superficial y manantiales, se observa una consistencia general en los patrones hidroquímicos entre la primera y segunda campañas. Sin embargo, se identifican ciertas variaciones:

El punto PZA 12-03 muestra un incremento en el grado de mineralización, con predominancia de $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. En contraste, el punto PZR 13-09 evidencia una disminución en la concentración de HCO_3^- y Ca^{2+} , lo que puede reflejar interacción con recarga más reciente o una menor interacción con el medio subterráneo.

Finalmente, en los puntos DH-TM-100, BH-5M-03 y BH-5M-08, se observa un incremento en las concentraciones de Ca^{2+} .

En términos generales, el bicarbonato (HCO_3^-) constituye el anión predominante en todos los piezómetros analizados, lo que es característico de aguas subterráneas con baja a

moderada evolución hidrogeoquímica, típicamente asociadas a condiciones de recarga meteórica o interacciones iniciales con el medio subterráneo.

Los puntos PZS 12-12, PZR 13-05, PZR 13-07, BH-5M-03 y BH-5M-08 presentan un grado de mineralización moderado, con concentraciones elevadas de calcio (Ca^{2+}) respecto al resto de cationes, lo que podría reflejar un mayor grado de interacción con las formaciones geológicas. En el caso específico de los piezómetros PZR 13-05 y PZR 13-07, se ha observado que, a lo largo de las distintas campañas de monitoreo isotópico, estas aguas presentan una firma isotópica más empobrecida que el resto de los puntos de agua subterránea analizados, lo cual refuerza la hipótesis de que el agua captada en estos puntos presenta una menor influencia de la recarga reciente.

En contraste, los piezómetros DH-FS-315, DH-TM-100, PZS-12-05 y PZ4 muestran una mineralización ligeramente más baja, con una mayor proporción relativa de sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$) frente al calcio, lo que podría indicar un menor tiempo de residencia en el sistema subterráneo.

Los puntos PZA-12-03, PZS 12-14, PZR- 13-09 y DH-FS-309, aunque exhiben grados de mineralización variables, se caracterizan por un predominio de los cationes $\text{Na}^+ + \text{K}^+$. Finalmente, los piezómetros PZA 12-08 y PZS 13-17 presentan bajas concentraciones de sólidos disueltos, sin que se observe un predominio claro de ningún catión, lo que es consistente con aguas de infiltración reciente.

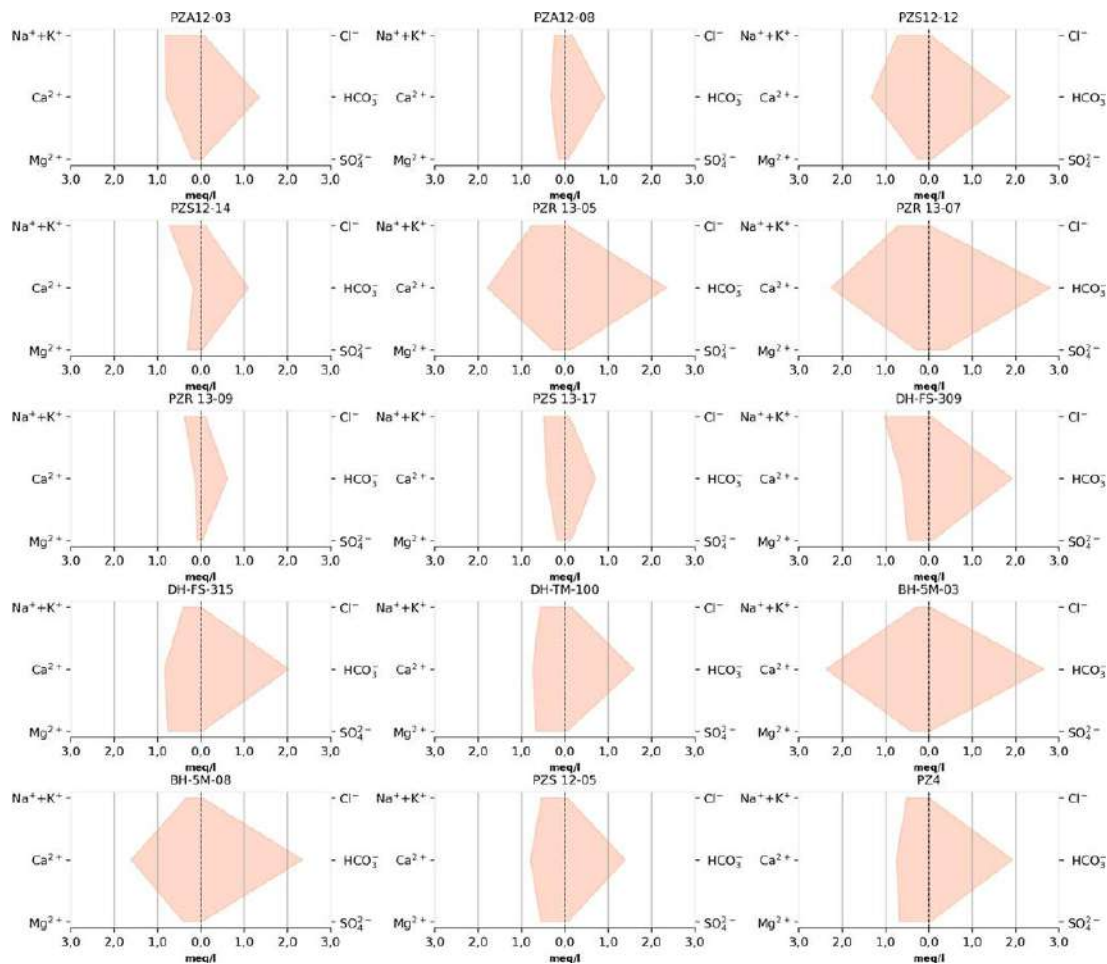


Figura 5.1.6.111 Diagramas de Stiff para los piezómetros Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

El análisis hidroquímico de las muestras provenientes de los diferentes puntos de monitoreo revela una composición homogénea, caracterizada por el predominio del bicarbonato (HCO_3^-) como anión mayoritario en todas las aguas evaluadas (Tabla 5.1.6.47). Esta condición es típica de sistemas hidrogeológicos influenciados por recarga reciente, lo que es coherente con los bajos niveles de sólidos disueltos totales y conductividad eléctrica previamente reportados, que indican una baja mineralización generalizada.

En cuanto a los cationes, es posible identificar tres grupos principales: un grupo mayoritario de aguas que no presenta un catión dominante; un subconjunto de muestras con predominio de sodio + potasio ($\text{Na}^+ + \text{K}^+$), asociado a facies bicarbonatadas sódicas; y un grupo más reducido, identificado en algunos piezómetros y puntos de agua superficial, en los cuales se evidencia un dominio de calcio (Ca^{2+}), clasificados como aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas.

Las aguas bicarbonatadas sódicas se asocian a valores de conductividad eléctrica bajos, lo que indica una mineralización reducida. Esto sugiere un tiempo de residencia corto y un limitado intercambio iónico con el medio geológico.

En contraste, las aguas con predominio de Ca^{2+} o sin un catión dominante suelen presentar valores de conductividad eléctrica ligeramente superiores, lo que sugiere una mayor interacción agua-roca. Aunque los niveles de mineralización continúan siendo relativamente bajos, estas diferencias en la composición catiónica permiten identificar algunos puntos con una evolución hidrogeoquímica más avanzada, posiblemente asociada a un mayor tiempo de residencia en el subsuelo, que favorece la disolución progresiva de minerales y el consecuente enriquecimiento iónico de la solución.

Tabla 5.1.6.47 Clasificación hidrogeoquímica de los puntos de monitoreo. Campaña 2 (2025)

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Aljibe La Mayoría	Aljibe	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M18	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Suelo residual sódica
M20	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M87	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M118	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M121	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M189	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M242	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M233	Manantial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
M100	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M215	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
M222	Manantial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZA12-03	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZA12-08	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-12	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS12-14	Piezómetro	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
PZR 13-05	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-07	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZR 13-09	Piezómetro	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
PZS 13-17	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Punto	Tipo	Catión	Anión	Clasificación
DH-FS-309	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-FS-315	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
DH-TM-100	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-03	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
BH-5M-08	Piezómetro	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZS 12-05	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
PZ4	Piezómetro	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Palestina	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada Topacio	Agua Superficial	Sodio-potasio	Bicarbonato	Bicarbonatada sódica
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	Calcio	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
Quebrada El Banco	Agua Superficial	Sin catión dominante	Bicarbonato	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica

Fuente: SHI S.A.S, 2025

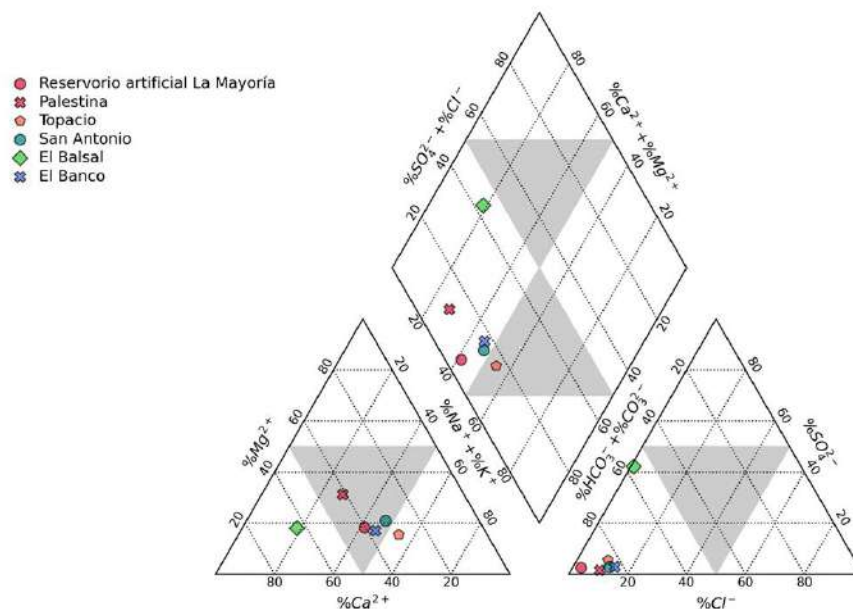


Figura 5.1.6.112 Diagrama de Piper para el reservorio artificial y puntos de agua superficial. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

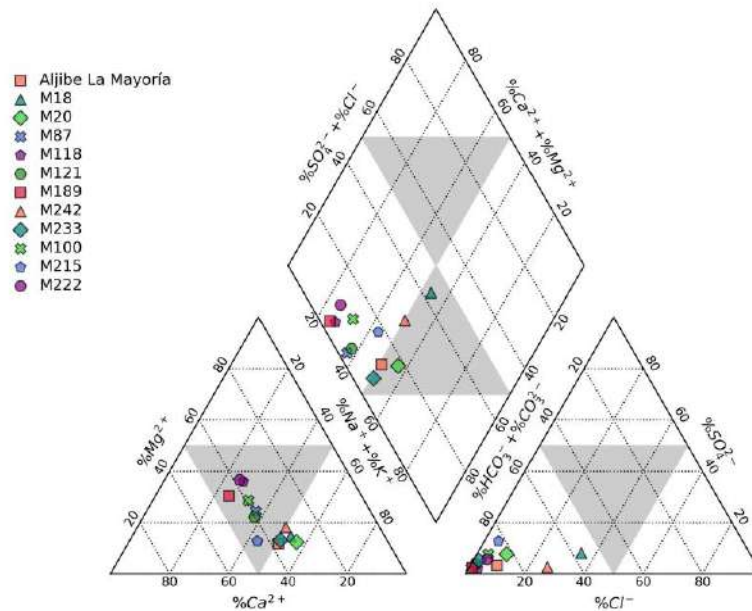


Figura 5.1.6.113 Diagrama de Piper para el aljibe y manantiales. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

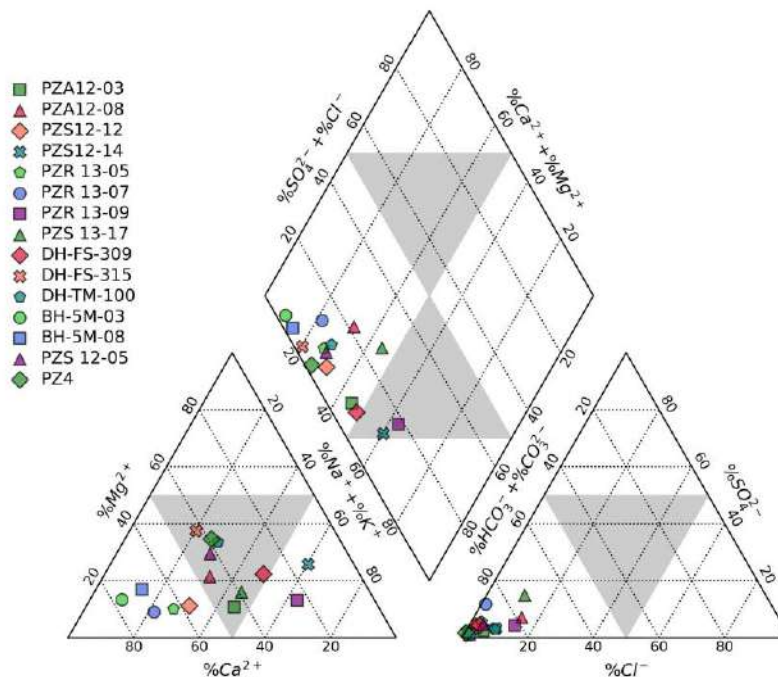


Figura 5.1.6.114 Diagrama de Piper para los piezómetros. Campaña 2 (2025)

Fuente: SHI S.A.S, 2025

A continuación, en la Figura 5.1.6.115 hasta la Figura 5.1.6.121 se presentan las isoconcentraciones de los iones mayoritarios para la campaña 2:

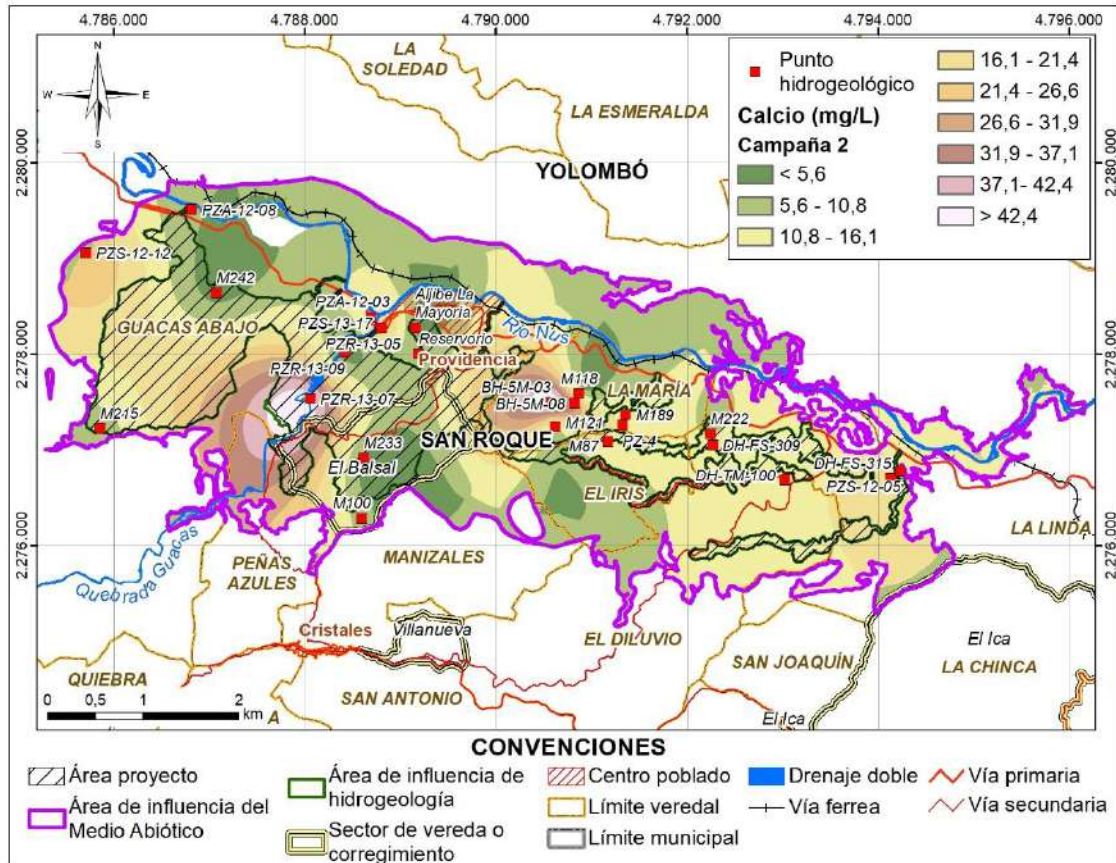


Figura 5.1.6.115 Isoconcentraciones de Calcio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CA)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

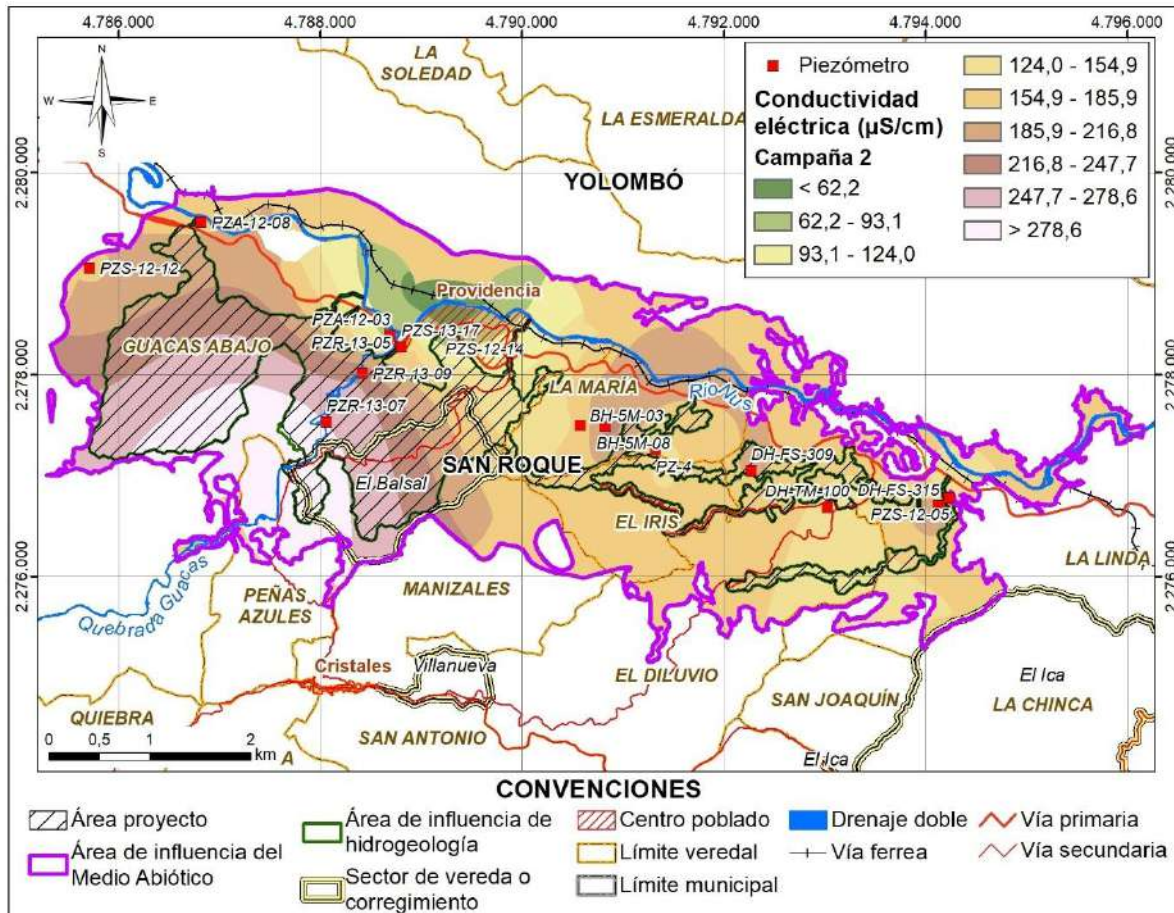


Figura 5.1.6.116 Isoconcentraciones de Conductividad eléctrica - Campaña 2 mayo 2025
(Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-CH)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

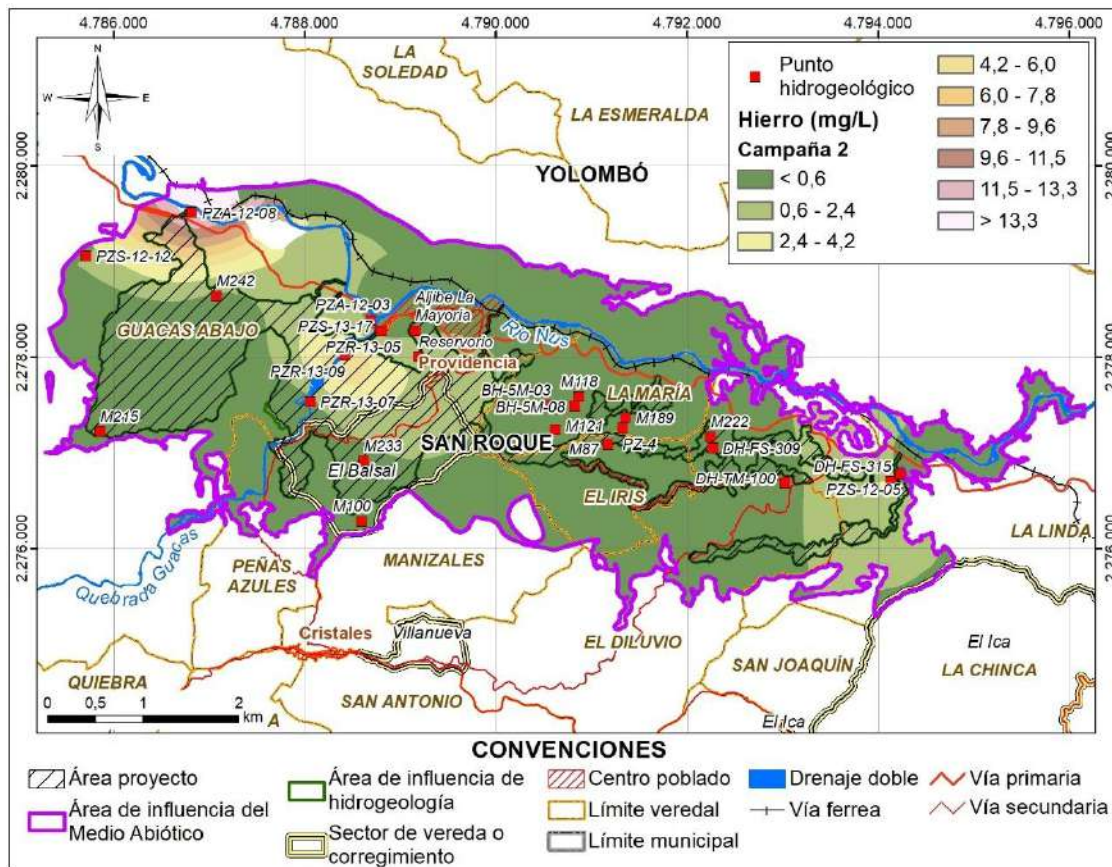


Figura 5.1.6.117 Isoconcentraciones de hierro - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-FE)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

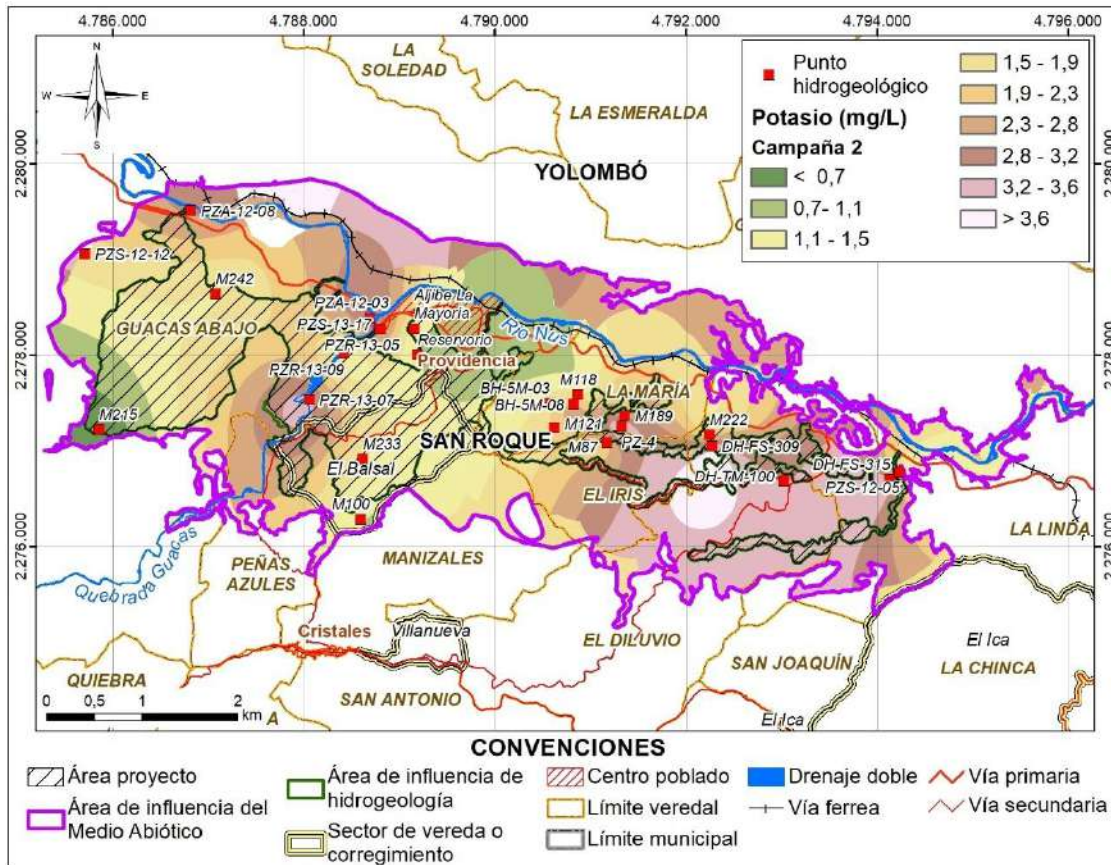


Figura 5.1.6.118 Isoconcentraciones de potasio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-K)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

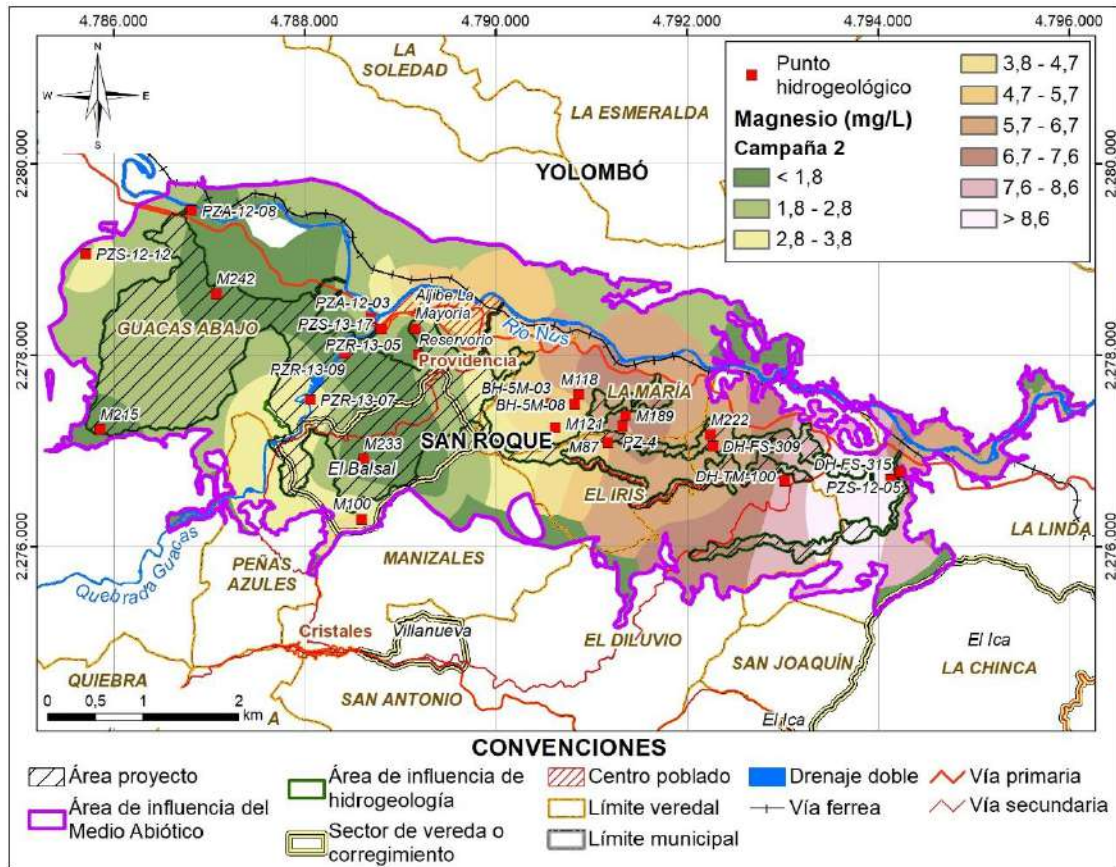


Figura 5.1.6.119 Isoconcentraciones de magnesio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-MG)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

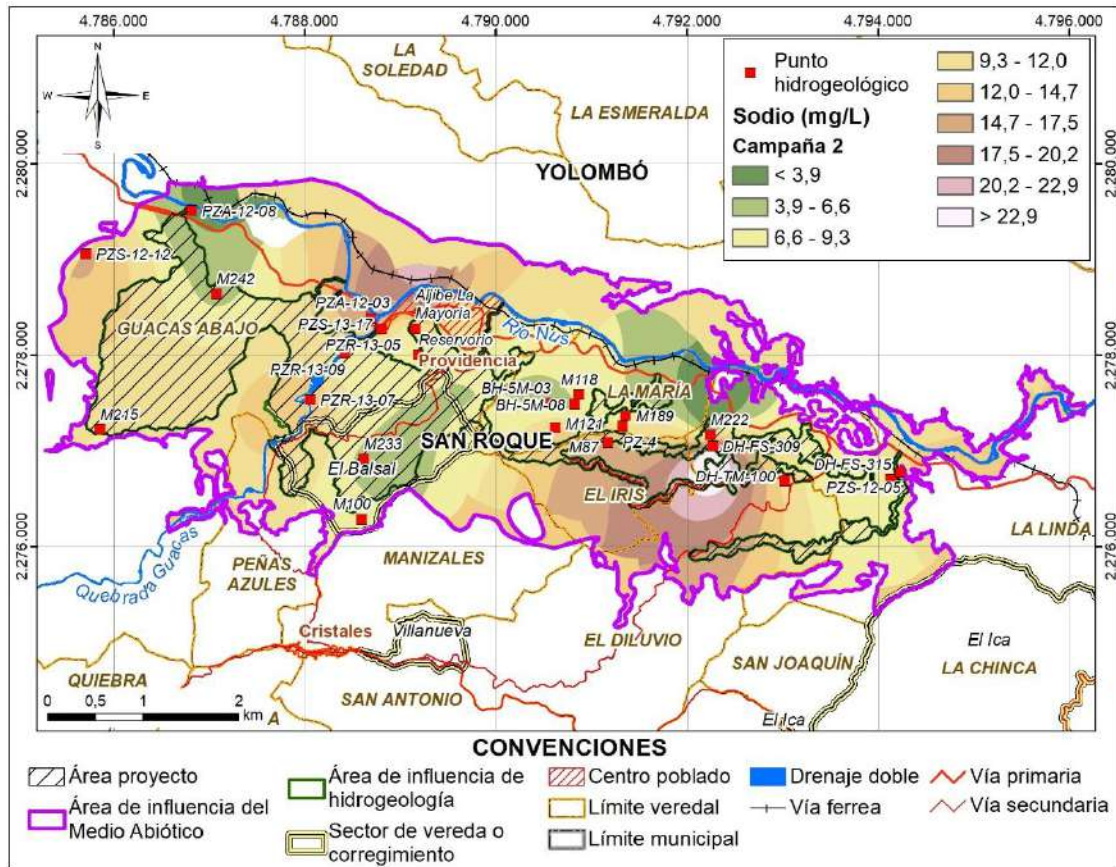


Figura 5.1.6.120 Isoconcentraciones de sodio - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-NA)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

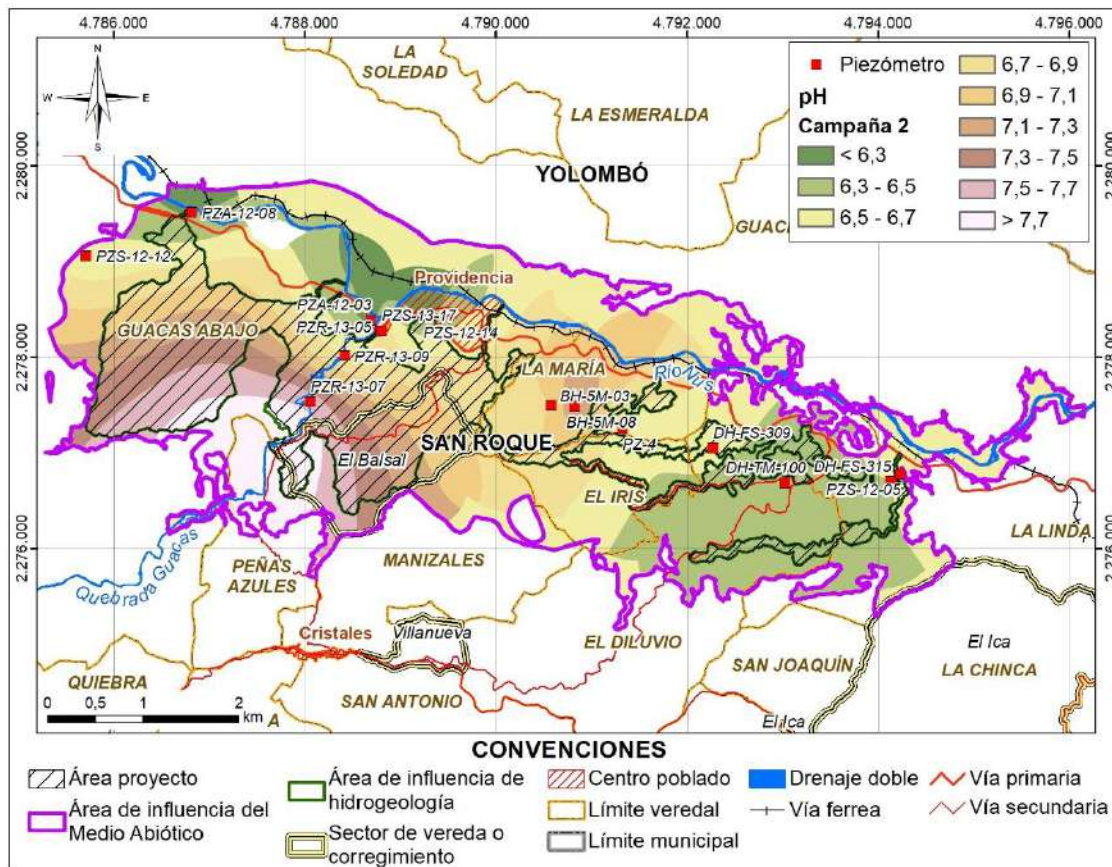


Figura 5.1.6.121 Isoconcentraciones de pH - Campaña 2 mayo 2025 (Mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-ISO-PH)

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de SHI S.A.S, 2025

D. Conclusiones de la evaluación hidrogeoquímica para las campañas de 2025

Los resultados de los parámetros microbiológicos indican contaminación en la mayoría de los puntos monitoreados, excepto en el piezómetro PZ4 en la primera campaña de monitoreo. Las aguas superficiales presentan contaminación, con niveles elevados de coliformes totales y *Escherichia coli* en algunas quebradas, sugiriendo origen fecal. Los manantiales muestran variabilidad, con algunos altamente contaminados y otros con mejores condiciones. En los piezómetros, la contaminación es generalmente menor, aunque ciertos puntos presentan valores elevados, como es el caso del punto DH-FS-309 en la primera campaña y los puntos PZR 13-05 y BH-5M-08 en la segunda. El reservorio artificial La Mayoría exhiben niveles bajos a moderados de coliformes totales sin indicios de contaminación de aguas negras. (SHI S.A.S, 2025).

Los resultados de las campañas de monitoreo hidrogeoquímica indica que la presencia de grasas y aceites es puntual y se restringe a algunos manantiales, piezómetros y a la quebrada Palestina, lo que sugiere fuentes de contaminación antrópica localizadas. En particular, la quebrada Palestina en la primera campaña de monitoreo presentó la mayor

concentración de grasas y aceites y es el único punto con detección de hidrocarburos, lo que evidencia una mayor afectación por actividades humanas. En cuanto a los nitratos, se observa una variabilidad en las concentraciones, con valores bajos o no detectables en algunos puntos, mientras que en ciertos piezómetros se registran niveles elevados, posiblemente asociados a fuentes de contaminación como el uso de fertilizantes o la infiltración de aguas residuales. (SHI S.A.S, 2025).

Los valores de temperatura y pH se mantienen dentro de los rangos típicos para aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia. Particularmente, el pH indica aguas que varían entre ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación. (SHI S.A.S, 2025).

Los valores de conductividad eléctrica registrados indican un grado de mineralización que varía entre bajo y moderado en la mayoría de los puntos monitoreados. Como es esperado, los totalizadores presentan las conductividades eléctricas más bajas ($< 40 \mu\text{S/cm}$), reflejando la baja concentración de solutos disueltos típica de la precipitación. (SHI S.A.S, 2025).

En manantiales y piezómetros, los valores se sitúan en rangos similares; no obstante, en términos generales, los piezómetros tienden a mostrar valores ligeramente más altos. Esta diferencia sutil sugiere una mayor interacción agua-roca y tiempos de residencia algo más prolongados en el sistema subterráneo. Sin embargo, algunos piezómetros ubicados generalmente en depósitos aluviales o saprolito, se caracterizan por presentar conductividades eléctricas bajas ($< 150 \mu\text{S/cm}$), semejantes a las observadas en manantiales, lo que sugiere recarga reciente y tiempos de tránsito reducidos. (SHI S.A.S, 2025).

Las aguas lluvia y superficiales presentan valores elevados de oxígeno disuelto, asociados a su contacto con la atmósfera. En el caso de las aguas subterráneas, los valores de oxígeno disuelto evidencian un patrón coherente con el origen y grado de evolución esperado: los manantiales presentan, en general, concentraciones elevadas ($> 4 \text{ mg/l}$), indicativas de recarga reciente y tiempos de tránsito cortos, mientras que los piezómetros y el aljibe generalmente exhiben niveles más bajos ($< 5 \text{ mg/l}$), compatibles con una mayor interacción con materia orgánica o mayores tiempos de residencia en el subsuelo. (SHI S.A.S, 2025).

La mayoría de los puntos de monitoreo, incluyendo aguas superficiales, manantiales y piezómetros, muestran una composición química dominada por bicarbonato (HCO_3^-) como anión principal, lo cual indica una influencia predominante de recarga y una baja evolución hidrogeoquímica. (SHI S.A.S, 2025).

La variación en la composición catiónica y los valores de conductividad eléctrica permite inferir distintos grados de evolución hidrogeoquímica en las aguas subterráneas monitoreadas. Las facies bicarbonatadas sódicas, asociadas a bajas conductividades, reflejan condiciones de recarga reciente y escasa interacción con el medio geológico. En cambio, las aguas con predominio de calcio o sin un catión dominante, identificadas especialmente en piezómetros, muestran una mineralización levemente mayor, indicando procesos de disolución mineral y posiblemente tiempos de residencia ligeramente más prolongados en el medio subterráneo. (SHI S.A.S, 2025).

5.1.6.3.4 Caracterización isotópica

A. Isotopos Estables

Las técnicas isotópicas se han aplicado en hidrología e hidrogeología en todo el mundo durante más de 50 años, convirtiéndose en una herramienta muy valiosa para la investigación y la solución de problemas relacionados con el medio ambiente y la ingeniería (Velez O. & Rhenals G., 2008). Los isótopos son átomos del mismo elemento que difieren en sus masas atómicas; esta diferencia en masa es suficiente para que muchos procesos físicos, químicos y biológicos cambien las proporciones de dichos isótopos en diferentes compuestos (Domenico & Schwartz, 1997).

Los isótopos del hidrógeno y del oxígeno constituyen trazadores geoquímicos ideales de las aguas, dado que sus concentraciones no suelen alterarse con la interacción de los materiales de los acuíferos (International Atomic Energy Agency, 2001).

Con un espectrómetro de masas se determinan las relaciones de isótopos en una muestra de agua $O^{18}/O^{16} - H^2/H^1$. Estas relaciones se miden en unidades delta (δ), tal como se expresa en la Ecuación 5.1.6.9, en la que SMOW (Standar Mean Ocean Water), es la muestra patrón que se encuentra en el Instituto de Energía Atómica en Viena (Barrera de Calderón, 2010).

Las muestras recolectadas para la medición de deuterio y oxígeno-18 deben ser tomadas de tal forma que se eviten los procesos de evaporación y oxidación; es decir, los recipientes deben estar totalmente llenos y herméticamente cerrados sin más precauciones. En caso de que las muestras no sean almacenadas por largos periodos de tiempo, el envase puede ser de plástico, de lo contrario, el envase debe ser de vidrio, de color ámbar y de cierre hermético (Instituto Geológico y Minero de España, 1997).

Para expresar la composición isotópica del agua (Ecuación 5.1.6.9), se utiliza la notación δ expresada en permil (‰), la cual denota la desviación de la tasa isotópica de la muestra con respecto al estándar (VSMOW) (Barrera de Calderón, 2010).

$$\delta\text{‰} = \frac{R_{\text{muestra}} - R_{\text{VSMOW}}}{R_{\text{VSMOW}}}$$

Ecuación 5.1.6.9 Composición isotópica

La química a nivel macroscópico establece que dos moléculas formadas por distintos isótopos, como por ejemplo el agua y el agua pesada, tiene las mismas características químicas, sin embargo, a nivel microscópico existen diferencia en las características químicas del mismo compuesto formado con isótopos distintos, generadas principalmente por las diferencias de masas (Velez O. & Rhenals G., 2008).

El fraccionamiento isotópico es una medida del cambio en la composición isotópica relativa, los procesos naturales más importantes que hacen variar la composición isotópica estable de las aguas naturales son la evaporación y la condensación. Las moléculas ligeras del agua, H^1 y Oxígeno – 16, son más volátiles que los isótopos más pesados, por lo que, al enfriarse, las moléculas pesadas se condensan más fácilmente y el vapor residual contiene cada vez menos isótopos pesados (International Atomic Energy Agency, 2001).

Finalmente, cuando el medio subterráneo (roca y suelo) entra en contacto con el agua lluvia que se infiltró, existe un fenómeno denominado intercambio isotópico, el cual se da cuando una fase (agua) entra en contacto con otra (roca) y sus composiciones isotópicas son distintas, en ese momento se iniciará un intercambio de isótopos hasta alcanzar el

equilibrio. Este fenómeno afecta en mayor proporción al oxígeno-18, ya que, el hidrógeno no se encuentra en grandes concentraciones en las rocas, por esto, el deuterio es mejor trazador que el oxígeno-18 y, por ende, es más confiable para la determinación de las zonas de recarga (Velez O. & Rhenals G., 2008).

a. Procesos que afectan a los isotopos estables

Para la interpretación de las diferentes relaciones que puedan darse en la naturaleza, se tienen en cuenta las variaciones producidas en ellas, por parámetros como la latitud, continentalidad, altitud, estacionalidad y cantidad de lluvia.

- **Efecto de la latitud:** a medida que se aleja del Ecuador, a latitudes altas, la lluvia está menos “enriquecida” o sea que tiene menor contenido de isótopos pesados que el agua del mar; este es llamado el efecto de latitud, pues los valores de $\delta^{18}\text{O}$ and δD decrecen con la latitud (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto de la altitud:** los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de la precipitación decrecen con la altura y son típicos gradientes de $-0,15$ [‰] por cada 100 m para el $\delta^{18}\text{O}$ y de $-1,5$ [‰] a -4 [‰] por cada 100 m para el deuterio. Estos patrones pueden diferir en los valles al interior de montañas. En general, hay una relación lineal inversa entre los valores del contenido isotópico del agua lluvia y la cota del lugar donde ocurre la precipitación, de forma que el agua lluvia presenta un contenido menor de isótopos pesados a medida que la precipitación ocurre a alturas mayores (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto continental:** los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD de la precipitación decrecen a medida que se aleja de las líneas de costa (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto de cantidad:** mientras mayor es la cantidad de lluvia, menores serán los valores de $\delta^{18}\text{O}$ y δD . En zonas tropicales es el principal factor donde las lluvias más intensas son las más empobrecidas (UNESCO - IAEA, 2001).
- **Efecto de estacionalidad:** las lluvias de la época lluviosa son las más empobrecidas (UNESCO - IAEA, 2001).

Las variaciones de la composición isotópica con la altitud, permite diferenciar las aguas subterráneas procedentes de áreas de recarga situadas a alturas distintas (International Atomic Energy Agency, 2001).

Al infiltrarse la precipitación y pasar a ser parte de las reservas de agua subterránea, la mezcla que se produce en la zona saturada compensa las variaciones estacionales isotópicas, por lo cual, la composición isotópica de las aguas subterráneas está relacionada con la composición isotópica de la precipitación caída en el área de recarga del acuífero, lo que puede ser útil para determinar el área de recarga en cuanto a altura o en cuanto a distancia a al mar (International Atomic Energy Agency, 2001).

b. Agua de precipitación y la línea meteórica mundial (LMM)

Las cantidades de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de cualquier muestra de agua de lluvia se relacionan por una línea llamada línea meteórica mundial (LMM) que obedece a la siguiente Ecuación 5.1.6.10.

$$\delta^2\text{H} = 8\delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$$

Ecuación 5.1.6.10 Línea meteórica mundial

El valor de d , conocido como exceso de deuterio (d -excess), se calcula con la siguiente fórmula (Ecuación 5.1.6.11):

$$d = \delta^2 H - 8 * \delta^{18} O$$

Ecuación 5.1.6.11 Ecuación para el cálculo del exceso de deuterio

Este valor representa la desviación de una muestra con respecto a la LMM, y su valor típico es de 10‰. Sin embargo, en distintas regiones del mundo, y bajo ciertas condiciones climáticas como baja humedad o altas temperaturas en la zona de evaporación, el exceso de deuterio puede variar significativamente. También puede cambiar durante ciertas estaciones del año o incluso durante eventos específicos como tormentas.

El agua que cae en la LMM se asume que ha sido originada en la atmósfera (UNESCO - IAEA, 2001).

La LMM se muestra en la Figura 5.1.6.122, en la que se puede observar que las precipitaciones que caen en áreas con baja temperatura o altas latitudes tienen valores más bajos de $\delta^2 H$ y $\delta^{18} O$.

La pendiente de la LMM puede cambiar debido a los siguientes procesos:

- i. Interacciones agua-roca (sólo para O)
- ii. Reacciones H₂S (sólo para H)
- iii. Evaporación de cuerpos de agua
- iv. Condensación

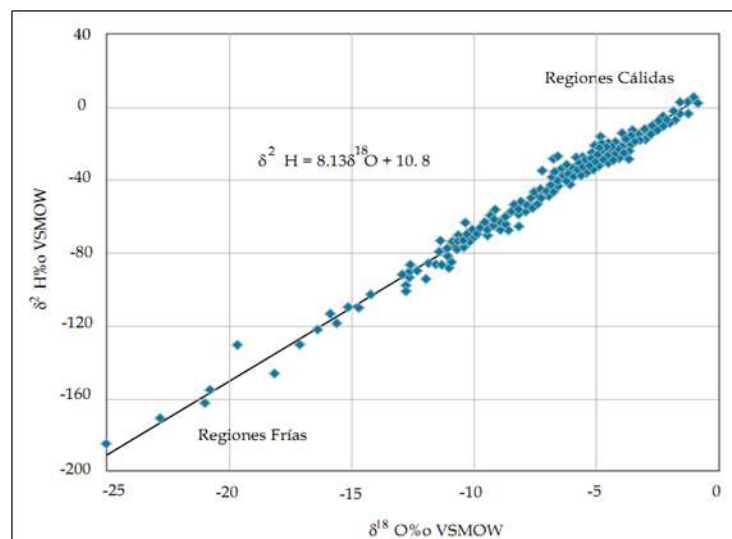


Figura 5.1.6.122 Línea Meteorológica Mundial

Fuente: (UNESCO - IAEA, 2001)

Cada uno de estos procesos exhiben desviaciones típicas en los isótopos ambientales. En la Figura 5.1.6.123 se pueden observar dichas desviaciones.

Durante las fases de evaporación y condensación del agua, cambia la concentración de los isótopos (diferentes nucleidos de un mismo elemento), del oxígeno y del hidrógeno. El vapor de agua originado en los océanos tiene una concentración más baja en isótopos

pesados que el agua del mar. Cuando se produce una precipitación, las gotas que descienden de la nube tienen una concentración en isótopos pesados más alta. Las masas nubosas, en su recorrido a través de los continentes se empobrecen en isótopos pesados y poco a poco el agua adquiere unas características propias a su medio ambiente (UNESCO - IAEA, 2001).

Durante las fases de evaporación y condensación del agua, cambia la concentración de los isótopos (diferentes nucleidos de un mismo elemento), del oxígeno y del hidrógeno. El vapor de agua originado en los océanos tiene una concentración más baja en isótopos pesados que el agua del mar. Cuando se produce una precipitación, las gotas que descienden de la nube tienen una concentración en isótopos pesados más alta. Las masas nubosas, en su recorrido a través de los continentes se empobrecen en isótopos pesados y poco a poco el agua adquiere unas características propias a su medio ambiente (UNESCO - IAEA, 2001).

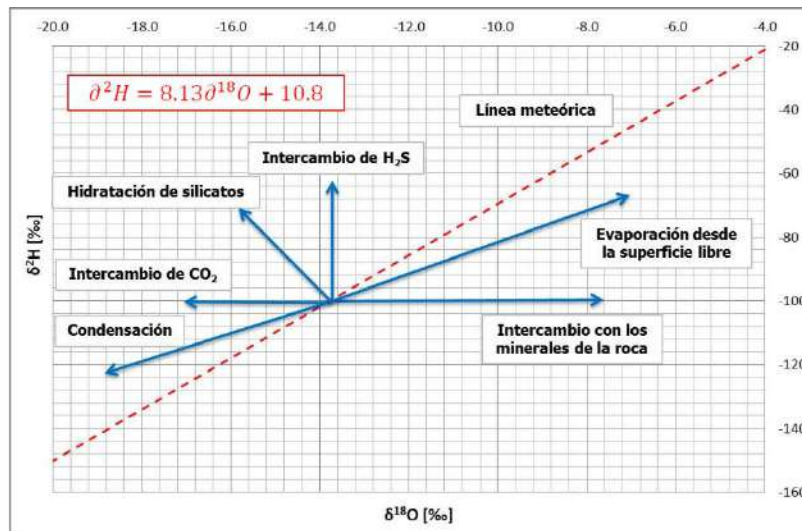


Figura 5.1.6.123 Desviaciones de la línea meteórica

Fuente: Modificado de (Domenico & Schwartz, 1997)

Las moléculas más livianas tienen una mayor probabilidad de salir de la masa de agua en procesos de evaporación o mantenerse en la masa de vapor en los procesos de condensación. Los cuerpos de agua superficiales sometidos a evaporación pueden presentar un contenido particularmente elevado de isótopos pesados (UNESCO - IAEA, 2001).

A medida que aumenta la altitud y se producen las precipitaciones, los valores de la abundancia isotópica δ , de ^2H y ^{18}O van disminuyendo. Esta relación es muy útil en hidrogeología, pues permite identificar la elevación a la que se produce la recarga (UNESCO - IAEA, 2001).

B. Isotopos radioactivos

El tritio es el isótopo radiactivo del hidrógeno, el cual tiene una vida media de 12,32 años. El tritio de la atmósfera se forma naturalmente por la acción de los rayos cósmicos, además de manera antrópica existen aportes gracias a los ensayos termonucleares. La mayor parte

del tritio se oxida rápidamente en HTO (agua pesada) incorporándose al ciclo hidrológico (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981). El contenido en tritio de las aguas naturales se expresa en unidades de tritio (UT) la cual corresponde a una concentración de 1 átomo de tritio por 10^{18} átomos de hidrógeno (International Atomic Energy Agency, 2001).

Naturalmente, los rayos cósmicos producen una concentración alrededor de 10 UT en las precipitaciones en las zonas templadas continentales. A partir del año 1953 existieron aportes de grandes cantidades de tritio a la atmósfera producidos por los ensayos termonucleares, alcanzando concentraciones de 10.000 UT para precipitaciones del hemisferio boreal (International Atomic Energy Agency, 2001).

El periodo en la que la mayor parte de tritio fue producido a la atmosfera corresponde a 1953 – 1962, después de este año los países nucleares de la época firmaron un acuerdo para cesar sus ensayos atmosféricos, sin embargo, se produjeron ensayos posteriores, a los que se le sumaron países como China y Francia, pero estos fueron de potencia limitada y no afectaron la composición de tritio en la atmosfera (Gonfiantini & Araguas, 1988).

El rango natural de tritio en las aguas lluvias del hemisferio norte, en el que se encuentran gran cantidad de estaciones de medición del OIEA oscila entre 10 y 30 U.T; para el hemisferio sur las magnitudes de tritio en el agua lluvia son menores y se encuentran alrededor de 5 U.T (Gonfiantini & Araguas, 1988).

En Colombia existen dos estaciones de monitoreo del IAEA ubicadas en Barraquilla y Bogotá, las cuales presentan datos en los periodos 1971 – 1990 y 1971 – 2019 respectivamente. La serie de datos de tritio en el agua lluvia en la estación ubicada en Bogotá se puede observar en la Figura 5.1.6.124, la cual muestra una concentración pico de 25 UT (unidades de tritio) registrada en el año 1971, época para la cual ya se había descargado o desintegrado parte importante del tritio presente en la atmósfera, lo que lleva a suponer que para el año 1961 la concentración pico de tritio, en el peor de los casos, estuvo entre 60 y 80 UT, lo que se puede corroborar observando el comportamiento de estaciones de países fronterizos con Colombia que cuentan con datos de concentración de tritio en la lluvia anteriores a 1971, como se puede observar en la Figura 5.1.6.125.

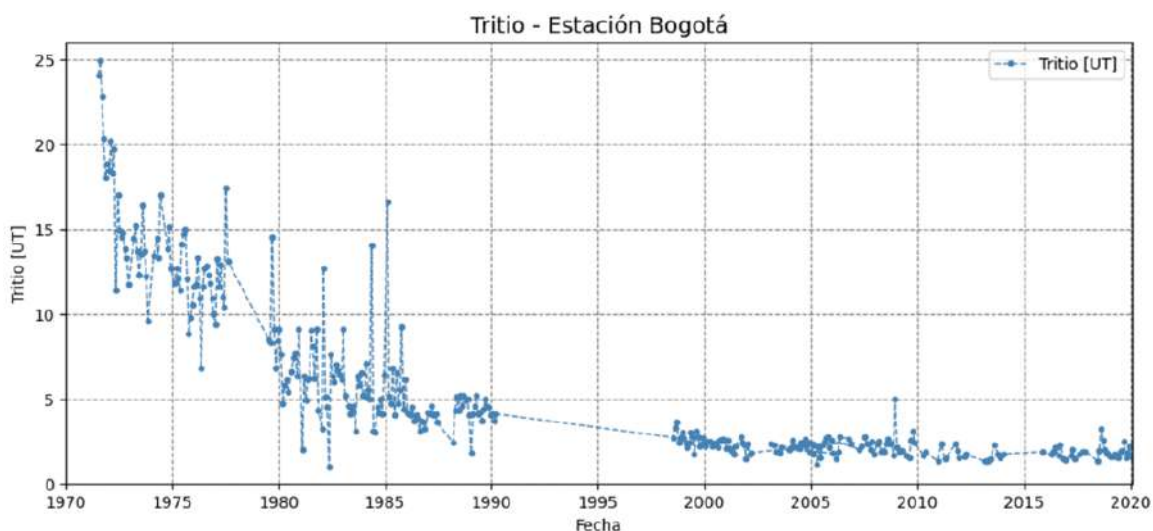


Figura 5.1.6.124 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia

Fuente: de los datos (IAEA/WWO, 2024)

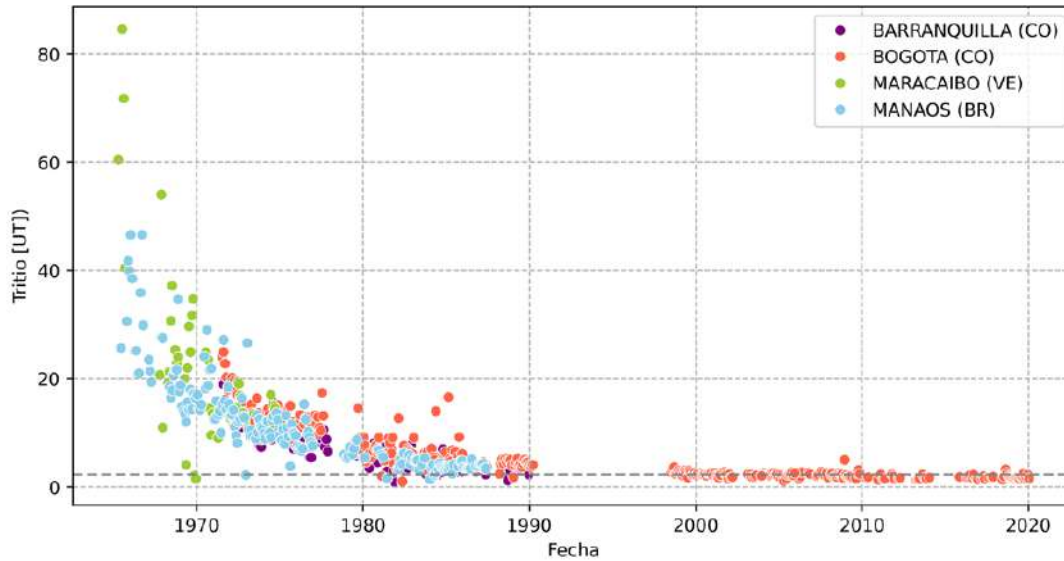


Figura 5.1.6.125 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos

Fuente de los datos: (IAEA/WWO, 2024)

Específicamente, para Colombia, las variaciones de tritio en la lluvia se encuentran alrededor de 2.3 U.T., lo que hace necesario contar con un buen límite de detección para los análisis de este isótopo.

Los análisis realizados y presentados en este informe se llevaron a cabo en Budapest – Hungría, con un límite de detección de 0,4 U.T. Los límites de detección del tritio empleados en los laboratorios internacionales se observan en la Tabla 5.1.6.48.

Tabla 5.1.6.48 Límites de detección de tritio

Análisis	Precisión
Tritio directo	$2\sigma = 6 \text{ TU}$
Tritio enriquecido	$2\sigma = 0,4 - 0,8 \text{ TU}$
Tritio (enriquecido de ultra bajo nivel -ULL)	$2\sigma = 0,1 \text{ TU}$

Fuente: SHI S.A.S (2025)

C. Toma de muestra

La toma de muestra se realizó siguiendo el procedimiento Protocolo de Muestreo con código DPT-P01 basado en (Ideam, Invemar, 2021). A continuación, se presentan los tipos de muestreo ejecutados por SHI, empresa acreditada para la toma de muestras por IDEAM, mediante la resolución 1630 de noviembre de 2023

a. Toma de muestra simple

Esta muestra consiste en la toma de una porción de agua en un punto o lugar determinado, y representa las condiciones y características de la composición original del agua en el lugar, tiempo y circunstancias particulares en el instante en el que se realizó su recolección. Cuando la composición de una fuente de agua es relativamente constante a través de un

tiempo prolongado o a lo largo de áreas sustanciales, se puede decir que la muestra simple es representativa de la fuente objeto de muestreo.

Para el muestreo en piezómetros se requiere de técnicas y precauciones especiales, dado que, al no realizarse un bombeo regular, puede existir una flora bacteriana y un ambiente fisicoquímico muy diferentes a los existentes en la unidad hidrogeológica. Por esta razón, es necesario realizar un proceso de purga que permita desalojar el agua almacenada y asegurar que se está recolectando la muestra de aguas con las condiciones de la unidad hidrogeológica.

La operación de la purga se realiza después de la medición del nivel piezométrico y se desaloja, por lo menos, el volumen ocupado por la columna de agua. Adicionalmente, se realizan mediciones de pH, conductividad eléctrica y temperatura en el agua de la purga para determinar la estabilidad de estos en el tiempo.

Para la toma de muestra se emplea un bailer, el cual consta de un cilindro, una válvula Check, la cual se cierra con el peso del agua, y una cuerda testigo para recuperar el instrumento. El bailer se baja lentamente hasta alcanzar el nivel del agua deseado y luego se procede a subir el bailer para recolectar el agua en un balde o en el recipiente de muestreo en el caso de los parámetros de grasas y aceites y microbiológicos.

En general, para la recolección de las muestras, se emplea un balde graduado y purgado tres veces con agua del punto antes de albergar la muestra.

D. Red de monitoreo de 2020 y 2021

La red de monitoreo empleada en los años 2020 y 2021 constó estuvo constituida por 27 puntos de los cuales 11 corresponden a piezómetros, 8 a manantiales, 4 son drenajes superficiales, 1 Reservorio Artificial y 3 totalizadores de agua lluvia. (Tabla 5.1.6.49).

Para el agua lluvia se instalaron 3 totalizadores a pesar de que la diferencia de altura entre la parte alta y media de la zona no es muy significativa, esto con el fin de identificar el gradiente altitudinal de los isótopos, así como evidencia cambios en la variabilidad de la precipitación, ya que según la media multianual hacia la zona de San Roque llueve más que hacia la zona de San José del Nus.

Para el análisis de Oxígeno 18 y Deuterio se tomaron 30 ml de muestra (27 muestras) y para el tritio se toma un volumen de 1 litro (16 muestras). El símbolo de (✓) significa disponibilidad de datos. El valor del parámetro medido se presenta en cada campaña.

Tabla 5.1.6.49 Puntos de la red de monitoreo isotópico de los años 2020 y 2021

Número	Nombre del punto	Tipo punto	18 O y 2H	Tritio UT 0,4
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	✓	✓
2	M-29	Manantial	✓	✓
3	M-233	Manantial	✓	✓
4	M191	Manantial	✓	
5	M-18	Manantial	✓	
6	M-237	Manantial	✓	

Número	Nombre del punto	Tipo punto	18 O y 2H	Tritio UT 0,4
7	M242	Manantial	✓	
8	M73	Manantial	✓	✓
9	M-79	Manantial	✓	✓
10	BH-2-4	Piezómetro	✓	✓
11	BH-5M-03	Piezómetro	✓	✓
12	DH-FS-309	Piezómetro	✓	
13	DH-TM-100	Piezómetro	✓	✓
14	PZS-12-09	Pozo	✓	✓
15	PZR-12-02	Piezómetro	✓	✓
16	PZR-12-04	Piezómetro	✓	
17	PZS-12-03	Piezómetro	✓	
18	PZS-13-17	Pozo	✓	✓
19	PZR-19-12	Piezómetro	✓	
20	PZR-19-13	Piezómetro	✓	✓
21	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	✓	✓
22	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	✓	
23	Quebrada La Bella	Drenaje superficial	✓	
24	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	✓	
25	TOT-1 La Mayoría (Oficinas de Gramalote)	Totalizador de agua lluvia	✓	✓
26	TOT-2 Manizales (Cerca de Cristales)	Totalizador de agua lluvia	✓	✓
27	TOT-3 La Bella (lado oeste de la zona subiendo hacia San Roque)	Totalizador de agua lluvia	✓	✓

Fuente: SHI S.A.S (2021).

a. Campaña 1 enero (2020)

La semana del 27 al 31 de enero de 2020, se llevó a cabo la campaña 1 de enero de 2020. Para el muestreo de los piezómetros, se realizó la toma del nivel freático y una purga previa para garantizar la representatividad de la muestra. Para el muestreo de los piezómetros se le asignó un bailer a cada uno, dicho bailer está codificado con el nombre de cada punto lo cual evita la contaminación de la muestra.

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo se presentan en la

Punto Red	Tipo punto	Fecha	pH	CE	18 O y 2H	Tritio UT 0,4
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	27/01/2019	6,21	61,6	✓	✓
M-29	Manantial	29/01/2019	7,08	42,4	✓	✓
M-233	Manantial	28/01/2019	7,65	157,1	✓	✓
M191	Manantial	30/01/2019	8,07	102,5	✓	
M-18	Manantial	31/01/2019	7,37	130	✓	
M-237	Manantial	28/01/2019	6,92	132	✓	
M242	Manantial	28/01/2019	7,11	67,5	✓	
M73	Manantial	31/01/2019	6,91	90,3	✓	✓
M-79	Manantial	28/01/2019	6,6	387	✓	✓
BH-2-4	Piezómetro	31/01/2019	7,41	659	✓	✓
BH-5M-03	Piezómetro	29/01/2019	6,79	180,6	✓	✓
DH-FS-309	Piezómetro	31/01/2019	6,53	365	✓	
DH-TM-100	Piezómetro	31/01/2019	6,59	292	✓	✓
PZS-12-09	Pozo	30/01/2019	6,79	406	✓	✓
PZR-12-02	Piezómetro	30/01/2019	6,67	68	✓	✓
PZR-12-04	Piezómetro	29/01/2019	7,04	495	✓	
PZS-12-03	Piezómetro	30/01/2019	7,15	279	✓	
PZS-13-17	Pozo	29/01/2019	6,97	55,1	✓	✓
PZR-19-12	Piezómetro	31/01/2019	6,78	81,3	✓	
PZR-19-13	Piezómetro	31/01/2019	6,64	68,7	✓	✓
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	30/01/2019	8,2	127,3	✓	✓
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	28/01/2019	7,45	134,4	✓	
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	27/01/2019	7,97	115,1	✓	
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	30/01/2019	7,4	71,7	✓	
T1 Mayoría	Totalizador de agua lluvia	27/01/2019	6,86	13,87	✓	✓
T2 Manizales	Totalizador de agua lluvia	28/01/2019	7	268	✓	✓
T3 La Bella	Totalizador de agua lluvia	27/01/2019	6,99	134,3	✓	✓

Tabla 5.1.6.50 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Enero de 2020

Punto Red	Tipo punto	Fecha	pH	CE	18 O y 2H	Tritio UT 0,4
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	27/01/2019	6,21	61,6	✓	✓
M-29	Manantial	29/01/2019	7,08	42,4	✓	✓
M-233	Manantial	28/01/2019	7,65	157,1	✓	✓
M191	Manantial	30/01/2019	8,07	102,5	✓	
M-18	Manantial	31/01/2019	7,37	130	✓	
M-237	Manantial	28/01/2019	6,92	132	✓	
M242	Manantial	28/01/2019	7,11	67,5	✓	
M73	Manantial	31/01/2019	6,91	90,3	✓	✓
M-79	Manantial	28/01/2019	6,6	387	✓	✓
BH-2-4	Piezómetro	31/01/2019	7,41	659	✓	✓
BH-5M-03	Piezómetro	29/01/2019	6,79	180,6	✓	✓
DH-FS-309	Piezómetro	31/01/2019	6,53	365	✓	
DH-TM-100	Piezómetro	31/01/2019	6,59	292	✓	✓
PZS-12-09	Pozo	30/01/2019	6,79	406	✓	✓
PZR-12-02	Piezómetro	30/01/2019	6,67	68	✓	✓
PZR-12-04	Piezómetro	29/01/2019	7,04	495	✓	
PZS-12-03	Piezómetro	30/01/2019	7,15	279	✓	
PZS-13-17	Pozo	29/01/2019	6,97	55,1	✓	✓
PZR-19-12	Piezómetro	31/01/2019	6,78	81,3	✓	
PZR-19-13	Piezómetro	31/01/2019	6,64	68,7	✓	✓
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	30/01/2019	8,2	127,3	✓	✓
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	28/01/2019	7,45	134,4	✓	
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	27/01/2019	7,97	115,1	✓	
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	30/01/2019	7,4	71,7	✓	
T1 Mayoría	Totalizador de agua lluvia	27/01/2019	6,86	13,87	✓	✓
T2 Manizales	Totalizador de agua lluvia	28/01/2019	7	268	✓	✓
T3 La Bella	Totalizador de agua lluvia	27/01/2019	6,99	134,3	✓	✓

Fuente: SHI S.A.S (2021).

Durante la ejecución de la campaña de muestreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica en todos los puntos de muestreo. Los resultados obtenidos durante

la campaña de muestreo 1 se muestran en la Figura 5.1.6.126 para pH y en la Figura 5.1.6.127 para conductividad eléctrica.

Los drenajes superficiales, que fueron objeto de muestreo, presentan valores de pH cercanos a 8 unidades para la quebrada La Bella y La Palestina, y cercanos a 7 unidades para la quebrada San Antonio y El Topacio, por otra parte, el Reservorio Artificial ubicado en La Mayoría tiene un pH ligeramente ácido muy cercano a 6 unidades de pH.

El rango de variación de pH en los manantiales fue de 6,6 – 8,7 unidades de pH, indicando agua de ligeramente ácida a neutra y ligeramente básica. En su gran mayoría las aguas de los manantiales presentaron características de aguas neutras dado su valor de pH cercano a las 7 unidades.

De forma similar que los manantiales se comportaron los valores de pH obtenidos en piezómetros, pozos y recolectores de agua lluvia; mostrando un rango de variación de 6,53 – 7,41 unidades de pH para pozos y piezómetros y de 6,86 – 7,00 unidades de pH en aguas lluvias.

La conductividad eléctrica de las fuentes de agua caracterizadas presenta contrastes importantes entre tipo de fuentes, situación típica, debido a que el agua subterránea sufre procesos fisicoquímicos distintos al agua superficial o al agua lluvia.

Las aguas superficiales y gran parte de los manantiales caracterizados presentan valores cercanos a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, considerado bajo si se tiene en cuenta que un valor cercano a 0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ corresponde a agua desmineralizada, es decir sin ningún sólido disuelto. El manantial M79 presentó un valor de conductividad eléctrica cercano a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, valor considerablemente mayor al resto de manantiales que conforman la red de monitoreo, lo que indica potencial por contaminación, o que el agua sufrió algún proceso de disolución de minerales en su recorrido por el medio subterráneo.

De forma general, las aguas de circulación de los manantiales de la zona corresponden a agua con valores bajos de conductividad eléctrica y por lo tanto poco mineralizadas y de corto tiempo de residencia en el medio subterráneo.

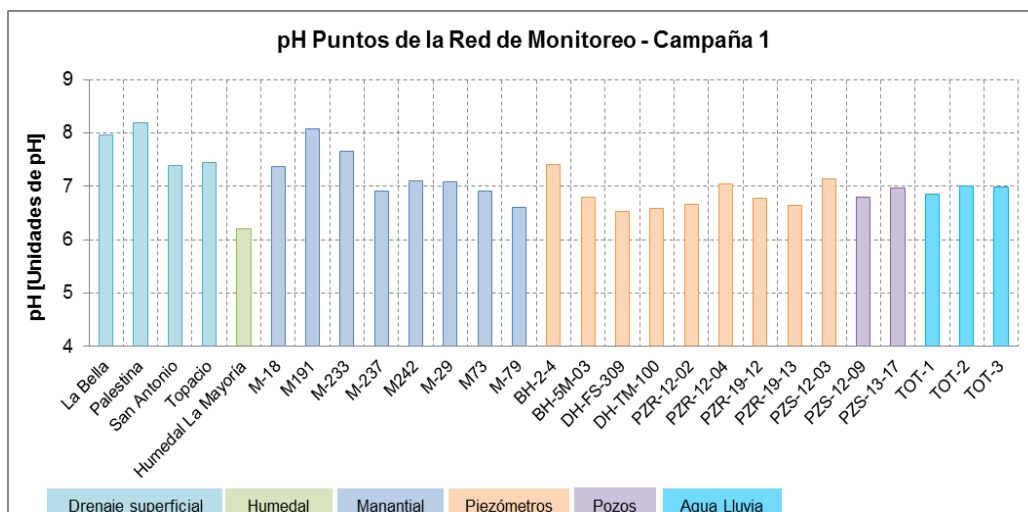


Figura 5.1.6.126 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

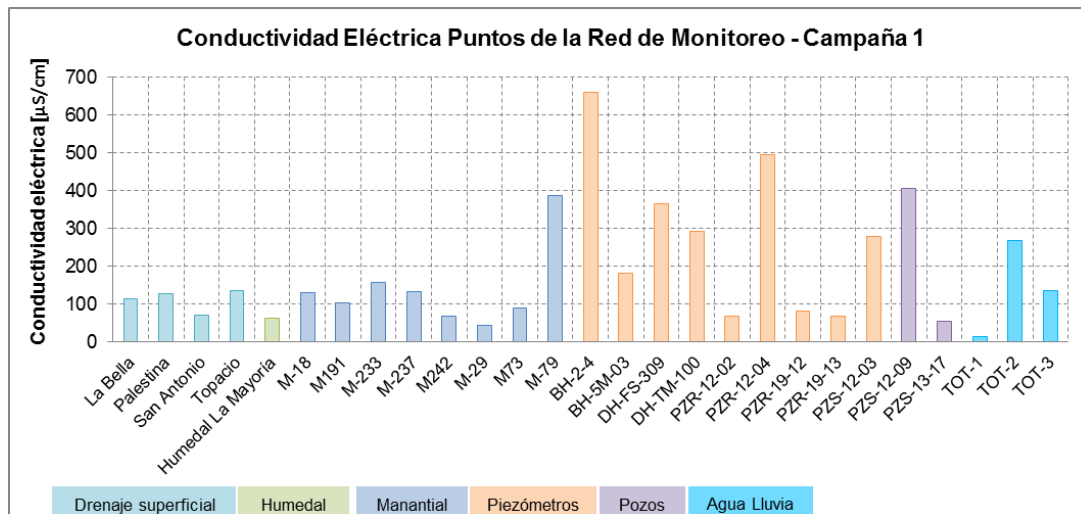


Figura 5.1.6.127 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos. Enero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

El agua lluvia recolectada en los totalizadores presentan un comportamiento atípico en cuanto a su conductividad eléctrica en los puntos T2 y T3, ya que para zonas poco industrializadas se esperan valores por debajo de 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$. El punto identificado con el código T1 si presenta una conductividad eléctrica típica para el agua lluvia de 13,87 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Es importante mencionar que los totalizadores T2 y T3 se encontraron deteriorados en la campaña de muestreo, esto puede explicar las anomalías encontradas en sus valores de conductividad eléctrica, ya que aún no se contaba con sistema de cerramiento de los puntos, y ganado vacuno pudo tener contacto con el embudo superficial por donde entra el agua lluvia.

La conductividad eléctrica de los piezómetros y pozos muestran una fuerte variación con valores menores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta valores cercano a 700 $\mu\text{S}/\text{cm}$, en la Figura 5.1.6.128 se presentan los datos de conductividad eléctrica registrados en los piezómetros y pozos de la red de monitoreo contra la profundidad de cada uno de estos instrumentos.

En la Figura 5.1.6.128 es posible identificar dos tendencias, hacia la izquierda de la figura se encuentra un conjunto de puntos cuya conductividad oscila alrededor de 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (circulo punteado de color rojo), en estos puntos la conductividad eléctrica no depende de la profundidad del piezómetro, esto puede indicar que existen flujos de agua que no modifican mucho su química durante su recorrido por el medio subterráneo, lo cual puede ocurrir porque el flujo es muy rápido o el medio es poco reactivo, o una combinación de ambas.

Por otro lado, hacia la derecha del gráfico se observa un conjunto de puntos cuya conductividad eléctrica aumenta con la profundidad, y presentan valores de conductividad eléctrica considerablemente mayor al grupo mencionado previamente, esto puede ser ocasionado por circulación lenta en el medio subterráneo (al tratarse de una roca ígnea con

diferentes horizontes de meteorización) o el contacto con una zona mineralizada que está aportando iones al agua.

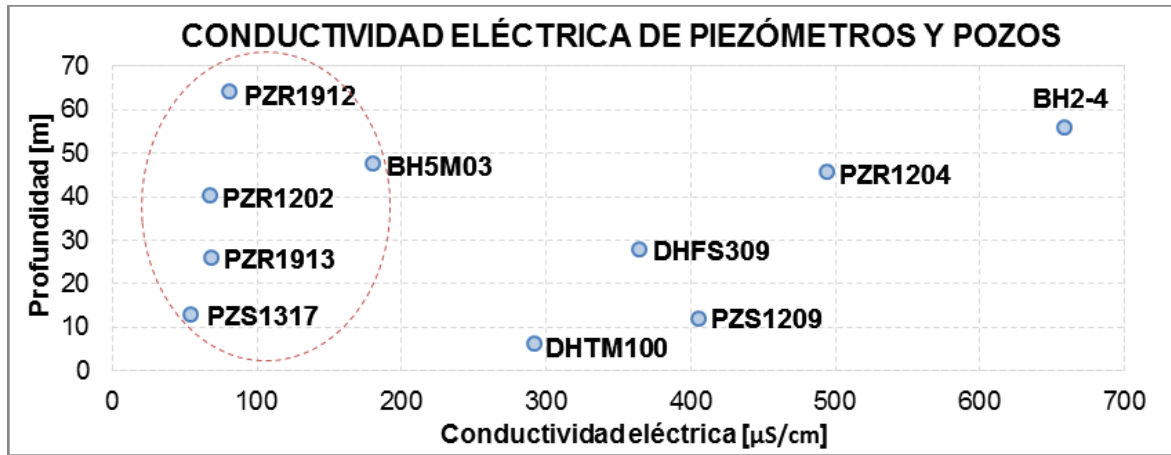


Figura 5.1.6.128 Conductividad eléctrica vs profundidad en pozos y piezómetros

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de deuterio y oxígeno 18 se muestran en la Tabla 5.1.6.51 y de forma gráfica en la Figura 5.1.6.129, allí se puede observar que drenajes superficiales, manantiales y piezómetros forman un grupo con similar marca isotópica, con concentración relativa de oxígeno 18 entre -7,69‰ y -9,53‰ y concentración relativa de deuterio entre -52,59‰, -64,04, lo que puede sugerir que estas fuentes de agua tienen el mismo origen, el cual corresponde a la precipitación en el área de influencia.

Por otro lado, el agua lluvia que se almacenó en los recolectores (totalizadores) durante el mes de enero presenta mayor enriquecimiento en deuterio y oxígeno 18 en comparación con el resto de los puntos que conforman la red de monitoreo, situación típica para época seca, en la cual, por el efecto de cantidad, los isótopos deuterio y oxígeno 18 suelen enriquecerse en el agua lluvia.

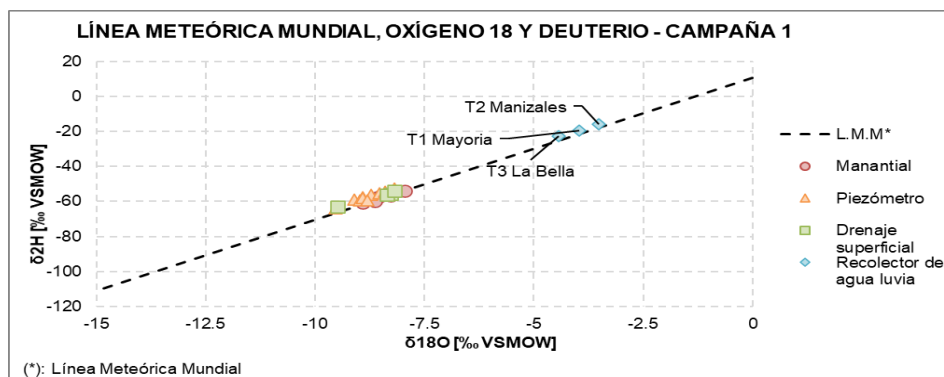


Figura 5.1.6.129 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 1. Enero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.51 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 1. Enero 2020

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0.2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0.8\text{‰}$
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio	-8,28	-56,29
M-29	Manantial	-8,52	-57,01
M-233	Manantial	-8,64	-57,85
M-191	Manantial	-8,64	-59,11
M-18	Manantial	-8,91	-60,60
M-237	Manantial	-8,21	-54,85
M-242	Manantial	-8,28	-56,44
M-73	Manantial	-7,96	-53,81
M-79	Manantial	-8,64	-59,71
BH-2-4	Piezómetro	-8,18	-52,59
BH-5M-03	Piezómetro	-8,92	-57,58
DH-FS-309	Piezómetro	-9,11	-58,70
DH-TM-100	Piezómetro	-8,72	-56,16
PZS-12-09	Pozo	-8,53	-55,28
PZR-12-02	Piezómetro	-8,97	-59,27
PZR-12-04	Piezómetro	-8,39	-54,46
PZS-12-03	Piezómetro	-8,92	-58,06
PZS-13-17	Pozo	-8,81	-59,53
PZR-19-12	Piezómetro	-9,53	-64,02
PZR-19-13	Piezómetro	-9,49	-63,15
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,27	-55,67
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,35	-56,34
Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,18	-53,89
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,40	-57,48
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-3,97	-19,61
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-3,52	-15,78
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-4,44	-22,65

* $\delta^{18}O$: oxígeno - δ^2H : Deuterio.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

III. Resultados de Tritio (época de verano)

En Colombia existen dos estaciones de monitoreo del IAEA ubicadas en Barraquilla y Bogotá, las cuales presentan datos en los periodos 1971 – 1990 y 1971 – 2016 respectivamente, la serie de datos de tritio en el agua lluvia en la estación ubicada en Bogotá se puede observar en la Figura 5.1.6.130, la cual muestra una concentración pico de 25 UT (unidades de tritio) registrada en el año 1971, época para la cual ya se había descargado o desintegrado parte importante del tritio presente en la atmósfera, lo que lleva a suponer que para el año 1961 la concentración pico de tritio, en el peor de los casos, estuvo entre 60 y 80 UT, lo que se puede corroborar observando el comportamiento de estaciones de países fronterizos con Colombia que cuentan con datos de concentración de tritio en la lluvia anteriores a 1971, como se puede observar en la Figura 5.1.6.130

La disminución en las concentraciones pico de tritio en la atmósfera en Suramérica, es una limitante para la datación de las aguas subterráneas en estas latitudes; ya que, con concentraciones pico de tritio tan bajas y teniendo en cuenta que la vida media del tritio equivale a 12,45 años (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981), el periodo de datación es limitado y la incertidumbre es bastante alta. Una muestra de esto es que el agua subterránea recargada en los años 60 (suponiendo una concentración pico de a lo sumo 120 UT y un sistema totalmente cerrado) tendría a fecha de hoy una concentración de tritio de 5 UT, lo que comprende la variación natural para Colombia según la Figura 5.1.6.131.

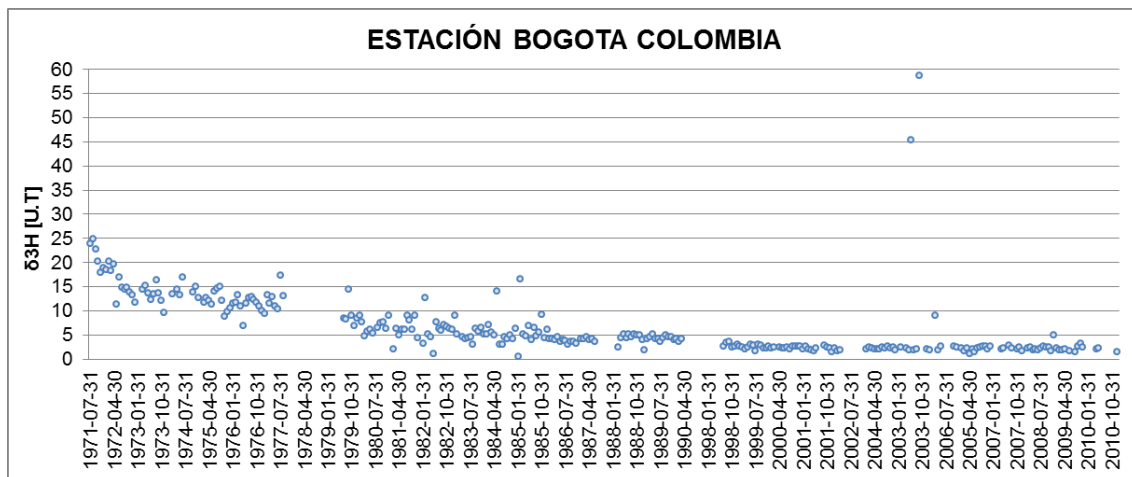


Figura 5.1.6.130 Estación de medición de tritio Bogotá - Colombia

Fuente: IAEA, (2020)

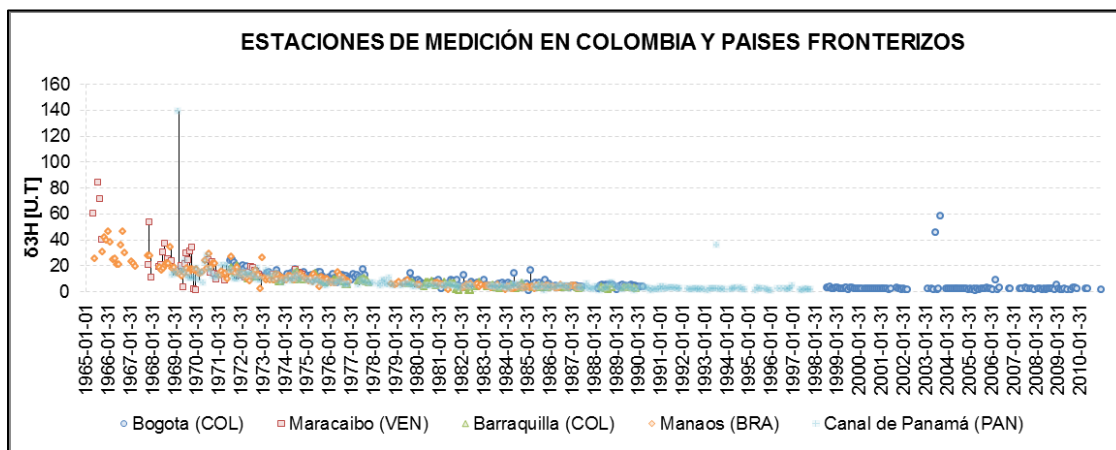


Figura 5.1.6.131 Estaciones de tritio en Colombia y algunos países fronterizos

Fuente: IAEA, (2020)

Los resultados de tritio son presentados en la Tabla 5.1.6.52. El agua del punto de monitoreo identificado como PZS-13-17 presentó una concentración relativa de tritio apreciablemente mayor al resto de puntos que se analizaron en esta campaña, con un valor de 11,86 U.T. Los análisis restantes de tritio en el agua proveniente de los puntos de

monitoreo dan como resultado un valor por debajo al de la lluvia para Colombia, el cual es aproximadamente 2,3 UT, como quedó en evidencia en la Figura 5.1.6.131.

Tabla 5.1.6.52 Resultados de tritio campaña 1 – época seca. Laboratorio Wessling. Enero 2020

Punto	Tritio [Bq/dm3]	Tritio [TU]
Reservorio Artificial La Mayoría	0,14	1,19
Quebrada Palestina	0,20	1,69
BH-2-4	0,16	1,36
BH-5M-03	0,08	0,68
DH-TM-100	0,11	0,93
M -29	0,14	1,19
M-73	0,13	1,10
M-79	0,11	0,93
M-233	0,11	0,93
PZR-12-02	0,12	1,02
PZS-12-09	0,07	0,59
PZS-13-17	1,4	11,86
PZR-19-13	0,12	1,02
T1 Mayoría	0,10	0,85
T2 Manizales	0,17	1,44
T3 La Bella	0,16	1,36

TU: Unidades de tritio [Bq/dm3]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

b. Campaña 2 febrero (2020)

La semana del 24 al 29 de febrero de 2020, se llevó a cabo la segunda campaña de muestreo, en la Tabla 5.1.6.53 se presentan los parámetros de campo pH y conductividad eléctrica, necesarios para los análisis del laboratorio. En esta campaña no se realizó medición de Tritio 0,4UT, ya que el próximo muestreo de este isótopo se hará en época húmeda.

El totalizador 2 evidenció afectación antrópica; ya que, en el agua muestreada se hallaron pelos de ganado, tierra y hojas, lo que alteró la conductividad eléctrica de dicho punto. Para evitar dicha situación en los próximos muestreos, se cercaron los 3 totalizadores.

Tabla 5.1.6.53 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros de campo. Febrero 2020

Punto Red	Tipo punto	Fecha	pH	CE
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	28/02/2020	6,21	61,3
M-29	Manantial	25/02/2020	7,11	52,5
M-233	Manantial	29/02/2020	7,38	83,3
M191	Manantial	26/02/2020	7,66	125,3
M-18	Manantial	26/02/2020	7,1	72,6
M-237	Manantial	27/02/2020	7,15	82,1
M242	Manantial	24/02/2020	5,9	60,3
M73	Manantial	24/02/2020	6,78	135,6

Punto Red	Tipo punto	Fecha	pH	CE
M-79	Manantial	28/02/2020	6,65	90,3
BH-2-4	Piezómetro	25/02/2020	6,91	282
BH-5M-03	Piezómetro	28/02/2020	6,72	152,8
DH-FS-309	Piezómetro	28/02/2020	6,65	201,4
DH-TM-100	Piezómetro	25/02/2020	6,6	144,6
PZS-12-09	Pozo	26/02/2020	6,59	379
PZR-12-02	Piezómetro	25/02/2020	6,49	79,4
PZR-12-04	Piezómetro	27/02/2020	7,02	439
PZS-12-03	Piezómetro	25/02/2020	7,07	361
PZS-13-17	Pozo	26/02/2020	6,56	124,2
PZR-19-12	Piezómetro	26/02/2020	6,75	96,1
PZR-19-13	Piezómetro	25/02/2020	6,65	80,3
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	26/02/2020	7,4	145,3
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	24/02/2020	7,18	88,2
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	26/02/2020	7,53	117,1
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	29/02/2020	7,19	95,4
TOT-1	Totalizador de agua lluvia	24/02/2020	6,93	39,5
TOT-2	Totalizador de agua lluvia	27/02/2020	6,89	128,1
TOT-3	Totalizador de agua lluvia	28/02/2020	7,42	45,4

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo pH y conductividad eléctrica que se midieron en cada uno de los puntos de muestreo se puede observar en la Figura 5.1.6.132 y Figura 5.1.6.133 respectivamente. El pH de las aguas superficiales se encontró muy cerca a las 7 unidades de pH, mientras que el Reservorio Artificial se ubicó por debajo de este valor, presentando características ligeramente ácidas, con un pH de 6,21.

Los manantiales que conforman la red de monitoreo presentan un valor de pH cercano a la neutralidad (7 unidades de pH) y valores de conductividades bajos (menores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$), lo que sugiere que los manantiales surgen aguas con poco tiempo de residencia en el medio subterráneo.

En total se visitaron 11 piezómetros los cuales se encuentran distribuidos en el área de influencia, y cuentan con profundidades y litología variables, algunos de estos tienen las rejillas en el aluvial, otros en el saprolito y otro en la roca, lo que proporciona tipos de agua un poco diferentes. Esto queda en evidencia en la Figura 5.1.6.132, donde se nota gran variabilidad de los valores de conductividad eléctrica en el piezómetro monitoreado, en cuanto al pH de este tipo de punto es ligeramente ácido, probablemente por la interacción del agua con la materia orgánica de las primeras capas del suelo.

Como se mencionó previamente el punto denominado totalizador 2 se encontró con algunas alteraciones, la cuales se ven reflejadas en los parámetros de campo obtenidos, principalmente en la conductividad eléctrica. En la Figura 5.1.6.133 es evidente que es precisamente el totalizador 2 el que presenta un valor de conductividad eléctrica mucho mayor los otros dos totalizadores instalados.

En cuanto al totalizador 1 y 3 presentan parámetros que concuerdan con las características del agua lluvia, las cuales presentan generalmente pH entre 6 y 8 en zonas no contaminadas y conductividades eléctricas menores a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e incluso mucho menores a medida que el punto de recolección se aleja de la zona costera. Finalmente, las aguas superficiales presentan comportamientos similares en conductividad eléctrica y pH a los manantiales, sugiriendo cierta conexión entre estos dos tipos de fuentes, conexión que puede tener origen en el agua lluvia del área de influencia.

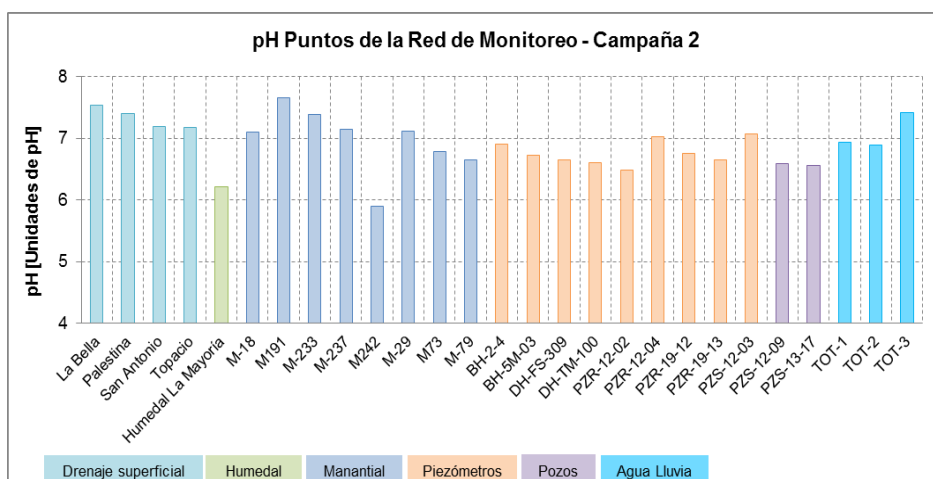


Figura 5.1.6.132 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

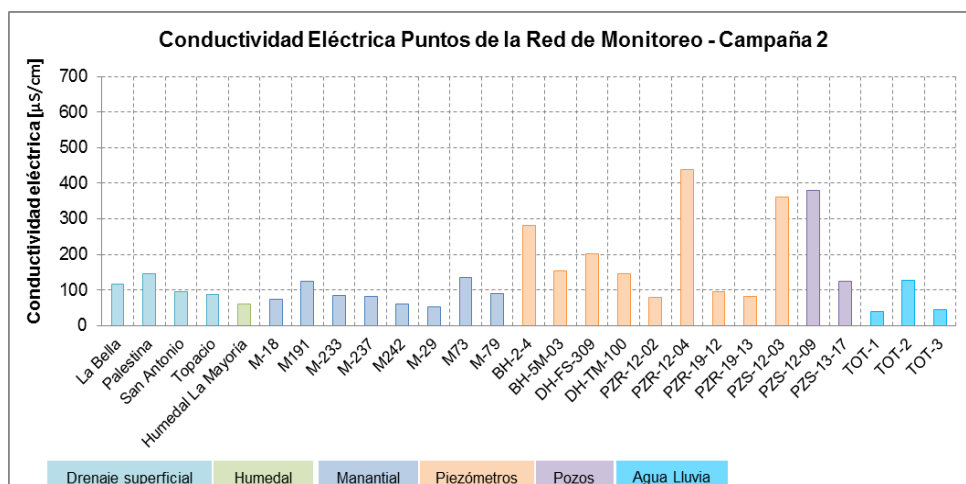


Figura 5.1.6.133 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Febrero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Figura 5.1.6.134 se observa que el agua lluvia se encuentra muy enriquecida con respecto al resto de puntos que conforman la red de monitoreo, esto es producto del efecto de cantidad, el cual expresa la relación existente entre la cantidad de lluvia y la composición isotópica de la misma, y dado que febrero es regularmente un mes seco el enriquecimiento isotópico de la lluvia es una condición normal. en la Tabla 5.1.6.54 se pueden ver los resultados para esta campaña.

Por otro lado, el agua subterránea y superficial no se ve afectada por las variaciones isotópicas que presenta el agua lluvia por los efectos de condensación y evaporación, ya que, una vez infiltrada en el subsuelo estos procesos no tienen lugar.

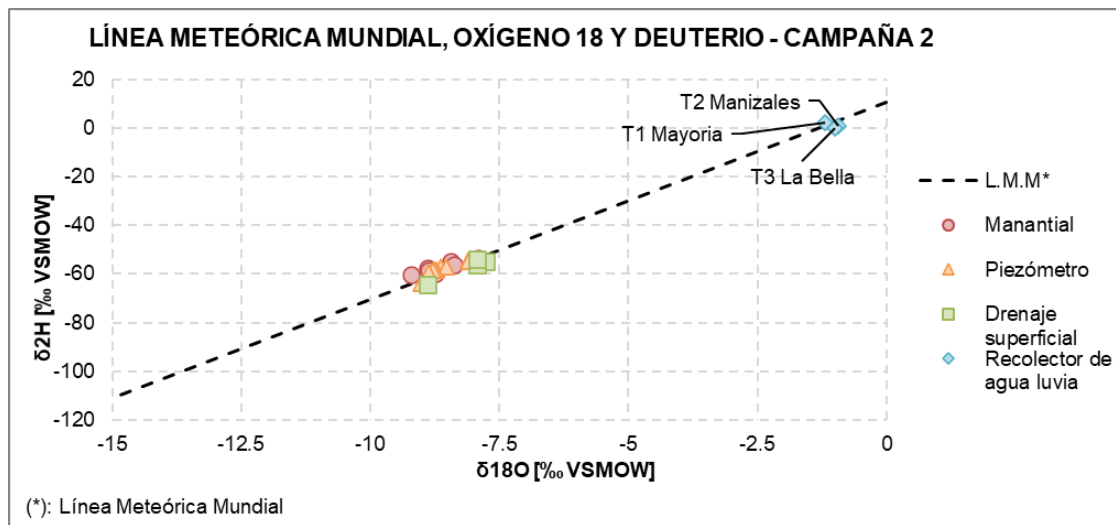


Figura 5.1.6.134 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno 18 y deuterio campaña 2. Febrero 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.54 Resultados de deuterio y oxígeno 18 de campaña 2. Febrero 2020

Puntos	Tipo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,38	-55,97
M-29	Manantial	-8,43	-55,83
M-233	Manantial	-8,9	-57,48
M-191	Manantial	-8,87	-58,61
M-18	Manantial	-9,22	-60,47
M-237	Manantial	-8,44	-54,65
M-242	Manantial	-8,37	-56,09
M-73	Manantial	-7,92	-53,52
M-79	Manantial	-8,75	-59,73

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
BH-2-4	Piezómetro	-8,08	-53,78
BH-5M-03	Piezómetro	-8,63	-57,3
DH-FS-309	Piezómetro	-8,72	-58,23
DH-TM-100	Piezómetro	-8,53	-57,2
PZS-12-09	Piezómetro	-8,1	-54,36
PZR-12-02	Piezómetro	-8,74	-58,6
PZR-12-04	Piezómetro	-8,11	-54,64
PZS-12-03	Piezómetro	-8,79	-58,4
PZS-13-17	Piezómetro	-8,86	-59,36
PZR-19-12	Piezómetro	-9,02	-63,66
PZR-19-13	Piezómetro	-8,89	-64,24

Fuente: SHI S.A.S (2021)

c. Campaña 3 mayo (2020)

La campaña de toma de muestras para análisis de isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18 se ejecutó en el mes de mayo de 2020, pues durante el mes de marzo y abril no fue posible recolectar muestras de agua, debido a la cuarentena nacional que decretó el gobierno por motivo de la pandemia del virus denominado COVID-19.

La recolección de las muestras se realizó entre el 27/05/2020 y el 03/06/2020, en cada uno de los puntos visitados se tomaron mediciones en campo de los parámetros pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados son presentados en la Tabla 5.1.6.55.

El piezómetro identificado con el código BH-2-4 se encontró deteriorado, lo que hizo imposible la recolección de las muestras, este punto queda deshabilitado para futuras campañas de muestreo. Por otro lado, se visitaron los tres totalizadores instalados en el área de influencia del proyecto Gramalote, sin embargo, se tomó la decisión de no recolectar muestras; ya que; el muestreo de agua lluvia corresponde a una integración mensual y por motivo de la cuarentena la muestra recolectada en los totalizadores cumplía más de dos meses de integración.

En la visita a los totalizadores se realizó mantenimiento general a la zona en la que están ubicados y se procedió a desocupar el volumen, para iniciar nuevamente la integración mensual para la siguiente campaña, por lo tanto, en esta campaña no se tomó registro del agua lluvia.

Tabla 5.1.6.55 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de mayo 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μS/cm]
Quebrada San Antonio	Quebrada	2/06/2020	6,88	100,4
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	27/05/2020	6,47	30,9
Quebrada La Bella	Quebrada	1/06/2020	7,52	69,4
Quebrada Palestina	Quebrada	30/05/2020	7,06	48,7
Quebrada Topacio	Quebrada	28/05/2020	7,01	79,9
M-29	Manantial	2/06/2020	6,96	87,9
M-242	Manantial	3/06/2020	6,99	35,2
M-18	Manantial	3/06/2020	7,26	100,6
M-233	Manantial	3/06/2020	7,58	79
M-73	Manantial	1/06/2020	6,92	79,2
M-79	Manantial	1/06/2020	6,91	131,6
M-191	Manantial	1/06/2020	7,81	98,5
M-237	Manantial	1/06/2020	6,99	62,2
M-73	Manantial	1/06/2020	6,92	79,2
PZS-12-09	Piezómetro	30/05/2020	6,65	429
PZS-13-17	Piezómetro	29/05/2020	6,42	78,6
DH-FS-309	Piezómetro	29/05/2020	6,58	389
PZR-12-02	Piezómetro	29/05/2020	6,43	87,3
PZR-12-03	Piezómetro	29/05/2020	7,04	575,0
DH-TM-100	Piezómetro	28/05/2020	6,48	169,5
PZR-19-13	Piezómetro	28/05/2020	6,61	93,6
BH-5M-03	Piezómetro	28/05/2020	6,86	190
PZR-12-04	Piezómetro	28/05/2020	7,07	467
PZR-19-13	Piezómetro	28/05/2020	6,42	83,2

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los valores de pH y conductividad eléctrica medidos durante la tercera campaña de 2020 son presentados en la Figura 5.1.6.135 y Figura 5.1.6.136. Es importante recordar que el punto identificado con el código BH-2-4 fue averiado por personas ajenas al proyecto, y en los puntos de recolección de agua lluvia T1, T2 y T3 no se tomaron muestras debido a la acumulación de agua lluvia de dos meses debido a que se cancelaron las campañas de muestreo por la pandemia del COVID – 19.

De forma general el pH de los puntos que conforman la red de monitoreo presenta una variación entre 6 y 8 unidades de pH, los drenajes superficiales presentan un pH neutro, mientras que el Reservorio Artificial presentó un pH ligeramente ácido con un valor de 6,47.

El comportamiento evidenciado en las dos campañas de muestreo anteriores se mantiene, la conductividad eléctrica de manantiales y drenajes superficiales se encuentra en su mayoría por debajo de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y el pH muy cercano a 7 unidades de pH. Por otro lado, los piezómetros y pozos presentan una mayor variación en cuanto a la conductividad eléctrica, y teniendo en cuenta que tanto la profundidad de los piezómetros/pozos como unidad geológica en la que se encuentran las rejillas, cambia entre piezómetros, es normal encontrar dicha variabilidad.

De lo anterior, se puede hacer una diferenciación entre dos tipos de aguas, las aguas con bajas conductividades eléctricas (menores a 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$) las cuales fluyen rápidamente por el medio subterráneo luego de su infiltración y emergen a la superficie, y aquellas agua que tienen un recorrido más lento y quizás más largo, desde la parte alta de la cuenca hacia la parte más baja, cuya conductividad alcanza a ser modificada de forma apreciable por la interacción agua – medio subterráneo, es importante aclarar, que estos dos tipo de agua tiene como origen común la precipitación de la zona de estudio.

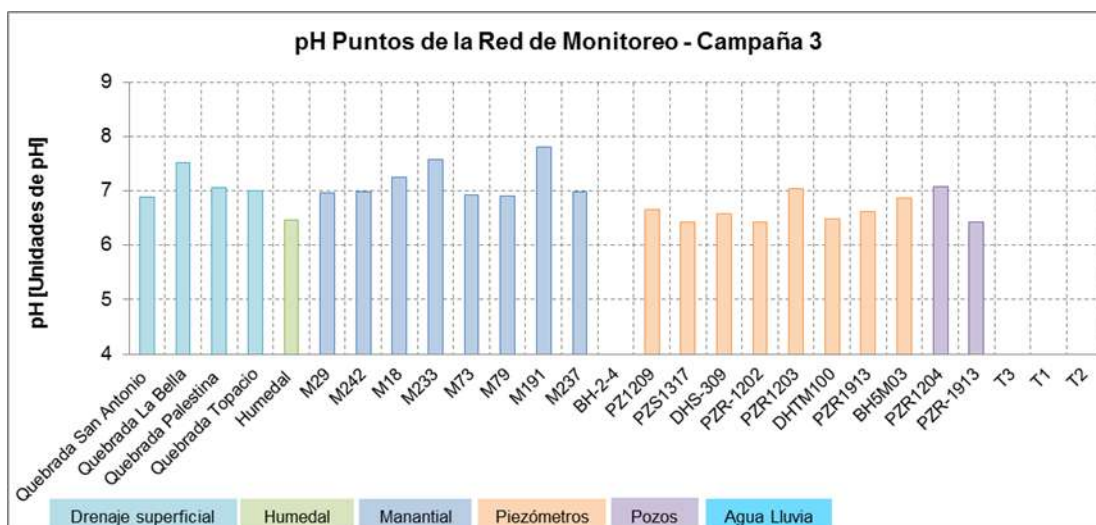


Figura 5.1.6.135 pH de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Mayo 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

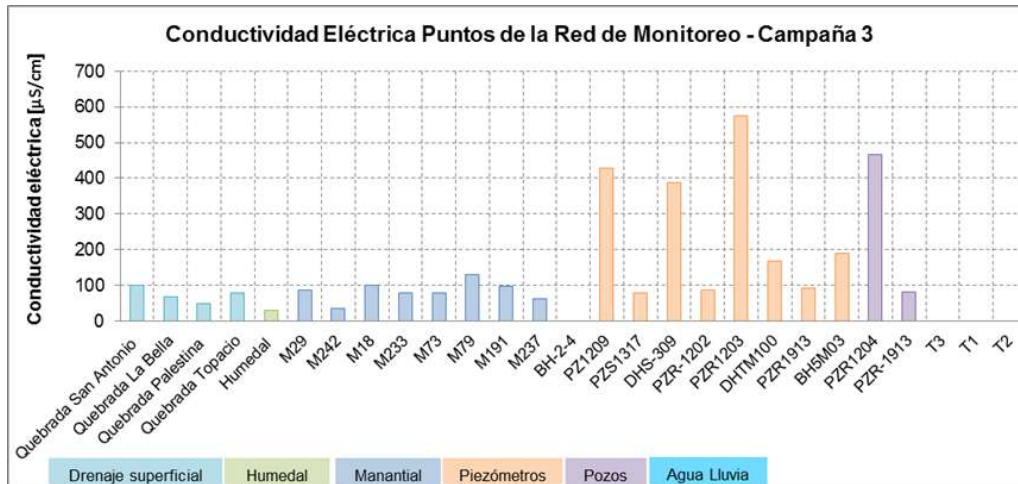


Figura 5.1.6.136 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo isotópico. Mayo 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18 se encuentra en la Tabla 5.1.6.56 y en la Figura 5.1.6.137 es posible visualizar las composiciones isotópicas sobre la recta meteórica mundial.

Allí se observa que los datos se ubican sobre la región de la línea meteórica mundial que comprende $[-7,86 \text{ } ^{18}\text{O}, -10,19]$ para oxígeno 18 y $[-51,18, -70,23]$ para deuterio. Los manantiales, algunos puntos superficiales y los piezómetros y pozos están agrupados todos dentro del rango mencionado y se encuentran cercanos entre sí, únicamente un punto de agua superficial está más empobrecido que el resto de las muestras.

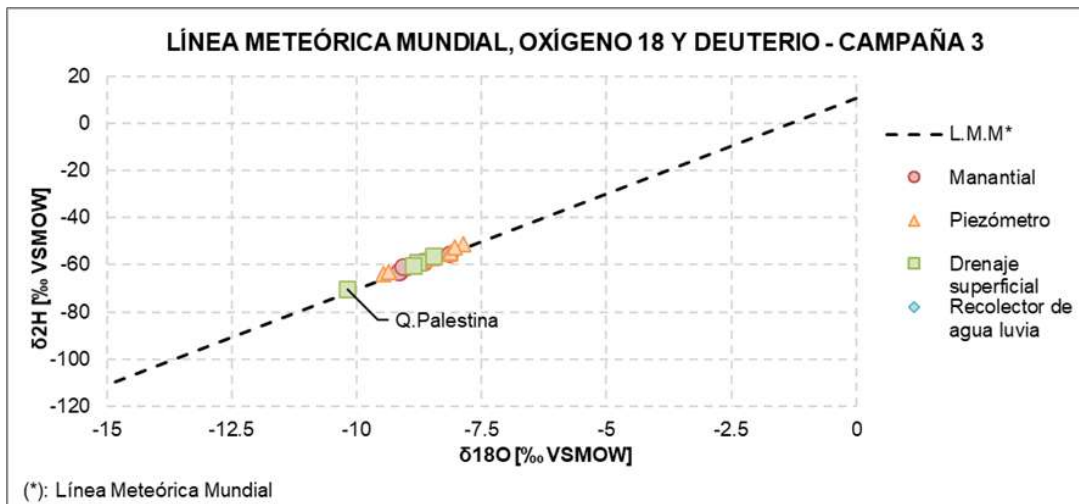


Figura 5.1.6.137 Línea Meteórica Mundial y composición isotópica de los puntos de muestreo campaña 3. Mayo 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.56 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 3. Mayo 2020

Puntos	Tipo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-9,96	-69,65
M-29	Manantial	-8,69	-58,53
M-233	Manantial	-8,98	-60,65
M-191	Manantial	-8,65	-58,82
M-18	Manantial	-9,15	-62,78
M-237	Manantial	-8,89	-60,25
M-242	Manantial	-8,15	-55,08
M-73	Manantial	-9,16	-62,97
M-79	Manantial	-9,08	-60,89
BH-5M-03	Piezómetro	-7,86	-51,18
DH-FS-309	Piezómetro	-8,66	-57,97
DH-TM-100	Piezómetro	-8,48	-57,13
PZS-12-09	Piezómetro	-8,14	-55,09
PZR-12-02	Piezómetro	-8,79	-59,3
PZR-12-04	Piezómetro	-8,12	-54,67
PZS-12-03	Piezómetro	-8,03	-52,73
PZS-13-17	Piezómetro	-8,72	-58,96
PZR-19-12	Piezómetro	-9,46	-63,98
PZR-19-13	Piezómetro	-9,36	-62,91
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-10,19	-70,23
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,46	-56,13
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	-8,78	-58,79
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,87	-60,05

Fuente: SHI S.A.S (2021)

d. Campaña 4 junio (2020)

La campaña 4 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 22 y 27 de junio del 2020, en cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.57.

Es importante reiterar que el piezómetro denominado BH-2-4 se encuentra deshabilitado para el muestreo debido a daños que sufrió en el mes anterior.

Tabla 5.1.6.57 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de junio 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μS/cm]
PZS1203	Piezómetro	26/06/2020	6,86	425
PZR-12-02	Piezómetro	26/06/2020	6,36	98
M191	Manantial	27/06/2020	7,45	144,3
M242	Manantial	27/06/2020	6,82	63,3
M18	Manantial	26/06/2020	7,05	71,5
PZS-12-09	Piezómetro	26/06/2020	6,46	409
DH-TM-100	Piezómetro	25/06/2020	6,36	188,5
DH-TM-309	Piezómetro	25/06/2020	6,27	211,3
BH-5M-03	Piezómetro	25/06/2020	6,64	209,1
PZR-19-13	Piezómetro	24/06/2020	6,29	90,4
M-29	Manantial	22/06/2020	7,15	56
PZR-12-04	Piezómetro	24/06/2020	6,84	492
PZS-13-17	Piezómetro	24/06/2020	6,17	72,9
M-73	Manantial	22/06/2020	6,92	140,3
M-233	Manantial	24/06/2020	7,14	92,5
M-236	Manantial	23/06/2020	7,34	86
PZR 19-12	Piezómetro	24/06/2020	6,45	115,9
M-79	Manantial	23/06/2020	6,35	82,9
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	27/06/2020	6,2	8,07
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	23/06/2020	5,83	8,19
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	22/06/2020	7,26	17,23
Quebrada Topacio	Quebrada	22/06/2020	7,02	92,3
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	27/06/2020	6,71	107,4
Quebrada San Antonio	Quebrada	25/06/2020	6,99	98,4
Quebrada Palestina	Quebrada	23/06/2020	7,09	188,2

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μS/cm]
Quebrada La Bella	Quebrada	23/06/2020	7,12	93,2

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.138 y Figura 5.1.6.140 se presentan los parámetros de campo (pH y conductividad eléctrica) de los puntos que conforman la red de monitoreo de isótopos, el rango de variación de pH para la campaña del mes de junio fue de [5,83-7,45] siendo el menor valor el que presentó el totalizador 2, ubicado en la vereda Manizales y el punto con mayor valor de pH fue el manantial identificado con el código M-191, ubicado en la vereda La María, sector El Torito.

Los valores obtenidos para conductividad eléctrica son presentados en la Figura 5.1.6.139, al igual que las anteriores campañas, los valores de conductividad eléctrica presentan amplia variación, esto es debido a los diferentes tipos de puntos que conforman la red de monitoreo. Las aguas lluvias normalmente presentan conductividades eléctricas bajas, debido al ciclo hidrológico, el cual genera procesos de evaporación y condensación que limitan la cantidad de iones disueltos que pueden estar presentes en este tipo de agua; por tal motivo, los totalizadores T1, T2 y T3 son los puntos con menores valores de conductividad eléctrica de la red de monitoreo.

Los drenajes superficiales están relacionados directamente con el agua lluvia de la zona de estudio y con la escorrentía; sin embargo, estas aguas sufren algunas modificaciones en cuanto a su composición química al fluir por el terreno, donde van lavando minerales que puedan estar presentes en las capas más superficiales del suelo o por contaminación antrópica; por tal motivo, los drenajes superficiales suelen presentar mayor conductividad eléctrica que el agua lluvia.

Las aguas de los manantiales comúnmente presentan procesos similares a los descritos para los drenajes superficiales; sin embargo, su conductividad depende generalmente del tiempo de residencia del agua luego de la infiltración y de la litología con la que tiene contacto el agua, para este caso en concreto, se observan en los manantiales valores de conductividad eléctrica muy similares a los drenajes superficiales, lo que sugiere conexión de estos puntos con el agua lluvia reciente y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo.

Finalmente, como ha sido una constante, la variación de la conductividad eléctrica en los piezómetros es mucho más amplia que en el resto de puntos, estas fluctuaciones se deben a la variedad del tipo de aguas que son objeto de muestreo.

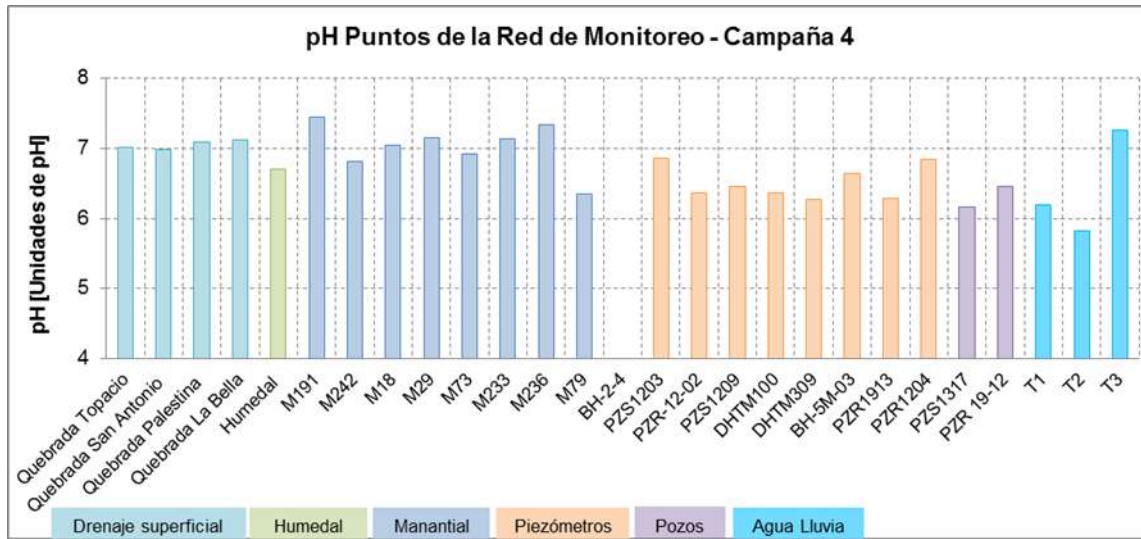


Figura 5.1.6.138 pH de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

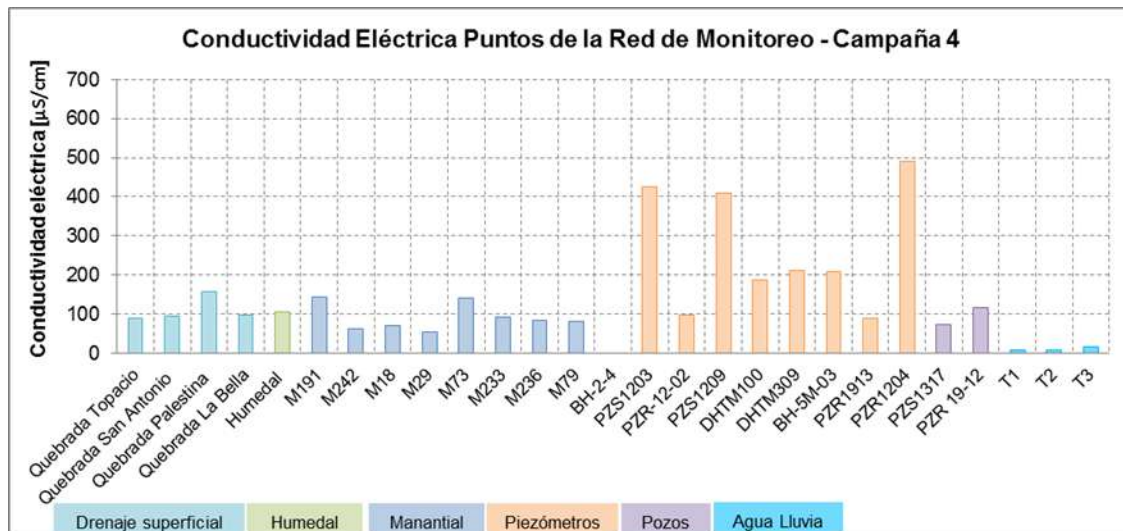


Figura 5.1.6.139 Conductividad eléctrica de los puntos que conforman la red de monitoreo. Junio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 4 junio de 2020 se presentan en la Tabla 5.1.6.58 y en la Figura 5.1.6.140 es posible visualizar de forma gráfico dichos resultados con la recta meteórica mundial.

En la Figura 5.1.6.140 se observan dos grupos de puntos, de color azul se encuentra el agua lluvia de la zona de estudio, recolectada en tres puntos con alturas distintas, los cuales presentan una variación isotópica de [-13,99‰, -13,01‰] para el oxígeno 18 y de [-

104,02‰, -97,19‰] para el deuterio. Esta composición isotópica del agua lluvia se encuentra más empobrecida que el resto de los puntos de agua objeto de monitoreo, lo cual es una situación normal para este mes lluvioso, pues el agua lluvia responde a la cantidad de precipitación de forma que a mayor precipitación mayor es el empobrecimiento del agua, lo cual es conocido como efecto cantidad.

Por otro lado, los puntos asociados a manantiales, piezómetros y drenajes superficiales conforman el segundo grupo que se logra observar en Figura 5.1.6.140, cuya variación corresponde a [-9,72‰, -7,94‰] para oxígeno 18 y de [-67,08‰, -54,51‰] para el deuterio. Esta distribución de los puntos sugiere que el origen de aguas subterráneas y superficiales es el mismo, el cual parece ser la precipitación reciente de la zona de estudio.

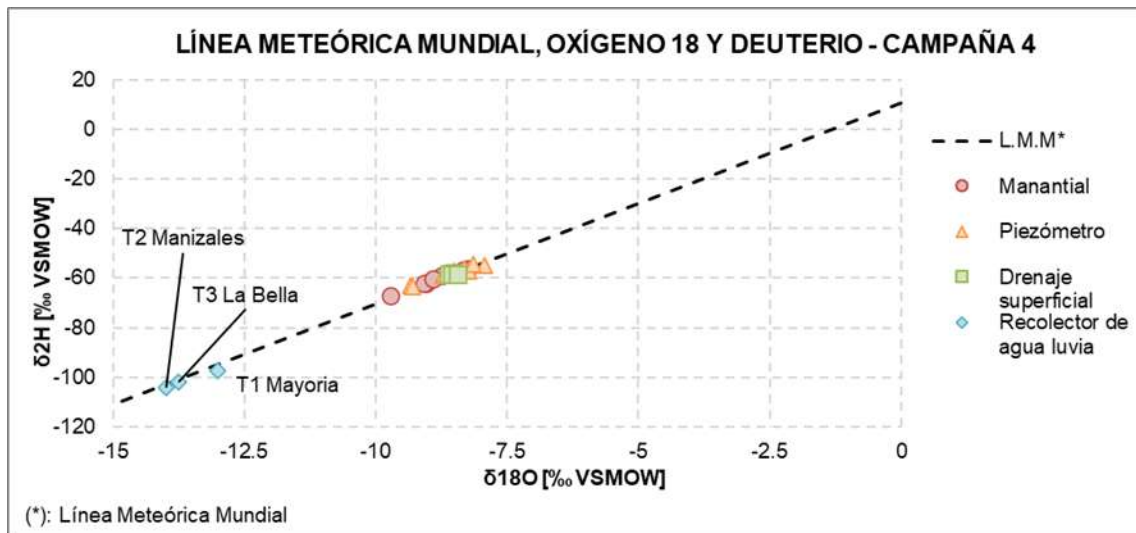


Figura 5.1.6.140 Composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo y línea meteórica mundial campaña 4. Junio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.58 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 4. Junio 2020

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,74	-59,39
M-29	Manantial	-8,59	-58,15
M-233	Manantial	-8,75	-58,68
M-191	Manantial	-9,03	-61,97
M-18	Manantial	-9,08	-62,06
M-237	Manantial	-8,26	-56,29
M-242	Manantial	-8,34	-56,46
M-73	Manantial	-9,72	-67,08
M-79	Manantial	-8,92	-60,16
BH-5M-03	Piezómetro	-8,31	-56,13
DH-FS-309	Piezómetro	-8,45	-58,03

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
DH-TM-100	Piezómetro	-8,22	-57,20
PZS-12-09	Piezómetro	-7,94	-54,68
PZR-12-02	Pozo	-8,73	-58,78
PZR-12-04	Piezómetro	-8,14	-54,51
PZS-12-03	Piezómetro	-8,69	-57,76
PZS-13-17	Piezómetro	-8,50	-57,06
PZR-19-12	Pozo	-9,34	-63,15
PZR-19-13	Piezómetro	-9,29	-63,53
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,62	-58,27
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,53	-57,99
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	-8,54	-58,40
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,44	-58,65
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-13,01	-97,19
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-13,99	-104,02
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-13,75	-102,14

Fuente: SHI S.A.S (2021)

e. Campaña 5 julio (2020)

La campaña 5 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 28 de julio al 1 de agosto del 2020, en cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.59.

Tabla 5.1.6.59 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de julio 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu S/cm$]
PZS-12-03	Piezómetro	29/07/2020	6,88	507
PZR-12-02	Piezómetro	29/07/2020	6,5	144
M-191	Manantial	01/08/2020	8,02	144,2
M-242	Manantial	31/07/2020	6,68	124,9
M-18	Manantial	01/08/2020	7,5	58
PZS-12-09	Piezómetro	29/07/2020	7,16	672
DH-TM-100	Piezómetro	29/07/2020	6,58	236
DH-TM-309	Piezómetro	29/07/2020	6,45	822
BH-5M-03	Piezómetro	28/07/2020	7,10	362
PZR-19-13	Piezómetro	28/07/2020	6,49	105,1
M-29	Manantial	31/07/2020	7,18	67,1
PZR-12-04	Piezómetro	28/07/2020	7,13	522

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
PZS-13-17	Piezómetro	28/07/2020	6,42	182,8
M-73	Manantial	30/07/2020	7,14	197,1
M-233	Manantial	01/08/2020	7,80	73,7
M-237	Manantial	31/07/2020	7,26	77,1
PZR 19-12	Piezómetro	28/07/2020	6,57	145,5
M-79	Manantial	30/07/2020	6,5	272
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	01/08/2020	5,71	7,8
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	30/07/2020	6,74	130,4
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	31/07/2020	6,07	8
Quebrada Topacio	Quebrada	30/07/2020	7,29	90,7
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	01/08/2020	6,55	44,2
Quebrada San Antonio	Quebrada	31/07/2020	7,03	78
Quebrada Palestina	Quebrada	01/08/2020	7,84	223
Quebrada La Bella	Quebrada	31/07/2020	7,7	74,1

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.141 y Figura 5.1.6.142 se presentan los valores de pH y conductividad eléctrica respectivamente, la variación del pH entre los puntos que conforman la red de monitoreo es de [5,73, 8,00 U.pH], el punto con menor valor de pH se identifica como T1, el cual es el totalizador ubicado en la cota más baja; mientras que el valor de pH más alto corresponde al manantial M-191 ubicado en el sector el torito de la vereda La María.

Al igual que en las campañas anteriores se observa una gran variación en los valores de conductividad eléctrica, la principal causa de esta variabilidad son los distintos tipos de puntos, por los cuales fluyen aguas con diferentes características en cuanto a su transporte desde que son originadas por el agua lluvia en el área de influencia.

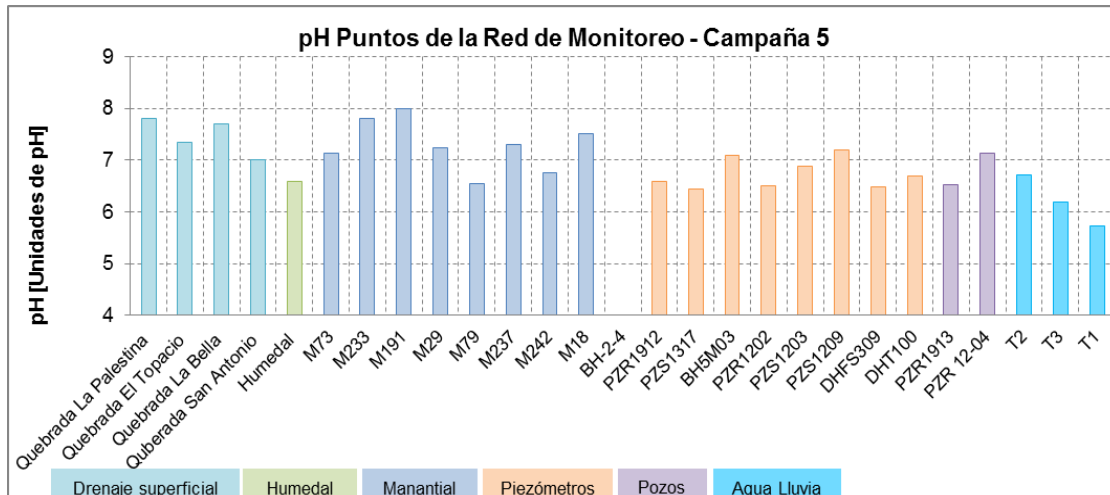


Figura 5.1.6.141 pH de los puntos de la red de monitoreo. Julio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

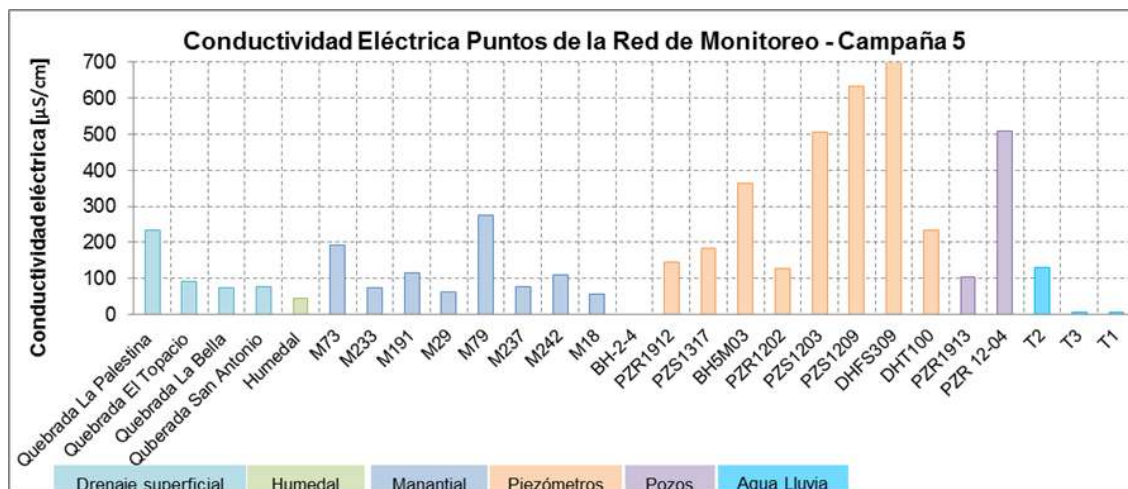


Figura 5.1.6.142 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de isótopos ambientales se presentan en la Tabla 5.1.6.60 y se representan gráficamente en la Figura 5.1.6.143, allí se observa nuevamente dos grupos de puntos, uno de ellos corresponde a los puntos de agua lluvia, los cuales para esta campaña se encuentran levemente empobrecidos comparado con el resto de punto que conforman la red de monitoreo.

Además, existen dos piezómetros desplazados levemente hacia zona más empobrecidas, estos se pueden diferenciar por el círculo de color rojo, los cuales corresponden a los piezómetros BH-5M-03 y PZS-12-09, que se encuentran registrando niveles del saprolito

del batolito y evidencian que el agua registrada en esa capa está relacionada con el agua lluvia, que como ya se mencionó también está empobrecida.

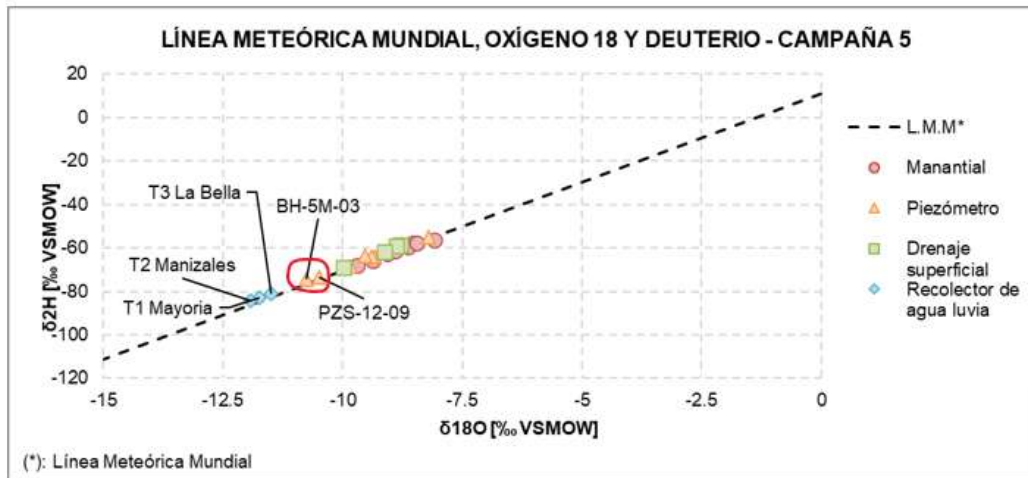


Figura 5.1.6.143 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 5. Julio 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.60 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 5. Julio 2020

Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
		VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-9,63	-67,84
M-29	Manantial	-8,09	-56,29
M-233	Manantial	-8,54	-57,90
M-191	Manantial	-8,64	-59,72
M-18	Manantial	-9,07	-62,66
M-237	Manantial	-8,45	-57,48
M-242	Manantial	-8,90	-61,33
M-73	Manantial	-9,38	-65,67
M-79	Manantial	-9,69	-67,93
BH-5M-03	Piezómetro	-10,76	-74,14
DH-FS-309	Piezómetro	-8,76	-58,28
DH-TM-100	Piezómetro	-9,83	-68,69
PZS-12-09	Piezómetro	-10,50	-73,56
PZR-12-02	Pozo	-8,81	-59,04
PZR-12-04	Piezómetro	-8,21	-54,99
PZS-12-03	Piezómetro	-9,33	-63,81
PZS-13-17	Piezómetro	-9,17	-62,02
PZR-19-12	Pozo	-9,40	-63,86
PZR-19-13	Piezómetro	-9,53	-63,61
Quebrada	Drenaje superficial	-8,79	-58,78

Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
		VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
Palestina			
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-9,99	-68,84
Quebrada La Bella	Drenaje superficial	-8,88	-59,11
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-9,13	-61,97
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-11,73	-82,72
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-11,92	-84,45
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-11,50	-81,23

Fuente: SHI S.A.S (2021)

f. Campaña 6 agosto (2020)

La campaña 6 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 5 de septiembre al 10 de septiembre del 2020. Aunque se realizó los primeros días de septiembre por temas logísticos, esta campaña representa el agua lluvia totalizada del mes de agosto de 2020. En cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.61.

Tabla 5.1.6.61 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de agosto 2020

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu S/cm$]
PZS-12-03	Piezómetro	09/09/2020	6,7	375
PZR-12-02	Piezómetro	09/09/2020	6,14	92,5
M-191	Manantial	07/09/2020	7,05	141,5
M-242	Manantial	07/09/2020	6,64	51,3
M-18	Manantial	09/09/2020	7,41	96,2
PZS-12-09	Piezómetro	08/09/2020	6,87	395
DH-TM-100	Piezómetro	10/09/2020	6,23	202,7
DH-TM-309	Piezómetro	10/09/2020	6,11	259
BH-5M-03	Piezómetro	08/09/2020	6,77	228
PZR-19-13	Piezómetro	09/09/2020	5,87	82,9
M-29	Manantial	07/09/2020	6,96	57
PZR-12-04	Piezómetro	08/09/2020	6,72	551
PZS-13-17	Piezómetro	08/09/2020	6,65	74,9
M-73	Manantial	06/09/2020	6,75	93,5
M-233	Manantial	06/09/2020	7,43	87,1
M-237	Manantial	05/09/2020	7	59,1
PZR 19-12	Piezómetro	09/09/2020	6,68	109,7
M-79	Manantial	06/09/2020	6,6	85,6
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	10/09/2020	6,61	24,2
T2 Manizales	Recolector de	06/09/2020	8,5	80

Nombre del punto	Tipo de fuente	Fecha de muestreo	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$]
	agua lluvia			
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	07/09/2020	7,02	71,9
Quebrada Topacio	Quebrada	05/09/2020	6,91	62,8
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	10/09/2020	6,39	84,3
Quebrada San Antonio	Quebrada	05/09/2020	6,46	73,8
Quebrada Palestina	Quebrada	06/09/2020	6,86	136,4
Quebrada La Bella	Quebrada	05/09/2020	7,54	65,2

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.144 y Figura 5.1.6.145 se presentan los valores de pH y conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. La variación del pH entre los puntos que conforman la red de monitoreo es de [5,86 a 7,89 U. pH], el cual ha sido un rango de variación típico en las campañas ejecutadas.

Al igual que en las campañas anteriores se observa una gran variación en los valores de conductividad eléctrica. Las aguas subterráneas comprenden piezómetros y manantiales, en estos puntos se encuentran algunos puntos con agua de corto tiempo de residencia en el medio subterráneo, las cuales tienen una conductividad eléctrica baja y agua con conductividades eléctricas más elevadas ($>300 \mu\text{S}/\text{cm}$) las cuales fluyen por el medio subterráneo de forma más lenta o prolongada, lo que posibilita que ganen iones gracias a la disolución de minerales. Las aguas lluvias y superficiales cuentan con conductividades eléctricas bajas, lo cual es un comportamiento normal en este tipo de aguas.

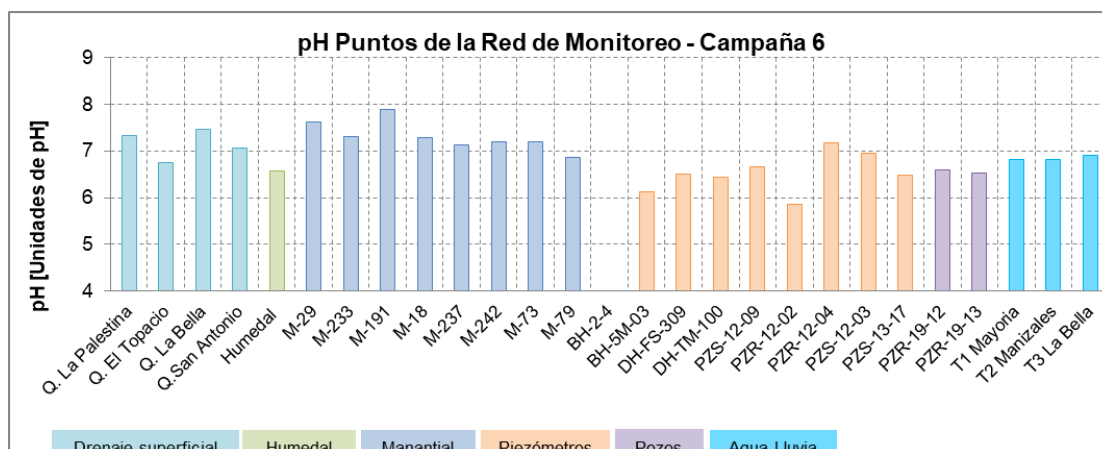


Figura 5.1.6.144 pH de los puntos de la red de monitoreo Campaña 6

Fuente: SHI S.A.S (2021)

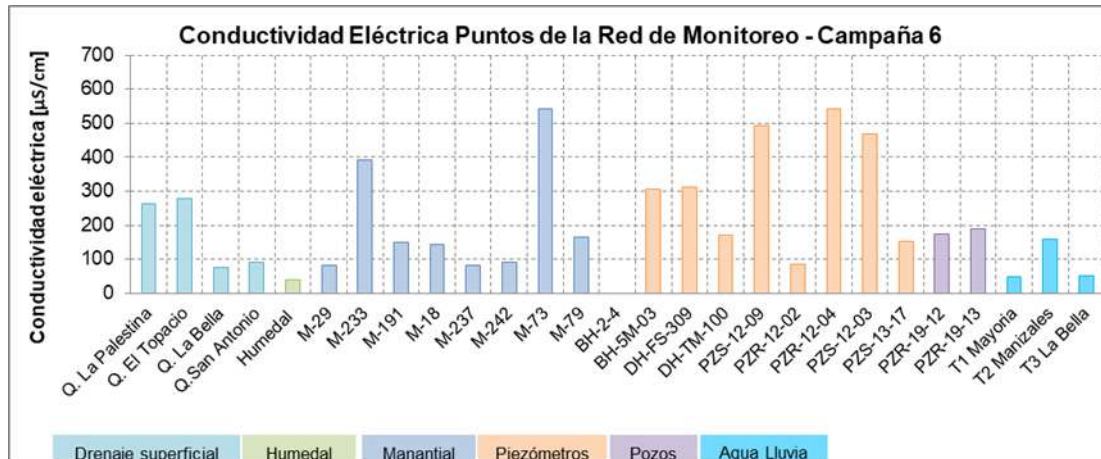


Figura 5.1.6.145 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de la concentración relativa de los isótopos deuterio y oxígeno 18 se pueden observar de forma gráfica en la Figura 5.1.6.146, también es posible visualizar los diversos valores en la Tabla 5.1.6.62. Luego de visualizar los resultados en la Figura 5.1.6.146 es posible llegar a las siguientes conclusiones:

Para el mes de agosto del año 2020 el agua lluvia se encuentra levemente más enriquecida comparado con el resto de los puntos de la red de monitoreo, esto indica que ha sido un mes de menos lluvias en la zona respecto a los dos meses anteriores, pues la marca isotópica de lluvia se venía empobreciendo mes a mes.

Para el mes de agosto, piezómetros, manantiales y drenajes superficiales comparten la misma marca isotópica, lo que valida la hipótesis de que todas las fuentes de agua que se encuentran en la zona de estudio tienen el mismo origen en la precipitación.

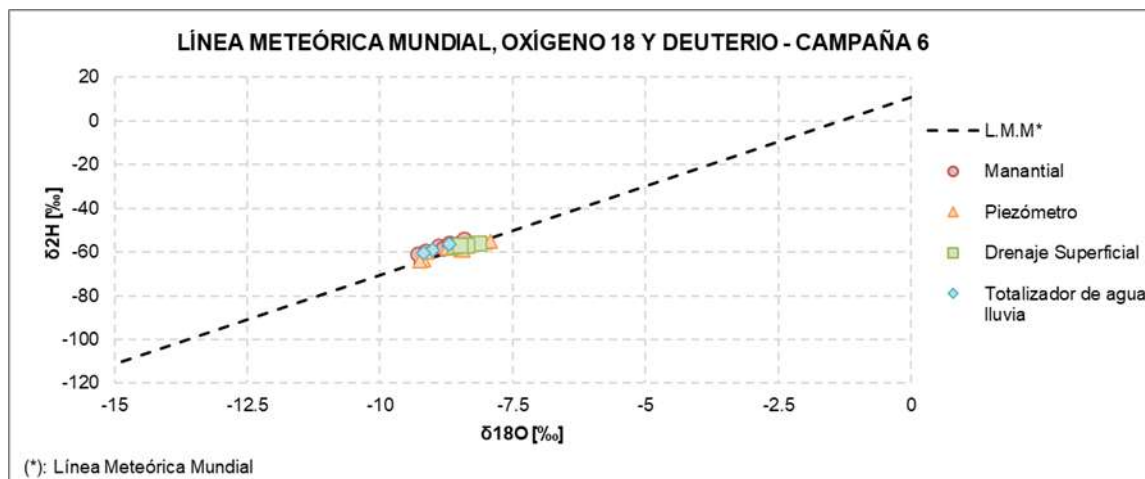


Figura 5.1.6.146 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 6. Agosto 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.62 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 6. Agosto 2020

#	Puntos	Tipo	$\delta^{18}O$	δ^2H
			VSMOW $\pm 0,2\%$	VSMOW $\pm 0,8\%$
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,49	-56,74
2	M-29	Manantial	-8,52	-56,02
3	M-233	Manantial	-8,91	-57,12
4	M-191	Manantial	-8,81	-58,34
5	M-18	Manantial	-9,29	-60,92
6	M-237	Manantial	-8,69	-55,98
7	M-242	Manantial	-8,66	-56,4
8	M-73	Manantial	-8,41	-54,23
9	M-79	Manantial	-9,13	-59,33
10	BH-5M-03	Piezómetro	-9,11	-59,76
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,73	-58,3
12	DH-TM-100	Piezómetro	-8,14	-55,9
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,01	-55,38
14	PZR-12-02	Pozo	-8,47	-58,85
15	PZR-12-04	Piezómetro	-7,92	-54,83
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,44	-58,95
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,45	-59,06
18	PZR-19-12	Pozo	-9,17	-63,53
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,25	-64,02
21	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,15	-56,01
22	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,39	-56,98
23	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,37	-56,74
24	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,6	-57,17
25	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-9,02	-59,01
26	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-8,7	-56,15
27	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-9,17	-60,49

Fuente: SHI S.A.S (2021)

g. Campaña 7 septiembre (2020)

La campaña 7 de recolección de muestras de agua fue ejecutada entre los días 28 de septiembre al 3 de octubre del 2020, representando el agua lluvia totalizada durante septiembre. En cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.63.

Tabla 5.1.6.63 Puntos de monitoreo isotópico y parámetros medidos en campo en el mes de septiembre-octubre de 2020

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	03/10/2020	0	39,4
M-29	Manantial	02/10/2020	7,62	82,1
M-233	Manantial	29/09/2020	7,32	392
M-191	Manantial	03/10/2020	7,89	150,8
M-18	Manantial	30/09/2020	7,28	144,1
M-237	Manantial	29/09/2020	7,13	82,4
M-242	Manantial	29/09/2020	7,19	91,6
M-73	Manantial	29/09/2020	7,19	544
M-79	Manantial	01/10/2020	6,86	164,6
BH-5M-03	Piezómetro	01/10/2020	6,12	307
DH-FS-309	Piezómetro	02/10/2020	6,51	311
DH-TM-100	Piezómetro	02/10/2020	6,43	172,6
PZS-12-09	Piezómetro	01/10/2020	6,66	494
PZR-12-02	Piezómetro	30/09/2020	5,86	84,4
PZR-12-04	Piezómetro	01/10/2020	7,17	543
PZS-12-03	Piezómetro	30/09/2020	6,96	469
PZS-13-17	Piezómetro	01/10/2020	6,49	153,5
PZR-19-12	Piezómetro	30/09/2020	6,6	173,9
PZR-19-13	Piezómetro	30/09/2020	6,54	190,4
Quebrada Palestina	Quebrada	28/09/2020	7,33	263
Quebrada El Topacio	Quebrada	28/09/2020	6,76	279
Quebrada La Bella	Quebrada	29/09/2020	7,46	77,4
Quebrada San Antonio	Quebrada	28/09/2020	7,07	905
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	03/10/2020	6,82	47,8
T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	01/10/2020	6,83	159,3
T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	02/10/2020	6,9	52,4
T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	03/10/2020	6,82	47,8

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.147 y Figura 5.1.6.148 se presentan los valores de pH y conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. La variación del pH entre los puntos que conforman la red de monitoreo es de [5,86, 7,89 U.pH], el cual ha sido un rango de variación típico en las campañas ejecutadas hasta la fecha.

La conductividad eléctrica se distribuye de forma similar a las campañas anteriores, con puntos de agua subterránea con valores altos y bajos de este parámetro y el agua lluvia y

superficial con conductividades eléctricas bajas, lo cual es un comportamiento normal en este tipo de aguas.

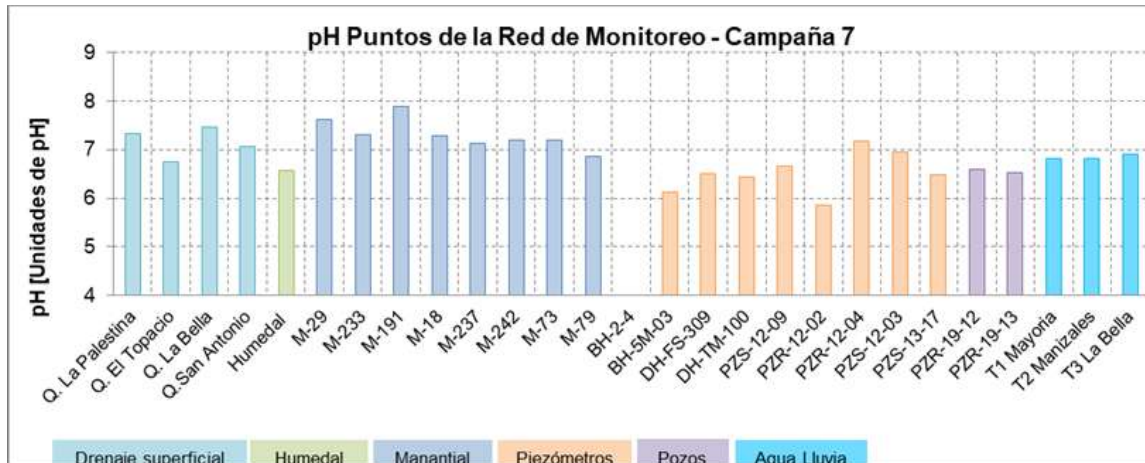


Figura 5.1.6.147 pH de los puntos de la red de monitoreo. Septiembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

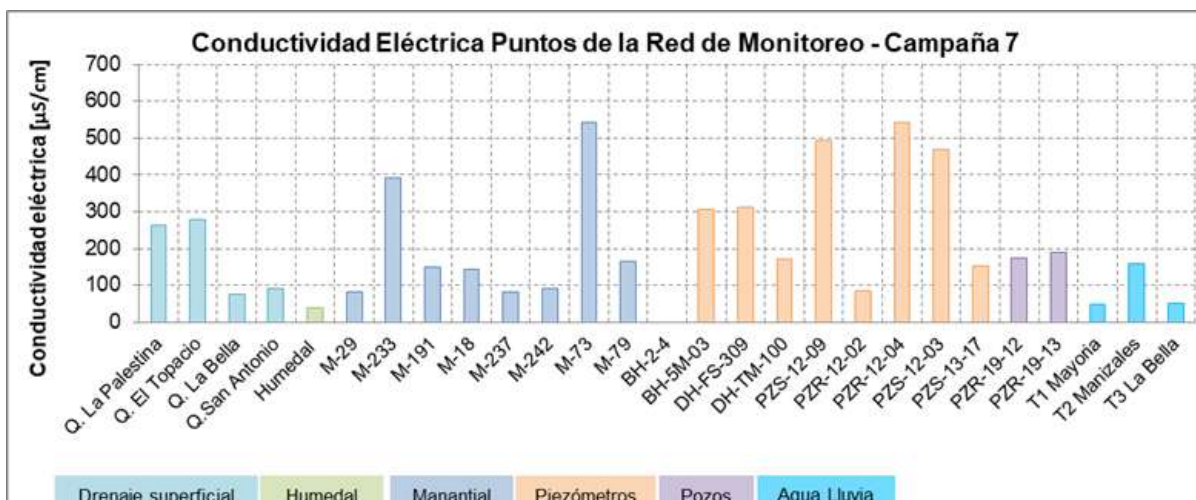


Figura 5.1.6.148 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7 Septiembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de la concentración relativa de los isótopos deuterio y oxígeno 18 se pueden observar de forma gráfica en la Figura 5.1.6.149, también es posible visualizar los diversos valores en la Tabla 5.1.6.64. Luego de visualizar los resultados es posible llegar a las siguientes conclusiones:

Para el mes de septiembre del año 2020 las aguas lluvias se encuentran levemente más enriquecidas comparadas con el resto de los puntos de la red de monitoreo.

Nuevamente se identifican dos piezómetros (PZR-19-13/ PZR-19-12) desplazados hacia la izquierda, lo que indica un leve empobrecimiento en isótopos para estos puntos.

Para el mes de septiembre, piezómetros, manantiales y drenajes superficiales comparten la misma marca isotópica, lo que concuerda con la hipótesis de que todas las fuentes de agua que se encuentran en la zona de estudio tienen el mismo origen.

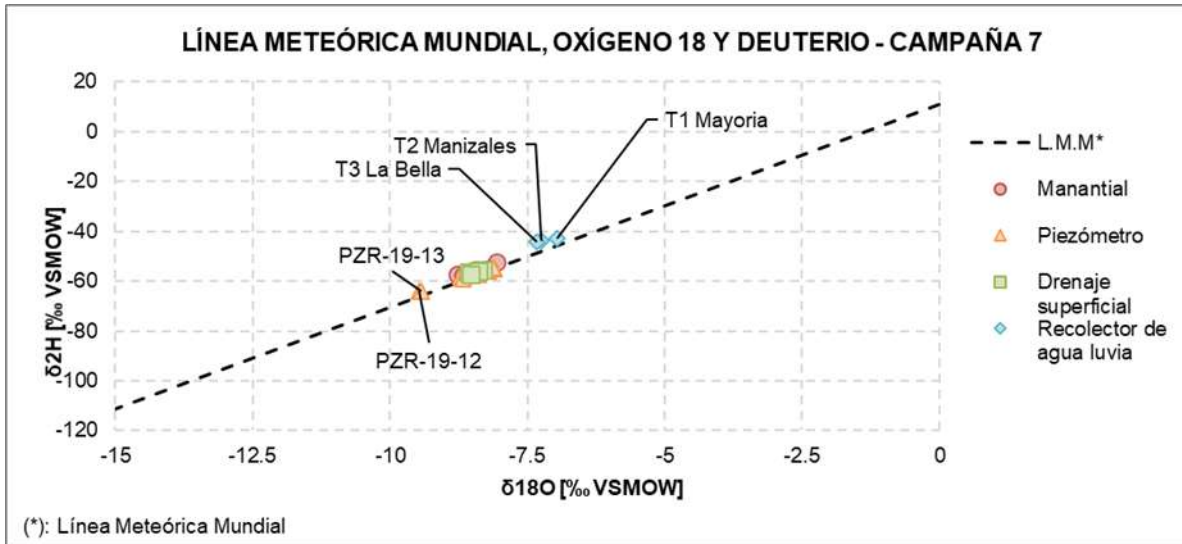


Figura 5.1.6.149 Línea meteórica mundial y composición isotópica de los puntos de la red de monitoreo campaña 7. Septiembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Tabla 5.1.6.64 Resultados de deuterio y oxígeno 18 campaña 7. Septiembre 2020

#	Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
			VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,20	-54,17
2	M-29	Manantial	-8,07	-52,29
3	M-233	Manantial	-8,78	-57,13
4	M-191	Manantial	-8,66	-57,59
5	M-18	Manantial	-8,46	-55,54
6	M-237	Manantial	-8,35	-55,87
7	M-242	Manantial	-8,26	-55,45
8	M-73	Manantial	-8,21	-55,14
9	M-79	Manantial	-8,67	-57,81
10	BH-5M-03	Piezómetro	-8,34	-55,84
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,40	-57,22
12	DH-TM-100	Piezómetro	-8,20	-56,02
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,10	-54,92
14	PZR-12-02	Pozo	-8,72	-58,35
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,12	-54,70
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,67	-58,41

#	Puntos	Tipo	$\delta 18O$	$\delta 2H$
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,67	-58,90
18	PZR-19-12	Pozo	-9,48	-63,80
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,44	-64,14
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,31	-55,52
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,58	-56,26
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,40	-55,88
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,53	-57,16
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-6,97	-42,79
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-7,24	-43,64
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-7,33	-44,09

Fuente: SHI S.A.S (2021)

III. Resultados de tritio (época de invierno)

Los resultados de tritio obtenidos en la campaña 7 son presentados en la Tabla 5.1.6.65, allí es posible observar que todos los resultados de tritio se encuentran por debajo o cercanos a 2 U.T, es decir valores menores los registros de tritio de la lluvia en Colombia (5 U.T) como quedo en evidencia en la Tabla 5.1.6.65.

Con los resultados de tritio obtenidos no es posible determinar tiempos de residencia en el medio subterráneo, ya que, no existe un enriquecimiento de tritio con respecto a la lluvia; por lo tanto, la concentración actual en aguas subterránea puede ser producto del decaimiento radioactivo o de aportes de la lluvia reciente.

Tabla 5.1.6.65 Resultados de tritio campaña 7 – época húmeda. Laboratorio Wessling

Punto	Tritio [Bq/dm3]	Tritio [TU]
Reservorio Artificial La Mayoría	0,17	1,5
Quebrada Palestina	0,16	1,4
BH-5M-03	0,16	1,4
DH-TM-100	0,15	1,3
M -29	0,15	1,3
M-73	0,12	1
M-79	0,06	0,5
M-233	0,06	0,5
PZR-12-02	0,11	0,9
PZS-12-09	0,1	0,8
PZS-13-17	0,14	1,2
PZR-19-13	0,14	1,2
T1 Mayoría	0,15	1,3
T2 Manizales	0,24	2
T3 La Bella	0,26	2,2

TU: Unidades de tritio [Bq/dm3]: becquerel por decímetro cúbico

Fuente: SHI S.A.S (2021)

h. Campaña 8 octubre (2020)

La campaña 8 fue ejecutada entre el 30 de octubre y el 3 de noviembre del año 2020, representando el agua lluvia totalizada en octubre. En cada uno de los puntos de monitoreo se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica y se recolectaron muestras para análisis de deuterio y oxígeno 18. Los puntos de monitoreo y los valores de los parámetros de campo son presentados en la Tabla 5.1.6.66.

Tabla 5.1.6.66 Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 8 – octubre 2020

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial	Reservorio Artificial	3/11/2020	7,12	45,3
M-29	Manantial	3/11/2020	7,13	272
M-233	Manantial	2/11/2020	7,16	79,8
M-191	Manantial	2/11/2020	6,87	57,1
M-18	Manantial	30/10/2020	7,35	211,2
M-237	Manantial	2/11/2020	7,18	117,7
M-242	Manantial	2/11/2020	7,2	87,7
M-73	Manantial	30/10/2020	6,67	122,3
M-79	Manantial	31/10/2020	6,76	63,7
BH-5M-03	Piezómetro	29/10/2020	6,75	228
DH-FS-309	Piezómetro	29/10/2020	6,84	209,5
DH-TM-100	Piezómetro	30/10/2020	6,45	370
PZS-12-09	Piezómetro	29/10/2020	6,6	469
PZR-12-02	Piezómetro	31/10/2020	6,64	88,4
PZR-12-04	Piezómetro	29/10/2020	6,92	515
PZS-12-03	Piezómetro	31/10/2020	6,99	365
PZS-13-17	Piezómetro	30/10/2020	6,53	69
PZR-19-12	Piezómetro	30/10/2020	6,81	181,5
PZR-19-13	Piezómetro	30/10/2020	6,63	243
Quebrada La Palestina	Quebrada	31/10/2020	6,94	109,7
Quebrada El Topacio	Quebrada	2/11/2020	7	54,7
Quebrada La Bella	Quebrada	2/11/2020	6,97	57
Quebrada San Antonio	Quebrada	31/10/2020	6,98	207,4

T1 Mayoría	Lluvia	3/11/2020	6,47	5,1
T2 Manizales	Lluvia	31/10/2020	5,4	6,88
T3 La Bella	Lluvia	1/11/2020	6,81	93,5

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros pH y conductividad eléctrica que fueron medidos en campo son presentados en la Figura 5.1.6.150 y Figura 5.1.6.151. Los valores de pH de los puntos que conforman la red de monitoreo presentan poca variabilidad, siendo Totalizador T2 Manizales el que presenta un pH más bajo, con un valor de 5,4 unidades de pH.

En cuanto a la conductividad las aguas lluvias presentan valores muy bajos de conductividad, con un punto anómalo el cual está identificado como el T3 La Bella, el cual presenta una conductividad eléctrica de 93,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$, la cual es una magnitud relativamente alta para el agua lluvia.

Los valores de conductividad eléctrica en agua superficiales presentaron un comportamiento normal, según lo observado en campañas anteriores, con la excepción del punto identificado como quebrada San Antonio el cual presentó el valor más alto entre las aguas superficiales.

Finalmente, la conductividad eléctrica de las aguas subterráneas durante la campaña 8 presentó el contraste esperado, ya que, se monitorearon piezómetros y manantiales los cuales pueden captar aguas con diferentes líneas de flujo y tiempo de residencia en el medio subterráneo.

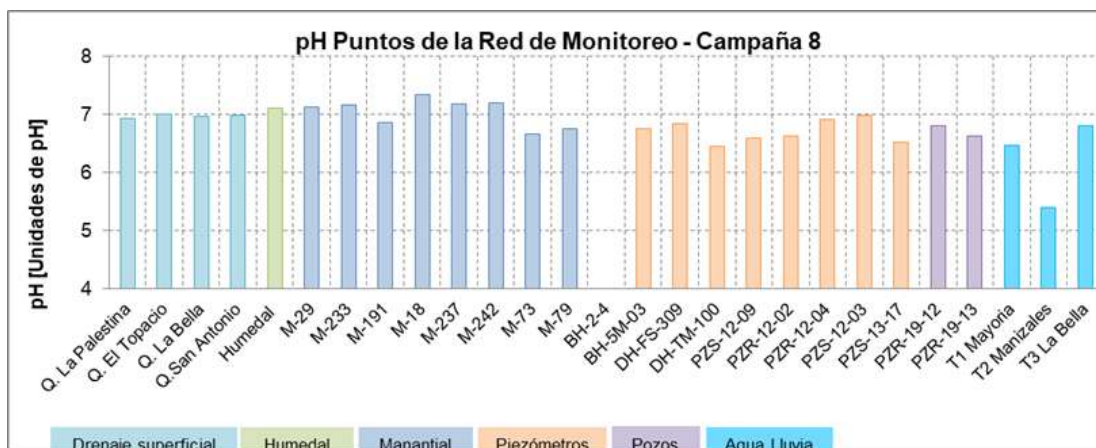


Figura 5.1.6.150 pH de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

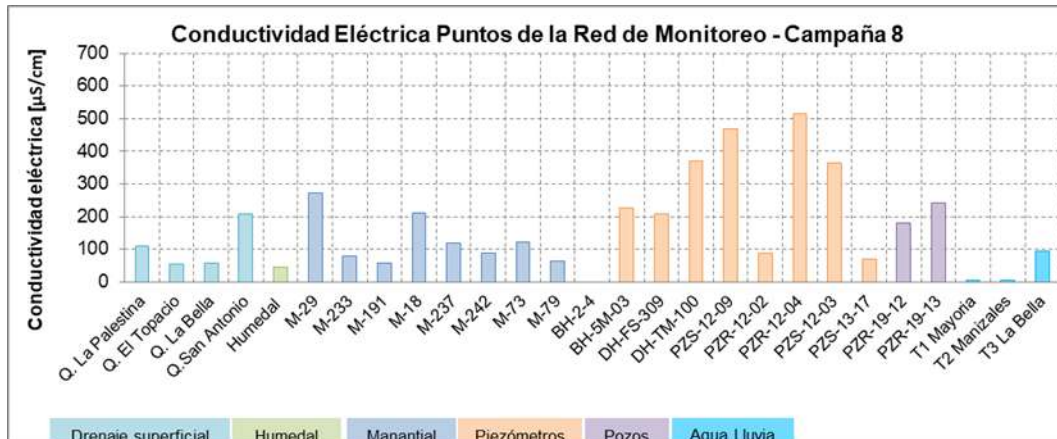


Figura 5.1.6.151 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo. Octubre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Los resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 8 son presentados en la Tabla 5.1.6.67 y de forma gráfica son presentados en la Figura 5.1.6.152 con los siguientes comentarios:

Para el mes de octubre del año 2020 las aguas lluvias se encuentran levemente más empobrecidas que la campaña anterior, ya que se presentan más lluvias, y respecto al resto de los puntos de la red de monitoreo, las muestras de lluvia tienen una marca isotópica similar a la de algunos piezómetros y manantiales.

Nuevamente se identifican los piezómetros PZR19-12 y PZR19-13 desplazados hacia la izquierda, lo que indica un leve empobrecimiento en isótopos para estos puntos.

Para el mes de octubre al igual que la campaña 7 de septiembre, los piezómetros, manantiales y drenajes superficiales comparten la misma marca isotópica, lo que concuerda con la hipótesis de que todas las fuentes de agua que se encuentran en el área de influencia tienen el mismo origen. SHI S.A.S (2021).

Tabla 5.1.6.67 Resultados de deuterio y oxígeno 18

#	Puntos	Tipo	δ18O	δ2H
			VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,05	-54,03
2	M-29	Manantial	-7,89	-53,34
3	M-233	Manantial	-8,27	-56,34
4	M-191	Manantial	-7,86	-53,63
5	M-18	Manantial	-8,72	-59,58
6	M-237	Manantial	-8,12	-53,58
7	M-242	Manantial	-8,01	-52,39
8	M-73	Manantial	-7,96	-51,92
9	M-79	Manantial	-8,25	-53,54

#	Puntos	Tipo	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
10	BH-5M-03	Piezómetro	-8,42	-54,39
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,29	-57,11
12	DH-TM-100	Piezómetro	-7,26	-51,84
13	PZS-12-09	Piezómetro	-7,58	-53,91
14	PZR-12-02	Pozo	-8,35	-58,79
15	PZR-12-04	Piezómetro	-7,72	-54,02
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,46	-58,17
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,50	-58,17
18	PZR-19-12	Pozo	-9,34	-63,98
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,43	-64,23
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,25	-55,37
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,34	-55,28
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,38	-55,41
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,06	-53,52
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-7,62	-47,62
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-7,49	-46,18
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-8,03	-52,01

Fuente: SHI S.A.S (2021)

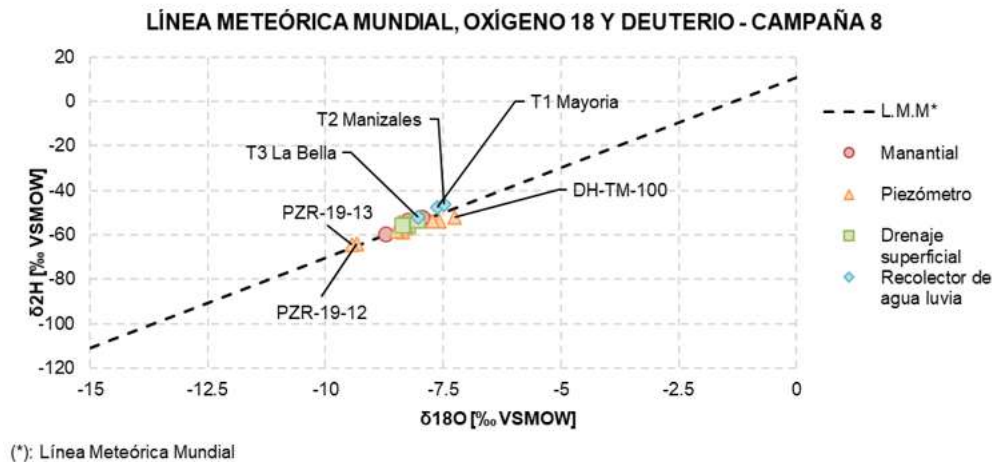


Figura 5.1.6.152 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 8. Octubre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

i. Campaña 9 noviembre (2020)

La campaña de muestreo número 9 fue ejecutada entre el 30 de noviembre y el 4 de diciembre del año 2020, representando el agua lluvia totalizada en noviembre. Los resultados de las mediciones realizadas en campo y los puntos que se visitaron se pueden observar en la Tabla 5.1.6.68.

Tabla 5.1.6.68 Puntos de monitoreo y parámetros en sitio medidos durante la campaña 9 – noviembre 2020

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial	Reservorio Artificial	4/12/2020	5,69	48
M-29	Manantial	4/12/2020	6,67	60
M-233	Manantial	4/12/2020	7,07	78
M-191	Manantial	3/12/2020	7,68	105
M-18	Manantial	1/12/2020	6,82	63
M-237	Manantial	30/11/2020	6,34	44
M-242	Manantial	4/12/2020	6,44	41
M-73	Manantial	3/12/2020	6,43	63
M-79	Manantial	2/12/2020	629	79
BH-5M-03	Piezómetro	2/12/2020	6,68	274
DH-FS-309	Piezómetro	3/12/2020	6,18	215
DH-TM-100	Piezómetro	2/12/2020	6,11	235
PZS-12-09	Piezómetro	2/12/2020	6,65	361
PZR-12-02	Piezómetro	1/12/2020	6,01	93
PZR-12-04	Piezómetro	2/12/2020	7,04	448
PZS-12-03	Piezómetro	1/12/2020	6,85	350
PZS-13-17	Piezómetro	3/12/2020	6,27	61
PZR-19-12	Piezómetro	1/12/2020	6,08	102
PZR-19-13	Piezómetro	1/12/2020	6,09	79
Quebrada La Palestina	Quebrada	2/12/2020	7,49	127
Quebrada El Topacio	Quebrada	1/12/2020	6,89	67
Quebrada La Bella	Quebrada	30/11/2020	6,45	96
Quebrada San Antonio	Quebrada	1/12/2020	6,60	56
T1 Mayoría	Agua lluvia	4/12/2020	5,19	8
T2 Manizales	Agua lluvia	2/12/2020	5,01	7
T3 La Bella	Agua lluvia	4/12/2020	6,28	19

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Durante las labores de campo se llevaron a cabo mediciones de pH y conductividad eléctrica, como se presentó previamente en la Tabla 5.1.6.68. En la Figura 5.1.6.153 y Figura 5.1.6.154 se observan por medio de un diagrama de barras los valores medidos en campo de pH y conductividad eléctrica. Los valores de pH obtenidos en los diferentes

puntos de monitoreo presentan un rango de variación de 5,01 a 7,68 U de pH, es decir que en el área de influencia se encuentran aguas ligeramente ácidas a aguas neutras.

Los valores de conductividad eléctrica presentados en la Figura 5.1.6.154 tienen un fuerte rango de variación, 7 – 448 $\mu\text{S}/\text{cm}$, esto debido a los diferentes tipos de aguas que conforman la red de monitoreo.

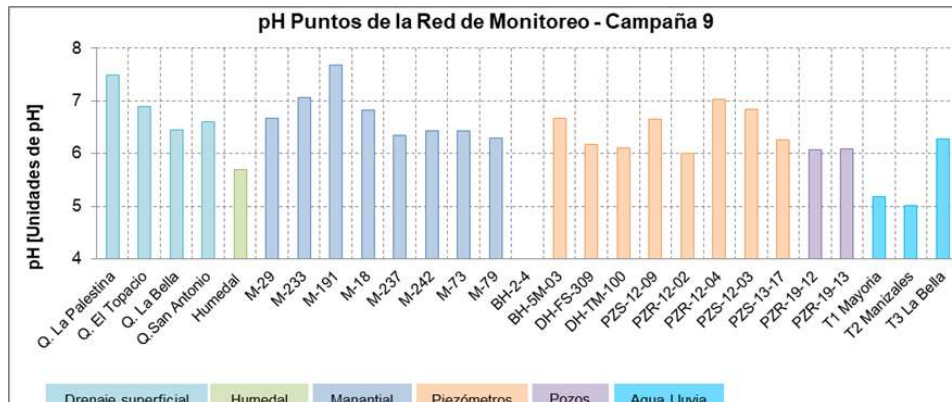


Figura 5.1.6.153 pH de los puntos de la red de monitoreo campaña 9. Noviembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

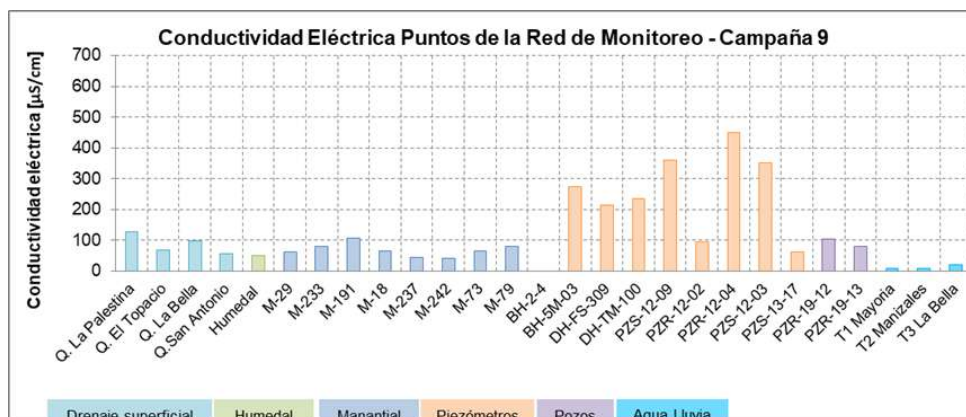


Figura 5.1.6.154 Conductividad eléctrica de los puntos de la red de monitoreo campaña 9 Noviembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.69 se presentan los resultados de deuterio y oxígeno 18, y de forma gráfica se presentan estos mismos resultados en la Figura 5.1.6.155, de la cual se pueden realizar los siguientes comentarios:

Las aguas lluvias en el mes de noviembre se encuentran empobrecidas en deuterio y oxígeno 18 con respecto al resto de los puntos que conforman la red de monitoreo y los dos meses anteriores, debido a que noviembre corresponde a un mes húmedo, por lo tanto, el empobrecimiento responde al efecto de cantidad.

La marca isotópica de fuentes de agua superficial y subterráneas son similares, por lo que se puede suponer que tienen el mismo origen, el cuales la precipitación en el área de influencia.

Tabla 5.1.6.69 Resultados de análisis de los isótopos deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo. Noviembre 2020

#	Punto	Tipo de punto	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$
			VSMOW $\pm 0,2\text{‰}$	VSMOW $\pm 0,8\text{‰}$
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-9,48	-67,91
2	M-29	Manantial	-8,41	-56,04
3	M-233	Manantial	-8,8	-58,32
4	M-191	Manantial	-9,07	-62,17
5	M-18	Manantial	-9,18	-62,95
6	M-237	Manantial	-8,37	-55,95
7	M-242	Manantial	-8,64	-58,18
8	M-73	Manantial	-10,81	-76,15
9	M-79	Manantial	-9,07	-60,13
10	BH-5M-03	Piezómetro	-9,31	-62,47
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,7	-57,11
12	DH-TM-100	Piezómetro	-7,69	-53,23
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,1	-55,02
14	PZR-12-02	Pozo	-8,74	-58,47
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,36	-54,64
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,82	-58,34
17	PZS-13-17	Piezómetro	-10,61	-72,52
18	PZR-19-12	Pozo	-9,66	-63,68
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,71	-64,23
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-9,27	-61,05
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-9,36	-62,67
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,75	-57,01
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-9,83	-69,1
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-11,62	-82,89
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-11,07	-75,46
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-11,63	-80,08

Fuente: SHI S.A.S (2021)

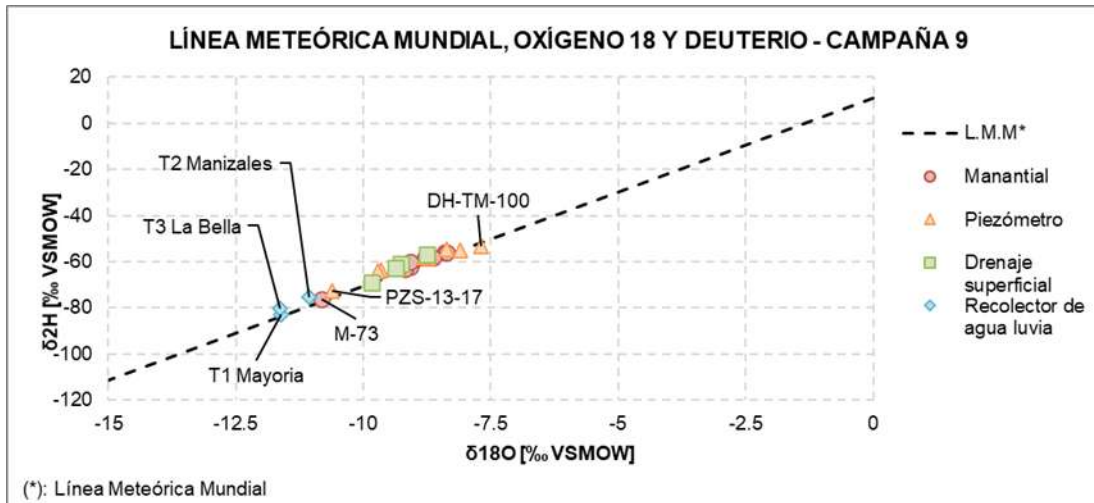


Figura 5.1.6.155 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 9. Noviembre 2020

Fuente: SHI S.A.S (2021)

j. Campaña 10 enero (2021)

La campaña de muestreo número 10 fue ejecutada entre el 12 y el 17 de enero del año 2021. Por asuntos de vacaciones de fin de año por parte del personal del proyecto, no fue posible realizarla los últimos días de diciembre de 2020. Se considera que el agua lluvia totalizada al momento de su recolección en la segunda semana de enero de 2021, es representativa de diciembre de 2020 para efectos de análisis. En cada uno de los puntos visitados se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.1.6.70. A continuación, se presenta el análisis de los resultados de las mediciones en campo y de los análisis de deuterio y oxígeno 18.

Tabla 5.1.6.70 Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 10 enero del 2021

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Quebrada La Palestina	Quebrada	16/01/2021	7,27	146,6
Quebrada El Topacio	Quebrada	15/01/2021	6,99	89,6
Quebrada La Bella	Quebrada	13/01/2021	7,68	70,2
Quebrada San Antonio	Reservorio Artificial	15/01/2021	6,80	81,6
Reservorio Artificial	Quebrada	16/01/2021	6,43	84,8
M-29	Manantial	16/01/2021	6,88	49,5
M-233	Manantial	16/01/2021	7,21	78,7
M-191	Manantial	17/01/2021	7,40	121,2

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
M-18	Manantial	15/01/2021	7,00	68,9
M-237	Manantial	13/01/2021	7,65	81,0
M-242	Manantial	16/01/2021	7,21	53,0
M-73	Manantial	13/01/2021	6,66	112,8
M-79	Manantial	14/01/2021	6,36	87,1
BH-5M-03	Piezómetro	14/01/2021	6,83	157,4
DH-FS-309	Piezómetro	17/01/2021	6,44	194,3
DH-TM-100	Piezómetro	16/01/2021	6,57	206,0
PZS-12-09	Piezómetro	14/01/2021	6,84	401,0
PZR-12-02	Piezómetro	15/01/2021	7,22	85,4
PZR-12-04	Piezómetro	14/01/2021	6,80	438,0
PZS-12-03	Piezómetro	15/01/2021	6,72	360,0
PZS-13-17	Piezómetro	14/01/2021	6,83	78,1
PZR-19-12	Piezómetro	15/01/2021	7,01	101,0
PZR-19-13	Piezómetro	15/01/2021	6,59	82,5
T1 Mayoría	Agua lluvia	16/01/2021	6,50	16,2
T2 Manizales	Agua lluvia	14/01/2021	6,06	7,1
T3 La Bella	Agua lluvia	16/01/2021	8,71	4,5

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los valores de pH y conductividad eléctrica son presentados en la Figura 5.1.6.156 y la Figura 5.1.6.157 respectivamente. Los valores de pH registrados durante la campaña 10 siguen la tendencia presentada durante el año de monitoreo, presentando aguas ligeramente ácidas a neutras.

Sin embargo, durante la campaña 10 el valor de pH del recolector de agua lluvia identificado como T3 totalizador La Bella fue bastante alto, alcanzando un valor de 8,71 Unidades de pH, lo cual no es normal en este tipo de agua. Esto se puede deber al contacto del agua con insectos. Los valores retornaron a valores normales en la siguiente campaña.

Los valores de conductividad eléctrica medidos en las distintas fuentes que conforman la red de monitoreo mostraron el contraste habitual, ya que, según el tipo de fuente, se registran valores más altos o bajos de conductividad eléctrica.

Las aguas lluvias, debido al ciclo hidrológico, presentan sólidos disueltos bajos, lo que concuerda con los valores presentados en la Figura 5.1.6.157. Los manantiales y agua superficiales presentan magnitudes de conductividad eléctrica similares, y su principal fuente para ganar iones en solución y por ende aumentar su valor de conductividad eléctrica con respecto a las aguas lluvias, son las primeras capas del suelo.

Finalmente, los registros encontrados en piezómetros son los más altos de toda la red de monitoreo, y se debe al contacto existente entre la roca y el agua, el cual genera procesos de disolución de minerales, los cuales se disocian en el agua y terminan aumentando la capacidad del agua para transportar cargas eléctricas.

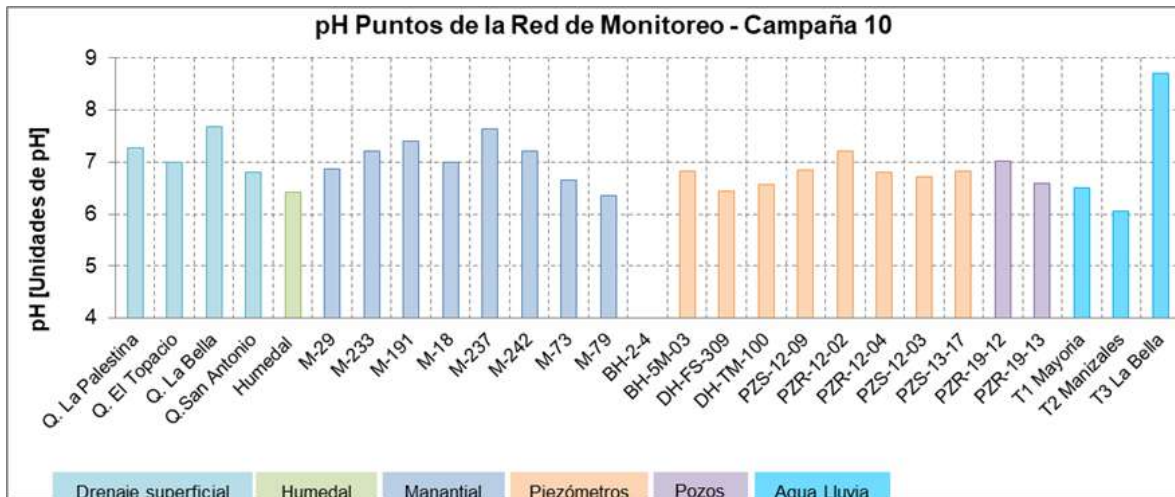


Figura 5.1.6.156 pH de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

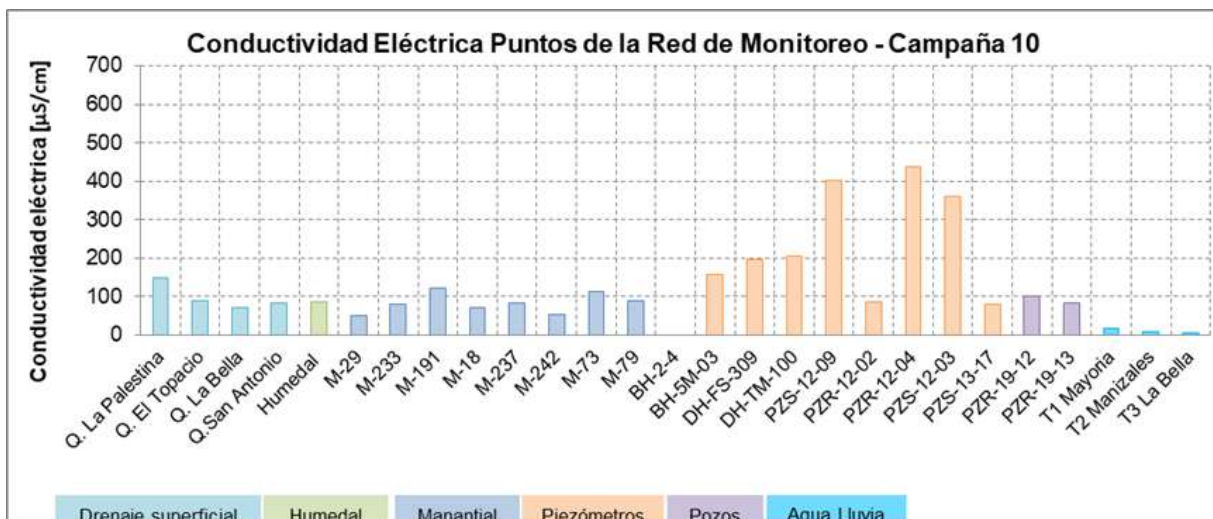


Figura 5.1.6.157 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 10. Enero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.71 y en la Figura 5.1.6.158 es posible visualizar las concentraciones relativas de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18. En la Figura 5.1.6.158 se pueden observar dos conjuntos de puntos sobre la línea meteórica, el primero de los

conjuntos está conformado por piezómetros, manantiales y quebradas. En este grupo existen dos piezómetros PZR-19-13 y PZR-19-12, que son los puntos más empobrecidos de la red.

El segundo conjunto de puntos se encuentra conformado por las aguas lluvias y se encuentra más a la derecha de línea meteórica, esto indica un enriquecimiento de las aguas lluvias en isótopos con respecto al resto de punto que conforman la red de monitoreo. Este es un comportamiento normal, ya que, debido al efecto de cantidad, las aguas lluvias sufren un enriquecimiento en los isótopos más pesados en épocas de verano, como lo son los meses de diciembre y enero. Es importante destacar que todos los puntos que fueron objeto de análisis de isótopos coinciden con la línea meteórica mundial, lo que puede ser indicativo de que el origen de estas fuentes se encuentra en la precipitación reciente.

Tabla 5.1.6.71 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 10. Enero 2021

#	Punto	Tipo de punto	$\delta^{18}O$	$\delta^{18}O$
			VSMOW $\pm$ 0,2‰	VSMOW $\pm$ 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,22	-54,51
2	M-29	Manantial	-8,27	-54,14
3	M-233	Manantial	-8,85	-56,92
4	M-191	Manantial	-8,75	-57,62
5	M-18	Manantial	-8,9	-58,87
6	M-237	Manantial	-8,3	-54,85
7	M-242	Manantial	-8,23	-54,58
8	M-73	Manantial	-7,44	-48,87
9	M-79	Manantial	-8,74	-58,75
10	BH-5M-03	Piezómetro	-8,59	-57,55
11	DH-FS-309	Piezómetro	-8,5	-56,27
12	DH-TM-100	Piezómetro	-7,51	-50,98
13	PZS-12-09	Piezómetro	-8,24	-54,7
14	PZR-12-02	Pozo	-8,71	-58,4
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,14	-54,6
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,62	-58,69
17	PZS-13-17	Piezómetro	-8,58	-58,87
18	PZR-19-12	Pozo	-9,49	-63,19
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,62	-63,84
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	-8,59	-55,49
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	-8,8	-56,06
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	-8,69	-54,87

#	Punto	Tipo de punto	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^{18}\text{O}$
			VSMOW $\pm$ 0,2‰	VSMOW $\pm$ 0,8‰
23	Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	-8,69	-57,55
24	T1 Mayoría	Recolector de agua lluvia	-4,27	-20,64
25	T2 Manizales	Recolector de agua lluvia	-5,15	-26,71
26	T3 La Bella	Recolector de agua lluvia	-4,38	-19,03

Fuente: SHI S.A.S (2021)

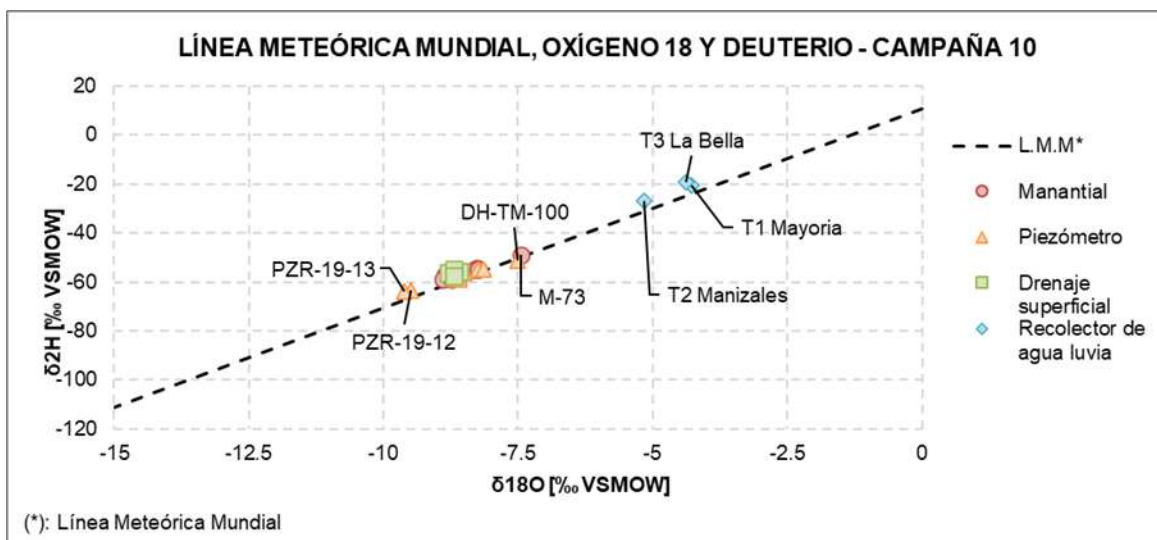


Figura 5.1.6.158 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 10. Enero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

k. Campaña 11 febrero (2021)

La campaña de muestreo número 11 fue ejecutada entre el 13 al 16 de enero del año 2021. Como se mencionó en la campaña 10, por efecto del cese de actividades en diciembre de 2020 en el proyecto, el muestreo se corrió dos semanas a partir de enero. Por tal motivo se considera para el análisis que el agua lluvia totalizada de esta campaña es representativa de enero de 2021. En cada uno de los puntos visitados se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.1.6.72.

A continuación, se presenta el análisis de los resultados de las mediciones en campo y de los análisis de deuterio y oxígeno 18. En este mes, los valores de pH de todas las muestras son cercanos al promedio (6,66 U de pH) y el valor de pH del recolector de agua lluvia identificado como T3 totalizador, que en la campaña anterior fue básico, en esta disminuyó, presentando un valor similar más normal para agua lluvia.

Tabla 5.1.6.72 Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 11 febrero del 2021

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	11/2/2021	6,12	71,1
M-29	Manantial	12/2/2021	6,86	52,7
M-233	Manantial	11/2/2021	6,82	81,5
M-191	Manantial	12/2/2021	7,48	137,5
M-18	Manantial	9/2/2021	6,69	65,3
M-237	Manantial	11/2/2021	6,63	80,9
M-242	Manantial	10/2/2021	6,72	55,5
M-73	Manantial	10/2/2021	6,58	136,8
M-79	Manantial	11/2/2021	6,63	78,3
BH-5M-03	Manantial	11/2/2021	6,26	135,4
DH-FS-309	Manantial	12/2/2021	6,54	210,1
DH-TM-100	Manantial	9/2/2021	6,35	173,3
PZS-12-09	Manantial	9/2/2021	6,27	383,0
PZR-12-02	Piezómetro	10/2/2021	6,2	91,9
PZR-12-04	Piezómetro	11/2/2021	6,66	453,0
PZS-12-03	Piezómetro	10/2/2021	6,82	384,0
PZS-13-17	Piezómetro	12/2/2021	6,57	75,5
PZR-19-12	Piezómetro	9/2/2021	6,49	91,5
PZR-19-13	Piezómetro	9/2/2021	6,47	79,2
Quebrada Palestina	Piezómetro	9/2/2021	7,41	137,7
Quebrada Topacio	Piezómetro	9/2/2021	6,73	73,5
Quebrada Bella	Piezómetro	11/2/2021	7,06	81,4
Quebrada San Antonio	Piezómetro	10/2/2021	6,44	95,0
T1 Mayoría	Agua lluvia	11/2/2021	6,67	126,0
T2 Manizales	Agua lluvia	12/2/2021	6,86	34,8
T3 La Bella	Agua lluvia	11/2/2021	6,83	21,26

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

Los valores de pH y conductividad eléctrica son presentados en la Figura 5.1.6.159 y en la Figura 5.1.6.160 respectivamente. Los valores de pH registrados durante la campaña 11 muestran aguas ligeramente ácidas a neutras. Los valores de conductividad eléctrica más altos se registran en los piezómetros, comportamiento ya observado en anteriores campañas de campo.

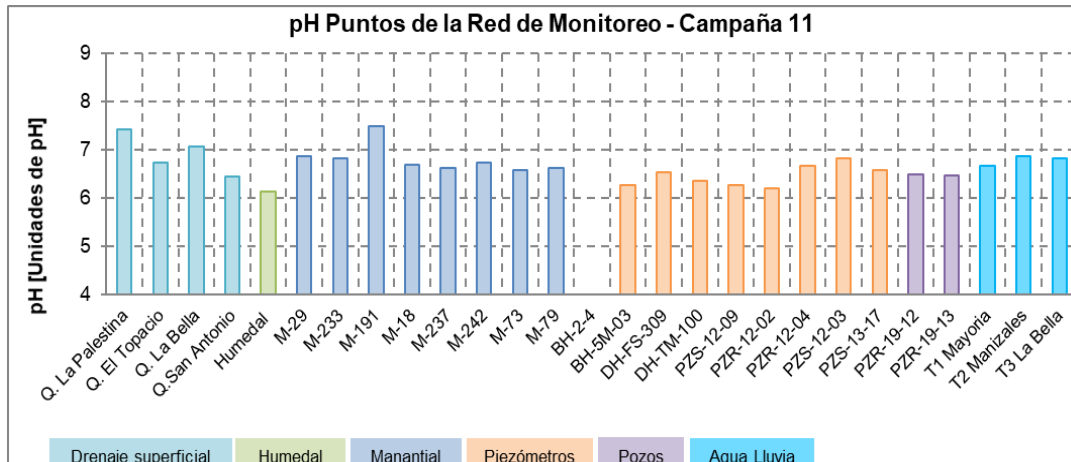


Figura 5.1.6.159 pH de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

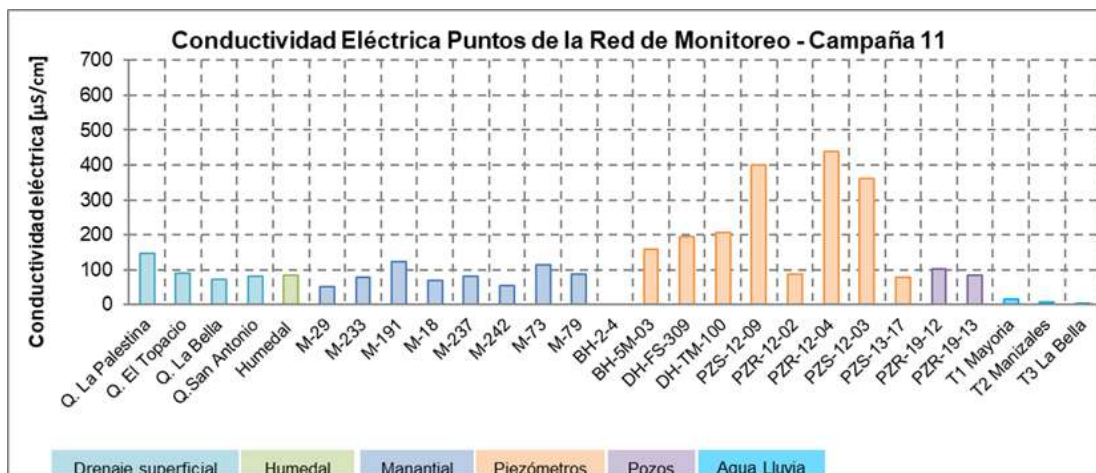


Figura 5.1.6.160 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 11. Febrero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.73 y en la Figura 5.1.6.161 es posible visualizar las concentraciones relativas de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18. En la Figura 5.1.6.161 se pueden observar dos conjuntos de puntos sobre la línea meteórica, el primero de los conjuntos está conformado por piezómetros, manantiales y quebradas, los cuales se encuentran empobrecidos con respecto a la marca isotópica de los tres recolectores de

agua lluvia, la cual para este mes se encuentra más enriquecida respecto a los dos últimos meses, esto tiene que ver porque en el mes de enero y febrero las precipitaciones fueron menores, incluso se evidenció en el volumen de recolección de muestras de lluvia de este mes.

Tabla 5.1.6.73 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 11. febrero 2021

#	Punto	Tipo de punto	δ18O	δ18O
			VSMOW ± 0,2‰	VSMOW ± 0,8‰
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	-8,54	-57,95
2	M-29	Manantial	-8,16	-54,70
3	M-233	Manantial	-8,78	-57,05
4	M-191	Manantial	-8,48	-57,42
5	M-18	Manantial	-8,69	-59,22
6	M-237	Manantial	-8,27	-55,08
7	M-242	Manantial	-8,20	-55,50
8	M-73	Manantial	-7,85	-53,48
9	M-79	Manantial	-8,62	-59,31
10	BH-5M-03	Manantial	-8,64	-58,51
11	DH-FS-309	Manantial	-8,4	-56,00
12	DH-TM-100	Manantial	-8,21	-55,22
13	PZS-12-09	Manantial	-8,2	-55,44
14	PZR-12-02	Piezómetro	-8,76	-58,26
15	PZR-12-04	Piezómetro	-8,26	-54,57
16	PZS-12-03	Piezómetro	-8,57	-57,8
17	PZS-13-17	Piezómetro	-9,01	-60,34
18	PZR-19-12	Piezómetro	-9,46	-63,59
19	PZR-19-13	Piezómetro	-9,46	-64,29
20	Quebrada Palestina	Piezómetro	-8,35	-56,02
21	Quebrada Topacio	Piezómetro	-8,43	-56,84
22	Quebrada Bella	Piezómetro	-8,16	-55,73
23	Quebrada San Antonio	Piezómetro	-8,36	-57,63
24	T1 Mayoría	Agua lluvia	-1,05	0,34
25	T2 Manizales	Agua lluvia	-1,39	1,13
26	T3 La Bella	Agua lluvia	-1	1,59

Fuente: SHI S.A.S (2021)

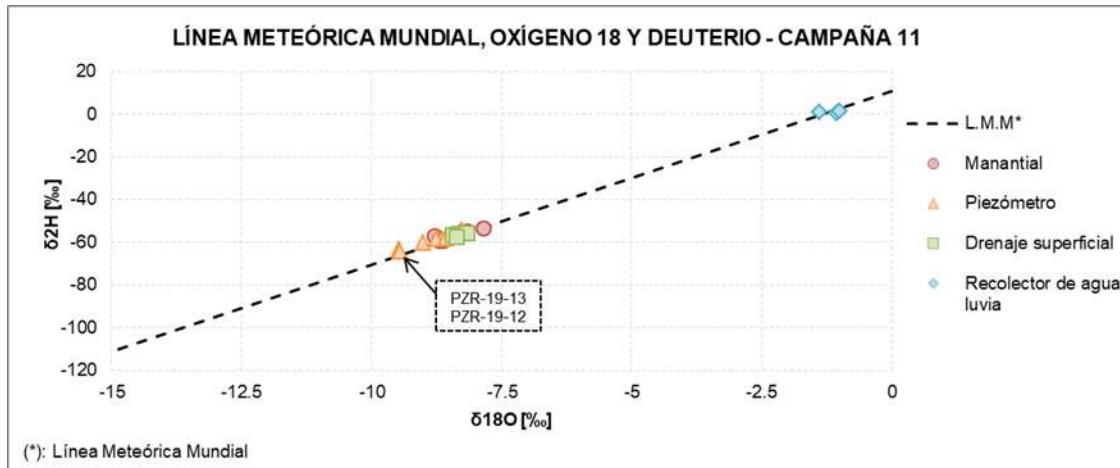


Figura 5.1.6.161 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 11. Febrero 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Campaña 12 marzo (2021)

La campaña de muestreo número 12 fue ejecutada entre el 08 y 13 de marzo del año 2021. Por el mismo motivo mencionado en las dos campañas anteriores, el agua lluvia totalizada de esta campaña es representativa de febrero de 2021. En cada uno de los puntos visitados se realizaron mediciones de pH y conductividad eléctrica, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.1.6.74. A continuación, se presenta el análisis de los resultados de las mediciones en campo y de los análisis de deuterio y oxígeno 18.

Tabla 5.1.6.74. Puntos de muestreo y resultados de medición en campo – campaña 12 marzo del 2021

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	8/3/2021	6,59	42,8
M-29	Manantial	10/3/2021	7,26	48,6
M-233	Manantial	12/3/2021	7,67	96,9
M-191	Manantial	12/3/2021	7,73	110,1
M-18	Manantial	9/3/2021	7,07	54,7
M-237	Manantial	12/3/2021	7,45	68,9
M-242	Manantial	12/3/2021	6,92	43,2
M-73	Manantial	9/3/2021	6,97	77,7
M-79	Manantial	11/3/2021	6,86	77,0
BH-5M-03	Piezómetro	11/3/2021	6,81	177,4
DH-FS-309	Piezómetro	9/3/2021	6,27	195,2
DH-TM-100	Piezómetro	9/3/2021	6,31	190,9

Nombre del punto	Tipo de punto	Fecha	pH [Unidades de pH]	Conductividad eléctrica [μ/cm]
PZS-12-09	Piezómetro	10/3/2021	6,71	393,0
PZR-12-02	Piezómetro	11/3/2021	6,51	81,6
PZR-12-04	Piezómetro	10/3/2021	7,07	461,0
PZS-12-03	Piezómetro	11/3/2021	6,96	339,0
PZS-13-17	Piezómetro	10/3/2021	6,43	69,9
PZR-19-12	Piezómetro	9/3/2021	6,73	92,2
PZR-19-13	Piezómetro	9/3/2021	6,38	80,2
Quebrada Palestina	Quebrada	9/3/2021	7,59	121,9
Quebrada Topacio	Quebrada	9/3/2021	6,8	50,7
Quebrada Bella	Quebrada	12/3/2021	7,43	66,0
Quebrada San Antonio	Quebrada	11/3/2021	7,09	78,3
T1 Mayoría	Agua lluvia	8/3/2021	5,37	11,99
T2 Manizales	Agua lluvia	11/3/2021	7,07	8,28
T3 La Bella	Agua lluvia	10/3/2021	5,69	6,35

Fuente: SHI S.A.S (2021)

I. Análisis de parámetros de campo

En la Figura 5.1.6.162 y Figura 5.1.6.163 se presentan los resultados de parámetros de campo de la campaña de muestreo número 12, allí es posible observar comportamientos de pH y conductividad eléctrica similares a los observados en las campañas anteriores.

El pH presentó un rango de variación de [5,37, 7,73 U.pH], es decir que se encontraron características del agua de ligeramente ácidas a neutras. Por otro lado, en toda la red de monitoreo se encontró un valor máximo de conductividad eléctrica de 461 μS/cm, el cual corresponde a un piezómetro, y el valor mínimo medido fue de 6,35 μS/cm, cuyo valor es asociado a un punto de agua lluvia.

En la Figura es posible notar que los mayores valores de conductividad eléctrica se encuentran relacionados a puntos de monitoreo de agua subterránea, específicamente a piezómetros, es importante mencionar que los piezómetros son instrumentos de monitoreo de agua subterráneas a profundidad, por lo que logran captar aguas que tienen contacto directo con la roca lo que aumenta su conductividad eléctrica.

Por otro lado, los manantiales, que también son puntos de agua subterránea, generalmente corresponden a puntos de salida de agua del sistema subterráneo cuyo tiempo de residencia es corto y las profundidades de estos flujos son someros, por tal razón presentan menores valores de conductividad eléctrica, como es posible notar en la Figura 5.1.6.163.

Finalmente, las conductividades eléctricas que presentan los puntos de agua lluvia son normales para este tipo de puntos y proporcionan confiabilidad a las muestras recolectadas, ya que indica que no fueron alteradas por algún tipo sólidos o por personas ajenas al proyecto.

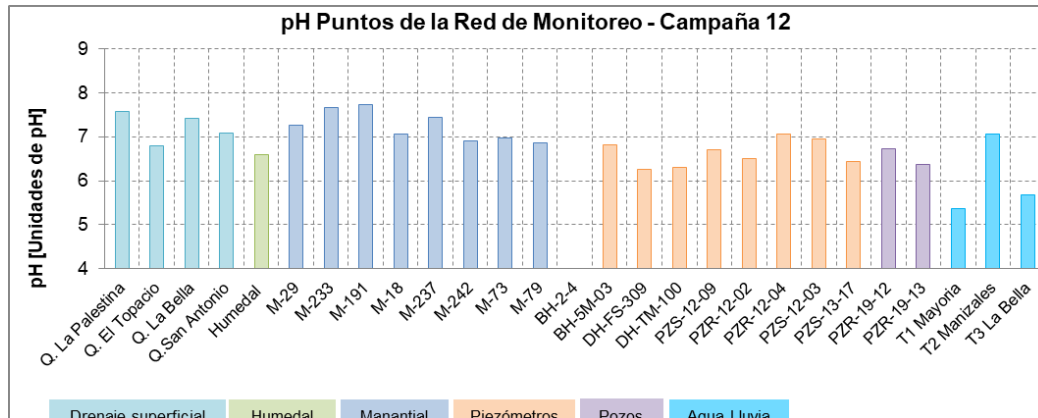


Figura 5.1.6.162 pH de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

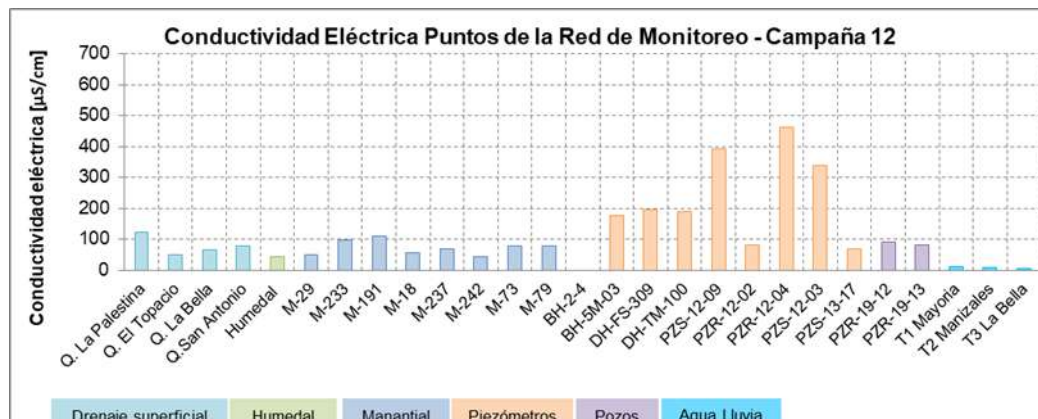


Figura 5.1.6.163 Conductividad eléctrica de los puntos de monitoreo campaña 12. Marzo 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

En la Tabla 5.1.6.75 es posible visualizar las concentraciones relativas de los isótopos ambientales deuterio y oxígeno 18. En la Figura 5.1.6.164 se pueden observar dos conjuntos de puntos sobre la línea meteórica, el primero de los conjuntos está conformado por piezómetros, manantiales y quebradas, y el segundo conjunto de puntos está conformado por los puntos de aguas lluvias, los cuales se encuentran más enriquecidos que el resto de los puntos que conforman la red de monitoreo. De los resultados obtenidos es importante destacar que:

Los puntos de agua lluvia en el mes de marzo se encuentran más enriquecidos que el resto de los puntos de la red de monitoreo, aunque fue un mes lluvioso. Este incremento podría asociarse a un comportamiento similar al de continentalidad, propiciado por un mayor transporte de humedad proveniente del mar, que genera una mayor concentración de isótopos estables, esto es posible dadas las condiciones macro climáticas favorables para

que estos flujos de advección de aire húmedo provenientes del mar incrementen, dado que el año 2020-2021 es oficialmente un año La Niña moderada (NOAA, 2021), lo cual fortalece los vientos alisios del este, que transportan humedad desde el océano Atlántico hasta la parte continental de Suramérica.

Es importante recordar que la concentración relativa de isótopos ambientales responde inmediatamente a la cantidad de precipitación en una zona determinada. Por otro lado, la concentración de isótopos en las aguas superficiales y principalmente la concentración en las aguas subterráneas corresponde a una ponderación de las lluvias anuales, debido al tiempo de tránsito y almacenamiento en el medio natural, luego de que el agua lluvia cae en la superficie.

Tabla 5.1.6.75 Resultados de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de la red de monitoreo – campaña 12. marzo 2021

#	Punto	Tipo de punto	Fecha	$\delta^{18}O [‰]$	$\delta^2H [‰]$
				VSMOW $\pm 0,2‰$	VSMOW $\pm 0,8‰$
1	Reservorio Artificial La Mayoría	Reservorio Artificial	8/3/2021	-5,83	-36,98
2	M-29	Manantial	10/3/2021	-7,58	-46,23
3	M-233	Manantial	12/3/2021	-8,56	-55,12
4	M-191	Manantial	12/3/2021	-7,86	-52,11
5	M-18	Manantial	9/3/2021	-7,44	-46,58
6	M-237	Manantial	12/3/2021	-7,93	-49,40
7	M-242	Manantial	12/3/2021	-7,90	-49,17
8	M-73	Manantial	9/3/2021	-6,26	-36,35
9	M-79	Manantial	11/3/2021	-8,94	-58,04
10	BH-5M-03	Piezómetro	11/3/2021	-7,94	-50,78
11	DH-FS-309	Piezómetro	9/3/2021	-8,39	-53,14
12	DH-TM-100	Piezómetro	9/3/2021	-5,73	-32,46
13	PZS-12-09	Piezómetro	10/3/2021	-7,90	-52,94
14	PZR-12-02	Piezómetro	11/3/2021	-8,62	-58,44
15	PZR-12-04	Piezómetro	10/3/2021	-7,83	-54,29
16	PZS-12-03	Piezómetro	11/3/2021	-7,05	-46,41
17	PZS-13-17	Piezómetro	10/3/2021	-8,41	-58,13
18	PZR-19-12	Piezómetro	9/3/2021	-9,16	-62,78
19	PZR-19-13	Piezómetro	9/3/2021	-9,13	-63,40
20	Quebrada Palestina	Drenaje superficial	9/3/2021	-7,05	-46,61
21	Quebrada Topacio	Drenaje superficial	9/3/2021	-6,14	-37,15
22	Quebrada Bella	Drenaje superficial	12/3/2021	-7,35	-46,44
23	Q Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	11/3/2021	-8,00	-51,72
24	T1 Mayoría	Agua lluvia	8/3/2021	-3,33	-10,89
25	T2 Manizales	Agua lluvia	11/3/2021	-3,29	-9,88
26	T3 La Bella	Agua lluvia	10/3/2021	-3,15	-9,04

Fuente: SHI S.A.S (2021)

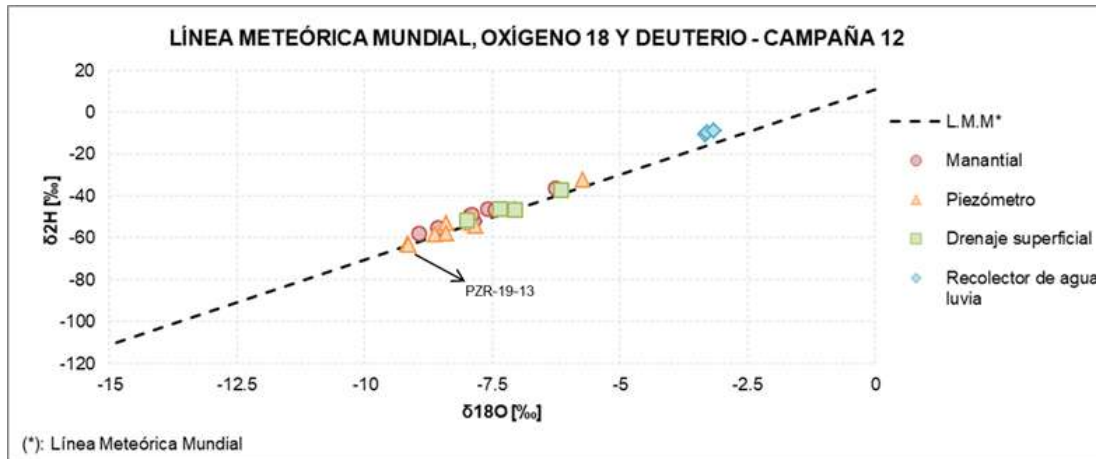


Figura 5.1.6.164 Línea meteórica mundial y resultados de deuterio y oxígeno 18 de la campaña 12. Marzo 2021

Fuente: SHI S.A.S (2021)

III. Resultados de Tritio (época de verano)

Los resultados de tritio obtenidos en la campaña 12 son presentados en la Tabla 5.1.6.76, allí es posible observar que todos los resultados de tritio se encuentran por debajo o cercanos a 2 U.T, es decir valores menores a los registros de tritio de la lluvia en Colombia (2,3 U.T) como quedo en evidencia en la Figura 5.1.6.130.

Tabla 5.1.6.76 Resultados de tritio campaña 7 – época transición seca-húmeda. Laboratorio Wessling

Punto	Tritio [Bq/dm3]	Tritio [TU]
Reservorio Artificial La Mayoría	0,19	1,6
Quebrada Palestina	0,18	1,5
BH-5M-03	0,17	1,4
DH-TM-100	0,15	1,3
M -29	0,17	1,4
M-73	0,22	1,8
M-79	0,14	1,2
M-233	0,13	1,1
PZR-12-02	0,19	1,6
PZS-12-09	0,12	1,0
PZS-13-17	0,17	1,4
PZR-19-13	0,08	0,7
T1 Mayoría	0,18	1,5
T2 Manizales	0,18	1,5
T3 La Bella	0,19	1,8

TU: Unidades de tritio [Bq/dm3]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2021)

E. Análisis global de los resultados de deuterio y oxígeno de las campañas 2020 y 2021

a. Variación temporal de los isótopos de agua lluvia

En cada una de las campañas de muestreo de isótopos ambientales, se tomaron muestras de agua lluvia en 3 recolectores (totalizadores), los cuales realizan una integración de todos los eventos de precipitación durante un mes. Estos tres recolectores se ubicaron en tres alturas distintas, como se puede observar en la Tabla 5.1.6.77, con el propósito de caracterizar la composición isotópica el agua lluvia en el gradiente altitudinal del área de influencia.

Tabla 5.1.6.77 Ubicación y cota de los recolectores de agua lluvia

Totalizador	Sitio	Este	Norte	Cota
1	La Mayoría (Oficinas de Gramalote)	4.789.134,00	2.278.266,00	836,00
2	Manizales (Cerca de Cristales)	4.789.432,00	2.275.309,00	1.260,00
3	La Bella (lado oeste de la zona subiendo hacia San Roque)	4.782.560,00	2.277.999,00	1.301,00

Fuente: SHI S.A.S (2021)

En cada una de las campañas de muestreo de isótopos ambientales, se realizó la medición del volumen de agua recolectado en el recipiente. Este volumen es un indicador de la intensidad de la precipitación durante el mes de integración de la muestra, la variación de estos volúmenes durante el periodo de caracterización se presenta en la Figura 5.1.6.165.

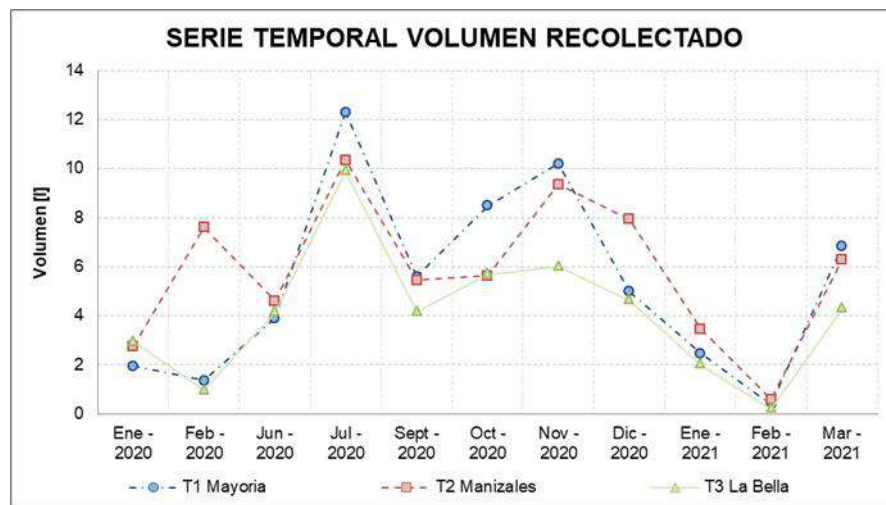


Figura 5.1.6.165 Variación temporal del volumen registrado en los recolectores de agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

La Figura 5.1.6.166 muestra, en cierta medida, el comportamiento de la precipitación en el área de influencia del proyecto Gramalote, allí se puede observar un fuerte periodo seco, el cual comprende el periodo enero – febrero.

Las gráficas de la Precipitación media multianual para las estaciones de precipitación del IDEAM, San Roque y Granja Experimental San José del Nus, muestran un ciclo bimodal con un efecto de veranillo en junio-agosto el cual se asemeja ligeramente al comportamiento de los volúmenes de agua recolectada en los totalizadores y es consecuente con la variación estacional de la concentración de oxígeno 18 y deuterio en cuanto al efecto de cantidad, donde en enero, febrero y marzo, que son meses secos se presenta un enriquecimiento del deuterio y oxígeno 18 de la lluvia, mientras que en el resto de meses donde hay mayores precipitaciones, hay empobrecimiento de los isótopos ambientales en los tres totalizadores (Figura 5.1.6.167).

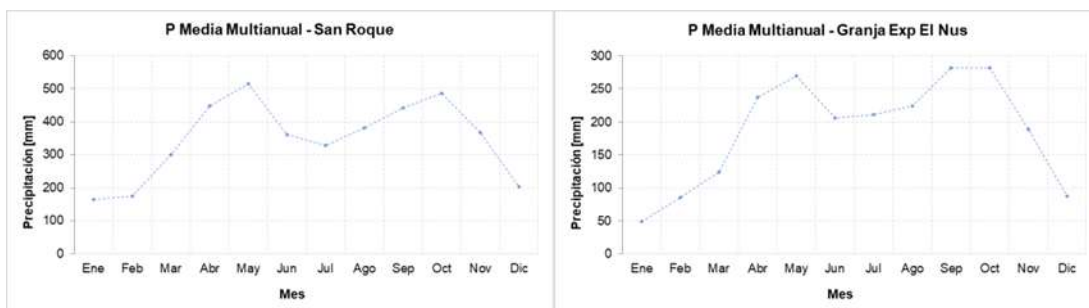


Figura 5.1.6.166 Precipitación media multianual para la zona de estudio

Fuente: SHI S.A.S (2021)

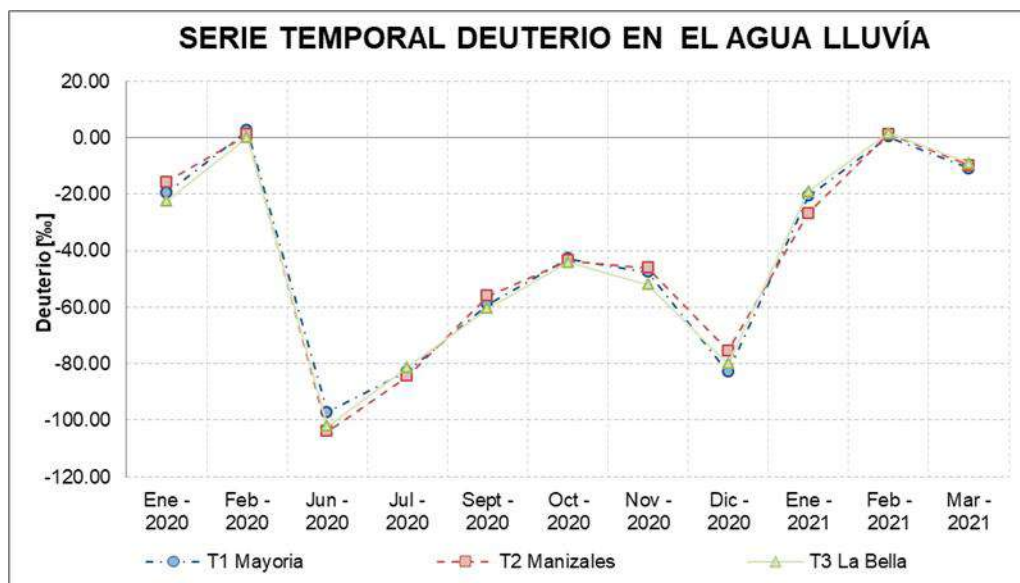


Figura 5.1.6.167 Variación temporal de la concentración de deuterio en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Con los resultados de deuterio y oxígeno 18 de cada uno de los muestreos de agua lluvia realizada en los totalizadores, se calculó el exceso de deuterio. La evolución temporal del exceso de deuterio en el agua lluvia se puede observar en la Figura 5.1.6.168, quedando como conclusión que existe poca variación entre totalizadores y poca variación temporal.

El exceso de deuterio es un indicador de la calidad analítica de los datos y de los procesos meteóricos y de reciclaje en el agua lluvia. En los 12 registros para los 3 totalizadores no se evidencian excesos por debajo del 7%, lo que indica que las muestras no sufrieron evaporación durante la toma, así mismo se evidencia para las campañas 10 y 12 (enero - marzo 2021) y 6- 7 (octubre-noviembre de 2020) un exceso por encima del 13%, que indica procesos de reciclaje en la lluvia. El resto de las campañas evidencian procesos meteóricos normales.

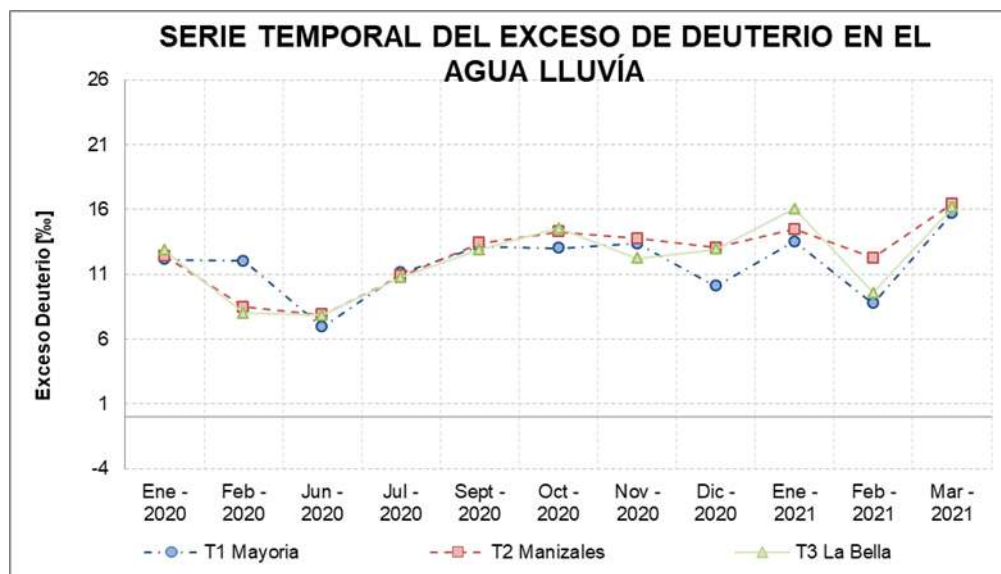


Figura 5.1.6.168 Evolución temporal del exceso de deuterio en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

b. Isotopos ambientales en el agua lluvia en comparación con la línea meteórica mundial y línea meteórica local

La Agencia Internacional de Energía Atómica de Viena (IAEA) empezó a operar una red de monitoreo mundial en el agua lluvia en el año 1961, para la medición de los isótopos ambientales, deuterio y oxígeno 18, y del isótopo radioactivo tritio, con una periodicidad mensual en 122 estaciones, la red de monitoreo de IAEA, la cual en 1980 se redujo a 80 estaciones oficiales (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981).

Las cantidades de $\delta^{18}O$ y δ^2H de cualquier muestra de agua de lluvia se relacionan por una línea llamada línea meteórica mundial, la cual fue construida con datos de las 80 estaciones de precipitación para medición de isótopos ambientales de la IAEA.

A continuación en la Figura 5.1.6.169 se presentan los resultados obtenidos en la caracterización anual que se realizó en las agua lluvias de la zona de estudio de isotopos ambientales, allí se observa concordancia de los resultados con la línea meteórica mundial, por lo que se descarta alteración de las muestras recolectadas por evaporación, además

las relaciones isotópicas relativas presentan un amplio rango de variación, debido a los cambios en la magnitud de la precipitación entre los meses de monitoreo. SHI S.A.S (2021).

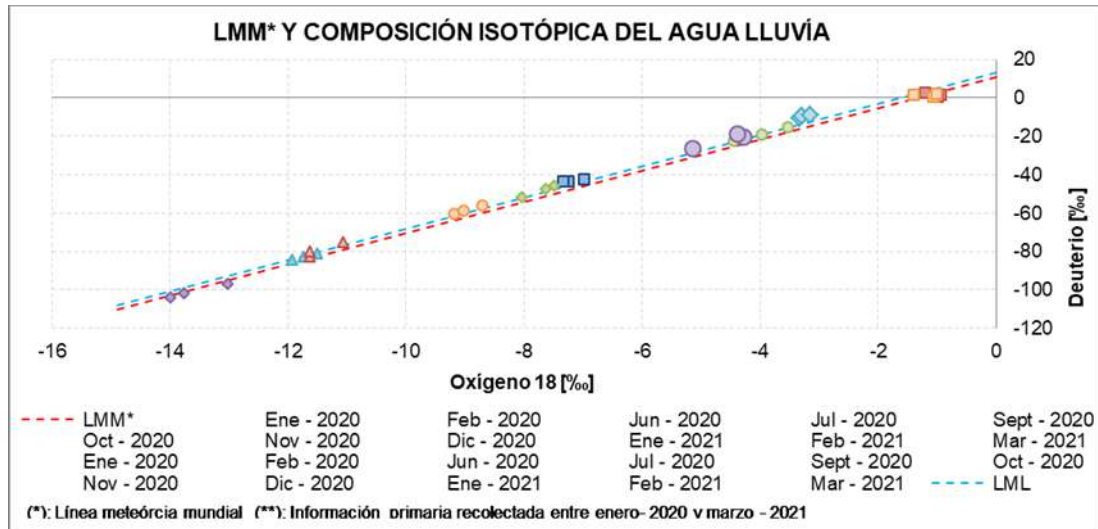


Figura 5.1.6.169 Línea meteórica mundial, local y resultados de isótopos ambientales en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

La línea meteórica local establece la relación entre el deuterio y el oxígeno 18 en la precipitación de una estación o un conjunto de estaciones, ubicadas en una zona específica. La línea meteórica local establece el comportamiento de los isótopos en la precipitación de la zona en particular (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981).

Es importante mencionar que la línea meteórica local, en muchas ocasiones, diferirá de la LMM, ya que existen procesos propios de cada zona que influencia el comportamiento de la precipitación, lo que se ve reflejado en enriquecimientos o empobrecimientos relativos, producto de veranos o lluvias locales (Velez O. & Rhenals G., 2008).

Para realizar la correlación de los datos y así obtener la ecuación de la línea meteórica local se realizó un ajuste lineal a los resultados de composición isotópica relativa de deuterio y oxígeno 18 en las aguas lluvias de la zona de estudio, utilizando el método de mínimos cuadrados, en la Tabla 5.1.6.78 se presenta la pendiente y el intercepto de la línea meteórica local, obtenidos, en la Figura 5.1.6.170 se puede observar la línea meteórica local.

La pendiente obtenida de la línea meteórica local es muy similar a la pendiente de la línea meteórica mundial, sin embargo, el intercepto difiere, situación que representa procesos locales que afectan la precipitación en la zona de estudio.

Tabla 5.1.6.78 Parámetros del ajuste lineal de la línea meteórica local

Parámetro	Valor
a (pendiente)	8,14
b (intercepto)	13,15
R^2	0,994

Fuente: SHI S.A.S (2021)

c. Isótopos ambientales en agua superficiales

La red de monitoreo de isótopos ambientales cuenta con cinco puntos de agua superficial, Quebrada La Bella, Quebrada El Topacio, Quebrada San Antonio, Quebrada Palestina y El Reservorio Artificial La Mayoría. Durante un año, al igual que en el resto de los puntos, se realizó una campaña de muestreo mensual para determinar la composición de deuterio y oxígeno 18 en estos puntos (Figura 5.1.6.170).

Los resultados obtenidos durante todo el año se pueden observar en la Figura 5.1.6.170, donde es posible notar que todos los puntos de agua superficial coinciden con la línea meteórica mundial, por lo que se descarta la existencia de procesos de evaporación en las aguas superficiales de la zona de estudio, incluyendo las aguas del Reservorio Artificial.

Existen cuatro puntos, que corresponden a cuatro muestras, que se ubican más hacia la derecha de la línea meteórica con respecto al resto de los puntos, estas muestras corresponden a cuatro de los cinco puntos de agua superficial de la última campaña de muestreo.

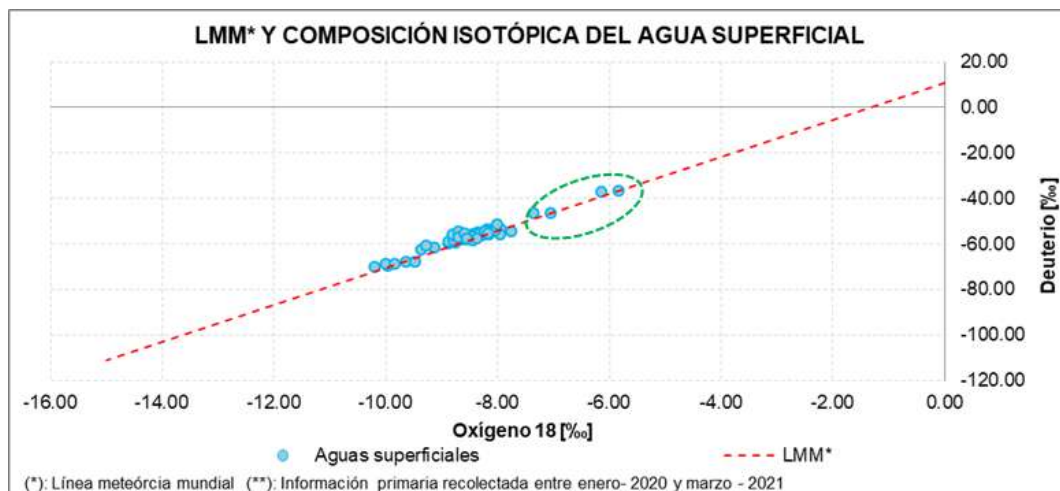


Figura 5.1.6.170 Línea meteórica mundial y composición isotópica del agua superficial

Fuente: SHI S.A.S (2021)

El comportamiento temporal del deuterio y del oxígeno 18 en las aguas superficiales y aguas lluvias se presenta en la Figura 5.1.6.171, en general se observa poca variación en la composición de isótopos ambientales, a excepción de algunas campañas en las que

existen variaciones de deuterio, lo que es normal debido a la baja masa molecular de este isótopo.

Como se había mencionado previamente, existe un enriquecimiento general de isótopos en las muestras de agua lluvia en la última campaña de monitoreo, que corresponde al mes de febrero del año 2021, esto podría estar relacionado con la fuerte temporada de lluvias que ha afectado a Colombia porque este año se presenta el fenómeno ENSO fase fría La Niña (moderada), lo que provoca que lleguen aguas enriquecidas desde el atlántico que pueden enriquecer las agua lluvias y a la vez las aguas superficiales.

Al comparar las series temporales de isótopos, deuterio y oxígeno 18, en agua lluvias y aguas superficiales, se observa una relación directa, ya que en los meses donde existen mayores empobrecimientos en el agua lluvia, se observa pequeños empobrecimientos en los isótopos del agua superficial, los cuales son más evidentes en el deuterio debido a su baja masa molecular, como se mencionó antes. Lo anterior deja manifiesto una relación directa entre el agua lluvia y el agua superficial.

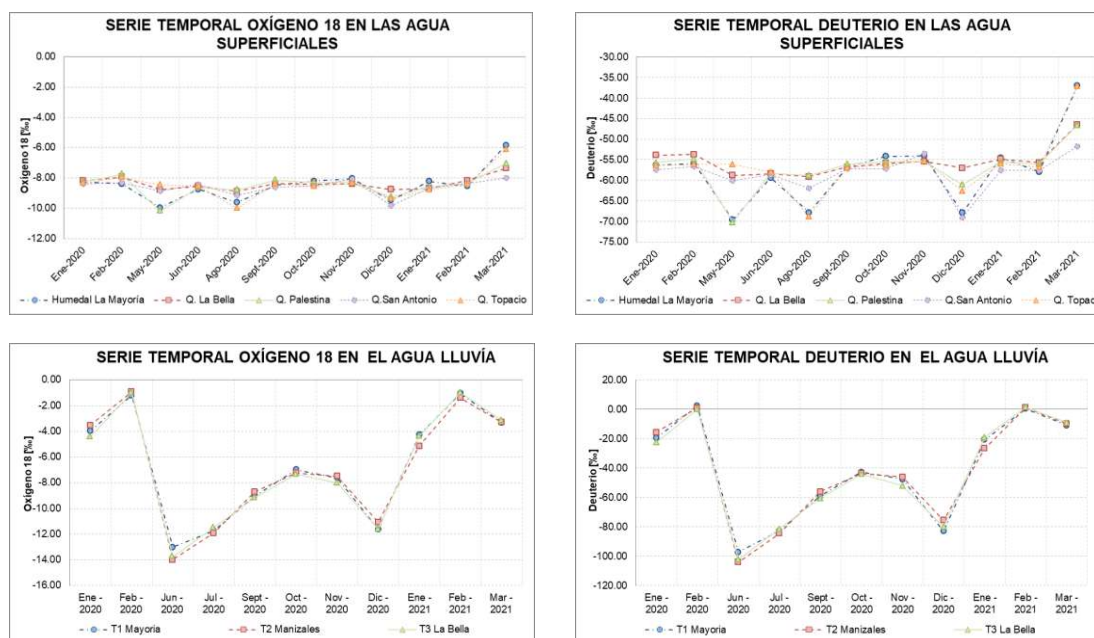


Figura 5.1.6.171 Evolución temporal del oxígeno 18 en las aguas superficiales y lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

d. Isotopos ambientales en las aguas subterráneas

En la Figura 5.1.6.172 se presenta la línea meteórica mundial y los resultados de deuterio y oxígeno 18 obtenidos en los puntos de agua subterránea. Según se observa en la figura, las aguas subterráneas no presentan fuertes variaciones temporales, lo que es de esperar, primero porque en el medio subterráneo se limitan los procesos de evaporación y condensación. Por otro lado, el agua subterránea es una mezcla de agua lluvia y agua superficial, la cual se almacena y transita en un medio que atenúa las variaciones isotópicas, las cuales son normales en agua lluvia y superficiales, llegando a una

concentración promedio. Además, todos los puntos de agua subterráneas se ubican sobre la LMM, lo que permite descartar el efecto de evaporación en las muestras.

Tiene sentido representar la marca isotópica del agua lluvia como la composición isotópica relativa ponderada, usando como factor de ponderación la cantidad de agua lluvia que en efecto se presentó en cada totalizador.

Dado que no se cuentan con estaciones de precipitación en cada totalizador, se utilizó como factor de ponderación el volumen recolectado en los totalizadores cada mes, el cual es un indicador de la cantidad de lluvia que se presentó en esa zona, además anteriormente se corroboró que el volumen recolectado en el totalizador es coherente con el comportamiento del ciclo anual la precipitación para la zona.

En la Figura 5.1.6.173 es posible observar la marca isotópica ponderada del agua lluvia, la cual coincide bastante bien con la marca isotópica del agua subterránea, por lo que es correcto afirmar que los flujos de agua subterráneos que fueron objeto de muestreo tienen origen en la precipitación de la zona de estudio.

Finalmente, en la Figura se puede observar la marca ponderada del agua lluvia y la marca isotópica promedio del agua subterránea, con la marca isotópica mes a mes del agua recolectada en los totalizadores, allí se evidencia que la mayor parte de la recarga se produce en los meses octubre, septiembre y noviembre, es importante resaltar que para disminuir la incertidumbre de este análisis es importante contar con la caracterización isotópica del agua lluvia en otro año hidrológico.

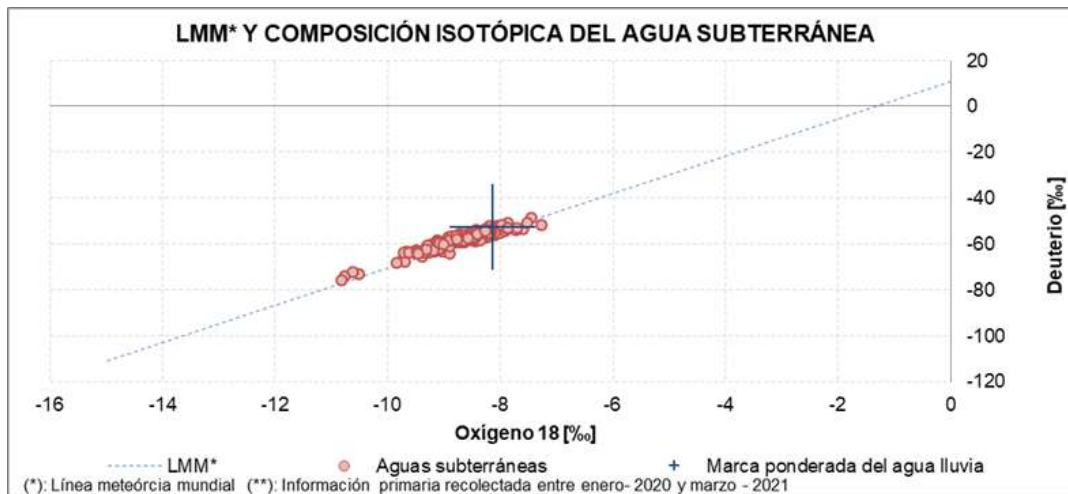


Figura 5.1.6.172 Composición isotópica del agua subterránea, LMM y marca ponderada del agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

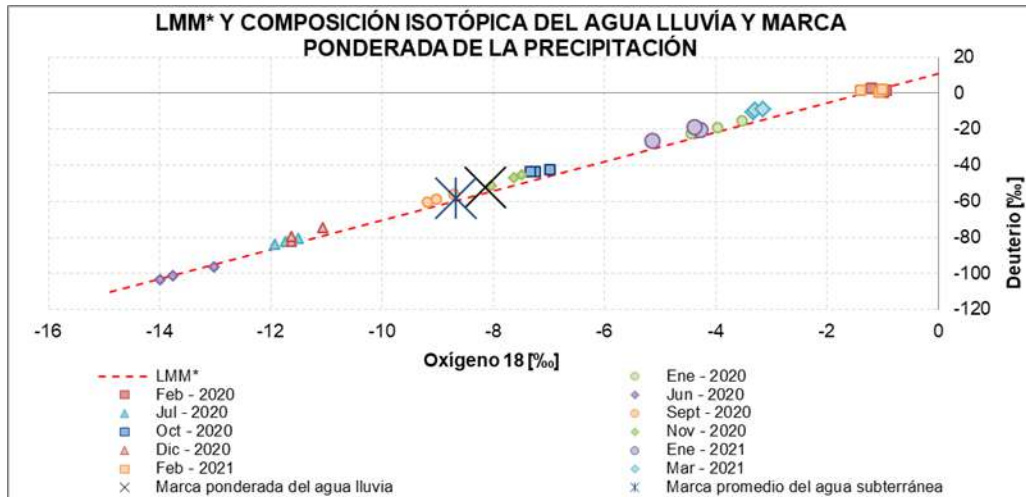


Figura 5.1.6.173 Marca ponderada del agua lluvia, marca promedio del agua subterránea y ciclo isotópica del agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

e. Estimación de alturas de recarga utilizando la relación de altura e isótopos estables

La correlación lineal entre las desviaciones de $2H$, $18O$ vs elevación, permite estimar zonas de recarga, identificando la altura a la cual se infiltra el agua, ya que las aguas luego de infiltradas presentan bajas variaciones isotópicas en el medio subterráneo.

La pendiente de la gráfica $2H$, $18O$ vs altura, es conocida como el gradiente orográfico el cual se expresa en $\delta\text{‰}/100\text{m}$, y puede variar entre cada zona.

Las gráficas de isótopos ambientales vs altura se presentan desde la Figura 5.1.6.174 y Figura 5.1.6.175 para deuterio y oxígeno 18 respectivamente. En estas dos figuras es posible notar que el comportamiento no es lineal, esto es debido a que el recolector de agua lluvia T2, a pesar de encontrarse a una altura similar al totalizador T3, presenta una composición isotópica distinta.

La diferencia de composición isotópica entre los totalizadores T2 y T3 puede ser causa por un efecto de lluvia orográfica local en el punto T2, el cual se encuentra ubicado en una cuenca con vertientes altas en ambos lados, lo que puede ocasionar precipitaciones mayores muy localizadas, alterando la concentración de isótopos ambientales según el efecto de cantidad, sin embargo, ahondar en esta hipótesis se sale del alcance de este estudio.

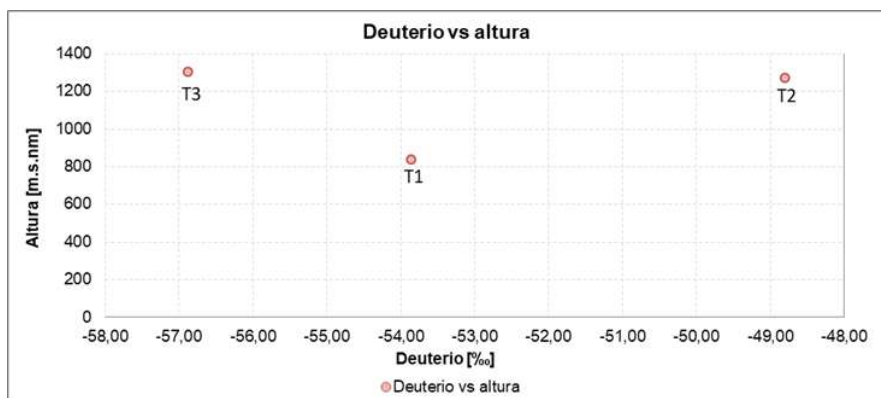


Figura 5.1.6.174 Deuterio vs altura en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

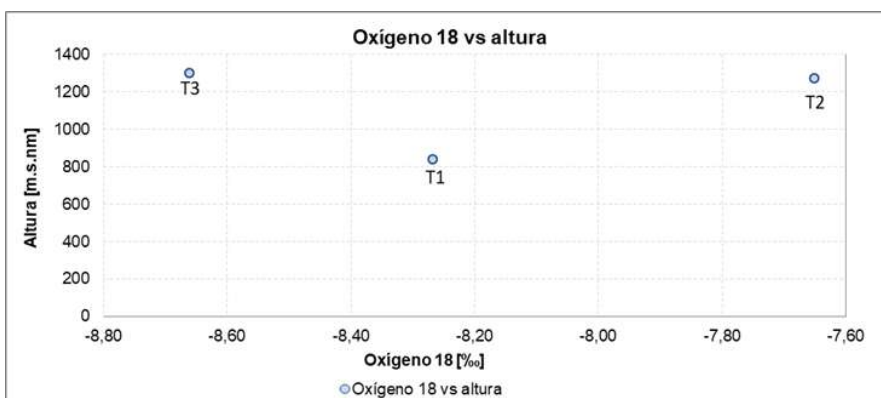


Figura 5.1.6.175 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia

Fuente: SHI S.A.S (2021)

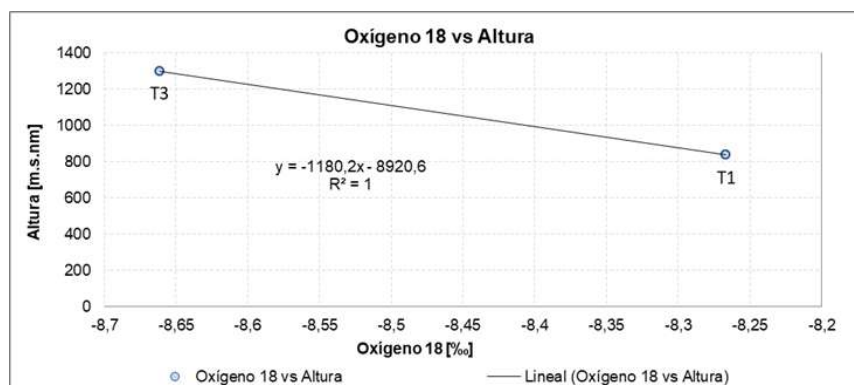


Figura 5.1.6.176 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3

Fuente: SHI S.A.S (2021)

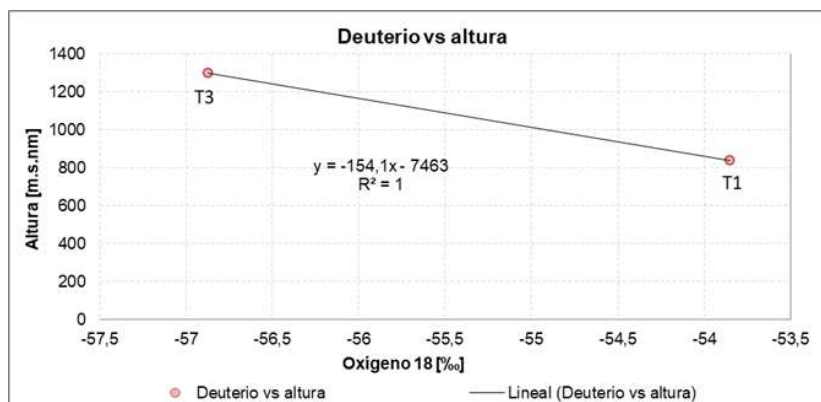


Figura 5.1.6.177 Oxígeno 18 vs altura en el agua lluvia totalizadores T1 y T3

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Según lo anterior, es correcto asumir que la lluvia en el área de influencia se encuentra bien representada por los totalizadores T1 y T3, los cuales presentan concordancia con el efecto de altitud, y por ende es posible estimar el gradiente altitudinal de empobrecimiento de los isótopos ambientales, el cual es presentado en la Figura 5.1.6.176 y Figura 5.1.6.177.

La línea recta obtenida con los totalizadores T1 y T3 establecen el gradiente isotópico de la zona de estudio, y es un insumo para realizar una estimación de las alturas de las zonas de recarga del agua subterránea que cuentan con caracterización isotópica. En la Figura 5.1.6.178 y Figura 5.1.6.179 es presentado el gradiente altitudinal de deuterio y oxígeno 18 en la lluvia junto con la composición isotópica promedio de los puntos de agua subterránea que conforman la red de monitoreo.

En las figuras presentadas se pueden observar tres grupos de agua subterránea, aquellos demarcados por las líneas de color verde y naranja, permiten estimar una zona de recarga entre 900 y 1600 metros sobre el nivel del mar, es decir la recarga se da en la misma zona. Esto concuerda con los valores de conductividad eléctrica bajos encontrados en las aguas subterráneas y con la buena correlación que existe entre la marca ponderada del agua lluvia y la concentración isotópica del agua subterránea.

Una de las características de un flujo regional de agua subterránea son los altos tiempos de residencia, lo cual le proporciona al agua el tiempo necesario para disolver iones provenientes de la roca con la que está en contacto y los piezómetros PZR-19-12 y PZR-19-13 presentan una conductividad eléctrica menor a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que permite descartar la altura estimada de recarga para estos dos puntos. SHI S.A.S (2021).

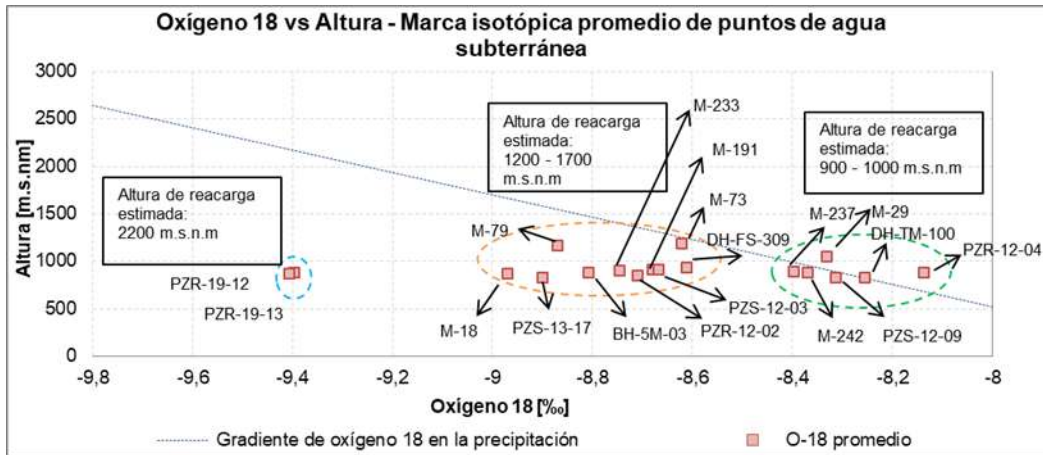


Figura 5.1.6.178 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de oxígeno 18 en la precipitación

Fuente: SHI S.A.S (2021)

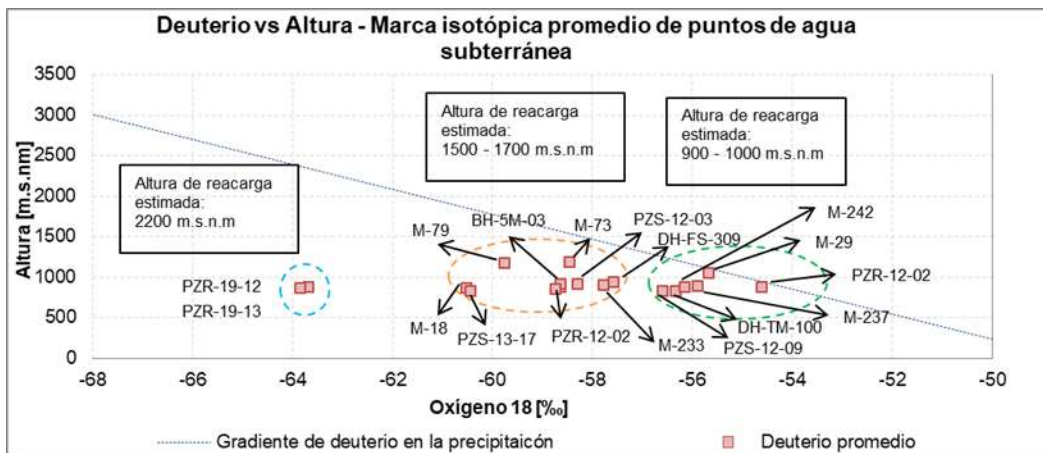


Figura 5.1.6.179 Marca isotópica promedio del agua subterránea y gradiente de deuterio en la precipitación

Fuente: SHI S.A.S (2021)

F. Análisis global de los resultados de tritio de las campañas 2020 y 2021

En Colombia existen dos estaciones de monitoreo del IAEA ubicadas en Barraquilla y Bogotá, las cuales presentan datos en los periodos 1971 – 1990 y 1971 – 2016 respectivamente, la serie de datos de tritio en el agua lluvia en la estación ubicada en Bogotá se puede observar en la Figura 5.1.6.180, la cual muestra una concentración pico de 25 UT (unidades de tritio) registrada en el año 1971, época para la cual ya se había descargado o desintegrado parte importante del tritio presente en la atmósfera, lo que lleva a suponer que para el año 1961 la concentración pico de tritio, en el peor de los casos, estuvo entre 60 y 80 UT, lo que se puede corroborar observando el comportamiento de

estaciones de países fronterizos con Colombia que cuentan con datos de concentración de tritio en la lluvia anteriores a 1971.

La disminución en las concentraciones pico de tritio en la atmósfera en Suramérica, es una limitante para la datación de las aguas subterráneas en estas latitudes; ya que, con concentraciones pico de tritio tan bajas y teniendo en cuenta que la vida media del tritio equivale a 12,45 años (Agencia Internacional de Energía Atómica, 1981), el periodo de datación es limitado y la incertidumbre es bastante alta. Una muestra de esto es que el agua subterránea recargada en los años 60 (suponiendo una concentración pico de a lo sumo 120 UT y un sistema totalmente cerrado) tendría a fecha de hoy una concentración de tritio de 5 UT, lo que comprende la variación natural para Colombia.

A partir del año 2000 el decaimiento no es notable, y el contenido de tritio en el agua lluvia empieza a mostrar un comportamiento semi-estable entre 1,14 UT y 4,98 UT, el valor promedio es de 2,3 UT, muy similar a lo observado en las lluvias de los recolectores en la zona, como se muestra en la Figura 5.1.6.180.

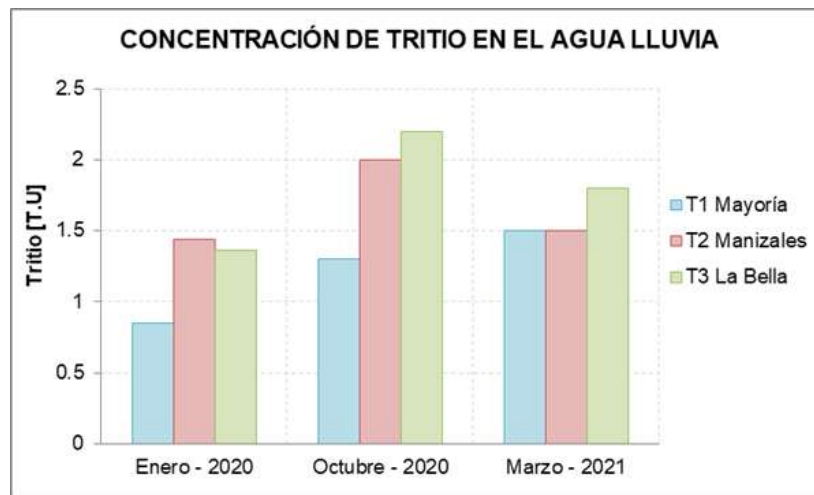


Figura 5.1.6.180 Resultados de tritio

Fuente: SHI S.A.S (2021)

Para datar el agua con los resultados de tritio es necesario asumir un modelo de flujo tipo pistón, donde el agua que se infiltra no se mezcla con el agua almacenada, sino que sigue su camino sin que se produzcan mezclas importantes. Se resalta que la configuración hidrogeológica de las unidades litológicas en la zona, no se comportan de esta manera, por lo cual el resultado de este modelo deber ser analizado con precaución.

Además de esta suposición, se requiere una función de entrada de tritio en la precipitación, la cual se puede suponer una función constante en 1,55 T.U, debido a la poca variación que presentaron los resultados de tritio en la lluvia de la zona de estudio.

En la Tabla 5.1.6.79 se muestra el tiempo transcurrido desde las infiltraciones del agua, utilizando la función de decaimiento potencial, con una vida media para el tritio de 12,31 años, bajo un modelo de flujo pistón y una función de entrada de tritio constante de 1,55 UT que corresponde al promedio en la zona.

Los resultados de datación muestran que las aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia son aguas jóvenes, mostrando edades variables entre 0,2 y 12 años. Sin embargo, se resalta que la estimación es altamente sensible a la función de entrada del tritio; así, por ejemplo, al considerar la función de entrada del tritio promedio de la estación Bogotá, las aguas infiltradas entre los años 1972 (≈ 20 UT) y 1976 (≈ 10 UT) tendrían concentraciones de tritio actuales entre 0,84 y 1,34 UT, similares también a las encontradas en las aguas subterráneas en la zona.

Tabla 5.1.6.79 Estimación del tiempo de decaimiento suponiendo un modelo de flujo pistón y función de entrada de tritio constante

Código	Años
Reservorio Artificial La Mayoría	1,4
Quebrada Palestina	0,2
BH-5M-03	5,2
DH-TM-100	4,9
M -29	3,2
M-73	3,2
M-79	10,2
M-233	10,9
PZR-12-02	5,0
PZS-12-09	11,9
PZS-13-17	3,2
PZR-19-13	8,3

Fuente: SHI S.A.S (2021)

De la tabla anterior se puede evidenciar algunas edades coherentes y aceptables para los puntos superficiales y los piezómetros, sin embargo los cuatro manantiales no reflejan la realidad de los flujos en la zona, ya que son puntos que se ubican en la partes más altas de las respectivas cuencas donde afloran y se ha evidenciado que el agua que recarga el terreno se infiltra y aflora rápidamente en dichos puntos, estas edades son el efecto de una modelación con condiciones de entrada y suposiciones que no se ajustan completamente a la realidad hidrogeológicas del área de influencia.

G. Conclusiones de la evaluación isotópica para las campañas de 2020 y 2021

Del inventario de puntos de agua realizado entre 2019-2020 se registraron 291 puntos de agua entre manantiales, pozos y piezómetros. El 73,8% de los puntos están sin uso, el 7,2 % tiene uso doméstico, industrial o agrícola y el restante 18,9% es para monitoreo del proyecto minero.

La mayoría de los manantiales afloran en el suelo residual y en el saprolito del batolito, el 63% son perennes y el 37% intermitentes y 67 manantiales se evidenciaron secos.

En cuanto a los parámetros fisicoquímico In situ medidos en la campaña de campo se observa de manera general que la conductividad eléctrica ha aumentado progresivamente en las cuatro campañas, siendo la campaña cuatro la que presenta mayores valores, mientras que la temperatura y el pH se mantienen muy constantes, aunque este último parámetro evidencia un ascenso, indicando aguas más cercanas al pH neutro a básico.

Fue posible comprobar que el agua lluvia en el área de influencia sigue el principio de cantidad en cuanto a su concentración relativa de isótopos ambientales, ya que, se identificaron empobrecimientos en deuterio y oxígeno 18 durante las épocas de lluvia y enriquecimiento del agua lluvia en estos dos isótopos durante las temporadas más secas.

No existen en el área de influencia fuentes de agua en las que se evidencien procesos de evaporación, ya que, todos los resultados de concentraciones relativas de deuterio y oxígeno 18 en los puntos de monitoreo coinciden con la línea meteórica mundial.

Con los resultados obtenidos, es posible determinar que existe una relación directa del agua lluvia con las aguas superficiales en el área de influencia, ya que, la composición isotópica de las aguas superficiales responde inmediatamente a cambios en la composición isotópica del agua lluvia.

Los flujos de aguas subterráneas en el área de influencia son originados por la precipitación reciente, y tienen un tiempo de residencia en el medio subterráneo muy bajo, prueba de ello es la coincidencia de la marca ponderada de la precipitación con la marca isotópica del agua subterránea y los bajos tiempos estimados según la datación con el tritio.

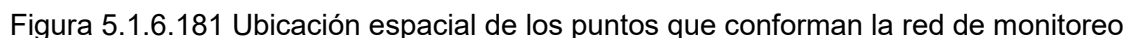
Luego de analizar los valores promedio de la composición isotópica del agua subterránea y del agua lluvia (deuterio y oxígeno 18), y realizar una comparación con el ciclo anual de isótopos recolectados en los totalizadores, fue posible determinar, que la mayor recarga de agua lluvia hacia el medio subterráneo se da en el periodo septiembre – noviembre.

Las zonas de recarga de agua subterránea presentan una altura estimada entre 900 y 1500 msnm, es decir la recarga sucede principalmente en la misma zona, lo que es concordante con las conductividades eléctricas encontradas en las aguas subterráneas, relativamente bajas, y por ende con la hipótesis de flujos de agua subterránea con cortos tiempos de residencia en el medio subterráneo.

Los resultados de tritio permitieron estimar una datación cuantitativa de las aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia, las cuales en general son aguas jóvenes entre 0,2 y 12 años; no obstante, el decaimiento radioactivo de este isótopo, las concentraciones bajas en países tropicales y las suposiciones de entrada del modelo que no se ajustan completamente a la realidad hidrogeológica de la zona, limitan la certeza de los resultados, por lo cual deben ser solo un valor de referencia general para este estudio. SHI S.A.S (2021).

H. Red de monitoreo de 2025

La red de monitoreo isotópica se detalla en el subcapítulo 5.1.6.3.1 . Los puntos monitoreados se presentan en la Figura 5.1.6.181



a. Campaña 1 febrero (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.3.2, ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

La campaña de febrero de 2025 se llevó a cabo desde el 4 de febrero de 2025 al 20 de febrero del 2025, en la cual se monitorearon 36 puntos (M195 se encontraba seco) en los cuales se encuentran agua superficial, agua subterránea y agua lluvia. Los resultados de deuterio y oxígeno -18 se presentan en la Tabla 5.1.6.80 y de manera gráfica en la Figura 5.1.6.182.

En términos generales, se observa que, con excepción del agua de lluvia, las diferentes fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y corriente superficial), presentan una composición isotópica relativamente homogénea, con variaciones mínimas entre los

distintos puntos de muestreo. Las concentraciones de oxígeno-18 oscilan entre -10,17‰ y -7,67‰, mientras que las de deuterio varían entre -66,37‰ y -52,15‰.

No obstante, se evidencia que algunos piezómetros presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida (BH-5M-08, PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07), la mayoría de los cuales se encuentran captando unidades rocosas, lo que podría sugerir un origen distinto o una historia de flujo diferenciada con respecto al resto de los puntos analizados.

Por otro lado, las muestras de agua de lluvia presentan un enriquecimiento isotópico relativo en comparación con las aguas subterráneas y superficiales, con concentraciones de oxígeno-18 que varían entre -5,60‰ y -5,06‰, y de deuterio entre -23,46‰ y -18,91‰. Sin embargo, es relevante señalar que el totalizador 1 muestra una firma más empobrecida en comparación con los otros dos totalizadores, a pesar de ubicarse a una elevación inferior, lo que sugiere que este comportamiento no puede atribuirse al efecto altitudinal (dado que existe una relación lineal inversa entre el contenido isotópico del agua de lluvia y la altitud del sitio de precipitación).

Además, el exceso de deuterio en todas las muestras de los totalizadores es elevado, superando los 20‰, lo que podría indicar la contribución de masas de aire con distinta historia isotópica o la presencia de una fuente de vapor con características isotópicas específicas.

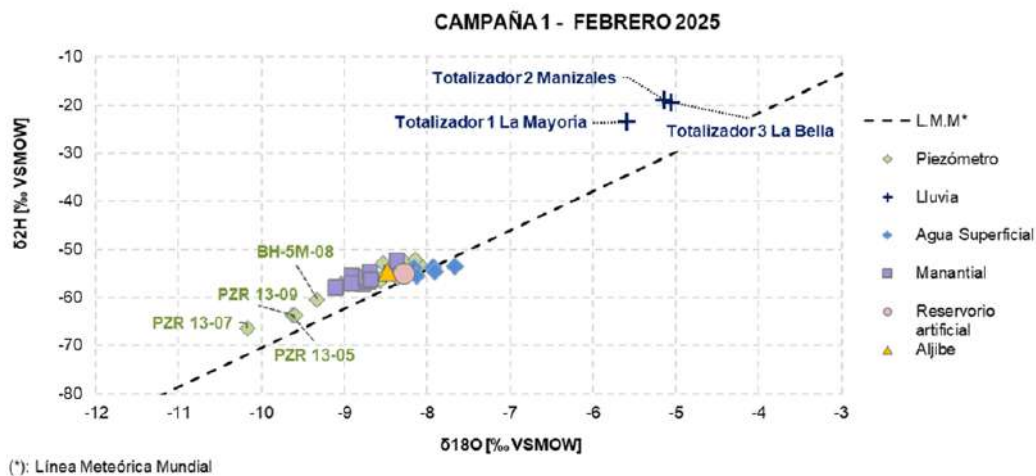


Figura 5.1.6.182 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 1 - febrero de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.80 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 1 febrero 2025

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado o en totalizadores (l)	δ ¹⁸ O	δ ² H	Exceso de deuterio
				VSMOW ± 0.2‰	VSMOW ± 0.8‰	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/2/2025		-8,27	-55,19	10,98

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm$ 0.2‰	VSMOW $\pm$ 0.8‰	
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/2/2025		-8,48	-54,61	13,23
M18	Manantial	4/2/2025		-8,78	-57,07	13,19
M20	Manantial	4/2/2025		-8,91	-55,33	15,97
M87	Manantial	13/02/2025		-8,92	-56,97	14,36
M118	Manantial	12/2/2025		-8,72	-56,62	13,13
M121	Manantial	12/2/2025		-8,74	-55,66	14,29
M189	Manantial	13/02/2025		-8,70	-54,61	14,96
M242	Manantial	10/2/2025		-8,45	-54,77	12,80
M233	Manantial	9/2/2025		-8,37	-52,15	14,80
M100	Manantial	9/2/2025		-9,10	-57,66	15,17
M195	Manantial	Seco				
M215	Manantial	5/2/2025		-8,69	-56,26	13,25
M222	Manantial	11/2/2025		-9,11	-57,83	15,08
PZA12-03	Piezómetro	11/2/2025		-8,57	-56,56	11,97
PZA12-08	Piezómetro	7/2/2025		-8,08	-53,22	11,44
PZS12-12	Piezómetro	7/2/2025		-8,36	-55,88	10,96
PZS12-14	Piezómetro	14/02/2025		-8,29	-52,41	13,94
PZR 13-05	Piezómetro	14/02/2025		-9,62	-63,75	13,25
PZR 13-07	Piezómetro	18/02/2025		-10,17	-66,37	15,02
PZR 13-09	Piezómetro	12/2/2025		-9,60	-63,76	13,01
PZS 13-17	Piezómetro	10/2/2025		-8,50	-55,17	12,81
DH-FS-309	Piezómetro	20/02/2025		-9,04	-57,18	15,12
DH-FS-315	Piezómetro	13/02/2025		-8,14	-52,20	12,93
DH-TM-100	Piezómetro	18/02/2025		-8,69	-56,44	13,04
BH-5M-03	Piezómetro	19/02/2025		-8,95	-57,19	14,44
BH-5M-08	Piezómetro	19/02/2025		-9,33	-60,42	14,21
PZS 12-05	Piezómetro	14/02/2025		-8,80	-56,39	14,03
PZ4	Piezómetro	20/02/2025		-8,53	-52,94	15,30
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/02/2025	4,03	-5,60	-23,46	21,32
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/02/2025	3,75	-5,15	-18,91	22,27
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/02/2025	3,38	-5,06	-19,44	21,05
Quebrada Palestina	Agua Superficial	11/2/2025		-8,16	-53,81	11,50
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/2/2025		-7,67	-53,54	7,83
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	7/2/2025		-8,12	-55,57	9,42
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	9/2/2025		-7,93	-53,69	9,77
Quebrada El Banco	Agua Superficial	6/2/2025		-7,91	-54,56	8,73

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la primera campaña de monitoreo de 2025 son presentados en la Tabla 5.1.6.81. El agua recolectada en los totalizadores se encuentra en un rango de 1,4 UT a 1,9 U.T., que pueden considerarse dentro de los niveles normales típicos para el agua lluvia en la zona, atribuido a fuentes naturales y consistentes con las variaciones naturales que este parámetro puede experimentar en la atmósfera.

Por su parte, los resultados de tritio en el agua procedente de los puntos de agua subterránea indican un valor inferior al registrado en las precipitaciones en Colombia, el cual es aproximadamente 2,0 – 2,1 U.T. y, por consiguiente, no se observa un aumento en la concentración de tritio en comparación con la lluvia.

Tabla 5.1.6.81 Resultados de tritio campaña 1 febrero de 2025

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	10/2/2025	1,3 ± 0,2	0,15
Aljibe La Mayoría	Aljibe	10/2/2025	<0,4	<0,05
M18	Manantial	4/2/2025	1,4 ± 0,2	0,17
M20	Manantial	4/2/2025	1,8 ± 0,3	0,21
M87	Manantial	13/2/2025	0,9 ± 0,2	0,11
M118	Manantial	12/2/2025	1,0 ± 0,2	0,12
M121	Manantial	12/2/2025	0,9 ± 0,2	0,11
M189	Manantial	13/2/2025	1,5 ± 0,2	0,18
M242	Manantial	10/2/2025	1,9 ± 0,3	0,22
M233	Manantial	9/2/2025	2,2 ± 0,3	0,26
M100	Manantial	9/2/2025	0,7 ± 0,2	0,08
M195	Manantial	Seco		
M215	Manantial	5/2/2025	1,5 ± 0,2	0,18
M222	Manantial	11/2/2025	1,0 ± 0,2	0,12
PZA12-03	Piezómetro	11/2/2025	1,0 ± 0,2	0,12
PZA12-08	Piezómetro	7/2/2025	1,6 ± 0,2	0,19
PZS12-12	Piezómetro	7/2/2025	<0,4	<0,05
PZS12-14	Piezómetro	14/2/2025	1,2 ± 0,2	0,14
PZR 13-05	Piezómetro	14/2/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-07	Piezómetro	18/2/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-09	Piezómetro	12/2/2025	0,6 ± 0,2	0,07
PZS 13-17	Piezómetro	10/2/2025	1,1 ± 0,2	0,13
DH-FS-309	Piezómetro	20/2/2025	2,1 ± 0,2	0,25
DH-FS-315	Piezómetro	13/2/2025	2,1 ± 0,2	0,25
DH-TM-100	Piezómetro	18/2/2025	1,3 ± 0,2	0,15
BH-5M-03	Piezómetro	19/2/2025	<0,4	<0,05
BH-5M-08	Piezómetro	19/2/2025	<0,4	<0,05
PZS 12-05	Piezómetro	14/2/2025	1,3 ± 0,2	0,15
PZ4	Piezómetro	20/2/2025	0,9 ± 0,2	0,11
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/2/2025	1,4 ± 0,2	0,17

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/2/2025	1,4 ± 0,2	0,17
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/2/2025	1,9 ± 0,3	0,22
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	11/2/2025	1,1 ± 0,2	0,13
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	6/2/2025	1,6 ± 0,2	0,19
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	7/2/2025	0,6 ± 0,2	0,07
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	9/2/2025	0,8 ± 0,2	0,09
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	6/2/2025	1,1 ± 0,2	0,13

U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2025)

b. Campaña 2 marzo (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.3.1, ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Durante la segunda campaña del muestreo isotópico que se realizó entre el 10 de marzo de 2025 a el 16 de marzo de 2025, en esta campaña se monitorearon 36 puntos (M195 estaba seco) en los que se encuentran agua superficial, agua subterránea y agua lluvia. Los resultados de la segunda campaña de monitoreo de deuterio y oxígeno -18 se presentan en la Tabla 5.1.6.82 y en la Figura 5.1.6.183.

Al igual que en la primera campaña, se observa que las distintas fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y drenaje superficial), presentan una composición isotópica similar. En esta campaña, la concentración de oxígeno-18 varía entre -9,92‰ y -7,81‰, mientras que la de deuterio oscila entre -66,48‰ y -50,83‰.

Se mantiene la tendencia en la que algunos piezómetros, principalmente aquellos que captan unidades rocosas, presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida. Esto sugiere posibles diferencias en el origen del flujo con respecto al resto de los puntos analizados. Dicho comportamiento se ha identificado en los piezómetros PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07, los cuales en la campaña anterior también mostraron esta característica. Adicionalmente, en esta campaña, el piezómetro BH-5M-03 también registra una ligera tendencia hacia valores más empobrecidos.

En cuanto a las aguas superficiales, se evidencia que la firma isotópica de los drenajes superficiales y del reservorio artificial es muy semejante entre sí, lo que indica que ambos tipos de agua responden de manera homogénea a los procesos hidrológicos en la zona y puede sugerir que el reservorio artificial mantiene una estrecha conexión con los drenajes superficiales.

Por otro lado, las aguas lluvias recolectadas en los totalizadores evidencian un enriquecimiento isotópico relativo en comparación con las aguas subterráneas y superficiales, así como con la firma isotópica observada en la primera campaña. Las concentraciones de oxígeno-18 en la precipitación oscilan entre -2,48‰ y -2,26‰, mientras que las de deuterio varían entre -5,55‰ y -4,13‰. Esta diferencia entre campañas puede

estar asociada al efecto de cantidad, dado que se espera un mayor enriquecimiento isotópico en eventos de menor volumen de precipitación.

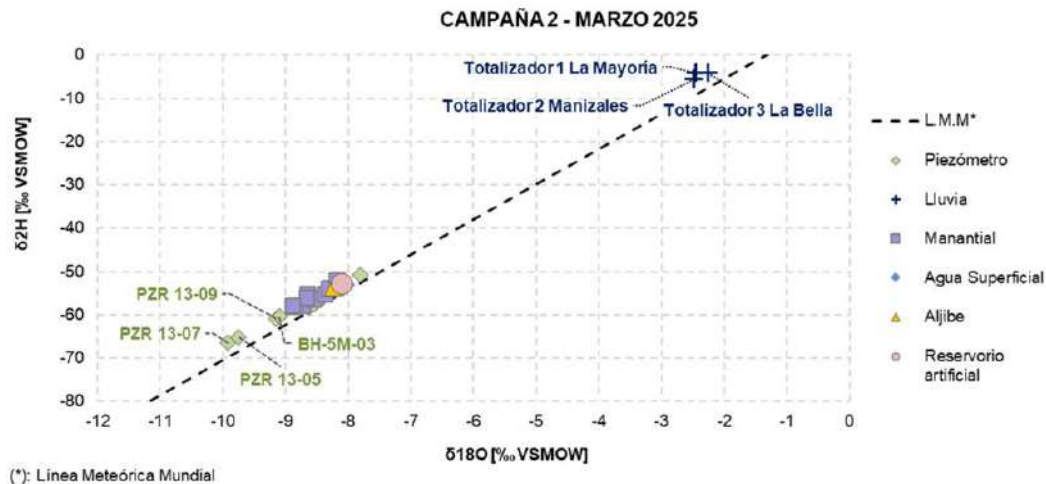


Figura 5.1.6.183 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 2 - marzo de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.82 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 2 marzo 2025

Punto	Tipo	Fecha	recolecta do en totaliza dores (l)	δ ¹⁸ O	δ ² H	Exces o de deute rio
				VSMOW ± 0.2‰	VSMOW ± 0.8‰	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	11/03/2025		-8,08	-53,03	11,61
Aljibe La Mayoría	Aljibe	11/03/2025		-8,22	-53,44	12,32
M18	Manantial	11/03/2025		-8,72	-57,74	12,02
M20	Manantial	11/03/2025		-8,65	-55,11	14,09
M87	Manantial	16/03/2025		-8,63	-56,04	13,00
M118	Manantial	14/03/2025		-8,55	-56,42	11,98
M121	Manantial	14/03/2025		-8,37	-55,18	11,78
M189	Manantial	15/03/2025		-8,29	-53,74	12,58
M242	Manantial	13/03/2025		-8,32	-54,03	12,53
M233	Manantial	13/03/2025		-8,19	-51,87	13,65
M100	Manantial	14/03/2025		-8,88	-58,05	12,99
M195	Manantial	15/03/2025		-8,85	-58,07	12,73
M215	Manantial	11/03/2025		-8,67	-55,97	13,39
M222	Manantial	15/03/2025		-8,89	-57,74	13,38
PZA12-03	Piezómetro	10/03/2025		-8,42	-56,37	10,99
PZA12-08	Piezómetro	10/03/2025		-8,11	-52,70	12,18
PZS12-12	Piezómetro	10/03/2025		-8,63	-58,32	10,72

Punto	Tipo	Fecha	recolecta do en totalizad ores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exces o de deute rio
				VSMOW $\pm$ 0.2‰	VSMOW $\pm$ 0.8‰	
PZS12-14	Piezómetro	23/03/2025		-8,11	-53,39	11,49
PZR 13-05	Piezómetro	10/03/2025		-9,75	-65,15	12,85
PZR 13-07	Piezómetro	13/03/2025		-9,92	-66,48	12,88
PZR 13-09	Piezómetro	13/03/2025		-9,15	-60,89	12,31
PZS 13-17	Piezómetro	15/03/2025		-8,47	-55,59	12,17
DH-FS-309	Piezómetro	15/03/2025		-8,57	-55,42	13,14
DH-FS-315	Piezómetro	13/03/2025		-7,81	-50,83	11,65
DH-TM-100	Piezómetro	13/03/2025		-8,50	-57,01	10,99
BH-5M-03	Piezómetro	14/03/2025		-9,10	-60,43	12,37
BH-5M-08	Piezómetro	14/03/2025		-8,55	-57,54	10,86
PZS 12-05	Piezómetro	15/03/2025		-8,34	-54,65	12,07
PZ4	Piezómetro	15/03/2025		-8,05	-52,78	11,62
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/03/2025	3,30	-2,46	-4,15	15,53
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/03/2025	3,70	-2,48	-5,55	14,29
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/03/2025	2,70	-2,26	-4,13	13,95
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	15/03/2025		-8,10	-52,91	11,89
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	10/03/2025		-8,06	-52,79	11,69
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	10/03/2025		-8,16	-53,03	12,25
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	13/03/2025		-8,03	-53,14	11,10
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	11/03/2025		-8,14	-52,31	12,81

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la segunda campaña de monitoreo, realizada en marzo de 2025, son presentados en la Tabla 5.1.6.83.

Los resultados de tritio obtenidos sugieren que la mayoría de las aguas subterráneas analizadas corresponden a aguas jóvenes, es decir, recargadas en las últimas décadas. Las concentraciones oscilan mayoritariamente entre 1,0 y 2,3 unidades de tritio (U.T.), lo cual es coherente con valores típicos de la precipitación reciente en Colombia. Sin embargo, algunos puntos como los piezómetros PZR 13-05, PZR 13-07, PZR 13-09 y PZS12-12, muestran concentraciones por debajo del límite de detección, lo que podría reflejar tiempos de residencia más prolongados o una desconexión con la recarga reciente.

En cuanto a las muestras de agua lluvia, los valores de tritio registrados en los totalizadores 1 (2,4 U.T.) y 3 (1,3 U.T.) se consideran consistentes con los niveles esperados para la precipitación en Colombia y en el área de influencia. Sin embargo, en el totalizador 2 se

registra un valor por debajo del límite de detección ($<0,4$ UT), lo que resulta inusual. A manera de hipótesis se tiene que, en algunas ocasiones, eventos de lluvia intensa pueden dar lugar a concentraciones de tritio muy bajas debido a un lavado atmosférico eficiente, especialmente si la lluvia ha sido prolongada o muy local.

Tabla 5.1.6.83 Resultados de tritio campaña 2 Marzo de 2025

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	11/03/2025	$1,5 \pm 0,2$	0,18
Aljibe La Mayoría	Aljibe	11/03/2025	$2,1 \pm 0,2$	0,25
M18	Manantial	11/03/2025	$1,4 \pm 0,2$	0,17
M20	Manantial	11/03/2025	$1,7 \pm 0,2$	0,2
M87	Manantial	16/03/2025	$1,1 \pm 0,2$	0,13
M118	Manantial	14/03/2025	$<0,4$	$<0,05$
M121	Manantial	14/03/2025	$1,0 \pm 0,2$	0,12
M189	Manantial	15/03/2025	$1,8 \pm 0,2$	0,21
M242	Manantial	13/03/2025	$1,1 \pm 0,2$	0,13
M233	Manantial	13/03/2025	$0,5 \pm 0,2$	0,06
M100	Manantial	14/03/2025	$2,3 \pm 0,3$	0,27
M195	Manantial	12/03/2025	$1,4 \pm 0,2$	0,17
M215	Manantial	11/03/2025	$2,1 \pm 0,2$	0,25
M222	Manantial	15/03/2025	$0,8 \pm 0,2$	0,09
PZA12-03	Piezómetro	10/03/2025	$1,3 \pm 0,2$	0,15
PZA12-08	Piezómetro	10/03/2025	$1,5 \pm 0,2$	0,18
PZS12-12	Piezómetro	10/03/2025	$<0,4$	$<0,05$
PZS12-14	Piezómetro	12/03/2025	$1,1 \pm 0,2$	0,13
PZR 13-05	Piezómetro	12/03/2025	$<0,4$	$<0,05$
PZR 13-07	Piezómetro	13/03/2025	$<0,4$	$<0,05$
PZR 13-09	Piezómetro	13/03/2025	$<0,4$	$<0,05$
PZS 13-17	Piezómetro	12/03/2025	$2,0 \pm 0,2$	0,24
DH-FS-309	Piezómetro	15/03/2025	$1,2 \pm 0,2$	0,14
DH-FS-315	Piezómetro	15/03/2025	$1,5 \pm 0,3$	0,18
DH-TM-100	Piezómetro	13/03/2025	$1,2 \pm 0,2$	0,14
BH-5M-03	Piezómetro	14/03/2025	$0,6 \pm 0,2$	0,07
BH-5M-08	Piezómetro	14/03/2025	$1,2 \pm 0,2$	0,14
PZS 12-05	Piezómetro	15/03/2025	$2,7 \pm 0,2$	0,32
PZ4	Piezómetro	15/03/2025	$0,9 \pm 0,2$	0,11

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	16/03/2025	2,4 ± 0,2	0,28
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	16/03/2025	<0,4	<0,05
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	16/03/2025	1,3 ± 0,2	0,15
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	15/03/2025	0,7 ± 0,2	0,08
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	10/03/2025	1,9 ± 0,2	0,22
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	10/03/2025	<0,4	<0,05
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	13/03/2025	0,7 ± 0,2	0,08
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	12/03/2025	1,6 ± 0,2	0,19

U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2025)

c. Campaña 3 abril (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.3.1, ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Entre el 23 y el 29 de abril de 2025 se llevó a cabo la tercera campaña de muestreo isotópico, durante la cual se evaluaron 35 puntos, que abarcan fuentes de agua superficial, subterránea y precipitación; como se mencionó anteriormente el totalizador 2 se encontraba fuera de su posición y sin agua, lo que indica posible manipulación o saqueo y en el punto M195 no se detectó flujo de agua. Los datos obtenidos en esta etapa, relacionados con las concentraciones de deuterio y oxígeno-18, se resumen en la Tabla 5.1.6.84 y se ilustran en la Figura 5.1.6.184.

De forma semejante a las campañas previas, se observa que las distintas fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y drenaje superficial), presentan una composición isotópica similar. En esta campaña, la concentración de oxígeno-18 varía entre -9,95‰ y -7,55‰, mientras que la de deuterio oscila entre -67,08‰ y -50,04‰.

Los piezómetros PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07 continúan mostrando una tendencia hacia una firma isotópica ligeramente más empobrecida, lo que, como se ha señalado previamente, podría indicar diferencias en el origen del flujo en comparación con los demás puntos evaluados.

Por otro lado, las muestras de agua lluvia recolectadas en los totalizadores revelan un empobrecimiento isotópico relativo respecto a las precipitaciones registradas en campañas anteriores. Las concentraciones de oxígeno-18 en estas muestras se sitúan entre -7,59‰ y -7,23‰, mientras que las de deuterio varían entre -47,62‰ y -45,65‰. Esta variación entre campañas podría estar relacionada con el efecto cantidad, dado que eventos de mayor volumen tienden a presentar una menor concentración de isótopos pesados.



Figura 5.1.6.184 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 3 - abril de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.84 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 3 abril (2025)

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	δ ¹⁸ O	δ ² H	Exceso de deuterio
				VSMOW ± 0.2‰	VSMOW ± 0.8‰	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	23/4/2025		-8,37	-54,78	12,19
Aljibe La Mayoría	Aljibe	23/4/2025		-8,00	-54,18	9,81
M18	Manantial	23/4/2025		-8,27	-58,64	7,50
M20	Manantial	23/4/2025		-8,13	-56,28	8,73
M87	Manantial	24/4/2025		-8,74	-57,19	12,74
M118	Manantial	27/4/2025		-7,89	-56,02	7,13
M121	Manantial	27/4/2025		-7,85	-55,59	7,21
M189	Manantial	27/4/2025		-7,85	-54,65	8,13
M242	Manantial	26/4/2025		-7,85	-50,04	12,79
M233	Manantial	27/4/2025		-8,11	-50,75	14,14
M100	Manantial	26/4/2025		-8,45	-57,95	9,68
M195	Manantial	Seco				

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm$ 0.2‰	VSMOW $\pm$ 0.8‰	
M215	Manantial	25/4/2025		-7,98	-53,74	10,11
M222	Manantial	25/4/2025		-8,25	-55,72	10,30
PZA12-03	Piezómetro	25/4/2025		-8,34	-56,78	9,97
PZA12-08	Piezómetro	25/4/2025		-7,90	-51,14	12,08
PZS12-12	Piezómetro	25/4/2025		-8,64	-58,14	10,99
PZS12-14	Piezómetro	25/4/2025		-7,55	-52,20	8,19
PZR 13-05	Piezómetro	25/4/2025		-9,71	-65,71	11,99
PZR 13-07	Piezómetro	25/4/2025		-9,95	-67,08	12,52
PZR 13-09	Piezómetro	25/4/2025		-9,53	-65,06	11,18
PZS 13-17	Piezómetro	25/4/2025		-8,23	-56,25	9,63
DH-FS-309	Piezómetro	25/4/2025		-8,44	-56,50	11,00
DH-FS-315	Piezómetro	25/4/2025		-7,83	-50,43	12,18
DH-TM-100	Piezómetro	25/4/2025		-8,07	-52,96	11,58
BH-5M-03	Piezómetro	25/4/2025		-8,76	-60,09	9,98
BH-5M-08	Piezómetro	25/4/2025		-8,66	-59,00	10,25
PZS 12-05	Piezómetro	25/4/2025		-8,37	-55,44	11,55
PZ4	Piezómetro	25/4/2025		-8,27	-53,58	12,54
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	25/4/2025	12,0	-7,23	-45,65	12,18
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	Manipulado				
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	25/4/2025	12,15	-7,59	-47,62	13,09
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	25/4/2025		-8,31	-53,48	13,02
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	25/4/2025		-8,49	-55,68	12,25
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	25/4/2025		-8,42	-54,07	13,27

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm$ 0.2‰	VSMOW $\pm$ 0.8‰	
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	27/4/2025		-8,15	-52,80	12,41
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	26/4/2025		-8,18	-52,66	12,76

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la tercera campaña de monitoreo de 2025 son presentados en la Tabla 5.1.6.85. El agua recolectada en los totalizadores muestra concentraciones de 1,1 U.T. en el totalizador 1 La Mayoría y 2,1 U.T. en el totalizador 3 La Bella, los cuales se encuentran dentro del rango esperado para la precipitación reciente en Colombia.

En contraste, la mayoría de los puntos de agua subterránea presentan concentraciones de tritio iguales o inferiores a las de la lluvia actual, lo cual es coherente con aguas de recarga reciente, como se ha mencionado anteriormente. En esta campaña también se observa que algunos piezómetros (PZR 13-05 y PZR 13-07) siguen presentando valores por debajo del límite de detección, lo que refuerza la idea de que las aguas provienen de un sistema de flujo más profundo o aislado de la recarga reciente. Sin embargo, esta afirmación es preliminar y debe ser tomada con precaución debido a que a que la interpretación basada en concentraciones de tritio puede estar sujeta a altas incertidumbres y esta hipótesis debe ser complementado y contrastada con otros análisis.

Adicionalmente, el manantial M233 presenta un valor de $5,2 \pm 0,3$ U.T., significativamente más alto que el tritio atmosférico actual y que el registrado en febrero (2,2 U.T.) y en marzo (0,5 U.T.) del mismo año. Este valor no puede explicarse por recarga directa de lluvia actual y sugiere un error analítico. Actualmente, este dato está siendo verificado por el laboratorio.

Tabla 5.1.6.85 Resultados de tritio campaña 3 abril de 2025

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	23/4/2025	<0,4	<0,05
Aljibe La Mayoría	Aljibe	23/4/2025	$1,9 \pm 0,2$	0,22
M18	Manantial	23/4/2025	$1,1 \pm 0,2$	0,13
M20	Manantial	23/4/2025	$0,8 \pm 0,2$	0,09
M87	Manantial	24/4/2025	$1,4 \pm 0,2$	0,17
M118	Manantial	27/4/2025	<0,4	<0,05
M121	Manantial	27/4/2025	$1,7 \pm 0,2$	0,2
M189	Manantial	27/4/2025	$2,3 \pm 0,2$	0,27
M242	Manantial	26/4/2025	$1,2 \pm 0,2$	0,14
M233	Manantial	27/4/2025	$5,2 \pm 0,3$	0,61
M100	Manantial	26/4/2025	$2,0 \pm 0,2$	0,24
M195	Manantial	Seco		
M215	Manantial	25/4/2025	$1,8 \pm 0,2$	0,33
M222	Manantial	29/4/2025	$2,8 \pm 0,2$	0,27

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
PZA12-03	Piezómetro	28/4/2025	0,8± 0,2	0,09
PZA12-08	Piezómetro	28/4/2025	1,5± 0,2	0,18
PZS12-12	Piezómetro	28/4/2025	0,4± 0,2	0,05
PZS12-14	Piezómetro	28/4/2025	1,6± 0,2	0,19
PZR 13-05	Piezómetro	28/4/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-07	Piezómetro	28/4/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-09	Piezómetro	28/4/2025	0,7± 0,2	0,08
PZS 13-17	Piezómetro	28/4/2025	1,5± 0,2	0,18
DH-FS-309	Piezómetro	29/4/2025	1,2± 0,2	0,14
DH-FS-315	Piezómetro	28/4/2025	1,5± 0,2	0,18
DH-TM-100	Piezómetro	28/4/2025	1,4± 0,2	0,17
BH-5M-03	Piezómetro	29/4/2025	1,3± 0,2	0,15
BH-5M-08	Piezómetro	29/4/2025	0,8± 0,2	0,09
PZS 12-05	Piezómetro	28/4/2025	<0,4	<0,05
PZ4	Piezómetro	29/4/2025	1,0± 0,2	0,12
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	24/4/2025	1,1± 0,2	0,13
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	Manipulado		
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	24/4/2025	2,1± 0,3	0,25
Quebrada Palestina	Drenaje superficial	25/4/2025	1,2± 0,2	0,14
Quebrada Topacio	Drenaje superficial	23/4/2025	1,1± 0,2	0,13
Quebrada San Antonio	Drenaje superficial	25/4/2025	0,9± 0,2	0,11
Quebrada El Balsal	Drenaje superficial	27/4/2025	1,4± 0,2	0,17
Quebrada El Banco	Drenaje superficial	26/4/2025	0,9± 0,2	0,11

U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico

Fuente: SHI S.A.S (2025)

d. Campaña 4 mayo (2025)

I. Análisis de parámetros de campo

Los parámetros de campo para esta campaña se reportan en el subcapítulo 5.1.6.3.1 ya que son los mismos utilizados en los análisis de las campañas de hidroquímica de 2025.

II. Resultados Oxígeno-18 y Deuterio

Entre el 04 y el 20 de mayo de 2025 se llevó a cabo la cuarta campaña de muestreo isotópico, durante la cual se monitorearon 36 puntos, debido a que el manantial M195 no presentaba flujo de agua al momento de la visita. Los datos obtenidos en esta campaña para las concentraciones de deuterio y oxígeno-18 se resumen en la Tabla 5.1.6.86 y se ilustran en la Figura 5.1.6.185.

De forma semejante a las campañas previas, se observa que las distintas fuentes de agua subterránea monitoreadas (piezómetros, manantiales y aljibes), así como las aguas superficiales (reservorio artificial y drenaje superficial), presentan una composición isotópica similar. En esta campaña, la concentración de oxígeno-18 varía entre -11,14‰ y -6,95‰, mientras que la de deuterio oscila entre -79,58‰ y -45,67‰, lo que evidencia una señal isotópica relativamente homogénea en el sistema, con ligeras variaciones que pueden estar

asociadas a diferencias en la altitud de recarga, trayectoria del flujo subterráneo o grado de interacción con agua superficial.

Por su parte, las muestras de agua lluvia recolectadas en los totalizadores revelan un empobrecimiento isotópico relativo respecto a las precipitaciones analizadas en campañas anteriores. Las concentraciones de oxígeno-18 en esta campaña registran valores entre -14,84‰ y -13,81‰, mientras que las de deuterio varían entre -109,22‰ y -101,65‰. Esta variación entre campañas no es lo esperado al considerar únicamente el efecto de cantidad, dado que en la campaña previa se recolectó un mayor volumen de precipitación, y los eventos de mayor magnitud suelen presentar una señal isotópica más empobrecida. Sin embargo, este empobrecimiento puede tener diversas causas, entre ellas, que la precipitación registrada provenga de una masa de aire más empobrecida en isótopos pesados, que esté asociada a condiciones atmosféricas más frías, o que exista un mayor componente de humedad reciclada a nivel local, lo que puede alterar la señal isotópica de la lluvia.

Cabe destacar que el totalizador 1 es el que presenta la firma isotópica menos empobrecida entre los tres totalizadores analizados. Este comportamiento puede atribuirse al efecto de altitud, ya que las precipitaciones a menores elevaciones suelen mostrar concentraciones más altas de isótopos pesados. Además, se observa que el manantial M233 y la quebrada El Balsal presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida que el resto de los puntos de agua subterránea o superficial, lo que podría indicar una mayor conexión con agua de recarga reciente.

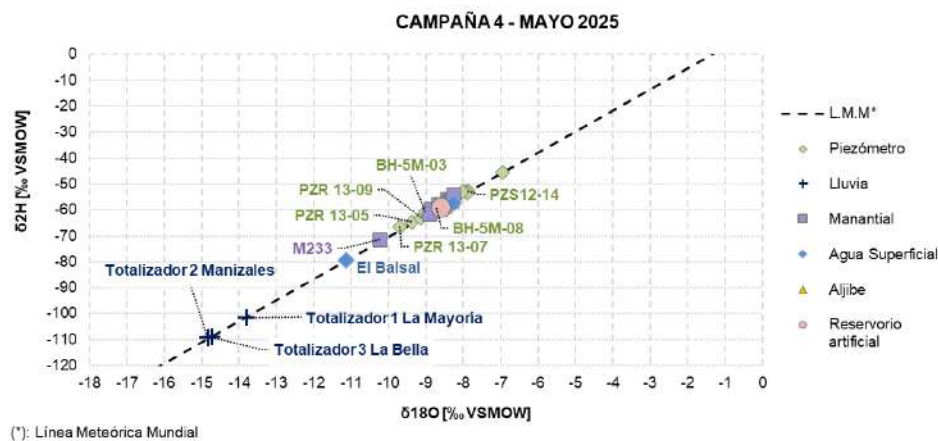


Figura 5.1.6.185 Línea meteórica mundial y resultados de oxígeno-18 y deuterio.
Campaña 4 - abril de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

Tabla 5.1.6.86 Resultados de deuterio y oxígeno-18 campaña 4 abril (2025)

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm$ 0.2‰	VSMOW $\pm$ 0.8‰	
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025		-8,58	-59,45	9,16
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025		-8,54	-57,88	10,44
M18	Manantial	5/5/2025		-8,86	-59,53	11,36
M20	Manantial	5/5/2025		-8,45	-55,93	11,64
M87	Manantial	19/5/2025		-8,90	-61,54	9,67
M118	Manantial	14/5/2025		-8,32	-56,55	10,04
M121	Manantial	13/5/2025		-8,31	-55,92	10,56
M189	Manantial	15/5/2025		-8,62	-58,73	10,25
M242	Manantial	9/5/2025		-8,26	-54,28	11,76
M233	Manantial	19/5/2025		-10,23	-71,45	10,35
M100	Manantial	18/5/2025		-8,67	-57,62	11,70
M195	Manantial	Seco				
M215	Manantial	6/5/2025		-8,26	-54,14	11,98
M222	Manantial	16/5/2025		-8,59	-58,31	10,45
PZA12-03	Piezómetro	7/5/2025		-8,35	-56,91	9,88
PZA12-08	Piezómetro	4/5/2025		-6,95	-45,67	9,92
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025		-8,32	-57,47	9,09
PZS12-14	Piezómetro	12/5/2025		-7,87	-52,77	10,21
PZR 13-05	Piezómetro	11/5/2025		-9,38	-64,59	10,41
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025		-9,70	-66,43	11,17
PZR 13-09	Piezómetro	7/5/2025		-9,13	-63,12	9,89
PZS 13-17	Piezómetro	11/5/2025		-8,16	-55,11	10,19
DH-FS-309	Piezómetro	16/5/2025		-8,48	-56,56	11,25
DH-FS-315	Piezómetro	18/5/2025		-7,94	-53,01	10,53
DH-TM-100	Piezómetro	4/5/2025		-7,90	-53,65	9,52
BH-5M-03	Piezómetro	13/5/2025		-9,00	-60,74	11,30
BH-5M-08	Piezómetro	14/05/2025		-8,72	-59,27	10,52
PZS 12-05	Piezómetro	13/5/2025		-8,19	-55,26	10,28
PZ4	Piezómetro	15/5/2025		-8,01	-53,07	11,00
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	20/5/2025	7,7	-13,81	-101,65	8,81
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	7,0	-14,84	-109,22	9,50
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	7,7	-14,73	-109,13	8,69
Quebrada Palestina	Agua Superficial	5/5/2025		-8,43	-58,39	9,08
Quebrada Topacio	Agua Superficial	6/5/2025		-8,45	-59,49	8,09
Quebrada San Antonio	Agua Superficial	8/5/2025		-8,47	-58,63	9,13

Punto	Tipo	Fecha	Volumen recolectado en totalizadores (l)	$\delta^{18}\text{O}$	$\delta^2\text{H}$	Exceso de deuterio
				VSMOW $\pm$ 0.2‰	VSMOW $\pm$ 0.8‰	
Quebrada El Balsal	Agua Superficial	19/5/2025		-11,14	-79,58	9,53
Quebrada El Banco	Agua Superficial	9/5/2025		-8,26	-57,52	8,57

Fuente: SHI S.A.S (2025)

III. Resultados de Tritio

Los resultados de tritio de la cuarta campaña de monitoreo de 2025 son presentados en la Tabla 5.1.6.87. El agua recolectada en los totalizadores muestra concentraciones de 0,6 U.T. en el totalizador 1 La Mayoría y 1,2 U.T. en el totalizador 2 Manizales, los cuales se encuentran dentro del rango esperado para la precipitación reciente en Colombia.

Respecto al agua subterránea, los valores de tritio presentan un rango de variación amplio, desde niveles por debajo del límite de detección (<0,4 UT en puntos como el aljibe La Mayoría, PZR 13-05, PZR 13-07 y PZS 12-05), hasta concentraciones relativamente altas como en DH-TM-100 (1,8 U.T.).

Como se ha observado en campañas previas, la concentración registrada en los piezómetros PZR 13-05 y PZR 13-07 podría indicar aguas con mayor tiempo de residencia, con un flujo aislado de la recarga reciente. En contraste, los valores más altos pueden ser asociados a recarga relativamente reciente, lo que indica una conexión más activa con la zona de infiltración.

Tabla 5.1.6.87 Resultados de tritio campaña 4. mayo de 2025

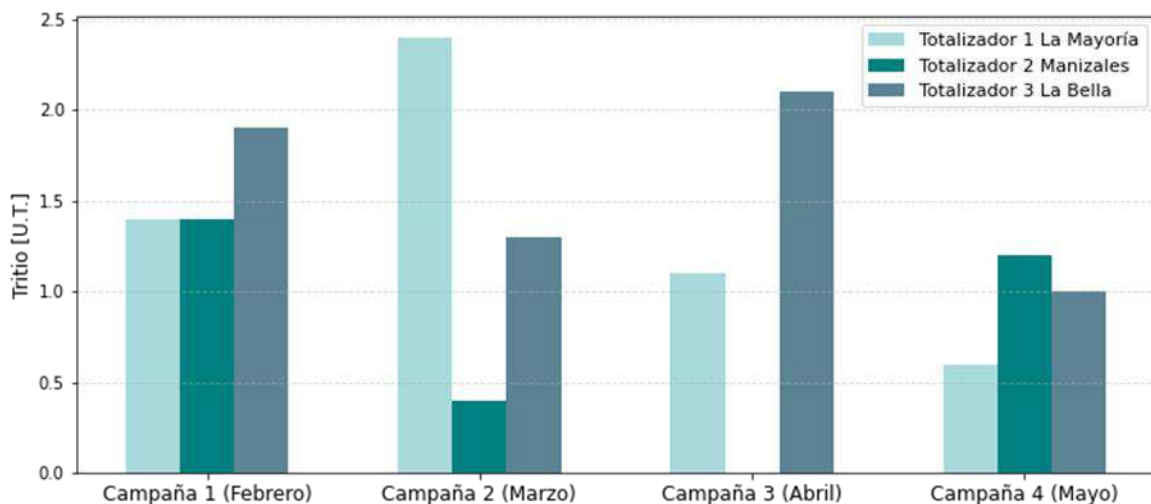
Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
Reservorio artificial La Mayoría	Reservorio artificial	12/5/2025	0,9 $\pm$ 0,2	0,11
Aljibe La Mayoría	Aljibe	12/5/2025	<0,4	<0,05
M18	Manantial	5/5/2025	0,6 $\pm$ 0,2	0,07
M20	Manantial	5/5/2025	0,7 $\pm$ 0,1	0,08
M87	Manantial	19/5/2025	1,1 $\pm$ 0,2	0,13
M118	Manantial	14/5/2025	0,6 $\pm$ 0,2	0,07
M121	Manantial	13/5/2025	0,9 $\pm$ 0,2	0,11
M189	Manantial	15/5/2025	1,2 $\pm$ 0,2	0,14
M242	Manantial	9/5/2025	0,8 $\pm$ 0,2	0,09
M233	Manantial	19/5/2025	1,5 $\pm$ 0,2	0,18
M100	Manantial	18/5/2025	1,2 $\pm$ 0,2	0,14
M195	Manantial	Seco		
M215	Manantial	6/5/2025	1,2 $\pm$ 0,2	0,14
M222	Manantial	16/5/2025	1,0 $\pm$ 0,2	0,12
PZA12-03	Piezómetro	7/5/2025	0,8 $\pm$ 0,2	0,09
PZA12-08	Piezómetro	4/5/2025	1,6 $\pm$ 0,2	0,19
PZS12-12	Piezómetro	4/5/2025	0,6 $\pm$ 0,2	0,07
PZS12-14	Piezómetro	12/5/2025	1,1 $\pm$ 0,2	0,13

Punto	Tipo	Fecha	Tritio [U.T.]	Tritio [Bq/dm ³]
PZR 13-05	Piezómetro	11/5/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-07	Piezómetro	11/5/2025	<0,4	<0,05
PZR 13-09	Piezómetro	7/5/2025	1,2 ± 0,2	0,14
PZS 13-17	Piezómetro	11/5/2025	1,6 ± 0,2	0,19
DH-FS-309	Piezómetro	16/5/2025	1,6 ± 0,2	0,19
DH-FS-315	Piezómetro	18/5/2025	1,1 ± 0,2	0,13
DH-TM-100	Piezómetro	4/5/2025	1,8 ± 0,2	0,21
BH-5M-03	Piezómetro	13/5/2025	1,1 ± 0,2	0,13
BH-5M-08	Piezómetro	14/5/2025	0,7 ± 0,1	0,08
PZS 12-05	Piezómetro	13/5/2025	<0,4	<0,05
PZ4	Piezómetro	15/05/2025	1,3 ± 0,2	0,15
Totalizador 1 La Mayoría	Lluvia	20/5/2025	0,6 ± 0,2	0,07
Totalizador 2 Manizales	Lluvia	20/5/2025	1,2 ± 0,2	0,14
Totalizador 3 La Bella	Lluvia	20/5/2025	1,0 ± 0,2	0,12
Palestina	Drenaje superficial	5/5/2025	0,5 ± 0,1	0,06
Topacio	Drenaje superficial	6/5/2025	1,3 ± 0,2	0,15
San Antonio	Drenaje superficial	8/5/2025	0,6 ± 0,2	0,07
El Balsal	Drenaje superficial	19/5/2025	1,8 ± 0,2	0,21
El Banco	Drenaje superficial	9/5/2025	1,5 ± 0,2	0,18

[U.T.: Unidades de tritio [Bq/dm³]: becquerel por decímetro cúbico.

Fuente: SHI S.A.S (2025)

En la Figura 5.1.6.186 se presenta la concentración de tritio registrada en el agua lluvia en las campañas de monitoreo ejecutadas en el año 2025. Como se ha mencionado previamente, los valores de tritio registrados en los totalizadores se mantienen dentro del rango esperado para precipitaciones recientes en Colombia, el cual generalmente no supera las 2,3 U.T. Estos resultados reflejan las condiciones atmosféricas actuales y no evidencian influencia de fuentes externas o no naturales de tritio.



*Totalizador 2 (marzo): <0.4 U.T.

Figura 5.1.6.186 Concentración de tritio en el agua lluvia en campañas de 2025

Fuente: SHI S.A.S (2025)

I. Conclusiones de la evaluación isotópica para las campañas de 2025

Los valores de temperatura y pH se mantienen dentro de los rangos típicos para aguas subterráneas y superficiales en el área de influencia. Particularmente, el pH indica aguas que varían entre ligeramente ácidas a ligeramente alcalinas, sin evidencias claras de procesos intensos de acidificación.

Los valores de conductividad eléctrica registrados indican un grado de mineralización que varía entre bajo y moderado en la mayoría de los puntos monitoreados. Como es esperado, los totalizadores presentan las conductividades eléctricas más bajas ($< 40 \mu\text{S/cm}$), reflejando la baja concentración de solutos disueltos típica de la precipitación.

En manantiales y piezómetros, los valores se sitúan en rangos similares; no obstante, en términos generales, los piezómetros tienden a mostrar valores ligeramente más altos. Esta diferencia sutil sugiere una mayor interacción agua-roca y tiempos de residencia algo más prolongados en el sistema subterráneo. Sin embargo, algunos piezómetros ubicados generalmente en depósitos aluviales o saprolito, se caracterizan por presentar conductividades eléctricas bajas ($< 150 \mu\text{S/cm}$), semejantes a las observadas en manantiales, lo que sugiere recarga reciente y tiempos de tránsito reducidos.

La composición isotópica del agua en los distintos puntos monitoreados evidenciada en las cuatro primeras campañas de monitoreo es relativamente homogénea, con ligeras variaciones entre fuentes subterráneas y superficiales. Las aguas subterráneas presentan valores similares de oxígeno-18 y deuterio, aunque algunos piezómetros (PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07) muestran una firma isotópica más empobrecida, lo que puede sugerir que estas aguas provienen de un sistema de flujo más profundo o aislado de la recarga reciente.

Por su parte, a lo largo de las distintas campañas de muestreo isotópico, el agua lluvia ha mostrado un comportamiento generalmente coherente con el efecto de cantidad, es decir, una relación inversa entre el volumen de precipitación y la concentración de isótopos pesados (oxígeno-18 y deuterio).

En general, el comportamiento del tritio en las diferentes campañas de monitoreo puede indicar que la mayoría de las aguas subterráneas monitoreadas en el área de influencia corresponden a aguas jóvenes, con influencia de recarga reciente. Sin embargo, valores más bajos, por debajo del límite de detección, observados principalmente en algunos piezómetros, sugieren la posible existencia de flujos más antiguos, más profundos o con menor conexión a las zonas de recarga.

Por su parte, las aguas lluvia recolectadas en los totalizadores generalmente responden a la variabilidad natural del tritio atmosférico.

5.1.6.3.5 Análisis de parámetros de campo

En el marco de las actividades de monitoreo hidroquímico e isotópico se ha llevado a cabo la medición in situ de parámetros fisicoquímicos en los puntos de agua de interés.

Adicionalmente, estos parámetros también fueron medidos en seis campañas de monitoreo de niveles piezométricos realizadas por SHI S.A.S.

Durante cada visita se registraron parámetros como temperatura, pH, conductividad eléctrica, oxígeno disuelto, entre otros, utilizando equipos multiparamétricos debidamente calibrados. El desarrollo sistemático de estas campañas ha permitido construir una línea base robusta y detectar posibles variaciones espaciotemporales asociadas a factores naturales y/o antrópicos (SHI SAS, 2025).

A continuación, se presenta el análisis integrado de los resultados obtenidos para los puntos de agua subterránea (manantiales y piezómetros), con el fin de identificar tendencias, establecer comparaciones entre campañas y zonas, y generar conclusiones técnicas que aporten a la toma de decisiones en materia de gestión ambiental (SHI SAS, 2025).

A. Análisis de parámetros en piezómetros

El monitoreo de los parámetros fisicoquímicos en los piezómetros se llevó a cabo entre los meses de febrero y mayo de 2025, mediante la ejecución de seis campañas de campo. En total, se evaluaron 15 piezómetros distribuidos espacialmente en el área de influencia del proyecto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante diagramas de caja y bigotes, los cuales permiten identificar la distribución, tendencia central y posibles valores atípicos de los parámetros evaluados: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, facilitando así el análisis de su comportamiento y variabilidad espacial y temporal (SHI SAS, 2025).

El análisis del diagrama de caja y bigotes correspondiente al parámetro de pH (Figura 5.1.6.187) evidencia que los valores registrados oscilan entre 5,9 y 7,9, lo cual indica condiciones que varían desde ligeramente ácidas hasta levemente alcalinas. El punto de monitoreo PZR 13-07 presenta los valores más elevados, lo que sugiere la posible influencia de materiales geológicos o procesos de intercambio iónico que elevan la alcalinidad. En contraste, PZS12-14 muestra los valores más bajos, con registros incluso por debajo de 6, lo cual puede estar asociado a procesos de oxidación de materia orgánica o a la infiltración de aguas ácidas. Se destaca también la alta variabilidad en puntos como BH-5M-03 y PZS12-12, donde se evidencian rangos amplios y posibles valores atípicos, reflejando cambios espaciales o temporales en las condiciones hidroquímicas. Por el contrario, puntos como PZA12-03, PZR 13-09 y PZ4 presentan distribuciones estrechas, lo que sugiere mayor estabilidad del pH en dichos sectores (SHI SAS, 2025).

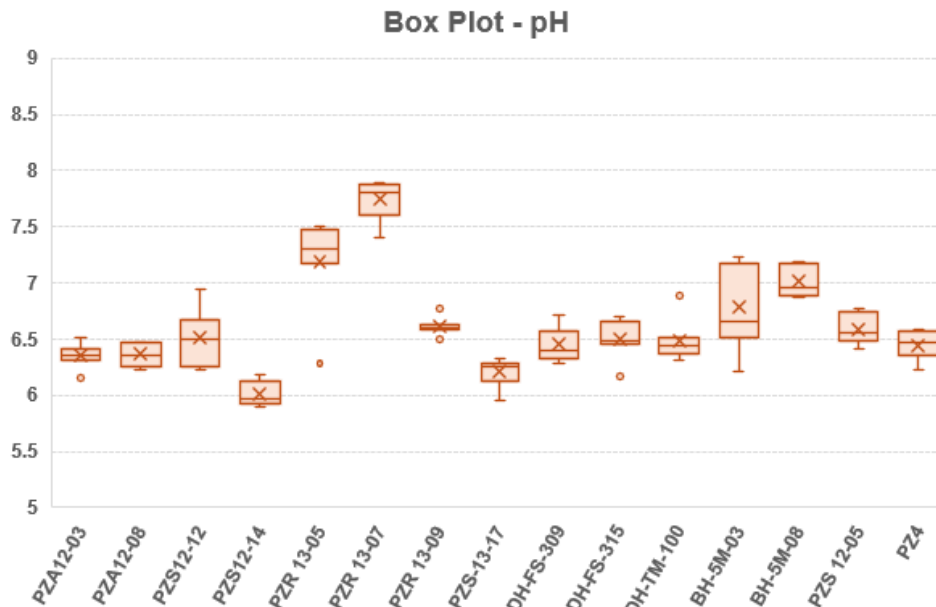


Figura 5.1.6.187 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en piezómetros

Fuente: (SHI SAS, 2025)

Con base en el análisis visual del diagrama de caja y bigotes correspondiente a las concentraciones de oxígeno disuelto (OD) registradas en los piezómetros monitoreados (Figura 5.1.6.188), se evidencian variaciones significativas tanto en los valores promedio como en la dispersión de los datos entre los diferentes puntos de muestreo. Se destacan valores máximos superiores a 6 mg/l en piezómetros como PZR 13-05, PZR 13-07, DH-FS-309 y PZS 12-05, lo cual sugiere una buena oxigenación del agua subterránea en estos sectores, posiblemente asociada a una mayor recarga o interacción con el agua superficial. Por el contrario, piezómetros como DH-FS-315, PZR 13-09, y PZA12-08 presentan rangos bajos de OD, incluso con valores por debajo de 2 mg/l, lo que podría indicar condiciones reductoras o limitaciones en la renovación del agua. Asimismo, se observaron casos con presencia de posibles valores atípicos (outliers), como en PZA12-03 y PZS 12-05, lo que sugiere eventos puntuales o variaciones temporales en la calidad del agua subterránea (SHI SAS, 2025).

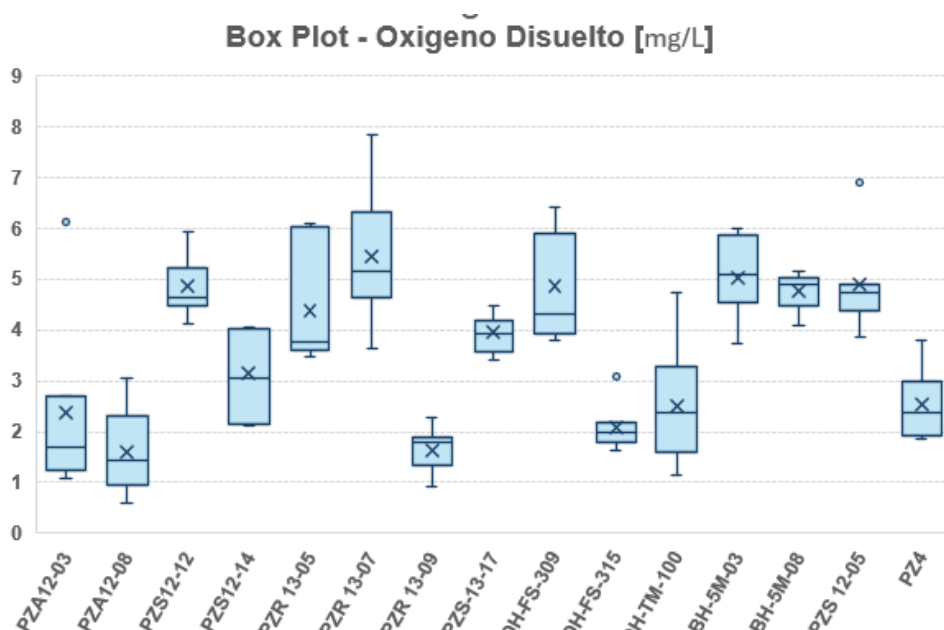


Figura 5.1.6.188 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en piezómetros

Fuente: (SHI SAS, 2025)

En cuanto a la conductividad eléctrica (Figura 5.1.6.189), los valores registrados muestran una notable variabilidad entre los diferentes piezómetros, con rangos que van desde aproximadamente 60 $\mu\text{S}/\text{cm}$ hasta más de 300 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los mayores valores se presentan en PZR 13-07, lo cual podría relacionarse con zonas de mayor mineralización del agua subterránea, sin embargo, los valores de oxígeno disuelto en este punto fueron predominantemente mayores a 5 mg/l, lo que se asocia a aguas de recarga reciente, por lo que estos niveles de conductividad pueden indicar condiciones de contaminación en el punto (SHI SAS, 2025).

En contraste, puntos como PZS-13-17 y PZA12-03 muestran niveles más bajos de conductividad, lo que puede estar asociado a aguas de menor tiempo de residencia o zonas con materiales menos solubles. El piezómetro BH-5M-03 destaca por presentar una dispersión significativamente alta, con un rango intercuartílico amplio y la posibilidad de presencia de múltiples valores atípicos, indicando una posible mezcla de aguas con diferente composición o variabilidad en las condiciones de muestreo (SHI SAS, 2025).

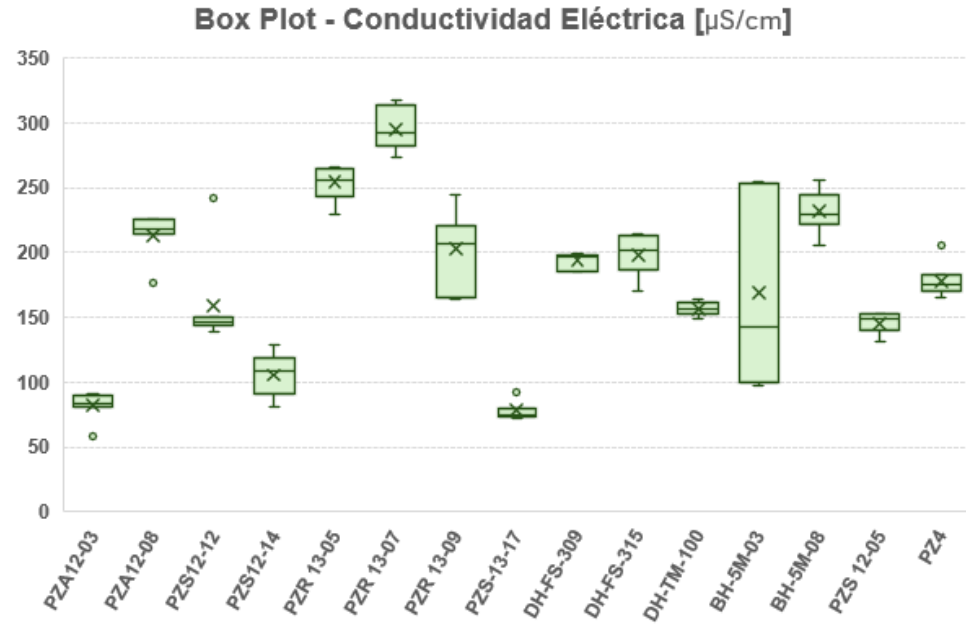


Figura 5.1.6.189 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en piezómetros

Fuente: (SHI SAS, 2025)

B. Análisis de parámetros en manantiales

El monitoreo de los parámetros fisicoquímicos en los manantiales se llevó a cabo entre los meses de febrero y mayo de 2025, mediante la ejecución de tres campañas de campo. En total, se evaluaron 14 manantiales distribuidos espacialmente en el área de influencia del proyecto. A continuación, se presentan los resultados obtenidos mediante diagramas de caja y bigotes, los cuales permiten identificar la distribución, tendencia central y posibles valores atípicos de los parámetros evaluados: pH, oxígeno disuelto y conductividad eléctrica, facilitando así el análisis de su comportamiento y variabilidad espacial y temporal (SHI SAS, 2025).

Los resultados de las mediciones de pH en fuentes naturales (manantiales, aljibes y reservorios) durante las campañas de monitoreo, evidencian una ligera variabilidad espacial entre los puntos de muestreo, con valores que oscilan entre 5,63 y 7,84 unidades de pH, lo cual indica en general condiciones entre ligeramente ácidas a neutras (Figura 5.1.6.190).

Los puntos que presentaron valores más bajos de pH fueron M222 (5,63) y M100 (6,03), los cuales podrían estar influenciados por procesos de oxidación de materia orgánica, presencia de suelos ácidos o bajo contenido de carbonatos en la zona. Por el contrario, los valores más altos se observaron en M121 (hasta 7,84), sugiriendo condiciones más alcalinas que podrían estar asociadas a la presencia de materiales con mayor capacidad de amortiguamiento (como rocas calcáreas o procesos de disolución de s). En cuanto a los rangos intercuartílicos y la distribución general de los datos, la mayoría de los manantiales presentan una variación relativamente baja, lo cual indica cierta estabilidad química del agua en estas fuentes durante el periodo analizado. Sin embargo, puntos como M233,

M121 y M222 mostraron variaciones más marcadas, lo cual podría ser indicativo de mezclas hídricas o influencia de factores ambientales puntuales (SHI SAS, 2025).

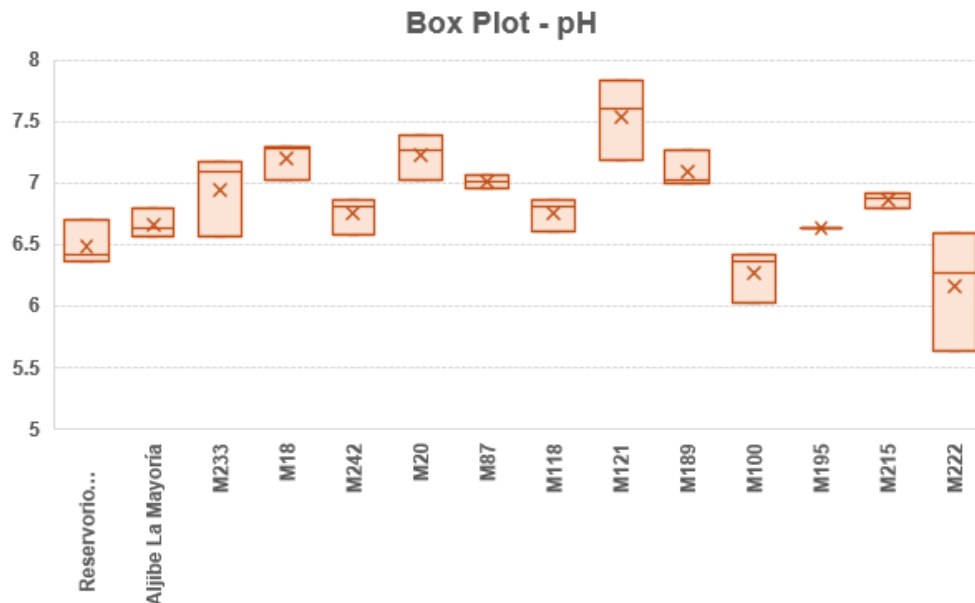


Figura 5.1.6.190 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de pH en manantiales

Fuente: SHI SAS (2025)

En cuanto el oxígeno disuelto (OD), se evaluaron en diversas fuentes hídricas superficiales y subterráneas poco profundas, incluyendo manantiales, aljibes y un reservorio artificial (Figura 5.1.6.191). Los valores registrados oscilaron entre 0,41 mg/l y 7,04 mg/l, evidenciando una amplia variabilidad espacial y posiblemente temporal, atribuible a factores fisicoquímicos y biológicos del entorno.

Los niveles más bajos de OD se presentaron en el Reservorio Artificial La Mayoría (mínimo de 0.74 mg/l), M233 (0.41 mg/l) y M118 (0,55 mg/l), lo que sugiere condiciones de baja oxigenación, posiblemente asociadas a procesos de estancamiento, presencia de materia orgánica en descomposición, consumo de oxígeno por microorganismos, o escasa fotosíntesis debido a poca penetración de luz (SHI SAS, 2025).

Por otro lado, los niveles más altos se registraron en M87 (7,04 mg/l), M20 (6,86 mg/l) y M18 (6,82 mg/l), indicando condiciones de buena oxigenación, favorecidas probablemente por una mayor renovación del agua.

Cabe resaltar que el Reservorio Artificial La Mayoría presentó los valores más bajos de OD en promedio, lo cual lo distingue del comportamiento observado en manantiales naturales. El Aljibe La Mayoría mostró una mayor variabilidad, con valores que van desde 1,49 hasta 6,56 mg/l. La mayoría de los manantiales (M20, M87, M215, M121) mantuvieron valores de OD por encima de 6 mg/l (SHI SAS, 2025).

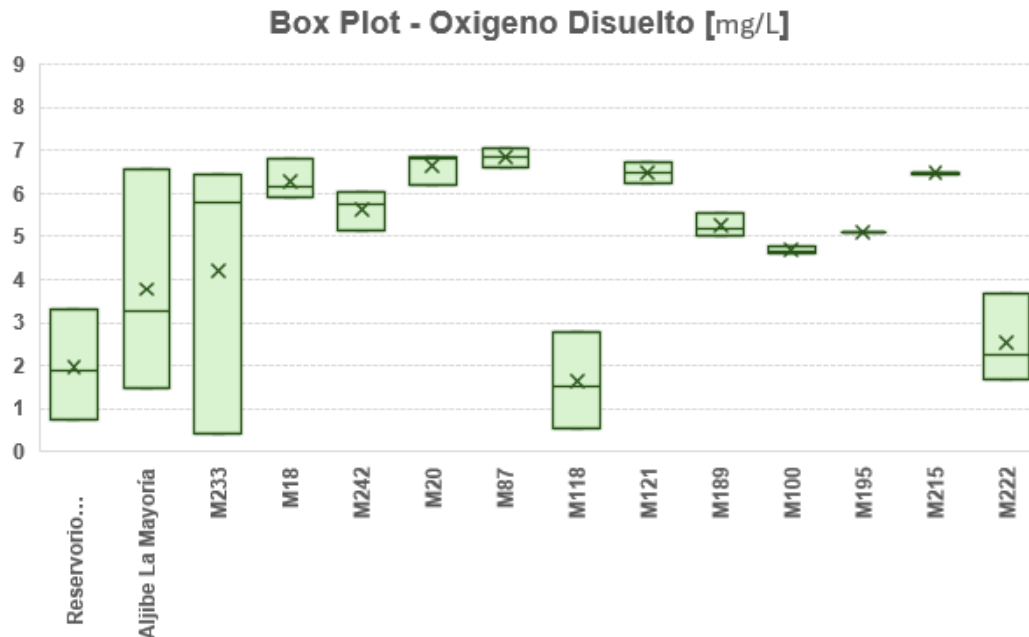


Figura 5.1.6.191 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de oxígeno disuelto en manantiales

Fuente: (SHI SAS, 2025)

En los puntos de muestreo analizados, se observaron valores de CE que oscilaron entre 32,5 y 209,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Figura 5.1.6.192). Los valores más bajos de conductividad se registraron en el Reservorio artificial La Mayoría, con un rango entre 32,5 y 75,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y en el Aljibe La Mayoría, con lecturas entre 34,7 y 85,8 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En contraste, el valor más alto de CE se presenta en el punto M87, presentando una conductividad de 209,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos resultados sugieren una baja mineralización del agua en estas fuentes, probablemente asociada a una recarga superficial reciente, escasa interacción con materiales geológicos solubles (SHI SAS, 2025).

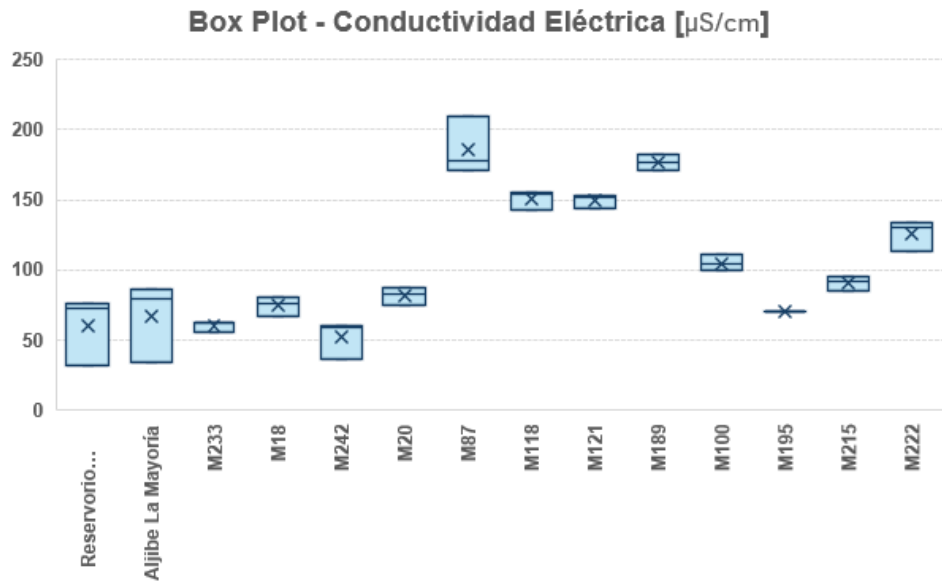


Figura 5.1.6.192 Diagrama de caja y bigotes para mediciones de conductividad eléctrica en manantiales

Fuente: (SHI SAS, 2025)

5.1.6.3.6 Drenajes mineros ácidos (DMA)

Para el siguiente subcapítulo se tendrán en cuenta las siguientes siglas:

- DMA: drenaje minero ácido o DRA: drenaje ácido de roca.
- NAG: Generación Neta de Ácido.
- PAG o PGAA: Potencial de Generación de Aguas Ácidas.
- No PAG: No generador de ácido
- PN: Máximo Potencial de neutralización
- PA: Máximo potencial de producción de ácido
- RPN: Razón de Potencial de Neutralización o Razón de Potencial Neto

Las investigaciones geoquímicas en el Proyecto Gramalote se iniciaron en el 2010, pHase Geochemistry Inc. (pHase) en 2013 desarrolló caracterización de geoquímica para entender el potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR).

La generación de drenaje ácido de mina (DMA) se da cuando se exponen minerales sulfurados a la oxidación. Para evaluar este riesgo, se realizan pruebas estáticas y cinéticas, como el test de Balance Ácido-Base (ABA) y el test de Generación Neta de Ácido (NAG), para determinar el Potencial de Generación de Aguas Ácidas (PGAA).

La Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) mediante la Resolución 782 del 8 de mayo de 2019 otorga modificación de la licencia y realiza un requerimiento:

3. Realizar la evaluación del potencial de generación de DMA a partir de la formación y neutralización natural de ácido. Para ello se deben determinar el Potencial Neto de Neutralización (NNP) a partir del cociente entre el máximo potencial de neutralización (NP) y el máximo potencial de producción de ácido (AP) desarrollando Ensayos Estáticos en

muestras espacialmente representativas de los diferentes tipos de suelo y roca que serán intervenidos por el proyecto. Cuando el NNP presente una relación NP:AP menor a 3:1 se deben efectuar Ensayos Dinámicos empleando metodologías internacionalmente reconocidas y se deben proponer medidas de manejo especiales para el control y tratamiento de los DMA durante y después de la explotación minera.”

Para responder el requerimiento (Golder, 2020) Golder 2020 resume los resultados de las pruebas geoquímicas desarrolladas a la fecha en el marco de la aplicación de los nuevos criterios para la clasificación del potencial de generación de drenaje ácido de roca (DAR) de los materiales de mina requerido por la ANLA en los “Términos de referencia para la elaboración del estudio de impacto ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera” (ANLA 2016). Se realizó una comparación entre los criterios específicos del sitio (pHase 2015) y los criterios de ANLA 2016.

La comparación demuestra que el uso de los criterios específicos del sitio (pHase 2015) conduce a una evaluación conservadora de la proporción de material PAG generado, y en el contexto del plan de manejo de residuos, este enfoque conservador reduce los riesgos ambientales. (Golder, 2020).

A. Criterios para la clasificación DAR

Los criterios específicos del sitio para la clasificación DAR (pHase 2015) se presentan en la Tabla 5.1.6.88 y también se presentan los criterios definidos en el GARD Guide (INAP, 2014) y el manual de predicción de la química de drenaje de materiales geológicos sulfurados de MEND (MEND, 2009); ambas guías son ampliamente usadas en la industria minera a nivel mundial.

Tabla 5.1.6.88 Criterios de Clasificación DAR Aplicados

Clasificación DAR	Criterio específico del sitio (pHase 2015)	ANLA (2016)	GARD Guide (INAP 2014)
Potencialmente generador de ácido (PAG)	PN/PA < 2	PN/PA < 1	PN/PA < 1
Potencial no definido (UC) / Incierto	2 < PN/PA <= 4	1 <= PN/PA <= 3	1 <= PN/PA <= 2
No generador de ácido (No PAG)	PN/PA > 4	PN/PA > 3	PN/PA > 2

Fuente: (Golder, 2020)

La Tabla 5.1.6.89 establece que usando los criterios específicos del sitio (pHase 2015) se clasifica como PAG una mayor cantidad de material ya que todos los materiales con RPN (Razón de Potencial de Neutralización) entre 1 y 2 serán considerados PAG, caso contrario usando los criterios de los términos de referencia (ANLA, 2016) donde estos mismos materiales serían clasificados como no definido. (Golder, 2020).

B. Resultados

a. Roca de Desmonte

I. Potencial de Generación de Drenaje ácido de roca

En todos los casos, los valores de pH en pasta fueron ligeramente alcalinos, a excepción de las muestras de saprolito, que son débilmente ácidas (pH medido en pasta de ~ 5,5),

indicando que no hay acidez residual en el material, lo cual es consistente con el bajo nivel de intemperización de los testigos de perforación. (Golder, 2020).

Los resultados de la prueba ABA indican que el azufre total en las muestras analizadas se encuentra predominantemente en forma de sulfuros tal como se observa en la Figura 5.1.6.193. Con este concepto, se usó la concentración de azufre total para calcular el potencial de acidez (PA) como es recomendado por GARD y MEND. (Golder, 2020).

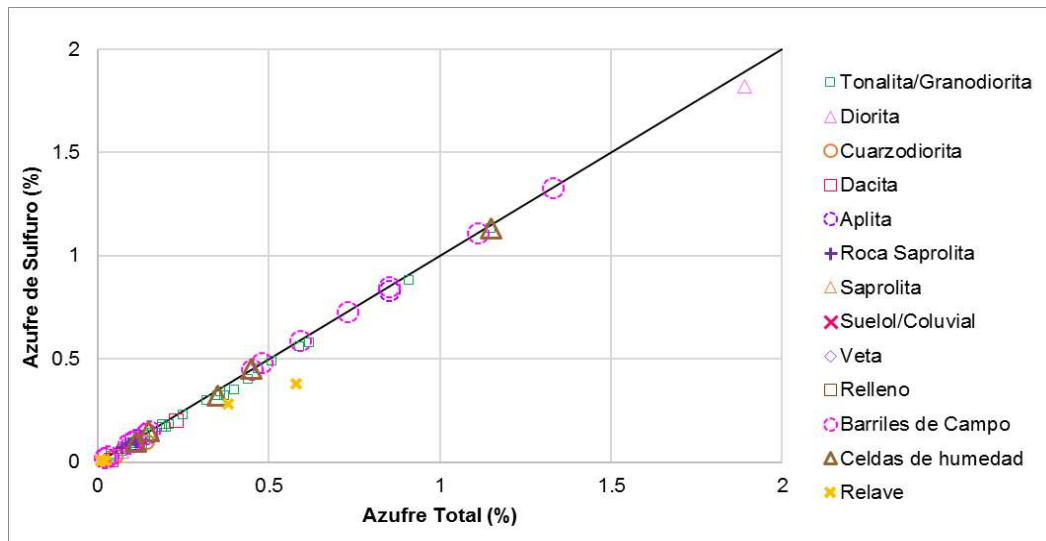


Figura 5.1.6.193 Azufre Total vs Azufre como Sulfuros

Fuente: Golder, 2020

El rango de contenido de azufre total en las muestras de tonalita, varía entre 0.01% y 3.2%, con una concentración promedio de 0.3% que coincide con la concentración promedio de todas las muestras de roca de desmonte. Las litologías saprolito, cuarzodiorita y dacita registraron las menores concentraciones de azufre con promedios menores a 0.1%, la probabilidad de este material para generar acidez es baja debido al bajo contenido de azufre que podría oxidarse para generar acidez. (Golder, 2020)

Una comparación entre el PN total y el PN de minerales carbonato (CO₃-PN) indica que la mayor parte del potencial de neutralización en las muestras proviene de los carbonatos el cual es más reactivo, más efectivo para neutralizar acidez que los minerales de silicatos que se incluyen en el PN total para determinar la capacidad de neutralización del material. (Golder, 2020)

Por ello, para tener una evaluación conservadora de la capacidad de neutralización, los valores de carbono inorgánico total (TIC por sus siglas en inglés) fueron usados para calcular el potencial de neutralización (de carbonatos). En general, el CO₃-PN en las unidades de roca ígnea (tonalita, diorita, cuarzodiorita y dacita) es relativamente bajo con valores menores que 90 kgCaCO₃/t, con promedios entre 20 y 50 kgCaCO₃/t. La roca saprolita no presenta potencial de neutralización. (Golder, 2020)

Los valores calculados de la razón de potencial neto (RPN=PN/PA) fueron usados para clasificar las muestras como PAG, No PAG o Inciertas, como es recomendado por ANLA,

GARD / MEND. Los porcentajes de las muestras por cada tipo de roca se presentan en la Tabla 5.1.6.89 (Golder, 2020).

En general la aplicación del criterio ANLA 2016 produce que una menor cantidad de muestras sean clasificadas como PAG y una mayor cantidad de material es No PAG que con el criterio específico del sitio. (Golder, 2020).

Tabla 5.1.6.89 Clasificación DAR - Criterios Aplicados

Litología	Numero de Muestras	Criterio Especifico - pHase 2015			Criterio ANLA 2016			Criterio GARD / MEND		
		PAG	Incierto	No PAG	PAG	Incierto	No PAG	PAG	Incierto	No PAG
		CO3-RPN < 2	$2 \leq \text{CO3-RPN} < 4$	CO3-RPN ≥ 4	CO3-RPN < 1	$1 \leq \text{CO3-RPN} < 3$	CO3-RPN ≥ 3	CO3-RPN < 1	$1 \leq \text{CO3-RPN} < 2$	CO3-RPN ≥ 2
Tonalita/Granodiorita	517	122	147	248	39	179	299	39	87	391
Diorita	5	1	1	3		2	3		1	4
Cuarzodiorita	3			3			3			3
Dacita	2			2			2			2
Aplita	3	1	2		1	2		1		2
Roca Saprolita	12	5	4	3	2	7	3	2	3	7
Saprolita	35	3	12	20		14	21		3	32
Veta	4	2	1	1	2		2	2		2
Material de relleno	3	2		1	1	1	1	1	1	1
Suelo/Coluvial	1		1			1				1
Total / Porcentaje	585	23%	29%	48%	8%	35%	57%	8%	16%	76%

Fuente: (Golder, 2020)

De acuerdo con lo indicado en los TDR (ANLA 2016), cuando los materiales tienen valores de RPN menores a 3 se deben realizar pruebas cinéticas. (Golder, 2020).

II. Pruebas Cinéticas en Celdas de Humedad (HTC)

El programa de pruebas cinéticas, tanto en celdas de humedad como en barriles de campo, tienen por objetivo cumplir con los requerimientos de los TDR (ANLA 2016) respecto a la confirmación de la clasificación DAR de los materiales con RPN menores a 3 (material PAG y no definido). (Golder, 2020).

En 2012 se iniciaron pruebas standard HCT en cinco muestras de roca de desmonte del depósito Gramalote. Tres de las celdas (1G, 2G, 3G) representan intervalos de 2 m de testigo, y dos de las muestras (4G y 5G) son las réplicas del programa de pruebas en barriles (FB#2 y FB#3), que representan mayores intervalos de testigo (60 m de longitud). La celda 1G representa roca saprolita mientras que las cuatro restantes comprenden tonalita/granodiorita con diferentes contenidos de azufre (entre 0,15 y 1,15%) con clasificaciones no definidas y PAG. Las celdas 2G y 4G representan al mineral de baja ley. (Golder, 2020).

El pH de los lixiviados para las cuatro muestras de tonalita/granodiorita se mantuvo estable en todas las pruebas, con valores de pH comprendidos entre 7,2 y 7,7. La muestra de roca saprolita presentó un pH débilmente ácido con valores típicos entre 5,5 y 7 (Figura 5.1.6.194). (Golder, 2020).

La máxima concentración de sulfato registrada en el flujo inicial (aproximadamente las diez primeras semanas de prueba) fue de ~100 mg/L de HC 3G y tuvo el más alto contenido de azufre (1,15%). La producción de sulfatos fue generalmente baja en todas las celdas después del flujo, presentando concentraciones estables, generalmente menores a 20 mg/L. (Golder, 2020).

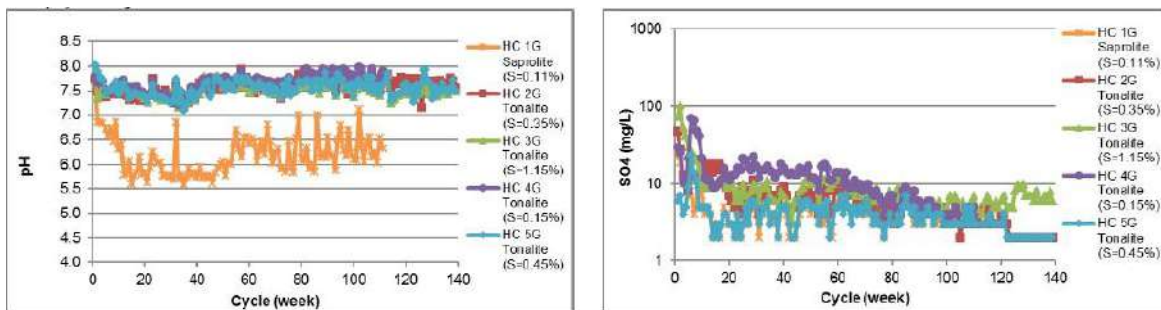


Figura 5.1.6.194 pH y Sulfatos en Pruebas Cinéticas (pHase 2015)

Fuente: Golder, 2020

El cálculo de los tiempos de agotamiento del potencial de neutralización de carbonato y los sulfuros confirma la clasificación PAG para las muestras 1G (roca saprolita) y 3G (tonalita 1,15% S), es decir, el potencial de neutralización se agotará antes que los sulfuros. Sin embargo, se considera que la muestra de saprolita será PAG al final de su intemperización confirmando la clasificación en base a las pruebas estáticas. (Golder, 2020).

Los resultados de HCT 2G, 4G y 5G, que según ABA clasificaban como Inciertas, los cálculos de agotamiento indican que las celdas 2G (0,35% S) y 4G (0,15% S) clasifican como No PAG, mientras que se espera que la celda 5G (0,45% S) sea PAG. (Golder, 2020).

III. Pruebas cinéticas en barriles

Las pruebas de barriles en campo incluyo diez barriles de tonalita/granodiorita con contenido de azufre entre 0,02 y 1,2%. Los primeros cinco barriles se instalaron en 2011. En 2012 se iniciaron cinco barriles adicionales (FB#6 a #10) con muestras de testigos de perforación que interceptan las paredes del tajo. El rango de contenido de azufre evaluado en los barriles es amplio desde 0.02% hasta 1.2% y se podría considerar que la selección de muestras para los barriles tuvo un enfoque conservador ya que se incluyeron muestras

con alto contenido de azufre, pero que esa proporción de roca con este contenido de azufre constituye una baja proporción del total de roca de desmonte que se producirá en la vida útil de la mina. Tres barriles contenían material PAG, cuatro con material No PAG y tres con material no definido. (Golder, 2020).

Los valores de pH en los lixiviados de todos los barriles fueron neutrales y alcalinos durante los 5 años de prueba, incluso los barriles con muestras con relativamente alto contenido de azufre (1.22% S). Los barriles de las paredes del tajo (FB#6 a #10) reportaron valores más elevados de pH a los esperados en rocas tonalitas. (Golder, 2020).

Las concentraciones de sulfatos fueron en su mayoría menores a 100 mg/L mostrando cierta variabilidad entre los barriles, con promedios entre 6 y 48 mg/L (Figura 5.1.6.195). Las concentraciones promedio de sulfato en los barriles de las paredes del tajo (FB#6 a FB#10) son ligeramente superiores a las de los barriles de roca de desmonte (FB#1 a FB#5) estos resultados son consistentes con el mayor grado de mineralización en las paredes del tajo respecto a la roca de desmonte. (Golder, 2020).

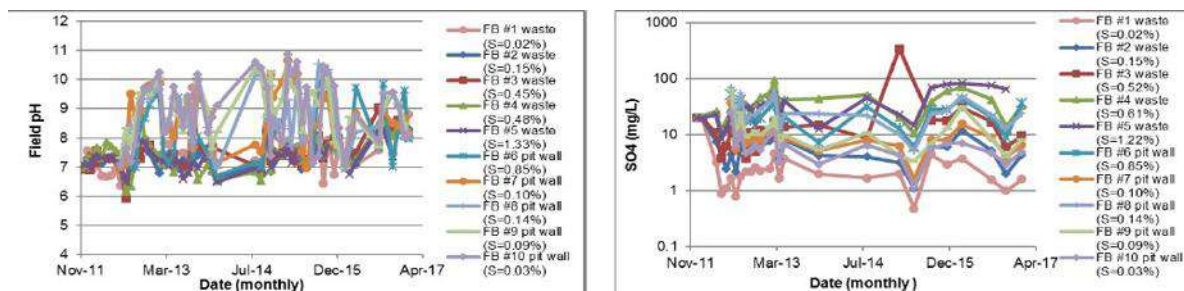


Figura 5.1.6.195 pH y Sulfatos en Pruebas de Barriles

Fuente: (Golder, 2020)

En general, la aplicación de los nuevos criterios de clasificación DAR (ANLA 2016) no sugiere cambios significativos en la clasificación global de los materiales. Se observa un aumento del porcentaje de muestras No PAG, la suma del material incierto y PAG no varía significativamente (Figura 5.1.6.196, Figura 5.1.6.197 y Figura 5.1.6.198). Considerando que el material incierto será manejado para minimizar el riesgo ambiental asociado con el material PAG e Incierto, se concluye que ambos criterios ANLA 2016 y los específicos del sitio son consistentes entre sí. (Golder, 2020).

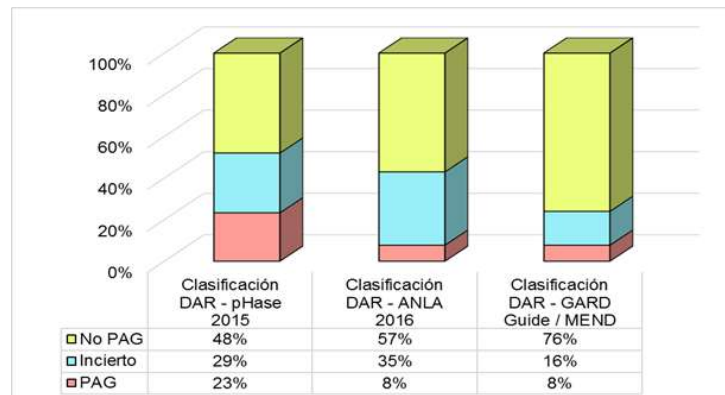


Figura 5.1.6.196 Comparación de Clasificación DAR – Porcentajes Globales (n= 585 muestras)

Fuente: (Golder, 2020)

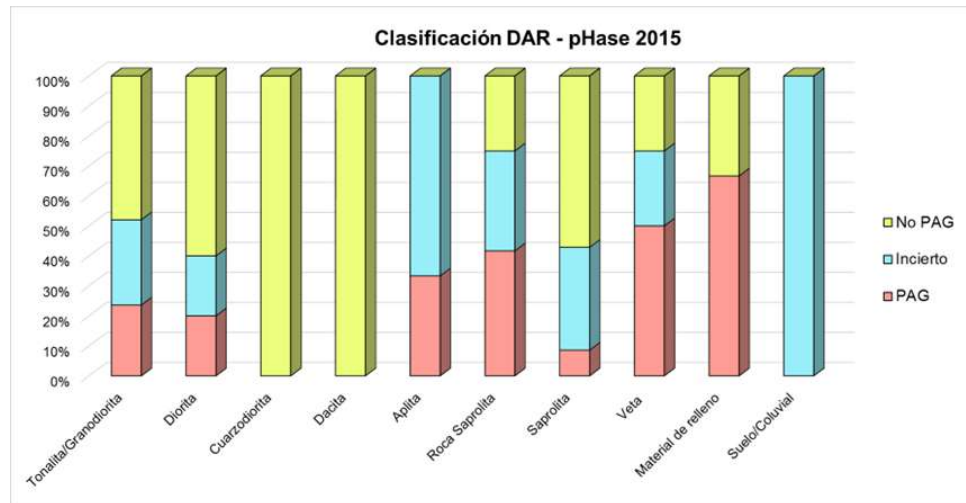


Figura 5.1.6.197 Comparación de Clasificación DAR - Por Litologías

Fuente: (Golder, 2020)

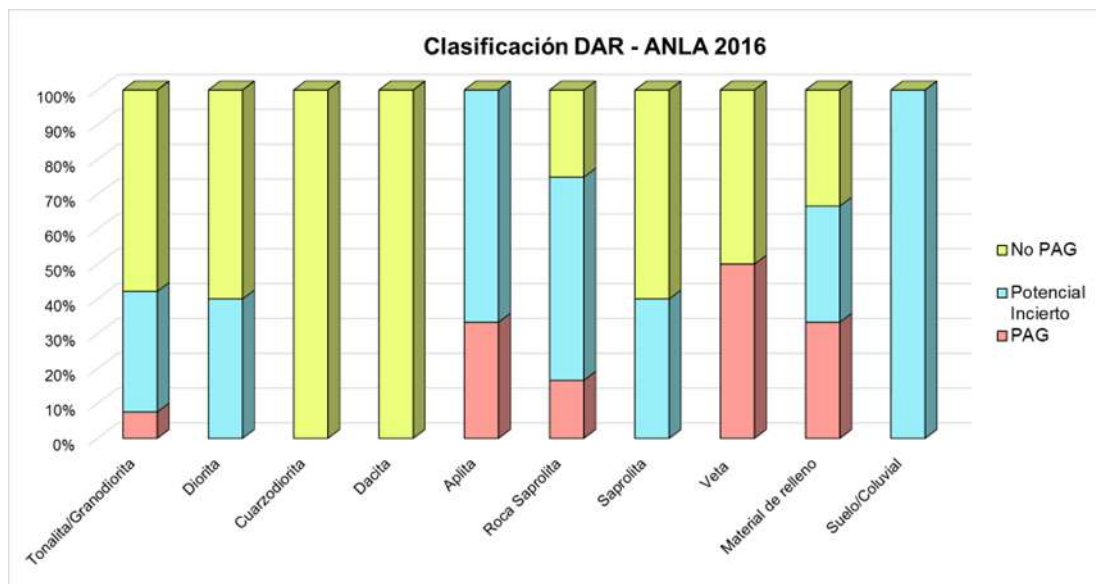


Figura 5.1.6.198 Comparación de Clasificación DAR - Por Litologías y clasificación ANLA 2016

Fuente: (Golder, 2020)

b. Colas o relaves

Se aclara que la presa de colas o relaves ya se encuentra licenciada y no hace parte de la modificación de la licencia actual.

I. Potencial de drenaje ácido

Los relaves producidos en las diferentes etapas de las evaluaciones metalúrgicas se analizaron para determinar sus parámetros geoquímicos, como se resume en esta sección. Se remite al lector al informe del programa metalúrgico para obtener detalles sobre el material de alimentación y la preparación de las muestras, así como sobre los métodos metalúrgicos utilizados en (pHase Geochemistry Inc, 2013).

La Etapa I del programa metalúrgico generó tres relaves que se sometieron a análisis geoquímico, como se indica a continuación:

- Relaves de mineral completo (identificados como CND);
- Relaves de flotación (identificados como F10KG-# TIs); y
- Relaves de concentrado de lixiviación con cianuro (identificados como FCC-CND).

Cada uno de los tipos de relaves mencionados anteriormente también está representado por una muestra de rechazo de vida útil temprana (EMLR) y una muestra de rechazo de vida útil restante (RMLR), para un total de seis muestras de relaves metalúrgicos en la primera etapa del programa.

El trabajo de la Etapa II produjo relaves adicionales, como se indica a continuación:

- Relaves de flotación ciclónica (etiquetados como Flot TIs) en fracciones gruesas y finas, y
- Relaves de concentrado de lixiviación con cianuro (etiquetados como CIP TIs).

La segunda etapa del trabajo metalúrgico se llevó a cabo para producir un volumen suficiente de relaves para las pruebas ambientales y de ingeniería.

A continuación, se resumen los resultados de las pruebas estáticas para las muestras de colas o relaves:

Los relaves de flotación son No PAG, de acuerdo con los resultados de la prueba ABA, su bajo contenido de sulfuros (<0.03%) y valores de PN (entre 20 y 30 kg CaCO₃/t). El contenido de metales en fase sólida no presenta concentraciones elevadas respecto 10 veces la concentración en la corteza terrestre. Cabe resaltar que los relaves de flotación constituyen aproximadamente el 95% del total de relaves que se generaran. (Golder, 2020)

Los relaves de concentrado de lixiviación con cianuro son PAG, de acuerdo con los resultados de la prueba ABA, su alto contenido de sulfuros (entre 8 y 15%) y bajos valores de PN cercanos a 10 kg CaCO₃/t. Se reportaron concentraciones elevadas de Ag, Bi, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mo, Ni, Se, W y Zn en relación con 10 veces la concentración en la corteza terrestre. El criterio de usar diez veces el valor típico de la corteza terrestre es usado para tener una idea referencial del contenido de metales de un material, lo cual no indica directamente que esos metales puedan lixiviarse a las aguas de contacto. Este tipo de relave bajo condiciones aeróbicas podrían generar aguas de contacto ácidas, por ello se considera un manejo en condiciones saturadas para este tipo de relaves, en condiciones subacuáticas el agua de contacto permanece neutra con bajas a moderadas concentraciones de metales. El plan de manejo para los relaves concentrado de lixiviación

con cianuro es mantenerlos en condiciones saturadas (bajo el agua) dentro del depósito de relaves; esto limita la oxidación y evita la generación de acidez. (Golder, 2020).

En general, la clasificación DAR de los relaves no varía al aplicar los criterios específicos del sitio (pHase 2015) y los TDR (ANLA 2016). (Golder, 2020).

II. Pruebas cinéticas

De acuerdo con los requerimientos de ANLA 2016, se realizaron pruebas cinéticas en los relaves tanto PAG como No PAG. También se hicieron pruebas de celdas sumergidas para los relaves PAG (concentrado de lixiviación con cianuro (Cyanide Leach)) para evaluar una medida de manejo y disposición bajo agua. Los resultados de las pruebas HCT se resumen de la siguiente manera:

El pH de lixiviado se ha mantenido en el rango cercano a neutro (entre 6.5 y 8) en todas las muestras (Figura 5.1.6.199) (Golder, 2020).

Las concentraciones de sulfatos, indicador de oxidación de sulfuros, son bajas para los relaves de flotación (<10 mg/L), los relaves de de concentrado de lixiviación con cianuro reportaron mayores concentraciones entre 50 y 100 mg/L. (Golder, 2020).

La fracción fina de los relaves de flotación reportó concentraciones de sulfatos ligeramente más altas que la fracción gruesa. (Golder, 2020).

En las columnas sumergidas los relaves de flotación y los de concentrado de lixiviación con cianuro reportaron valores de pH neutros o alcalinos. Los relaves de concentrado de lixiviación con cianuro presentaron las concentraciones más altas de sulfatos (200-300 mg/L) como resultado del lavado de las aguas de poro durante las pruebas metalúrgicas en lugar de la oxidación. Los relaves de flotación reportaron concentraciones de metales menores al límite de detección. Aunque los valores provenientes de los relaves de concentrado de lixiviación con cianuro son mayores siguen siendo relativamente bajos. (Golder, 2020).

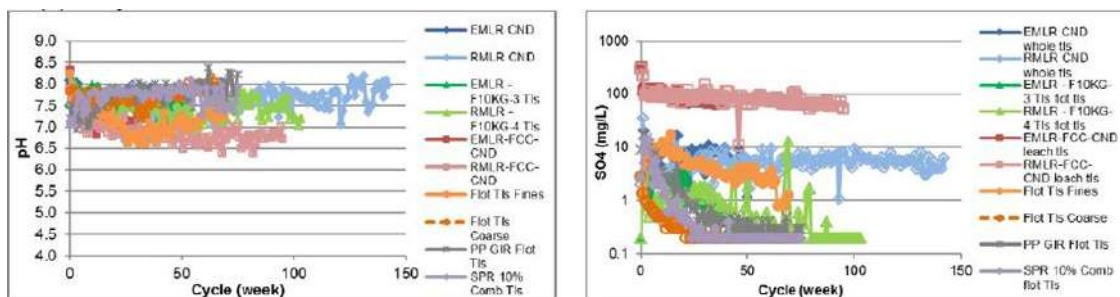


Figura 5.1.6.199 pH y Sulfatos en Celdas de Humedad - Relaves

Fuente: (Golder, 2020)

Se realizaron cálculos de tasas de agotamiento para el azufre y el potencial de neutralización, los cuales confirman que los relaves de flotación son No PAG, y que los relaves concentrados de lixiviación con cianuro son PAG. (Golder, 2020).

III. Pruebas de Barriles

Se construyeron tres barriles de campo de relaves: una fracción gruesa de relaves de flotación que podrían usarse en la construcción del dique del TSF, una fracción fina de relaves de flotación para representar una playa del TSF y relaves de concentrado de lixiviación con cianuro. Se colectaron muestras del agua sobrenadante en la parte superior del material del barril (entrada) y del lixiviado (salida). (Golder, 2020).

En la Figura 5.1.6.200, se observa que el lixiviado de los relaves de flotación gruesa fueron alcalinos con bajo contenido de sulfato (~20 mg/L). El lixiviado de los relaves de flotación fina también ha sido alcalino con niveles de sulfato ligeramente más altos (90 mg/L). El barril de relaves de concentrado de lixiviación con cianuro se volvió ácido después de 8 meses de prueba. Los niveles de sulfato en el barril ácido son mayores a 10,000 mg/L con una mayor lixiviación de metales de Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Se y Zn. (Golder, 2020).

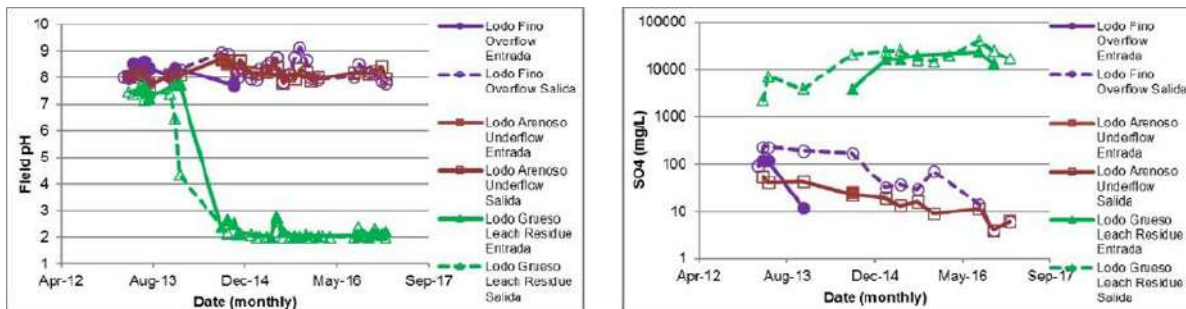


Figura 5.1.6.200 pH y Sulfatos en Barriles de Campo - Relaves

Fuente: (Golder, 2020)

Los lixiviados de los diez barriles de campo mostraron valores de pH neutros a ligeramente alcalinos, generalmente entre 7.0 y 8.5. El subconjunto de barriles con material de pared del tajo (FB #6 a FB #10) reportó un rango más amplio, con valores de pH de hasta 11.0. Estos valores elevados de pH se consideraron inusualmente altos para roca tonalita, lo que sugiere que los lixiviados podrían haber sido influenciados por la arena filtrante en la base de los barriles. (WSP, 2025).

Según los criterios de clasificación ARD recomendados por Golder (2020), solo cuatro barriles de campo (FB #4_superior, FB #5_superior e inferior, y FB #6) se clasifican como PAG, con valores de NPR que oscilan entre 0.4 y 2.1 y contenidos de azufre total entre 0.73 y 1.33 % en peso para las muestras correspondientes. (WSP, 2025).

Las concentraciones de sulfato en los lixiviados fueron generalmente bajas, en su mayoría por debajo de 100 mg/L. En general, los resultados indicaron concentraciones relativamente bajas de metales en los lixiviados de todas las pruebas en barriles de campo. Las concentraciones de sulfato del programa de barriles de campo fueron consistentes con las observadas en el programa HCT, excepto durante las primeras 20 semanas, en las que las concentraciones de sulfato en los lixiviados de los barriles fueron más altas. Esta diferencia inicial se atribuye a los menores volúmenes de enjuague en los barriles (determinados por la lluvia local) en comparación con las HCT (enjuague semanal con agua desionizada). A medida que avanza el programa, las concentraciones en los lixiviados de las HCT y los barriles de campo se volvieron más similares. (WSP, 2025).

De las tres pruebas en barriles, uno de los dos barriles con relaves de cianuración desarrollo condiciones acidas después de ocho meses, con un aumento en la lixiviación de varios

metales y concentraciones de sulfato superiores a 10,000 mg/L. En contraste, el barril con relaves de flotación generó lixiviados con pH alcalino, bajas concentraciones de metales y bajos niveles de sulfato, con un promedio de 20 mg/L. (WSP, 2025).

En general, las pruebas cinéticas en relaves indican lo siguiente:

Los relaves de flotación son No PAG con lixiviados bajos en sulfato y metales asociados. (Golder, 2020).

Se espera que los relaves concentrados de lixiviación con cianuro (Cyanide Leach) en condiciones aeróbicas generen acidez y lixiviados ricos en sulfatos, Al, As, Cd, Cu, Fe, Mn, Ni, Se y Zn. (Golder, 2020).

Respecto a la disposición subacuática de relaves de concentrado de lixiviación con cianuro, las pruebas indican que el agua de contacto permanecería neutral con una posible lixiviación de metales de Mo y, en menor medida As y Zn. (Golder, 2020).

Las pruebas de laboratorio ejecutadas para estos análisis se encuentran en el reporte de (pHase Geochemistry Inc, 2013), el detalle se relaciona a continuación (ver ANEXO_CHARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_DRENAJE_MINERO_ACIDO).

Apéndice A: Matrices de correlación de los valores de los ensayos de núcleos de perforación de Gramalote por tipo de roca. Página 66.

Apéndice B: Matrices de correlación de los valores de los ensayos de núcleos de perforación de Monjas West por tipo de roca. Página 76.

Apéndice C: Conjunto de muestras para caracterización geoquímica (incluye muestras de barriles de campo). Página 83.

Apéndice D: Métodos de prueba. Página 91.

Apéndice E Aseguramiento de Calidad/Control de Calidad. Página 94.

Apéndice F Análisis Mineralógico de Fracciones de Muestras de Barriles de Campo e Informe Petrográfico. Página 99.

Apéndice G Resultados de la Contabilidad Ácido-Base de Roca Destilada. Página 207.

Apéndice H Pruebas de Generación Neta de Ácido (NAG) de Fracciones de Muestras de Barriles de Campo. Página 218.

Apéndice I Análisis del Tamaño de Partícula de Fracciones de Muestras de Barriles de Campo. Página 221.

Apéndice J Análisis de Metales de Roca Destilada por ICP-MS. Página 224.

Apéndice K Resultados de la Extracción por Lixiviación en Matraz de Agitación de Roca Destilada. Página 230.

Apéndice L Resultados de Barriles de Campo de Roca Destilada. Página 232.

Apéndice M Resultados de la Celda de Humedad de Roca Destilada. Página 269.

Apéndice N Análisis Mineralógico de Muestras de Relaves. Página 293.

Apéndice O Pruebas de Contabilidad Ácido-Base y Generación Neta de Ácido (NAG) de Muestras de Relaves. Página 301.

Apéndice P Análisis de metales elementales en relaves. Página 303.

Apéndice Q Resultados de la extracción de lixiviación en matraz de agitación y características de toxicidad del procedimiento de lixiviación. Página 305.

Apéndice R Análisis del sobrenadante de relaves (solución decantada). Página 308.

Apéndice S Resultados de la celda de humedad de relaves. Página 310.

C. Conclusiones de la evaluación de DMA

El contenido de sulfuros se asocia en gran medida con la presencia de estas vetillas; solo se observa una mínima cantidad de pirita diseminada y su abundancia es generalmente baja (el promedio de todas las muestras en la base de datos de exploración es de ~0,3 %, incluyendo los intervalos de mineral). (pHase Geochemistry Inc, 2013).

Los relaves de flotación se clasifican como no PAG y no parecen tener potencial de lixiviación de metales, con la posible excepción de bajos niveles de Mo y posiblemente F. (pHase Geochemistry Inc, 2013).

Los relaves de lixiviación de concentrado asociados son claramente PAG y tienen el potencial de lixiviar parámetros potencialmente preocupantes, como SO_4 , Mo y F mientras están tamponados, y si son ácidos, probablemente Cd, Cu, Ni, Pb y Zn. (pHase Geochemistry Inc, 2013).

La calidad del agua de la TSF durante las operaciones estará dominada por la química de la solución de proceso, que puede contener niveles elevados de SO_4 y metales complejos con CN. (pHase Geochemistry Inc, 2013).

Los resultados de los relaves de lixiviación de mineral completo no son tan definitivos como los de los relaves de flotación o los de lixiviación de concentrado. Los resultados del ABA clasifican los relaves de mineral completo con un potencial de generación de ácido de bajo a incierto, y la prueba NAG sugeriría un comportamiento no PAG. Las pruebas continuas en la celda de humedad ayudarán a verificar la clasificación de este material. La lixiviación de metales puede limitarse a niveles moderados a bajos de parámetros como SO_4 y Mo (posiblemente F), a menos que se desarrollen condiciones ácidas (pHase Geochemistry Inc, 2013).

La clasificación DAR para los residuos generados por Gramalote fueron evaluados de acuerdo con un plan de muestreo y análisis que cumple con los requerimientos de MEND, GARD y ANLA. Los criterios específicos del sitio (pHase 2015) son más conservadores en relación con los criterios especificados en los TDR (ANLA 2016), ya que es más estricto para clasificar a los materiales como PAG. Es decir, aplicando los criterios específicos (pHase 2015) un mayor tonelaje de material es considerado como PAG. (Golder, 2020).

La aplicación de los criterios específicos del sitio (pHase 2015) y los TDR (ANLA 2016) producen resultados similares de material clasificado como PAG, sin embargo, los resultados de pHase 2015 son más conservadores. Las conclusiones de la evaluación son similares usando ambos criterios pHase 2015 y ANLA 2016. Por lo tanto, Gramalote cumple lo indicado por el ANLA en la observación descrita en el “Resolución 00782 de 2019 – Artículo Vigésimo Noveno”. (Golder, 2020).

Las medidas de manejo en el depósito de estériles durante la construcción incluyen la construcción de sedimentadores para controlar la carga sólida de las aguas de contacto.

Durante la operación de la mina, tales como construcción de canales de derivación de aguas superficiales, instalación de sub-drenes para coleccionar las filtraciones, uso de materiales de baja permeabilidad en el basamento del depósito reducen el riesgo ambiental desde esta instalación hacia los cuerpos receptores. Durante el cierre progresivo se tiene planeado la revegetación para disminuir aún más la tasa de infiltración hacia los estériles. (Golder, 2020).

5.1.6.4 Modelo Hidrogeológico Conceptual

5.1.6.4.1 Caracterización hidrogeológica de las formaciones geológicas

La definición de las unidades hidrogeológicas tuvo en consideración lo propuesto en modelos realizados previamente en en el área de influencia elaborados por Hidrogeocol, Knight Piesold y Golder Associates, los cuales se presentan en la Figura 5.1.6.201. Con base en la nueva información disponible, obtenida del inventario de puntos de agua, así como de los datos geológicos, estructurales e hidrogeológicos recopilados en campo, se decide suprimir la unidad HGU3 del último modelo presentado por Golder (2013), correspondiente a saprolito extremadamente meteorizado, debido a que no se identifican variaciones significativas en las características geológicas e hidráulicas en la zona de transición entre el saprolito y el suelo residual, que justifique separarla en una unidad hidrogeológica independientes (SHI SAS, 2025). Además, se tiene en cuenta la definición más detallada de los depósitos cuaternarios y la disposición de los materiales resultantes de las actividades de explotación, de acuerdo con lo contemplado en el plan minero, para la clasificación de nuevas unidades hidrogeológicas.

Hidrogeocol		Knight Piésold		Golder Julio 2013	
	Depósitos aluviales		Depósitos aluviales		Depósitos aluviales
	Suelo residual		Suelo residual		Suelo residual
	Saprolito		Saprolito		Saprolito extremadamente meteorizado
					Saprolito arenoso
	Zona de transición				Saprolito, zona de transición
	Roca fresca		Roca fresca		Roca fracturada
					Roca fresca

Golder Octubre 2013			SHI (2025)	
	Depósitos aluviales	HGU1	Depósitos antrópicos	UHG-1
			Depósitos coluviales y de flujo	UHG-2
	Suelo residual	HGU2	Depósitos aluviales	UHG-3
	Saprolito extremadamente meteorizado	HGU3	Suelo residual	UHG-4
	Saprolito arenoso	HGU4	Saprolito arenoso	UHG-5
	Saprolito, zona de transición y roca fracturada	HGU5 / 6	Zona de transición y roca meteorizada y fracturada	UHG-6
	Roca fresca	HGU 7	Roca fresca fracturada	UHG-7

Figura 5.1.6.201 Unidades hidrogeológicas de estudios previos y su correlación con las unidades definidas en este estudio.

Fuente: Modificado de Golder Associates Perú S. A (2020)

El modelo hidrogeológico conceptual se fundamenta en los hallazgos encontrados en el análisis del tipo de unidades, el inventario de puntos de agua, la estimación de la recarga, información piezométrica de la zona, y las pruebas hidráulicas realizadas en en el área de influencia (SHI SAS, 2025).

A. Unidad hidrogeológica 1 (UHG-1)

La capa más superficial del modelo conceptual corresponde a la Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1), la cual agrupa los depósitos antrópicos. Esta unidad incluye, por un lado, los llenos actualmente existentes asociados principalmente a obras de infraestructura vial, y, por otro lado, los diferentes depósitos que se proyectan desarrollar según el plan minero, tales como los depósitos de colas, estériles y los ZODMES, los cuales actualmente no han sido construidos. El material que compone estos depósitos es de carácter heterogéneo, con una composición variable de materiales gruesos y finos. En particular, se proyecta que los depósitos de material estéril San Antonio y El Balsal estarán conformados por tonalita y granodiorita extraídas durante las operaciones mineras, en tamaños de cantos, grava, arena y una pequeña fracción de finos.

Por otra parte, se proyecta la construcción de la presa de colas, la cual incluirá inicialmente una presa de arranque conformada por material residual y saprolito compactado y, a medida que se generen las colas de flotación, se construirá la presa de arena, utilizando como material base la fracción gruesa de estas colas, mientras que la fracción fina se depositará en el embalse de colas. En los reportes realizados por Golder (2013) se les asigna una permeabilidad de 0,0009 m/día a la presa de arranque, de 0,58 m/día a la presa de arenas y de 0,086 m/día al depósito de colas (SHI SAS, 2025).

Adicionalmente, los ZODMES estarán conformados por una mezcla de limos, arenas limosas y arcillosas, provenientes principalmente de la remoción de horizontes superficiales del suelo, donde predomina el horizonte de saprolito. De acuerdo con la caracterización realizada por Integral S.A. (2025), se estima que estos depósitos presentarán una permeabilidad entre 8,64 y 0,086 m/día.

En este sentido esta unidad hidrogeológica se puede subdividir en subunidades debido a la diferencia en las características de los elementos que la componen, tal como se muestra en la Tabla 5.1.6.90.

Tabla 5.1.6.90 Subunidades que conforman la Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1)

Subunidad	Nombre	Descripción
UHG-1A	Llenos antrópicos y ZODMES	Mezcla de limos, arenas limosas y arcillosas, provenientes principalmente de la remoción de horizontes superficiales del suelo, donde predomina el horizonte de saprolito. permeabilidad entre 8,64 y 0,086 m/día
UHG-1B	Depósitos de material estéril	Cantos, gravas y arenas de roca provenientes de las operaciones mineras con una pequeña fracción de finos.
UHG-1C	Presa de arranque	Conformada por suelo residual y saprolito compactado. Se estima una permeabilidad de

Subunidad	Nombre	Descripción
		0,0009 m/día (Golder Associates Perú S.A., 2013)
UHG-1D	Presa de arenas	Constituida por la fracción gruesa de las colas de flotación compactada. Se estima una conductividad hidráulica de 0,58 m/día (Golder Associates Perú S.A., 2013)
UHG-1E	Depósito de colas	Constituido por Los relaves producto del proceso de beneficio. Corresponde a material fino con una conductividad hidráulica estimada de 0,086 m/día (Golder Associates Perú S.A., 2013)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

Cabe señalar que en el diseño y desarrollo de estos depósitos se incorporan elementos de control hidráulico, tales como filtros, cunetas y capas compactadas, diseñados para redirigir el flujo superficial y, de este modo, limitar tanto la infiltración como el flujo subterráneo a través de estos materiales.

B. Unidad hidrogeológica 2 (UHG-2)

En la zona superficial se encuentran depósitos coluviales y de flujo, los cuales conforman la Unidad Hidrogeológica 2 (UHG-2). Estos depósitos se originan por procesos donde la gravedad actúa como el agente principal de transporte, y están compuestos por suelo y bloques de roca provenientes de los horizontes más superficiales de meteorización. En los ensayos geoelectrónicos realizados por Hidrogeocol (2012) se observa que estos depósitos presentan profundidades menores a los 12 m. Adicionalmente, en las perforaciones realizadas para la exploración geotécnica del proyecto Gramalote esta unidad presenta espesores entre 2 y 4 m (SHI SAS, 2025).

Al tratarse de una acumulación reciente de material no consolidado, tienen una mayor capacidad para almacenar agua. Sin embargo, la matriz de estos depósitos es de una textura que varía entre limo arcilloso y limo arenoso, y corresponden a depósitos puntuales, con continuidad lateral limitada, lo que restringe su capacidad para transmitir agua.

Durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico realizadas por SHI S.A.S. (2025) se han monitoreado manantiales representativos de esta unidad, los cuales presentan valores conductividad eléctrica 50 y 170 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de oxígeno disuelto predominantemente mayores a 5 mg/l, a excepción del punto M222, en donde se registró un valor de 2,25 mg/l, posiblemente asociado a interacciones con materiales orgánicos (SHI SAS, 2025).

Estos parámetros indican un grado de mineralización débil y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo, lo cual se ve reforzado con la caracterización hidroquímica del agua, que varía entre tipos bicarbonatado sódico y bicarbonatado cálcico y/o magnésico, lo que es típico de aguas subterráneas con baja evolución geoquímica.

Para esta unidad se cuenta con una prueba Lefranc realizada por Geodrill S.A.S en 2025, la cual arroja un valor de conductividad hidráulica de 0,34 m/día.

C. Unidad hidrogeológica 3 (UHG-3)

La UHG-3 está conformada por los diferentes depósitos aluviales del área de influencia. Estos se caracterizan por ser depósitos angostos, de poca profundidad, (a excepción de los depósitos aluviales del río Nus y de la quebrada Guacas), con una granulometría predominantemente compuesta por arena fina a limos, derivados del arrastre de los suelos del Batolito Antioqueño. Golder (2020) describe que la profundidad de estos depósitos se encuentra entre 1 y 5 m con un valor promedio de 4 m. Por otra parte, esta unidad se encontró en las perforaciones de las campañas de exploración geotécnica con profundidades entre 4,5 y 7 m, con un valor promedio de 5,7 m.

La porosidad primaria de estos depósitos les confiere una buena capacidad de almacenamiento y transmisión de agua, aunque, esto se ve limitado por su espesor reducido y baja continuidad lateral. A pesar de esto, los depósitos aluviales suelen favorecer la acumulación de escorrentía y el desarrollo de un flujo subsuperficial, generalmente asociado a bajos tiempos de residencia (SHI SAS, 2025).

Los parámetros fisicoquímicos medidos durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico llevadas a cabo por SHI S.A.S. (2025) muestran en el piezómetro PZA12-03 (Ubicado en la quebrada Guacas cerca del río Nus tiene 8,8 m de espesor de depósito aluvial) un valor de oxígeno disuelto de 6,12 mg/l y una conductividad eléctrica de 57,9 μ S/cm, valores similares a los observados en el agua superficial. Esto indicaría una baja mineralización y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo.

Por otra parte, el piezómetro PZA12-08 (Ubicado en la quebrada El Banco cerca del río Nus tiene 6.0 m de espesor de depósito aluvial) presenta un valor de oxígeno disuelto de 0,58 mg/l y una conductividad eléctrica de 214,2 μ S/cm. El bajo nivel de oxígeno sugiere la presencia de condiciones reductoras, posiblemente asociadas a procesos de degradación de materia orgánica y consumo de oxígeno, lo cual podría indicar una condición de contaminación del agua, aunque no necesariamente se asocia a un mayor tiempo de residencia en el subsuelo (SHI SAS, 2025).

Sobre esta unidad Hidrogeocol (2012) realizó seis pruebas de bombeo, las cuales permitieron establecer un valor de conductividad hidráulica promedio de 10,1 m/día.

D. Unidad hidrogeológica 4 (UHG-4)

La UHG-4 corresponde al horizonte de suelo residual del Batolito Antioqueño (horizonte VI). Esta unidad reúne las unidades HGU-2 y HGU-3 definidas por Golder (2020) en su modelo hidrogeológico conceptual, las cuales se describen como suelo residual y saprolito extremadamente meteorizado, respectivamente. Estas unidades presentan espesores promedio de 0,41 m y 9,1 m, por lo que la UHG-4 alcanza un espesor promedio de 9,5 m. En general, el perfil de meteorización es más espeso en las zonas de pendiente baja, mientras que, en las laderas, con pendientes mayores, el espesor disminuye. Por otra parte, en las zonas bajas de los valles, los procesos erosivos remueven las primeras capas de suelo, lo que ocasiona la eliminación de esta unidad, dejando expuesto el saprolito o cubierto por los depósitos aluviales (Gramalote Colombia Limited, 2018).

El suelo residual se caracteriza por presentar una textura limo arcillosa a arcillosa. La presencia significativa de materiales arcillosos limita la permeabilidad del medio, por lo que esta unidad presenta un bajo potencial hidrogeológico.

La empresa Hidrogeocol (2012) realizó sobre esta unidad seis pruebas de tipo Slug, que permiten establecer un valor promedio de conductividad hidráulica de $4,531\text{E}-03$ m/día, lo que lo define como un acuitardo. Cabe mencionar que esta primera capa de suelo residual puede presentar variaciones laterales y no encontrarse presente en zonas de alta pendiente o en el fondo de los valles debido a los procesos erosivos en estas zonas (SHI SAS, 2025).

En las pruebas lefranc ejecutadas por GEODRILL en el 2025 en los suelos residuales entre (0 y 7) m, se encontraron suelos clasificados como arenas finas con valor promedio de conductividad hidráulica de $6,147\text{E}-01$ m/día.

Los puntos de agua asociados a esta unidad, monitoreados en las diferentes campañas de muestreo isotópico e hidroquímico, desarrolladas por SHI S.A.S. (2025) presentan valores de conductividad eléctrica entre 85,8 y 177,3 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y oxígeno disuelto predominantemente en el rango de 4,66 a 7,04 mg/l, lo cual indica una mineralización débil y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo. No obstante, en los puntos M118 y DH-FS-315 se registraron valores de oxígeno disuelto de 0,55 y 1,64 mg/l, respectivamente, los cuales podrían estar relacionados con condiciones reductoras o procesos de contaminación local.

Adicionalmente, la caracterización hidrogeoquímica del agua indica que son predominantemente bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, lo que refuerza la interpretación de una baja evolución geoquímica del agua subterránea y un tiempo de residencia relativamente corto (SHI SAS, 2025).

E. Unidad hidrogeológica 5 (UHG-5)

La UHG-5 corresponde al saprolito del Batolito Antioqueño (horizonte de meteorización IC), el cual presenta variaciones granulométricas entre arenoso y limoarenoso, siendo más arenoso a medida que la roca parental presenta una mayor proporción de cuarzo. Este horizonte presenta un espesor promedio de 9,4 m, aunque hay registros de perforación con espesores de hasta 35 m (Golder Associates Perú S.A., 2020).

Debido a su textura y buena continuidad lateral, permite tanto el almacenamiento como la transmisión de agua, por lo que se considera una unidad con alto potencial hidrogeológico. En esta unidad fueron realizadas siete pruebas de bombeo por Hidrogeocol (2012), las cuales arrojaron un valor promedio de conductividad hidráulica de 6,96 m/día.

Esta unidad se considera un acuífero continuo, de extensión regional y de tipo confinado, que se recarga mediante flujos verticales provenientes de las unidades suprayacentes (Gramalote Colombia Limited, 2018), especialmente en las zonas bajas de los valles, donde la capa arcillosa superficial del suelo ha sido removida por procesos erosivos y se encuentra cubierto por depósitos aluviales (SHI SAS, 2025).

Los puntos de agua monitoreados en esta unidad, durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico, llevadas a cabo por SHI S.A.S. (2025) presentan valores de conductividad eléctrica entre 62,5 y 242 $\mu\text{S}/\text{cm}$, y oxígeno disuelto predominantemente entre 3,88 y 4,46 mg/l. Estos valores reflejan una mineralización débil y un tiempo de residencia corto a moderado en el medio subterráneo. No obstante, en comparación con las unidades más superficiales, se observa un ligero aumento en la conductividad eléctrica y una leve disminución en los niveles de oxígeno disuelto, lo cual sugiere una mayor interacción roca-agua, aunque todavía limitada en términos de evolución geoquímica (SHI SAS, 2025).

El análisis hidroquímico indica que las aguas en esta unidad son principalmente de tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, lo cual es consistente con un tiempo de residencia relativamente corto y una evolución hidrogeoquímica incipiente.

F. Unidad hidrogeológica 6 (UHG-6)

La Unidad Hidrogeológica 6 (UHG-6) comprende la zona de transición entre la roca fresca y el saprolito (horizonte IC-IIA), así como los horizontes de roca moderadamente meteorizada (horizonte IIA). Esta unidad representa el paso de un medio poroso, caracterizado por la presencia de bloques de roca embebidos en una matriz limosa a arenosa, hacia un medio fracturado de roca meteorizada, cuya capacidad para almacenar y transmitir agua depende de factores como el grado de fracturamiento y la interconexión entre las fracturas. Según Golder (2020) estos dos horizontes presentan características hidráulicas similares, por lo que se consolidan en una misma unidad hidrogeológica. La UHG-6 presenta un espesor promedio de 7,7 metros (Golder Associates Perú S.A., 2020) y puede presentar un potencial hidrogeológico medio, ya que la granulometría arenosa de la matriz, en la zona más superficial, favorece el flujo de agua. No obstante, este potencial puede disminuir a medida que aumenta la profundidad y a su vez, la proporción de bloques de roca, que reducen la porosidad y la conectividad hidráulica (SHI SAS, 2025).

En esta unidad se registran valores promedio de conductividad eléctrica de 195 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y de oxígeno disuelto de 4,7 mg/l, medidos durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico, llevadas a cabo por SHI S.A.S. (2025). Estos valores indican un grado de mineralización bajo y un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo. Por otra parte, la caracterización hidroquímica del agua muestra que el agua en esta unidad es de carácter bicarbonatado cálcico y/o magnésico, lo cual indica una evolución hidrogeoquímica limitada (SHI SAS, 2025).

El flujo de agua en esta unidad ocurre principalmente en la zona de transición y los primeros metros de roca. En esta zona Geodrill S.A.S. ha realizado dos pruebas hidráulicas que permiten establecer el valor medio de conductividad hidráulica en 0,57 m/día.

G. Unidad hidrogeológica 7 (UHG-7)

La UHG-7 corresponde esencialmente al basamento rocoso, conformado por rocas ígneas intrusivas del tipo tonalita, cuarzodiorita y diorita, con un grado de fracturamiento medio a bajo. El almacenamiento y transporte de agua en esta unidad depende de la densidad y la interconexión de las fracturas, sin embargo, la porosidad secundaria de estas rocas se ve disminuida por el relleno de las fracturas con minerales arcillosos, producto de la saprolitización y la mineralización hidrotermal lo que ocasiona un escaso almacenamiento de agua subterránea en este medio (Gramalote Colombia Limited, 2018).

Los puntos de agua en esta unidad presentan valores de conductividad eléctrica entre 221 a 283 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo que indica un grado de mineralización medio. Sin embargo, los valores de oxígeno disuelto presentan valores predominantemente entre 4,73 y 7,89 mg/l, lo que se asocia a un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo, a excepción del piezómetro PZR-13-09, que presenta un valor de oxígeno disuelto de 1,88 mg/l, que podría sugerir un mayor tiempo de residencia en el medio subterráneo. Sin embargo, esta hipótesis se descarta por la caracterización hidroquímica del agua, en donde todas las muestras de agua en esta unidad son de carácter bicarbonatado cálcico y/o magnésico, lo cual indica una evolución hidrogeoquímica limitada (SHI SAS, 2025).

En esta unidad Geodrill S.A.S. ha realizó pruebas hidráulicas de tipo Lugeon en estratos correspondientes a roca sana a levemente meteorizada, los cuales arrojan un valor promedio de conductividad hidráulica de 0,0023 m/día.

A continuación, en la Tabla 5.1.6.91 se muestra el resumen de las unidades hidrogeológicas en asociación con la unidad geológica.

Tabla 5.1.6.91 Resumen Unidades Hidrogeológicas en asociación con las unidades geológicas

Unidad Hidrogeológica	Unidad geológica
Unidad Hidrogeológica 1 (UHG-1)	Depósitos antrópicos
Unidad Hidrogeológica 2 (UHG-2)	Depósitos coluviales y flujo
Unidad Hidrogeológica 3 (UHG-3)	Depósitos aluviales
Unidad Hidrogeológica 4 (UHG-4)	Suelo residual
Unidad Hidrogeológica 5 (UHG-5)*	Saprolito arenoso
Unidad Hidrogeológica 6 (UHG-6)*	Zona de transición suelo – roca y roca meteorizada y fracturada
Unidad Hidrogeológica 7 (UHG-7)	Roca fresca fracturada

Nota: Las unidades hidrogeológicas UHG-5 y UHG-6 no se representan en la Figura 5.1.6.202 ni en el mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-CONHID dado que son unidades que se encuentran en profundidad, fuera del alcance de la representación superficial.

Fuente: Integral S.A., 2025 a partir de (SHI SAS, 2025)

La Figura 5.1.6.202 muestra las Unidades Hidrogeológicas y en el en el mapa I-M-10719-GCLMEIA2-V1-CAI-05-CONHID las respectivas conductividades hidráulicas asociadas.

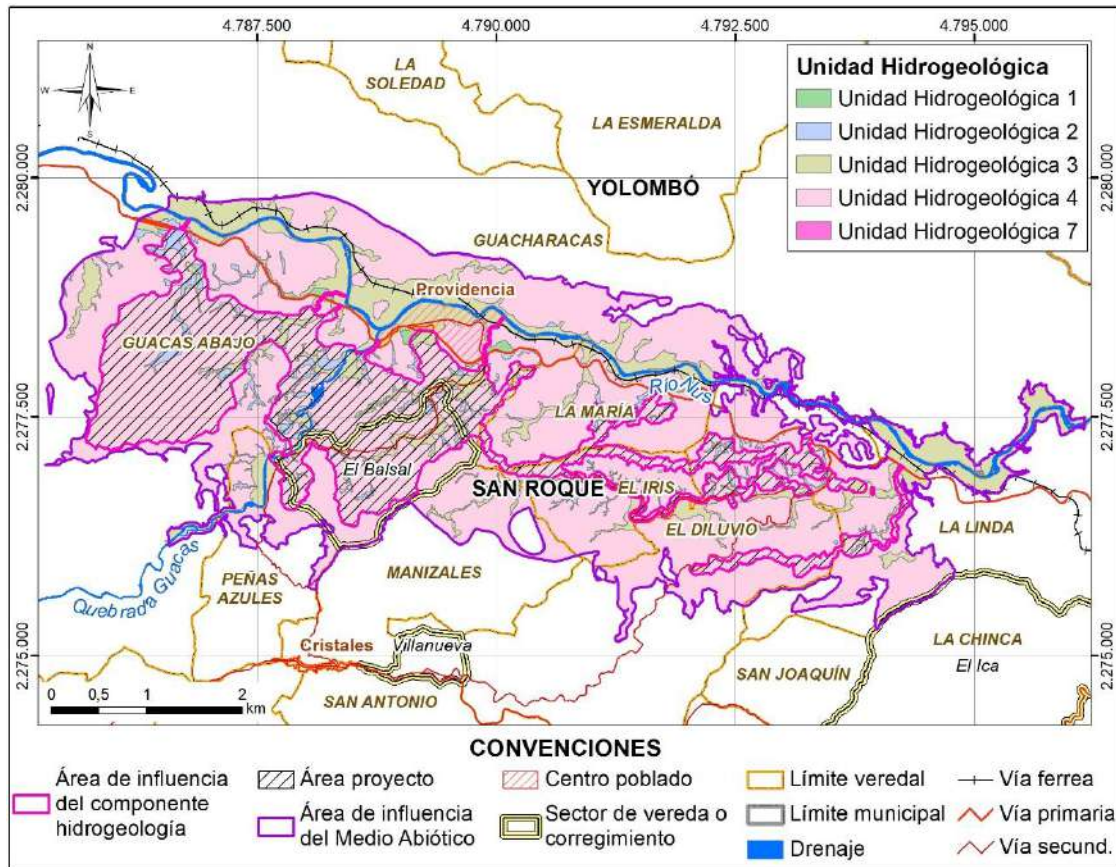


Figura 5.1.6.202 Unidades hidrogeológicas

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.4.2 Zonas de recarga y descarga

La recarga se refiere a la manera como los acuíferos se recargan o llenan de agua de forma natural por infiltración del agua lluvia que cae sobre ellos, de los ríos o lagos que los atraviesan o limitan y también puede ser de manera artificial producto del excedente de agua empleada en regar cultivos asentados, fugas de redes y abastecimientos o por infiltraciones de embalses y depósitos. Las fuentes de recarga, naturales o artificiales pueden ser clasificados como recarga directa (proveniente del agua lluvia), recarga indirecta (productos de cauces permanente, estacional y efímeros), flujos laterales (procedentes de otros acuíferos), retornos de riegos, excesos de riegos o las pérdidas en los canales de distribución y recarga urbana (producto de fugas de redes de abastecimiento y redes de alcantarillado) (IDEAM, 2013).

La circulación de los flujos de agua subterránea puede conformar en una cuenca tres tipos de sistemas de flujos: local, intermedio y regional (Toth, 1963). Un sistema local de flujo de agua subterránea tiene su zona de recarga en un alto topográfico y su zona de descarga en un bajo topográfico, y se encuentran localizados de forma cercana el uno del otro (<5 km). Los sistemas de flujo intermedio son aquellos en donde sus áreas de recarga y descarga no ocupan los lugares topográficos más altos y más bajos respectivamente, es

posible encontrar otros puntos más altos y más bajos en medio de ellos. Un sistema de flujo regional es aquel cuya área de recarga se encuentra en la divisoria de aguas y su zona de descarga se encuentra en la parte baja de la cuenca (Figura 5.1.6.203).

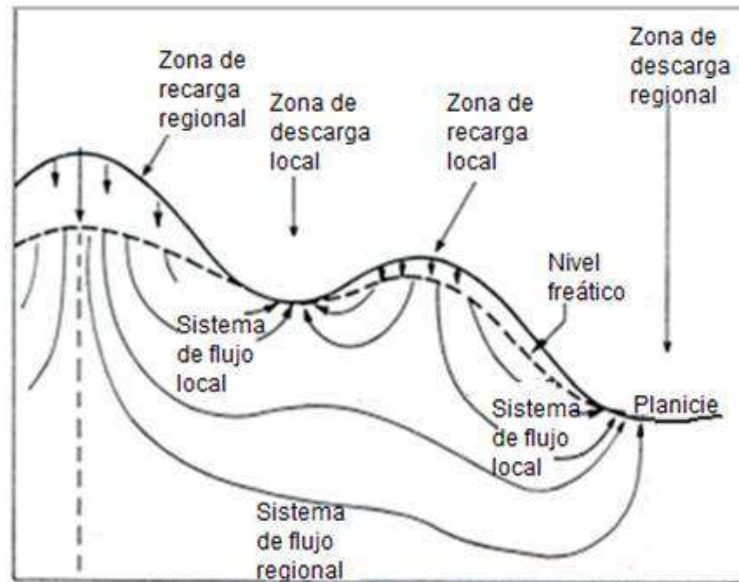


Figura 5.1.6.203 Sistema de flujos de agua subterránea

Fuente: Toth, (1963)

A partir de la configuración de la red de flujo establecida, se estima que los acuíferos se recargan directamente de las lluvias principalmente a través de las zonas planas y de la misma zona de colinas y lomos. Igualmente pueden tener cierta recarga de los cauces mayores como es el caso del Río Nus en relación con la UHG-3 – Depósitos aluviales, cuya recarga es indirecta hacia las aguas subterráneas y viceversa según la época hidrológica. Las zonas de recarga se presentan hacia las colinas altas, en las rocas pertenecientes a las Unidad del Batolito Antioqueño. Los sistemas de flujos en el sector están conformados por flujos locales para el acuífero aluvial, coluvial y flujos e intermedios y regionales para el acuitardo de los suelos residuales del Batolito Antioqueño.

La descarga de estos acuíferos libres y no confinados (cubiertos) se hace hacia superficie (aquellos que están por encima del nivel más bajo del terreno) originando los cauces menores.

La fluctuación estacional detectada en algunos piezómetros permite inferir que en periodos de verano las unidades hidrogeológicas con capacidad de almacenar y transmitir agua pueden generar un aporte a los cauces, contribuyendo a los caudales que se presentan en los cauces. En veranos fuertes el descenso del nivel freático puede ser mayor, quedando por debajo del nivel de los cauces.

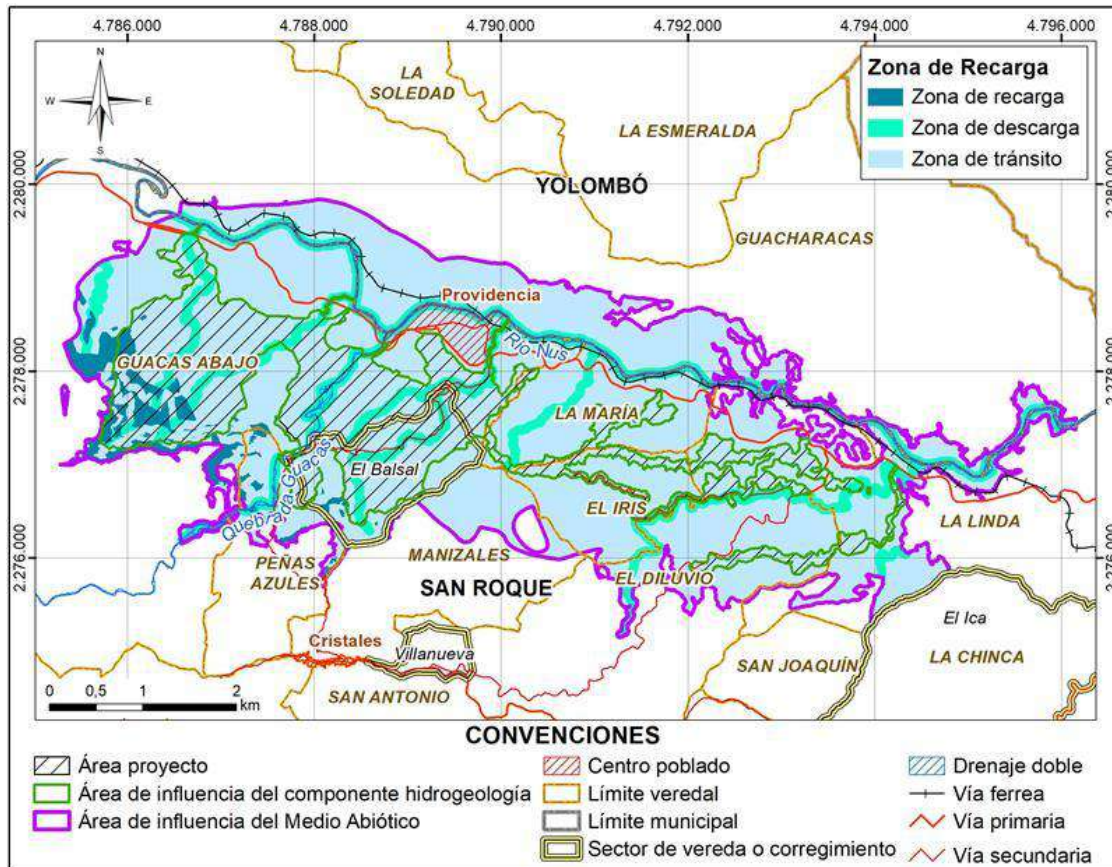


Figura 5.1.6.204 Zonas de recarga y descarga

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.4.3 Movimiento del agua subterránea

Las direcciones del flujo hídrico subterráneo están fuertemente influenciadas por la condición estructural de la zona, para el área de influencia estas direcciones se dirigen hacia terrenos topográficamente más bajos.

Las direcciones de flujo en los acuíferos aluviales, coluviales y flujos presentan una dirección regional en sentido Nororiente en dirección al río Nus. Por otro lado, el depósito aluvial asociado al río Nus, presenta direcciones correspondientes a la dirección del drenaje en mención, es decir, oeste – este.

Las direcciones de flujo asociadas a las unidades hidrogeológicas presentan una tendencia generan sur - norte, hacia el río Nus (en sentido Nororiente) (Figura 5.1.6.205).

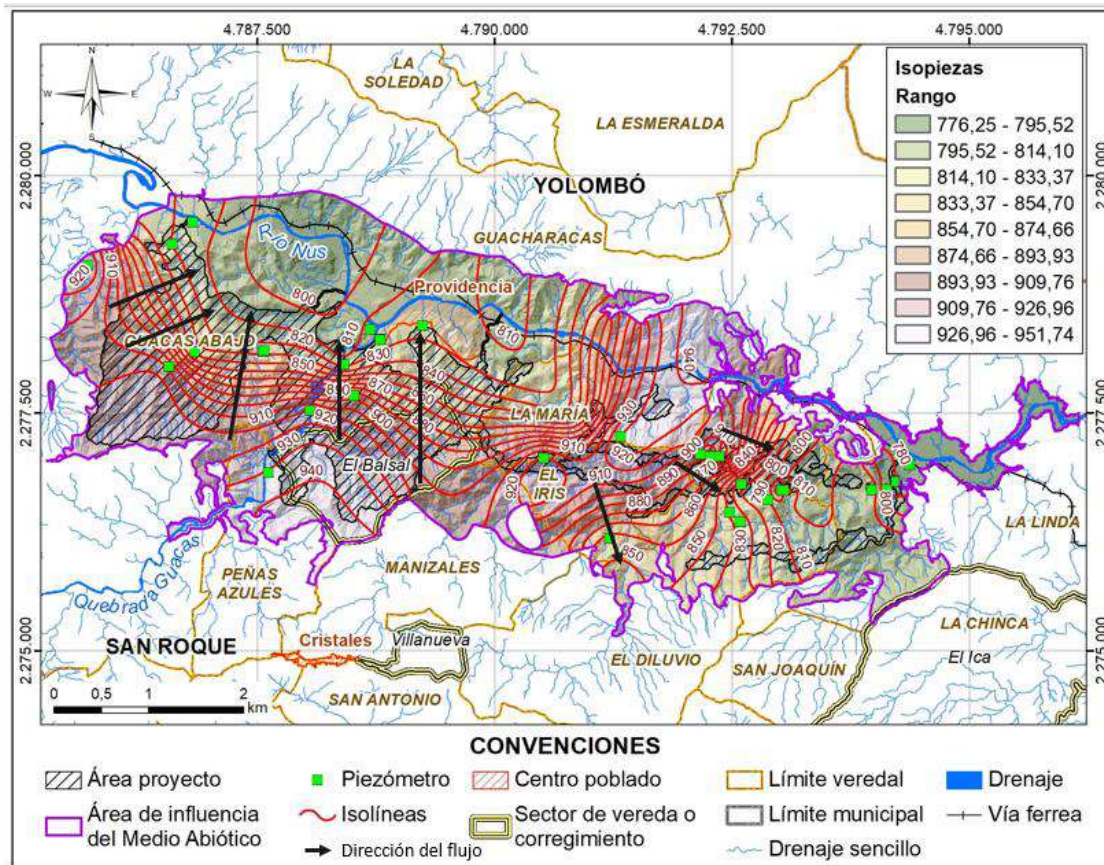


Figura 5.1.6.205 Direcciones de flujo

Fuente: Integral S.A., 2025

5.1.6.4.4 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

La vulnerabilidad de los acuíferos representa las características intrínsecas que determinan la sensibilidad de varias partes de un acuífero a ser afectado adversamente por un contaminante (Vargas, M., 2010). Para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas existen varias metodologías, la selección y aplicación de cualquiera de ellas dependerá de la información existente y la utilidad de dicha evaluación. En este caso, se emplean dos métodos paramétricos: GOD y DRASTIC; en el primer caso cada parámetro está dividido en clases a las que se atribuye una puntuación y en la metodología DRASTIC, además de asignar una puntuación, cada parámetro es multiplicado por un factor ponderador (Vargas, M., 2010).

A. Método GOD

La metodología GOD, es un método paramétrico propuesto por (Foster, Hirata, Gomes, D'Elia, & Paris, 2002) en donde se toman tres parámetros (Grado de confinamiento hidráulico, caracterización de la zona no saturada y profundidad del nivel freático) y se multiplican los valores asignados para cada parámetro, obteniendo el índice de vulnerabilidad GOD. Dicha metodología se caracteriza por ser sencilla y práctica, que se recomienda cuando se tiene poca información. Los tres parámetros (G, O y D) que

comprende la metodología, cuyos valores son asignados de acuerdo con la contribución en la defensa a la contaminación, se describen a continuación (Vargas, M., 2010).

- **G (Groundwater occurrence) – Índice de confinamiento:** corresponde al grado de confinamiento hidráulico con la identificación del tipo de acuífero, su índice puede variar entre 0 y 1. El modo de ocurrencia varía entre la ausencia de acuíferos (evaluado con índice 0) y la presencia de un acuífero libre o freático (evaluado como índice 1), pasando por acuíferos artesianos, confinados y semiconfinados.
- **O (Overall aquifer class) – Sustrato litológico:** corresponde a la caracterización de la zona no saturada del acuífero o de las capas confinantes, en términos de grado de consolidación y litología. Los índices más bajos (0,4) corresponden a los materiales no consolidados, mientras que los más altos (0,9 – 1,0) corresponden a rocas compactas fracturadas o karstificadas.
- **D (Depth) – Profundidad del nivel freático:** se refiere a la profundidad del nivel freático en acuíferos libres o a la profundidad del techo del acuífero, en los confinados. Los índices más bajos (0,6) corresponden a acuíferos libres con profundidad mayor a 50 m; mientras que los índices altos (1,0) corresponden a acuíferos que independientemente de la profundidad se encuentran en medios fracturados. Para el caso de los acuíferos libres la profundidad del nivel estático está sujeta a la oscilación natural.

La vulnerabilidad se calcula como el producto de estos parámetros Ecuación 5.1.6.12:

$$\text{índice de vulnerabilidad} = G * O * D$$

Ecuación 5.1.6.12 Índice de vulnerabilidad GOD

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, entre mayor es el valor, más desfavorable es la condición, la clasificación se hace a partir de la Figura 5.1.6.206. Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores.

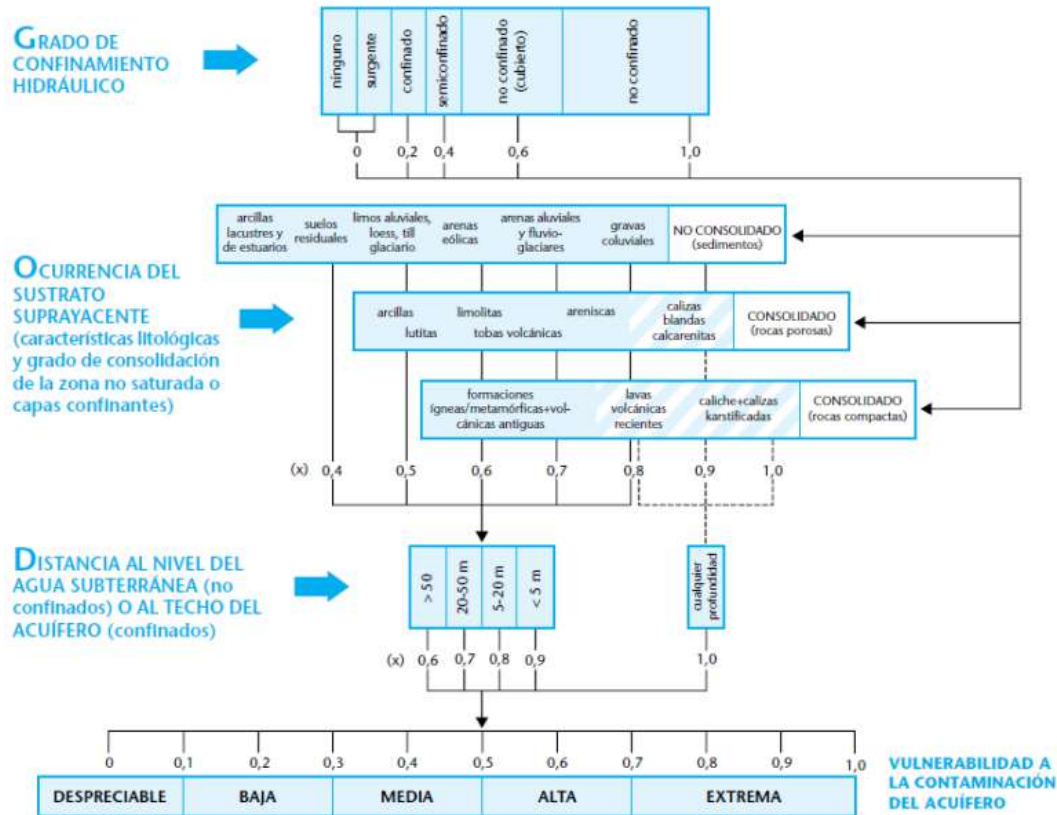


Figura 5.1.6.206 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca

Fuente: Foster, S; Hirata, R; Gomes, D; D'Elia, M; Paris, M; (2002)

Los resultados del cálculo del índice de vulnerabilidad pueden variar entre 0 y 1, obteniendo las categorías de vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación, como se observa en la Tabla 5.1.6.92.

Tabla 5.1.6.92 Valoración de la vulnerabilidad con el método GOD

Grado	Vulnerabilidad
Muy bajo	0 – 0,1
Bajo	0,1 – 0,3
Moderado	0,3 – 0,5
Alto	0,5 – 0,7
Muy Alto	0,7 - 1

Fuente: Vargas, M., (2010)

A continuación, se presentan el análisis de los parámetros para hallar el índice GOD:

a. Resultados en la UHG-1 – Llenos Antrópicos

La unidad de llenos antrópicos se define como una unidad con poca importancia hidrogeológica por lo que se le asigna un valor de 0,1 en el parámetro G (grado de confinamiento hidráulico). Esta unidad está compuesta, por llenos actualmente existentes asociados principalmente a obras de infraestructura vial, por lo que suelen estar

conformados de mezcla de limos, arenas limosas y arcillosas, y algunas gravas; para el parámetro O (sustrato litológico) se le otorga un valor de 0,6. Para el parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor es de 0,9, ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros circundantes oscilan entre 1,54 y 6,31 m.

b. Resultados en la UHG-2 – Depósitos coluviales y de flujo

El acuífero coluvial y de flujo se define como no confinado, por lo que se les asigna un valor de 1 en el parámetro G (índice de confinamiento). La estratigrafía de esta unidad se caracteriza por presentar suelos de textura limo arenosa a limo arcillosa y bloques, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le otorga un valor de 0,8. Para el parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor es de 0,8, ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros generalmente oscilan entre 5,0 y 20,0 m.

c. Resultados en la UHG-3 – Depósitos aluviales

El acuífero aluvial se define como un acuífero no confinado, por lo que se le asigna un valor de 1 en el parámetro G (índice de confinamiento). La estratigrafía de esta unidad se caracteriza por sedimentos no consolidados, de textura arena fina y limos, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le asignó un valor de 0,7. Para el parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor es de 0,9 ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros generalmente se encuentran cercanos a los 3,00 m.

d. Resultados en la UHG-4 – Suelo residual

Esta unidad hidrogeológica se define como un acuitardo, por lo que al parámetro G (índice de confinamiento), se le asignó un valor de 0,7. La estratigrafía de esta unidad corresponde a suelos de textura limo arcillosa a arcillosa asociados a la meteorización de las rocas pertenecientes al Batolito Antioqueño, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le asignó un valor de 0,4. Finalmente, al parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor asignado es de 0,8 ya que los niveles estáticos tomados en los piezómetros generalmente se encuentre los 5,0 – 20,0 m.

e. Resultados en la UHG-7 – Roca fresca fracturada

Esta unidad hidrogeológica se define con un grado de confinamiento hidráulico confinado, por lo que al parámetro G se le da una calificación de 0,2. La estratigrafía corresponde a las rocas intrusivas de tipo tonalita, cuarzodiorita y diorita pertenecientes a la unidad geológica Batolito Antioqueño, con un grado de fracturamiento medio a bajo, por lo que al parámetro O (sustrato litológico) se le da un valor de 0,6. Finalmente, al parámetro D (profundidad del nivel freático), el valor asignado es de 0,8 ya que aproximadamente la distancia del nivel al techo del acuífero se encuentra entre 5,0 y 20,0 m.

En la Tabla 5.1.6.93 y la Figura 5.1.6.207 se presentan los resultados obtenidos:

Tabla 5.1.6.93 Clasificación parámetros GOD

Unidad hidrogeológica	UHG-1	UHG-2	UHG-3	UHG-4	UHG-7
Parámetro					
G	0,1	1	1	0,7	0,2
O	0,6	0,8	0,7	0,4	0,6
D	0,9	0,8	0,9	0,8	0,8

Índice vulnerabilidad intrínseca	0,05	0,64	0,63	0,22	0,10
	Muy bajo	Alta	Alta	Bajo	Bajo

Fuente: Integral S.A., 2025

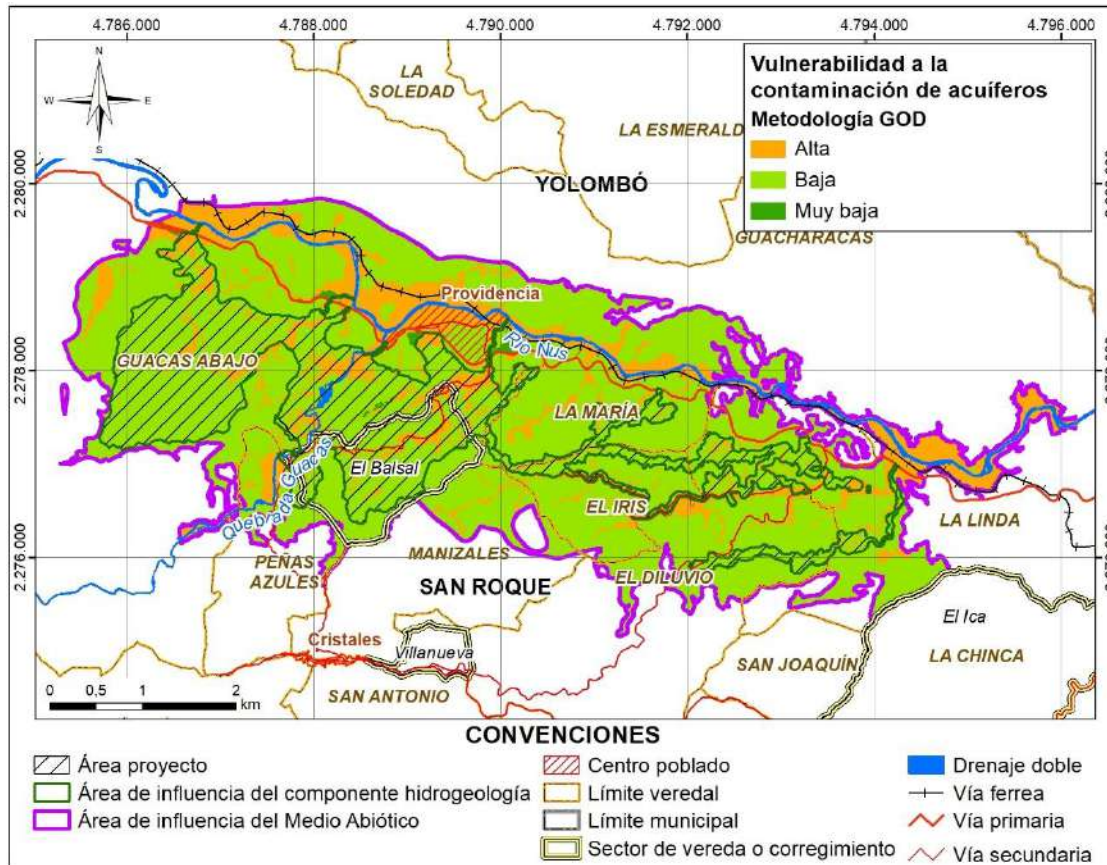


Figura 5.1.6.207 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Metodología GOD

Fuente: Integral S.A., 2025

En la Figura 5.1.6.207 se observa que el 78,87% del área presenta vulnerabilidad baja, asociada principalmente a zonas con suelo residual, saprolito y roca fresca fracturada. El 20,41% del área corresponde a vulnerabilidad alta, relacionada con depósitos aluviales, coluviales y de flujo. Finalmente, el 0,72% del área muestra vulnerabilidad muy baja, vinculada a los rellenos antrópicos. La Tabla 5.1.6.94 presenta el resumen de las áreas.

Tabla 5.1.6.94 Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – GOD

Categoría Vulnerabilidad	Área (ha)	Área (%)
Muy baja	17,96	0,72
Baja	1968,04	78,87

Alta	509,27	20,41
Total	2495,27	100,00

Fuente: Integral.S.A., 2025

B. Método DRASTIC

El método DRASTIC utiliza siete parámetros para la evaluación de la vulnerabilidad, que dependen del clima, el suelo, el sustrato superficial y el subterráneo (Vargas, M., 2010) así:

- **D** (Depth to ground water) - Profundidad del agua subterránea: indica el espesor de la zona no saturada que es atravesado por las aguas de infiltración y que pueden traer consigo el contaminante, hasta alcanzar el acuífero.
- **R** (Recharge rate) - Recarga neta: es la cantidad de agua anual por unidad de superficie que contribuye a la alimentación del acuífero y resulta de forma primaria de la escorrentía superficial y de la fracción de precipitación después de satisfacer la evapotranspiración. Es el principal vehículo transportador de los contaminantes.
- **A** (Aquifer media) - Litología y estructura del medio acuífero: representa las características del acuífero, en particular la capacidad del medio poroso y/o fracturado para transmitir los contaminantes.
- **S** (Soil media) - Tipo de suelo: representa la capacidad de los suelos para oponerse a la movilización de los contaminantes y corresponde a la parte de la zona vadosa o no saturada, que se caracteriza por la actividad biológica. En conjunto, con el parámetro A, determinan la cantidad de agua de percolación que alcanza la superficie freática.
- **T** (Topography) - Topografía: representa la pendiente de la superficie topográfica e influye en la evacuación de aguas con contaminantes por escorrentía superficial y subsuperficial.
- **I** (Impact on vadose zone) - Naturaleza de la zona no saturada: representa la capacidad del suelo para obstaculizar el transporte vertical.
- **C** (Conductivity) - Conductividad hidráulica del acuífero: determina la cantidad de agua que atraviesa el acuífero por unidad de tiempo y por unidad de sección, es decir la velocidad.

De acuerdo con las características y el comportamiento, a cada parámetro se les asignan índices que van desde 1,0 (mínima vulnerabilidad) hasta 10,0 (máxima vulnerabilidad), presentados en la Tabla 5.1.6.95:

Tabla 5.1.6.95 Valoración de parámetros para el método DRASTIC

Profundidad del nivel freático, Dr		Recarga, Rr	
D (Profundidad, m)	Rango Dr	R (Recarga, mm)	Rango Rr
0 - 1,5	10	0 - 50	1
1,5 - 4,6	9	50 - 103	3
4,6 - 9,1	7	103 - 178	6
9,1 - 15,2	5	178 - 254	8
15,2 - 22,9	3	>254	9
22,9 - 30,5	2		
> 30,5	1		
		Tipo de suelo, Sr	

Medio acuífero, Ar		
A (Litología del acuífero)	Rango Ar	Típico
Lutita masiva	1 - 3	2
Roca metamórfica / ígnea	2 - 5	3
Roca metamórfica / ígnea meteorizada	3 - 5	4
Arenas y gravas de origen glaciar	4 - 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 - 9	6
Arenisca masiva	4 - 9	6
Caliza Masiva	4 - 9	6
Arena o grava	4 - 9	8
Basaltos	2 - 10	9
Caliza cárstica	9 - 10	10

Topografía, Tr	
T (Pendiente, %)	Rango Tr
0 - 2	10
2 - 6	9
6 - 12	5
12 - 18	3
>18	1

Conductividad hidráulica, Cr	
C (Conductividad hidráulica, m/día)	Rango Cr
0,04 - 4,08	1
4,08 - 12,22	2
12,22 - 28,55	3
28,55 - 40,75	6
40,75 - 81,49	8
>81,49	10

Fuente: Vargás, M., (2010)

Además de la asignación de valores a cada parámetro, este método asigna un factor de ponderación a cada parámetro, que depende si el contaminante en cuestión es un pesticida (DRASTIC-P) o no (dado que los pesticidas son menos volátiles y más persistentes), con valores que están entre 1,0 y 5,0 (Tabla 5.1.6.96).

Tabla 5.1.6.96 Factores de ponderación para el método DRASTIC

Tipo de contaminante	Dw	Rw	Aw	Sw	Tw	Iw	Cw

S (Tipo de suelo)	Rango Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

Naturaleza de la zona no saturada, Ir		
I (Tipo de Acuífero)	Rango Ir	Típico
Capa confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 - 6	3
Lutita	2 - 5	3
Caliza	2 - 7	6
Arenisca	4 - 8	6
Secuencias de areniscas, caliza y lutita	4 - 8	6
Arena o grava con contenido de cieno y arcilla significativo	4 - 8	6
Rocas ígneas / metamórficas	2 - 8	4
Grava y arena	6 - 9	8
Basalto	2 - 10	9
Caliza cárstica	8 - 10	10

Pesticida	5	4	3	5	3	4	2
No pesticida	5	4	3	2	1	5	3

Fuente: (Vargas, M., 2010)

El valor índice se obtiene, entonces, de la sumatoria de la multiplicación de cada parámetro por su respectivo factor de ponderación, así:

$$iV_{DRASTIC} = (D_r * D_w) + (R_r * R_w) + (A_r * A_w) + (S_r * S_w) + (T_r * T_w) + (I_r * I_w) + (C_r * C_w)$$

Donde: r: factor de clasificación o valoración

w: factor de ponderación

Ecuación 5.1.6.13 Cálculo de la vulnerabilidad. Método DRASTIC

Fuente: (Vargas, M., 2010)

Los resultados pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), obteniendo los rangos de vulnerabilidad de la Tabla 5.1.6.97. En la práctica este índice varía entre 50 y 200. Si se considera contaminación por pesticidas (DRASTIC-P) podrá tomar valores comprendidos entre 26 y 260.

Tabla 5.1.6.97 Grados de vulnerabilidad general del método DRASTIC

Grados de vulnerabilidad general (no pesticida)	
Grado	Vulnerabilidad
Muy bajo	23 - 64
Bajo	65 - 105
Moderado	106 - 146
Alto	147 - 187
Muy alto	188 - 230

Fuente: (Vargas, M., 2010)

Para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación de las aguas subterráneas con este método en la zona de interés, se clasifica la información existente de acuerdo con los rangos propuestos en la Tabla 5.1.6.97.

Los resultados de la valoración (r) de cada parámetro se pueden ver en la Tabla 5.1.6.98 y la Figura 5.1.6.208, Figura 5.1.6.209, Figura 5.1.6.210, Figura 5.1.6.211, Figura 5.1.6.212, Figura 5.1.6.213 y Figura 5.1.6.214.

Tabla 5.1.6.98 Pesos asignados a las diferentes variables evaluadas. Método DRASTIC

Sigla	Parámetro	UHG-1 Llenos antrópicos	UHG-2 Depósitos coluviales y de flujo	UHG-3 Depósitos aluviales	UHG-4 Suelo residual	UHG-7 Roca fresca
Dr	Profundidad nivel freático	Se emplearon las isopiezas				
Ar	Medio acuífero	7	7	7	4	3
Cr	Conductividad hidráulica	1	1	2	1	1
Rr	Recarga	Se empleo el ráster de recarga en condiciones normales				
Sr	Suelo	9	9	9	1	1
Ir	Naturaleza de la zona no saturada	7	6	7	4	2
Tr	Pendiente	Se reclasificaron las pendientes de acuerdo con la Tabla 5.1.6.95				

Fuente: Integral S.A., 2025

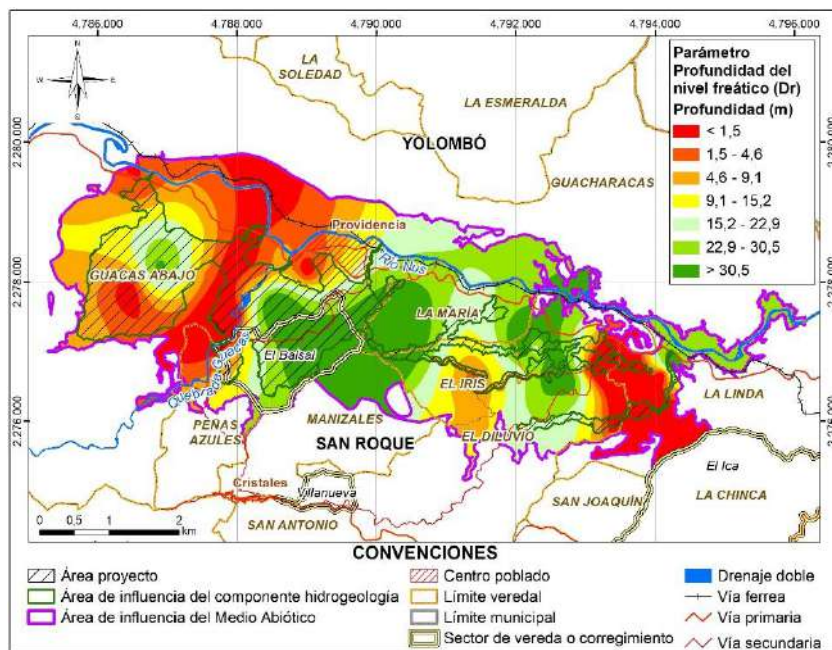


Figura 5.1.6.208 Parámetro nivel freático (Dr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

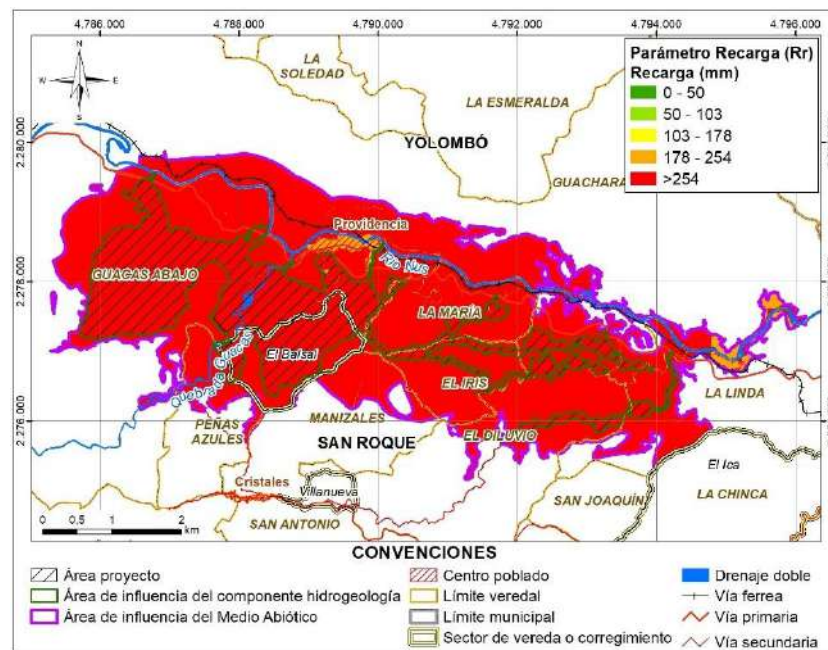


Figura 5.1.6.209 Parámetro Recarga (Rr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

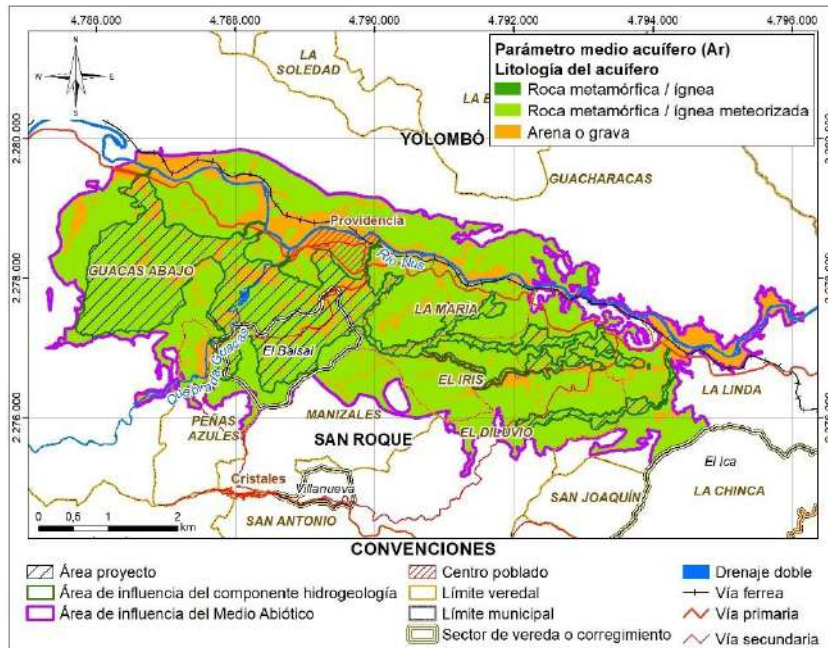


Figura 5.1.6.210 Parámetro medio acuífero (Ar). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

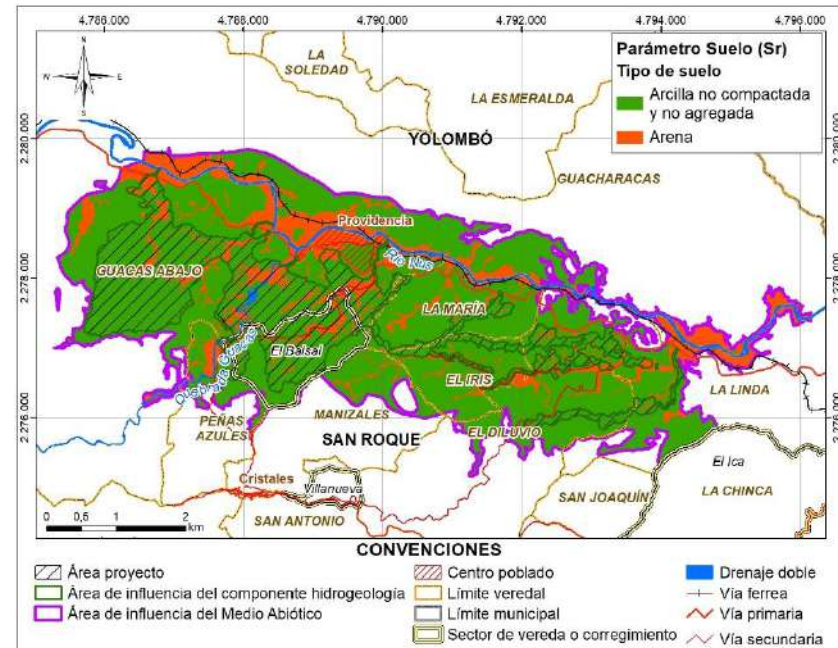


Figura 5.1.6.211 Parámetro tipo de suelo (Sr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

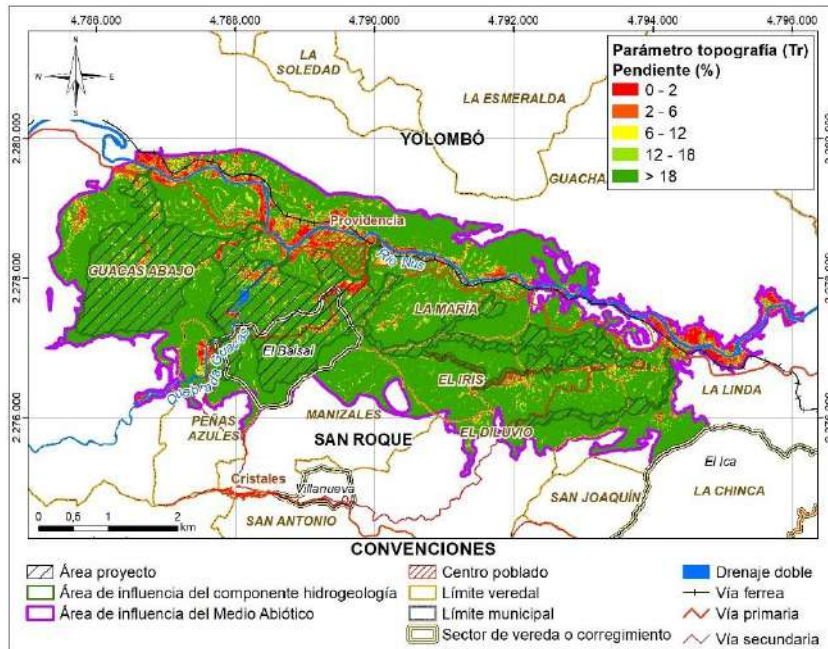


Figura 5.1.6.212 Parámetro Topografía (Tr). Método DRASTIC
Fuente: Integral S.A., 2025

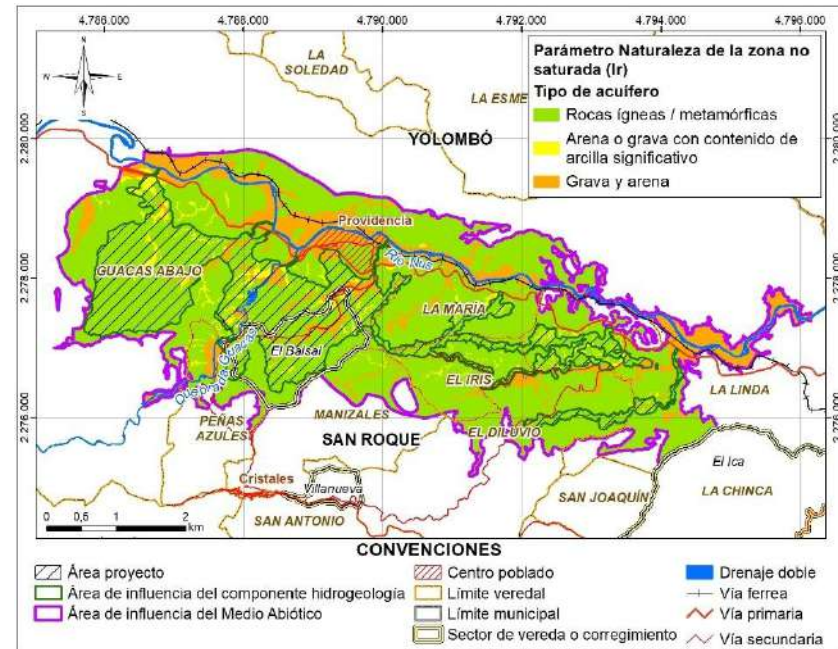


Figura 5.1.6.213 Parámetro naturaleza de la zona no saturada (Ir). Método DRASTIC
Fuente: Integral S.A., 2025

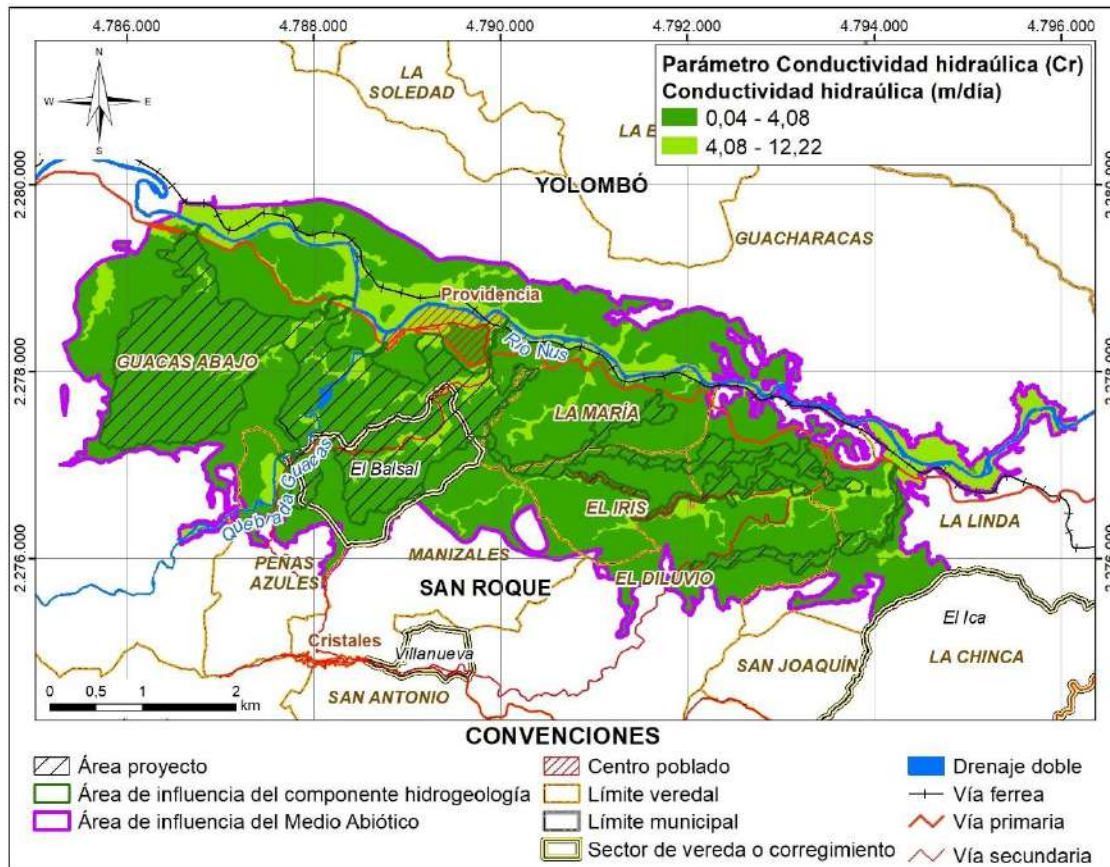


Figura 5.1.6.214 Parámetro conductividad hidráulica (Cr). Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

La Figura 5.1.6.208 muestra la vulnerabilidad según la profundidad del agua subterránea, donde se evidencia que el nivel freático es más superficial hacia los sectores oeste y este del área de influencia abiótica, especialmente en proximidad a los cauces principales (río Nus, quebrada Guacas y quebrada Palestina). Esta condición implica una mayor vulnerabilidad a la contaminación en dichas zonas. Por el contrario, en la parte central del área se presentan niveles freáticos más profundos, lo que se asocia con una menor vulnerabilidad, dado que el agua subterránea se encuentra más protegida frente a posibles contaminantes.

La Figura 5.1.6.209 muestra una recarga alta en gran parte del territorio evaluado, lo que conlleva a una mayor vulnerabilidad debido a al aumento en la probabilidad de arrastre e infiltración de contaminantes.

La Figura 5.1.6.210 muestra la vulnerabilidad a la contaminación según la litología del acuífero; siendo los acuíferos asociados a los depósitos aluviales, coluviales y de flujos los más vulnerables a la contaminación, ya que los materiales que lo conforman corresponden predominantemente a arenas y limos con contenido considerable de gravas.

La Figura 5.1.6.211 muestra la vulnerabilidad según el tipo de suelo, los acuíferos asociados a los depósitos aluviales, coluviales y flujos son los que presentan mayor vulnerabilidad.

La Figura 5.1.6.212 muestra la vulnerabilidad a la contaminación según el porcentaje de inclinación, evidenciando que las zonas circundantes a los drenajes principales presentan mayores índices de vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos.

La Figura 5.1.6.213 presenta la vulnerabilidad según la naturaleza de la zona no saturada donde se observa que el acuífero aluvial es quien presenta una menor capacidad para obstaculizar el transporte vertical de los contaminantes.

Y la Figura 5.1.6.214, presenta la vulnerabilidad a la contaminación según la conductividad hidráulica, siendo el acuífero aluvial el que presenta el índice más alto.

El resultado del álgebra de mapas, presentado en la Figura 5.1.6.215,, evidencia que las mayores vulnerabilidades se concentran en los sectores occidental y oriental del área de influencia. Estas zonas corresponden a áreas con niveles freáticos someros y presencia del acuífero aluvial, condiciones que, sumadas a la alta recarga, incrementan el riesgo de contaminación. En contraste, la zona central muestra vulnerabilidad baja a muy baja, asociada a niveles freáticos más profundos, lo que proporciona mayor protección frente a la infiltración de contaminantes.

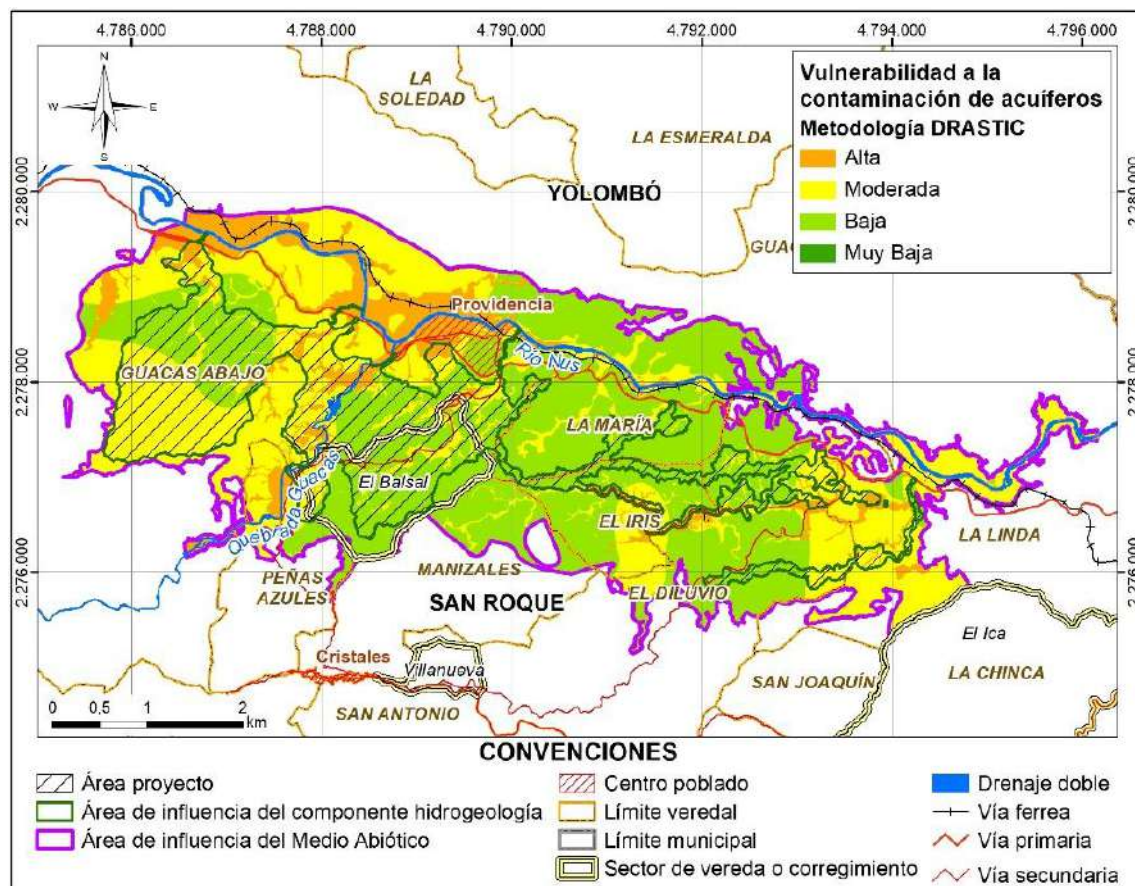


Figura 5.1.6.215 Vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de acuíferos. Método DRASTIC

Fuente: Integral S.A., 2025

La Tabla 5.1.6.99 muestra las áreas para cada categoría de vulnerabilidad a la contaminación.

Tabla 5.1.6.99 Resumen de las áreas – Vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos – DRASTIC

Categoría Vulnerabilidad	Área (ha)	Área (%)
Muy baja	0,20	0,01
Baja	1.191,45	47,75
Moderada	1.011,55	40,54
Alta	2.92,07	11,71
Total	2495,27	100,00

Fuente: Integral.S.A., 2025

5.1.6.4.5 Resultados del Modelo Hidrogeológico conceptual

Los parámetros fisicoquímicos medidos en los puntos de agua subterránea durante las campañas de muestreo isotópico e hidroquímico realizadas por SHI S.A.S. (2025) muestran valores de conductividad eléctrica bajos para los manantiales (58,9 a 177,3 $\mu\text{S/cm}$) lo que indica un grado de mineralización muy bajo asociado a poco tiempo de residencia en el medio subterráneo. Por su parte los valores de conductividad eléctrica medidos en pozos y aljibes son ligeramente más altos (57,9 a 283 $\mu\text{S/cm}$) encontrándose la mayoría entre los 100 y 300 $\mu\text{S/cm}$ exhibiendo un grado de mineralización bajo a medio. Los piezómetros PZR 13-07 (283 $\mu\text{S/cm}$) y PZS12-12 (242 $\mu\text{S/cm}$), registran los valores más altos de conductividad eléctrica, 283 y 242 $\mu\text{S/cm}$ respectivamente, lo cual puede indicar que están captando aguas con un mayor tiempo de residencia en el medio subterráneo o con interacción con materiales más solubles (SHI SAS, 2025).

Los valores de oxígeno disuelto presentan variaciones entre 0,41 y 7,85 mg/l, tanto en manantiales como en piezómetros y el único aljibe existente, en donde la mayoría de los puntos presentan valores altos, entre 4 y 7 mg/l, lo que se relaciona aguas de infiltración reciente con poco tiempo de tránsito en el medio subterráneo. Los valores más bajos se encuentran en los manantiales M233, M118 y en los piezómetros PZA12-08 y DH-FS-315 los cuales son de poca profundidad y captan unidades aluviales y suelos residuales, Esta baja concentración de oxígeno sugiere condiciones reductoras, posiblemente asociadas a procesos de degradación de materia orgánica (SHI SAS, 2025).

Las aguas subterráneas en la zona de estudio presentan una composición que varía entre bicarbonatada cálcica a bicarbonatada sódica, con un ligero aumento de la mineralización hacia horizontes más profundos, La ausencia de sulfatos y cloruros en los análisis de laboratorio es una característica común en toda el área de estudio, lo que indica poca evolución química del agua subterránea y se asocia a un tiempo de residencia corto en el medio subterráneo. Además, las mayores concentraciones de iones se identifican en la parte baja de la cuenca, en proximidad al río Nus. En particular, se observa una

acumulación significativa de hierro y manganeso en estas zonas, lo que sugiere una dirección de flujo de agua subterránea predominantemente hacia el río (SHI SAS, 2025).

El muestreo isotópico muestra que las diferentes fuentes de agua subterránea presentan una composición isotópica relativamente homogénea con variaciones mínimas entre los distintos puntos de muestreo. Sin embargo, los piezómetros BH-5M-08, PZR 13-09, PZR 13-05 y PZR 13-07, los cuales captan unidades rocosas, presentan una firma isotópica ligeramente más empobrecida, lo que puede sugerir un origen distinto o una historia de flujo diferenciada del resto de puntos.

Lo anterior permite inferir que el flujo subterráneo se da principalmente desde la zona vadosa local, y está regulado por los depósitos cuaternarios y el perfil de meteorización del Batolito Antioqueño. Este flujo puede ser más rápido en las unidades más superficiales, como los depósitos cuaternarios y el suelo residual y ser más lento a medida que aumenta la profundidad, lo que se evidencia en un aumento ligero de la mineralización del agua subterránea en horizontes más profundos.

A pesar de esto, la ausencia de aguas sulfatadas o cloruradas y los valores bajos de conductividad eléctrica que presentan de manera general los puntos de agua, muestran que el tiempo de residencia del agua en el medio subterráneo es corta, y evidencian la ausencia de flujos de agua más profundos. Sin embargo, las diferencias en la firma isotópica en los piezómetros que captan de unidades rocosas podrían sugerir un flujo regional rápido, que ocurre en la zona más superficial de la roca fracturada (SHI SAS, 2025).

El flujo subterráneo en las unidades más superficiales, (depósitos, suelo residual y saprolito) se encuentra controlado por los gradientes topográficos, mostrando un comportamiento similar al flujo superficial, siendo la dirección principal de flujo hacia el NE, teniendo al río Nus como el receptor principal del flujo, y presentando direcciones secundarias que desvían el agua subterránea hacia la quebrada Guacas. Por otra parte, el flujo en las unidades más profundas (zona de transición y roca) también tiene una dirección preferencial hacia el NE, en dirección al río Nus, sin embargo, presenta menos variaciones locales asociadas a la topografía local (SHI SAS, 2025).

En las Figura 5.1.6.216 se observan las unidades hidrogeológicas previas a la construcción del proyecto, la Figura 5.1.6.217 se muestra la distribución de las unidades hidrogeológicas en el área de influencia luego de las obras proyectadas, en la Figura 5.1.6.218 se muestra un perfil esquemático del flujo subterráneo, y la Figura 5.1.6.216 se observa un bloque diagrama esquemático del flujo de aguas superficial y subterráneo de la zona.

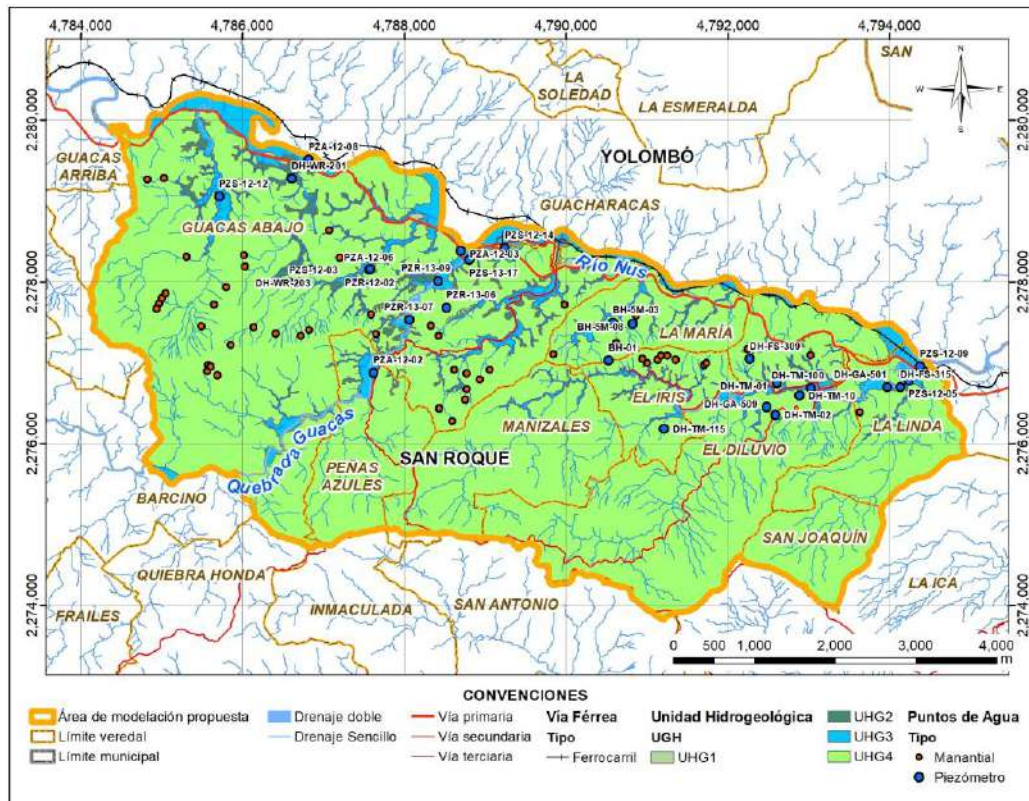


Figura 5.1.6.216 Unidades hidrogeológicas del área de estudio previas a la construcción del proyecto

Fuente: (SHI SAS, 2025)

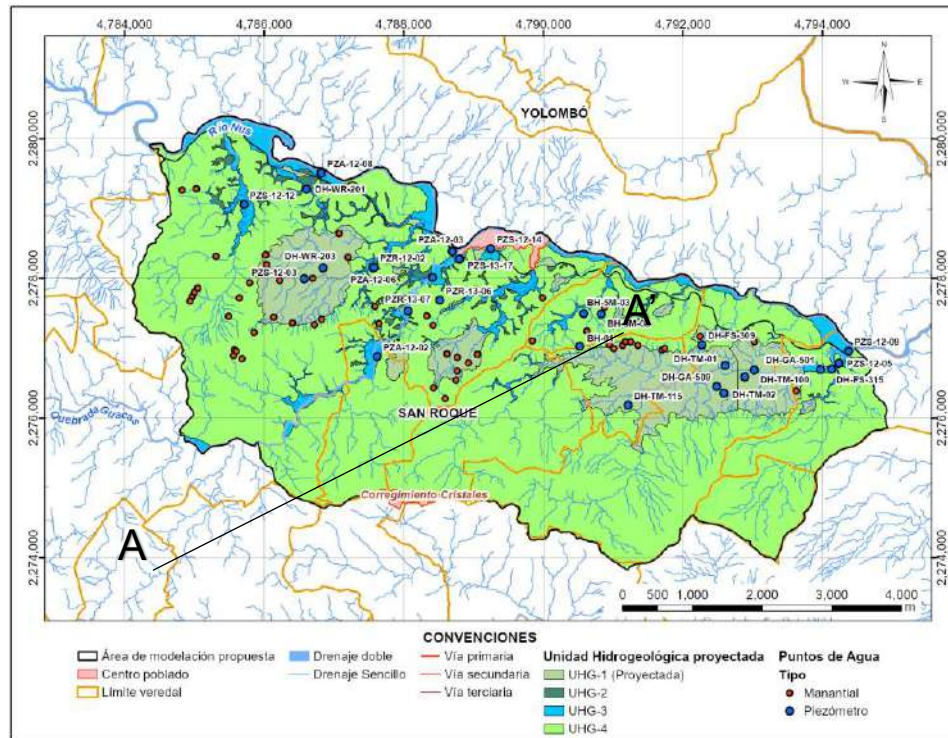


Figura 5.1.6.217 Unidades hidrogeológicas del área de estudio con zonas de depósitos proyectados

Fuente: (SHI SAS, 2025)

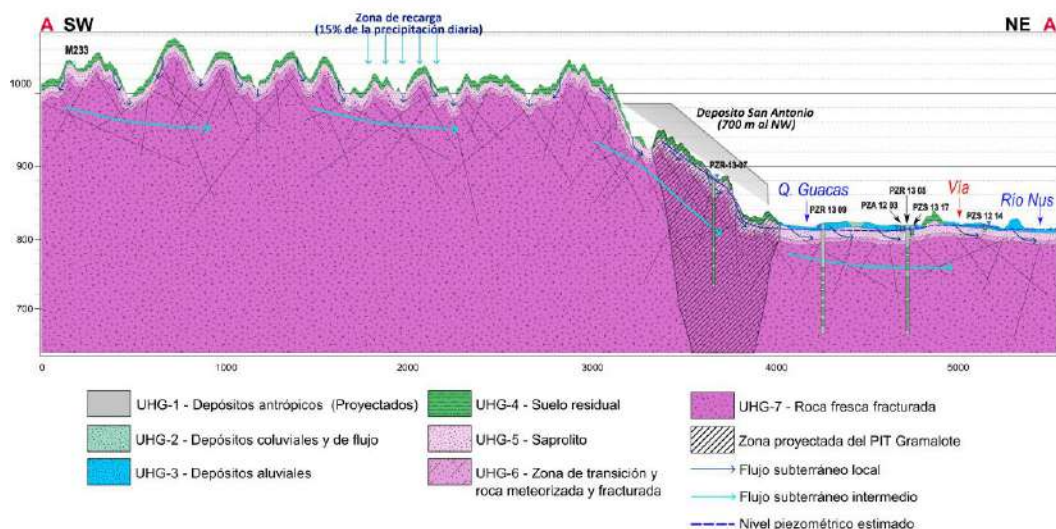


Figura 5.1.6.218 Perfil esquemático del flujo subterráneo en la zona de estudio

Fuente: (SHI SAS, 2025)

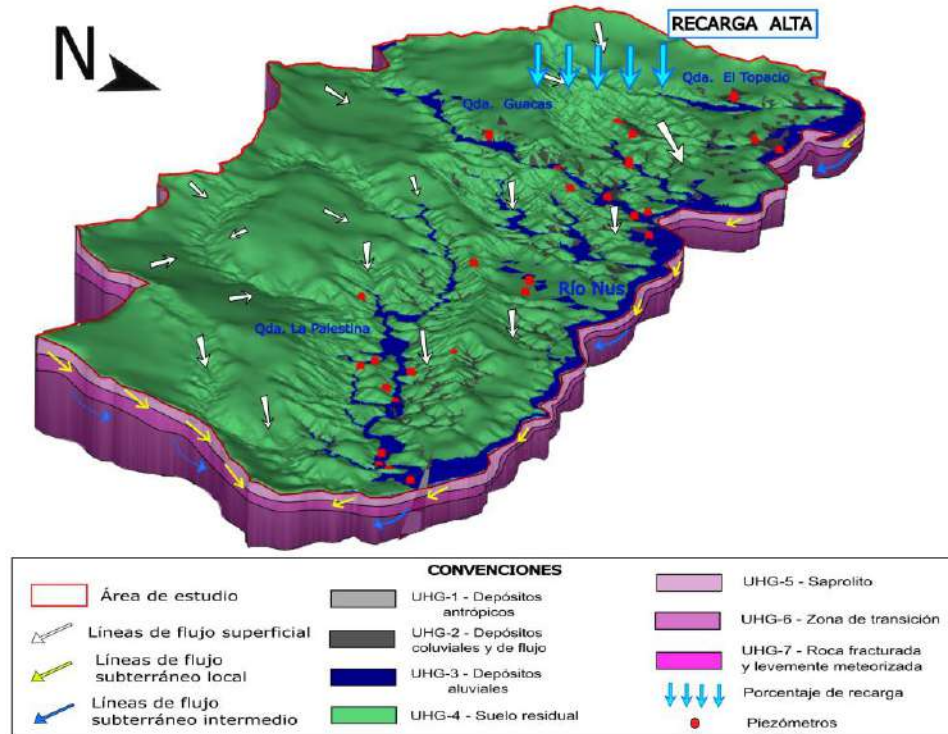


Figura 5.1.6.219 Bloque diagrama esquemático de las unidades hidrogeológicas en la zona de estudio.

Fuente: (SHI SAS, 2025)

5.1.6.5 Modelo numérico del flujo de las aguas subterráneas

La actualización del modelo numérico se da principalmente para incorporar los cambios proyectados del Plan de Trabajo y Obras (PTO) de la Modificación del Estudio de Impacto Ambiental (MEIA) del proyecto, lo cual implica actividades como: refinamiento de la malla computacional para representar obras mineras, recalibración del modelo en estado estacionario y transitorio, incorporación de obras mineras actualizadas y simulación de potenciales impactos (SHI S.A.S., 2025).

La modelación conceptual y numérica en hidrogeología son herramientas que permiten mejorar la comprensión del sistema toda vez que proporcionan una estructura para sistematizar la información disponible y ayudan a identificar áreas donde se requiere información adicional. Asimismo, permiten interpretar la dinámica de las unidades hidrogeológicas y plantear escenarios para responder preguntas sobre el funcionamiento de estas. Adicionalmente, los modelos conceptuales y numéricos pueden focalizar la atención en relación con la ocurrencia de fenómenos y conflictos con incidencia en la sostenibilidad del recurso, su planeación y su gestión.

El modelo conceptual es un conjunto de hipótesis y asunciones que permiten simplificar el problema de flujo subterráneo y su dominio espacial y temporal real, a partir del análisis conceptual y multidisciplinar de componentes geológicos, geomorfológicos, hidrogeoquímicos, hidráulicos, hidrológicos y climatológicos. Es importante resaltar que estos modelos son de carácter dinámico y a medida que se disponga de información nueva,

se debe reevaluar y ajustar (Vélez, 2004), de acuerdo con la teoría de ciclos crecientes (Figura 5.1.6.220).

El modelo conceptual es el punto de partida de todo modelo numérico, de tal forma que el modelo numérico valide matemáticamente las hipótesis de flujo planteadas en el modelo conceptual y no al contrario. El modelo hidrogeológico numérico es la representación matemática del medio físico simplificado que ha sido representado mediante el modelo conceptual. El modelo numérico representa y resuelve el flujo de agua en medios porosos por medio de la ecuación general de flujo en derivadas parciales, la cual combina los principios de balance de masas y la ley de Darcy. El balance de masas involucra consideraciones de flujos de entrada y salida de agua y cambios en el almacenamiento. La solución de la ecuación general de flujo requiere establecer condiciones de frontera y condiciones iniciales, las cuales se definen a partir del modelo hidrogeológico conceptual (SHI S.A.S., 2025).

La ecuación general de flujo en medios porosos es la siguiente:

$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \cdot \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \cdot \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \cdot \frac{\partial h}{\partial z} \right) - W = S_s \cdot \frac{\partial h}{\partial t}$	(1).

Donde K_i representa la conductividad hidráulica del medio en la dirección i ; $\delta h / \delta i$ representa el gradiente hidráulico en la dirección i ; S_s el coeficiente de almacenamiento específico; $\delta h / \delta t$ la variación en la carga piezométrica en el tiempo y W los aportes o salidas de agua ocasionados por acciones externas del medio poroso (término fuente / sumidero). Cuando el problema de flujo no varía en el tiempo, $\delta h / \delta t = 0$, se dice que el sistema está en condiciones estacionarias o permanentes, de otra manera se habla de estado transitorio.

En el ANEXO_CARACTERIZACION_HIDROGEOLOGIA_MHN se presentan los archivos nativos del modelo.



Figura 5.1.6.220 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas

Fuente: (Vélez, 2004)

5.1.6.5.1 Metodología

Un modelo hidrogeológico numérico se construye con el fin de dar respuesta a preguntas específicas relacionadas con el sistema modelado, ya sea para el entendimiento del sistema en estado natural o en condiciones alteradas bajo acciones externas, como intervenciones antrópicas o cambios ambientales (tales como deforestación y cambio climático). El proceso de modelación hidrogeológica numérica demanda una estructura ordenada de trabajo (*workflow*), para lo cual el protocolo de modelación presentado en la Figura 5.1.6.221 ofrece una serie de pasos sugeridos que permiten alcanzar los *objetivos de este proyecto desde la modelación numérica, que son*: obtener escenarios prospectivos de potenciales caudales de infiltración hacia el PIT del proyecto minero Gramalote, estimar los abatimientos de nivel piezométrico que se podrían esperar producto de la construcción del PIT, y evaluar las potenciales filtraciones desde las facilidades mineras como los depósitos de estériles y presas de colas en la zona de interés.

Una vez definido el propósito del modelo numérico, su construcción se basa en el modelo conceptual, realizando la formulación numérica requerida para el código de simulación seleccionando, representando la geometría de las unidades hidrogeológicas en sistema de mallas y capas, sus propiedades y sus variables de estado, así como los insumos de entrada y salida, definiendo condiciones iniciales y condiciones de frontera.

Posteriormente, se ejecuta el modelo y los resultados son comparados con observaciones de campo (objetivos de calibración) para evaluar el ajuste del modelo durante el proceso de calibración. La calibración consiste en la variación sistemática de ciertos parámetros del modelo con el objetivo de reproducir las variables observadas, que corresponden

usualmente a los niveles piezométricos asociados a puntos de agua, caudales de infiltración registrados (en caso de existir obras), flujos base en los cuerpos de agua ganadores y a la piezometría general considerada para ajustar el comportamiento general de los flujos del sistema hidrogeológico representado (SHI S.A.S., 2025).

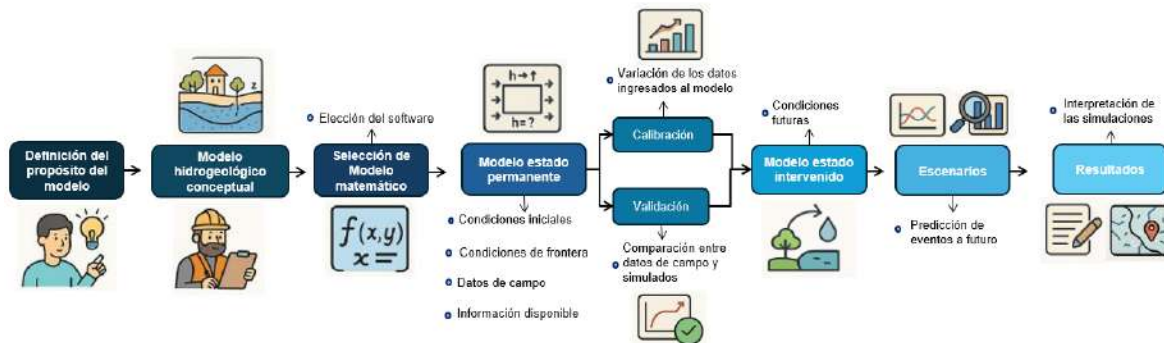


Figura 5.1.6.221 Teoría de los ciclos crecientes en los sistemas de aguas subterráneas

Fuente: (SHI SAS, 2025) a partir de (Anderson & Woessner, 1991)

La validación se realiza mediante la misma metodología y criterios que la calibración, salvo que se utiliza un conjunto de observaciones independiente respecto de aquel utilizado para la calibración. Si se tienen registros de observaciones suficientes, se debería privilegiar un conjunto de datos que represente una condición hidrológica distinta a la de los datos utilizados en la calibración. Una vez el modelo se encuentra calibrado y validado (en caso de ser posible), se puede utilizar en fase prospectiva; es decir, con objetivo de simular escenarios, con cierta capacidad predictiva. Finalmente, se describen e interpretan los resultados a la luz del modelo conceptual (SHI S.A.S., 2025).

Es muy importante resaltar que el modelo numérico es una versión matemática y simplificada del funcionamiento del sistema hidrogeológico, por tanto, está sujeto a limitaciones que implica un grado alto de incertidumbre, los principales factores de incertidumbre son:

- Las simplificaciones principales están relacionadas con la geometría de las unidades hidrogeológicas, la extensión de estas y sus espesores, así como a la variabilidad espacial de sus propiedades, tales como la conductividad hidráulica, también se simplifica notablemente la representación de las acciones exteriores sobre las unidades hidrogeológicas, tales como pozos de bombeo y simulación de obras de infraestructura (p.ej. túneles). Estas simplificaciones se aproximan de mejor manera a la realidad en función de la información disponible en el modelo conceptual y de acuerdo con las condiciones específicas que ofrece el software de modelación para su representación (interpolaciones espaciales, paquetes específicos de condiciones de frontera, etc.).
- La discretización temporal depende en gran medida de la capacidad computacional disponible, por tanto, es complejo representar procesos hidrogeológicos que se dan a bajas escalas temporales y combinarlos con procesos que se dan en escalas de tiempo de mayor duración.

- La capacidad de almacenar y transmitir agua en unidades hidrogeológicas rocosas se da fundamentalmente a través de sus discontinuidades, pues para la mayoría de las rocas ígneas como en este caso, la permeabilidad de su matriz rocosa es despreciable en comparación con la conductividad hidráulica de las fracturas, la cual se conoce tradicionalmente como permeabilidad secundaria y depende de las propiedades de la red de discontinuidades (abertura, relleno, conectividad, densidad, etc.). Por lo anterior, en la modelación numérica se suele aplicar un enfoque de medio poroso equivalente (EPM por sus siglas en inglés), dicho enfoque representa estas masas de rocas como un medio poroso capaz de transmitir agua en dirección del máximo gradiente, dependiendo del grado de fracturamiento e interconexión de la roca, dicha hipótesis toma mayor validez a determinadas escalas (Londoño Aguirre, 2015).

5.1.6.5.2 Código numérico y software

Todo modelo numérico de flujo subterráneo resuelve la ecuación diferencial (1), en conjunto con la ecuación de continuidad de caudal, en un dominio dado y sujeto a unas condiciones iniciales y de frontera conocidas. Tradicionalmente, existen tres aproximaciones generales para la solución de estas ecuaciones: diferencias finitas (DF), elementos finitos (EF) y diferencias finitas de volúmenes de control (DFVC), que se distinguen por la manera en que discretizan el dominio del problema para encontrar la solución numérica de las ecuaciones, pues la solución analítica solo es posible en casos muy específicos (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015), (Lozano Hernández, Marín Celestino, Martínez Cruz, & Ramos Leal, 2024). Se resalta que las tres aproximaciones resuelven las mismas ecuaciones, bajo la premisa de continuidad, pero bajo una aproximación distinta (SHI S.A.S., 2025).

Las soluciones numéricas no son continuas en el espacio y en el tiempo, como ya se ha mencionado son una aproximación discreta de ambas dimensiones, en el espacio a partir de puntos discretos (denominados nodos) y en el tiempo a partir de intervalos (denominados periodos de estrés), la variable de estado (niveles piezométricos) es calculada en dichos elementos discretos a partir de la resolución aproximada de la ecuación general de flujo (ecuación (1)). En el método de Diferencias Finitas (DF) los nodos son localizadas en el espacio tridimensional en el centro de celdas rectangulares (diferencias finitas), ubicadas espacialmente mediante los índices i, j, k en una cuadrícula georreferenciada (*grid*). Mientras que en el método de Elementos Finitos (EF) los nodos son localizados espacialmente en las coordenadas x, y, z , conformando una malla (*mesh*), dichos nodos se conectan mediante segmentos que conforman elementos típicamente triangulares (aunque también pueden ser cuadriláteros) conocidos como elementos finitos, pero la resolución de la ecuación siempre se da en los nodos. En la Figura 5.1.6.222 se muestra un ejemplo de la configuración geométrica de ambos métodos.

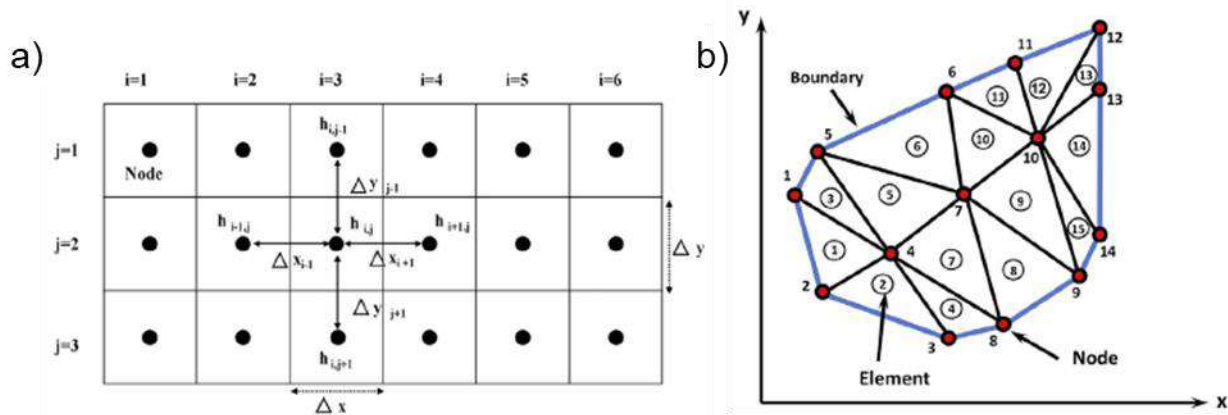


Figura 5.1.6.222 a) Cuadrícula de diferencias finitas en 2D ilustrando la notación de nodos, b) malla de elementos finitos en 2D ilustrando la notación de nodos y elementos

Fuente: (SHI SAS, 2025) a partir de (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

Para la modelación del flujo subterráneo en el proyecto minero Gramalote, se ha seleccionado el método de aproximación de **elementos finitos (EF)**, por las siguientes razones:

- *Flexibilidad para la representación espacial de elementos antrópicos*, dado el uso de elementos geométricos irregulares (triángulos y cuadriláteros) que permiten ampliar o disminuir la escala de representación en un mismo modelo, permitiendo simular formas de objetos o intervenciones antrópicas detalladas, tales como pits mineros y otras facilidades mineras como presas de relaves y depósitos de estériles, así como elementos lineales como túneles y canales de desviación.
- *Facilidad y eficiencia para generar refinamientos y anidamiento de modelos*, la discretización de la zona de interés mediante elementos finitos e interconexión a través de los nodos (vértices) facilita realizar refinamientos localizados alrededor de zonas de interés (elementos antrópicos, o elementos físicos de relevancia como cuerpos de agua o discontinuidades) sin extenderse hacia los extremos de la malla (como si sucede en las diferencias finitas), lo cual repercute en una mejor definición de los elementos de interés dentro del modelo sin incurrir en sobredimensionamiento del tamaño de los elementos en áreas donde no se presenta la necesidad.
- *Flexibilidad para representar condiciones hidrogeológicas complejas*, la facilidad de representar tanto horizontal como verticalmente (malla 3D) el medio subterráneo mediante nodos interconectados con formas irregulares, facilita la representación de condiciones hidrogeológicas complejas como zonas de alta heterogeneidad, pinchamientos de capas, discontinuidades como fallas y zonas de fracturas, contactos entre unidades hidrogeológicas, nacimientos, entre otros elementos propios del modelo hidrogeológico conceptual.
- *Eficiencia en tiempos de cómputo y convergencia*, si bien la posibilidad de representar la geometría del medio subterráneo de forma irregular acerca más al modelo a las condiciones hidrogeológicas reales, esto suele implicar una alta definición de elementos y nodos, que en función de su tamaño, interconexión y geometría pueden incurrir en amplios tiempos de cómputo; sin embargo, una definición cuidadosa de la malla de modelamiento, respetando las reglas de los elementos finitos y optimizando las

transiciones puede beneficiar de manera significativa la convergencia de la solución del flujo en cada paso de tiempo.

El enfoque EF resuelve el sistema a través del cálculo de los niveles piezométricos (h) en los nodos que conforman los vértices de los elementos en el que se discretiza el sistema hidrogeológico de interés. Se interpola dentro de cada elemento utilizando una función base asociada a cada nodo para encontrar una solución de prueba (*trial solution*) que relaciona el nivel en los nodos con el nivel en el elemento asociado (Álvarez-Villa, 2017). De tal forma el nivel piezométrico en un punto (x,y) en función del tiempo t puede escribirse así:

$h(x, y, t) = \sum_{i=1}^n h_i(t) * N_i(x, y)$	(2).

$N_i(x,y)$ es la función base de interpolación asociada al nodo i . Estas funciones de interpolación tienen distintas expresiones dependiendo del tipo de elemento (triángulos, cuadriláteros) y del tipo de interpolación (siendo la lineal la más tradicional). La función de interpolación es una pirámide (Figura 5.1.6.223) con vértice sobre el nodo y cuya base tiene por lados los elementos que comparten el nodo opuesto al mismo nodo (Álvarez-Villa, 2017). Dado que la solución es de prueba es claro que no va a representar la solución final real del nivel piezométrico, incumpliendo la ecuación gobernante del flujo subterráneo (ecuación (1)), sin embargo, permite calcular un error residual, como la diferencia que existe entre la solución de prueba y la ecuación gobernante, si el residual sobre el dominio espacial del modelo es minimizado (optimización) la suma de los residuales converge a cero. El enfoque EF suele aplicar entonces el método de los residuales ponderados para minimizar el error de cierre en los nodos, aplicando el método de Galerkin (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015) (Álvarez-Villa, 2017) .

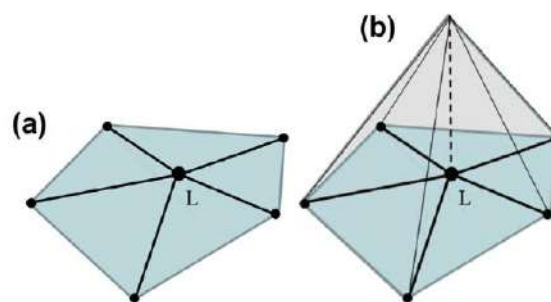


Figura 5.1.6.223 a) Vista en planta de una porción de elementos alrededor del nodo L en una malla de elementos finitos. (b) Vista tridimensional de la función base nodal $N(x,y)$.

Fuente: (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015)

De acuerdo con el estado del arte de la modelación de flujo subterráneo (Anderson, Woessner, & Hunt, 2015), (Lozano Hernández, Marín Celestino, Martínez Cruz, & Ramos Leal, 2024), existe un importante número de software que aplican el enfoque de EF para simular el flujo de aguas subterráneas (saturadas y vadosas), entre ellos se destacan FEFLOW de DHI, Hydrogeosphere de HGS, OpenGeoSys del UFZ (Helmholtz Centre for Environmental Research), SUTRA del USGS, GMS (Groundwater Modeling System) de

AquaVEO, AQUIFEM de CSIRO, HYDRUS, entre otros. Para el proyecto minero Gramalote se ha seleccionado el software FEFLOW (Finite Element Modeling of Flow) por ser un software integrado (código numérico e interfaz gráfica – concepto todo en uno) de amplio uso a nivel mundial, con documentación extensa, soporte técnico, con más de 30 años en el mercado y con aplicaciones específicas para el sector minero (Diersch, 2014) (DHI, 2025). La versión implementada es FEFLOW 10.0 Standard, licenciada por SHI S.A.S.

5.1.6.5.3 Dominio del modelo y su geometría

El dominio del modelo numérico comprende la misma área de influencia que fue delimitada en el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), la cual parte de la delimitación realizada por Golder Associates (2021), verificando que cubre la totalidad de la infraestructura minera proyectada y definiendo límites físicos para su acotamiento. Para el MHC se modificó el límite occidental, donde no se prevén intervenciones ni modificaciones en el terreno de acuerdo con la MEIA, dicha modificación se realizó siguiendo la divisoria de cuencas. En la Figura 5.1.6.224 se muestra la extensión del dominio espacial del modelo, con un área total de 40,10 km², dicho dominio es limitado de la siguiente manera: al norte con el cauce del río Nus, el cual configura una importante condición de frontera del modelo numérico (*Flow Transfer*), al occidente con la divisoria de aguas externa de la cuenca de la quebrada La Bella y la de un afluente menor de la quebrada Guacas, al oriente con la divisoria de aguas interna de la cuenca de la quebrada La Linda, al suroccidente con el cauce de la quebrada Guacas, al sur y al sureste con la divisoria de aguas externa de la cuenca del río El Socorro (SHI S.A.S., 2025).

El dominio espacial descrito anteriormente, configura la malla principal del modelo de elementos finitos (*supermesh*), la cual es incorporada en FEFLOW (Figura 5.1.6.224) y permite configurar la zona activa de modelamiento. Posteriormente se procede a definir las zonas de refinamiento (Figura 5.1.6.225), donde los nodos de la malla estarán más cercanos entre sí para representar mayor nivel de detalle espacial de elementos físicos del sistema hidrogeológico, tanto naturales como antrópicos, dichas zonas de modelamiento corresponden a: 1) la huella minera del proyecto, 2) los drenajes dobles dentro del dominio del modelo o en sus fronteras, que corresponden a la quebrada Guacas y al río Nus respectivamente, 3) los drenajes sencillos que describen cauces principales de mayor orden en la red de drenaje del dominio del modelo, los cuales corresponden a quebrada El Topacio, quebrada La Negra, quebrada La Linda y Cauce 233 (SHI S.A.S., 2025).

La construcción de la malla se realiza directamente en FEFLOW, así como el refinamiento, el suavizado y la optimización geométrica de la misma, el resultado se presenta en la Figura 5.1.6.227, dicha malla es conformada por 326.508 Nodos, 647.325 elementos finitos (EF) y 1'300.340 bordes. El tamaño de los EF resultantes varía entre 345 m en las zonas más distantes a las áreas de refinamiento y 15 m en las zonas directas de refinamiento, permitiendo representar un modelo multiescalar anidado (Figura 5.1.6.228). La optimización de la malla busca obtener formas ideales, que suavice los ángulos y que permita una mejor conexión entre los nodos con fines de estabilidad numérica y eficiencia computacional, en la Figura 5.1.6.229 se muestra el ángulo interior máximo de cada EF, denotando que dichos ángulos se alejan de ser demasiado obtusos o agudos, oscilando entre 60° y 80° (SHI S.A.S., 2025).

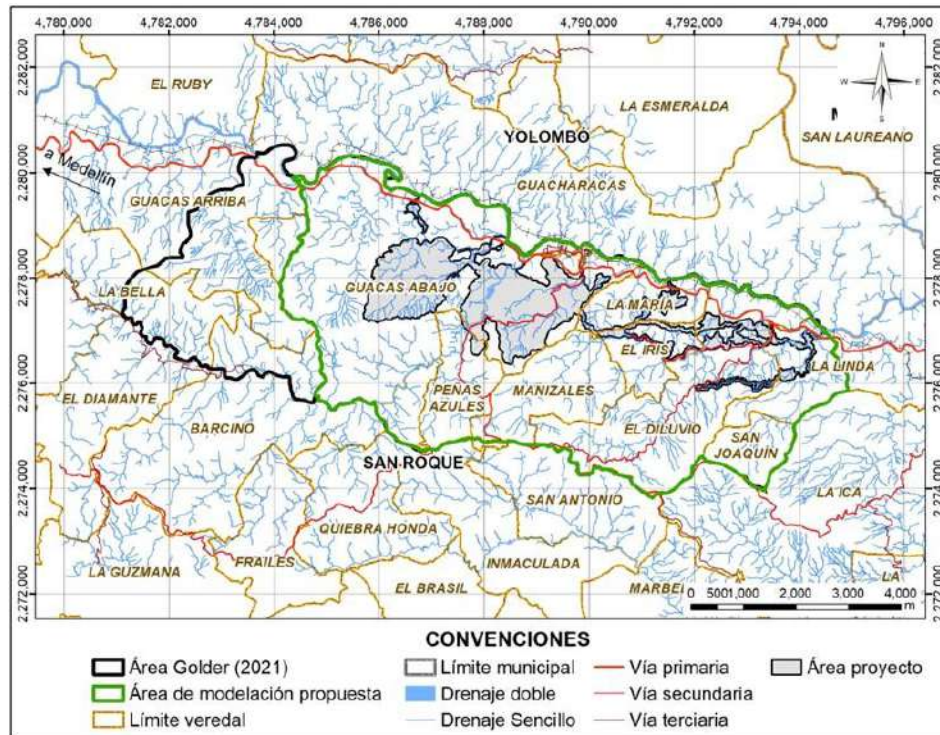


Figura 5.1.6.224 Área de influencia para el modelo hidrogeológico conceptual y numérico propuesto

Fuente: (SHI SAS, 2025) a partir de (Golder Associates Perú S.A., 2021)

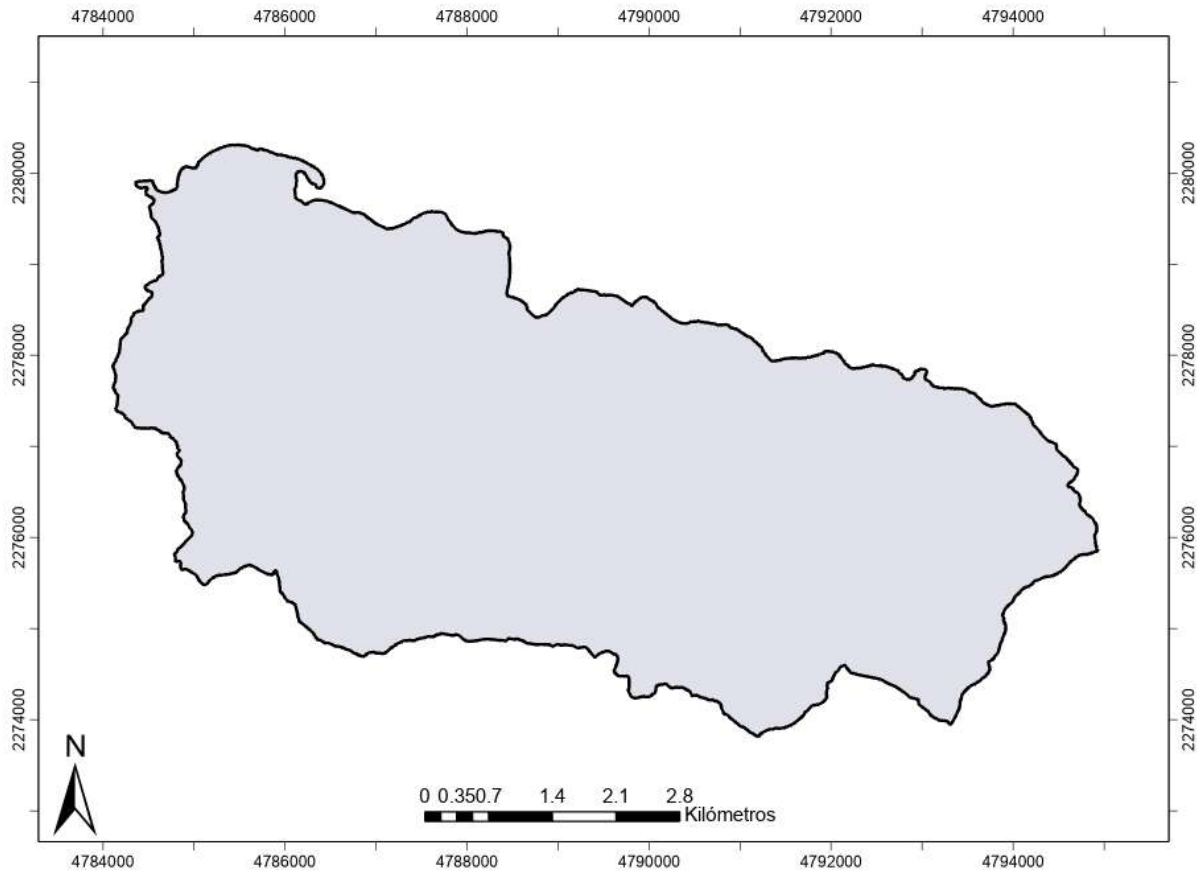


Figura 5.1.6.225 Zona activa de modelamiento incorporada en FEFLOW que define la malla principal (supermesh) de elementos finitos para el modelo

Fuente: (SHI SAS, 2025)

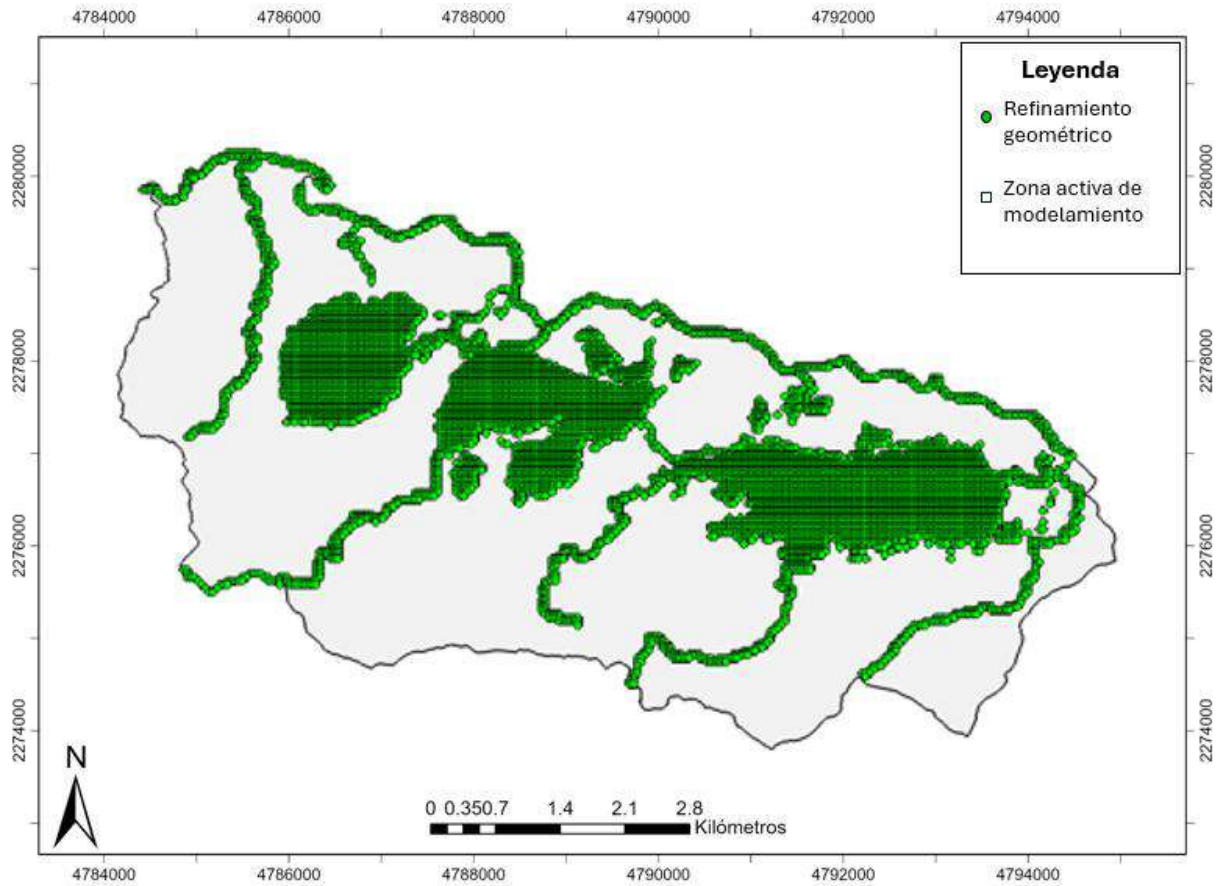


Figura 5.1.6.226 Zonas de refinamiento geométrico del enmallado propuesto en FEFLOW (puntos verdes), representado mayor nivel de detalle alrededor y dentro de la huella minera proyectada y los drenajes principales de la zona de estudio

Fuente: (SHI SAS, 2025)

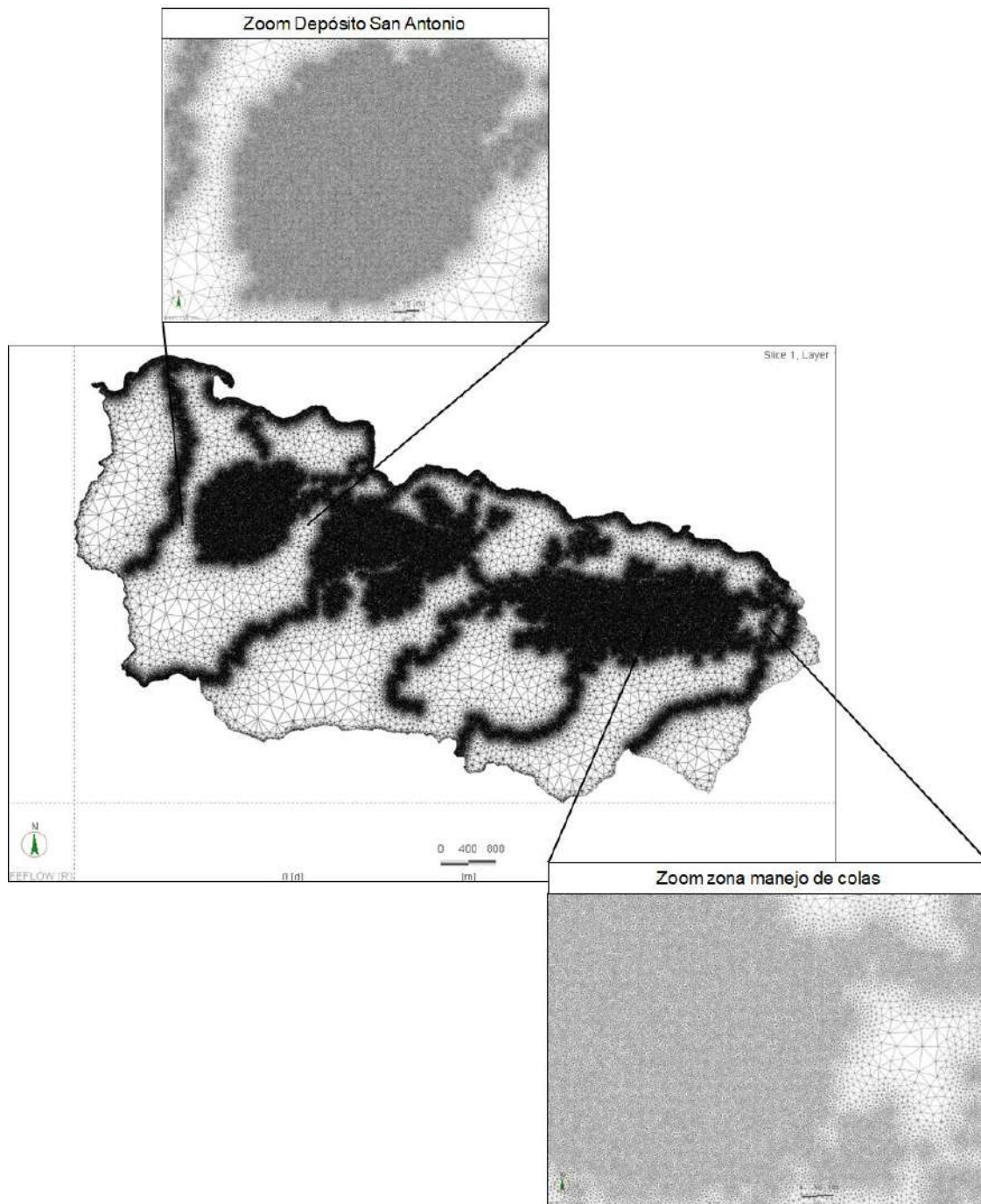


Figura 5.1.6.227 Geometría de la malla de elementos finitos construida para el modelo numérico con sus respectivas zonas de refinamiento

Fuente: (SHI SAS, 2025)

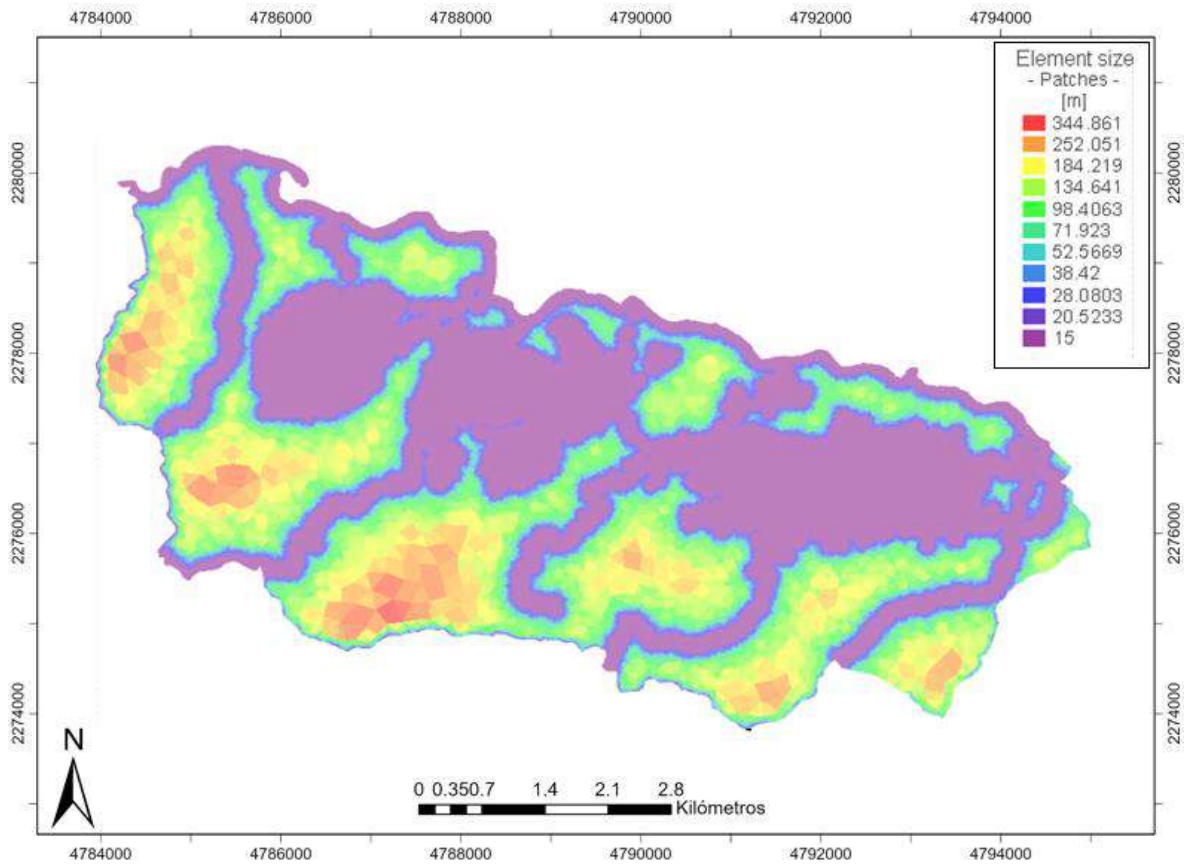


Figura 5.1.6.228 Tamaño de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando la implementación multiescalar, pasando de tamaños regionales (345 m) hasta tamaños locales (15 m)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

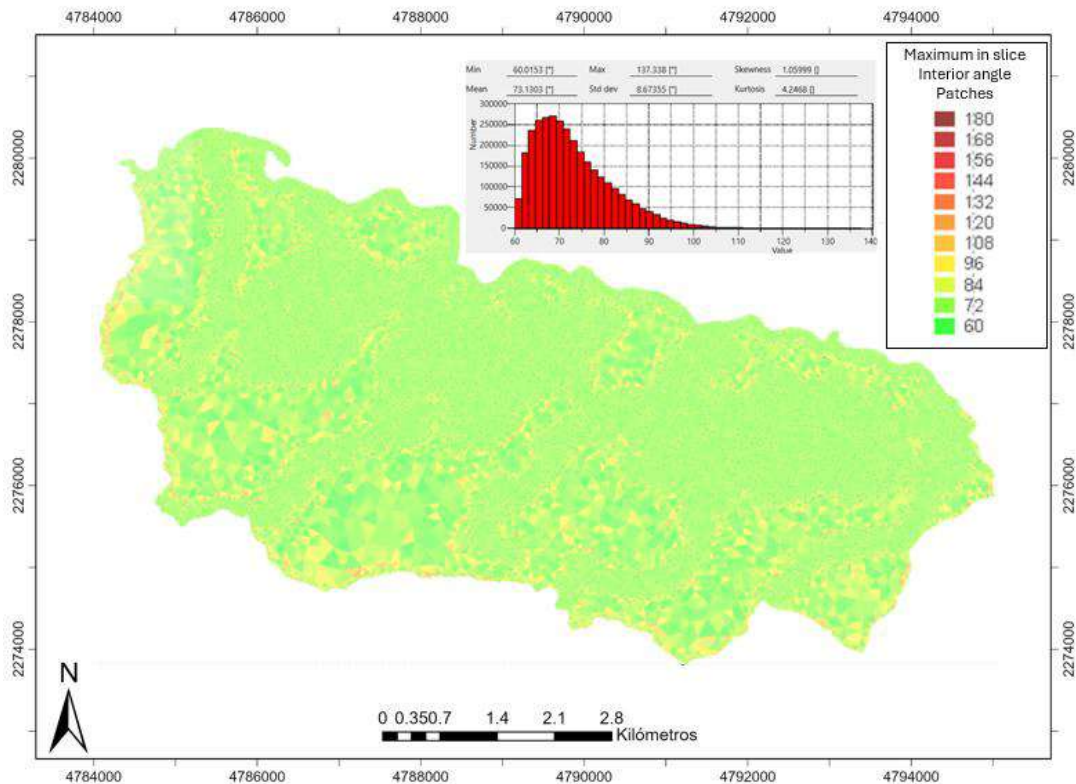


Figura 5.1.6.229 Ángulos interiores máximos de los elementos finitos que componen la malla computacional, denotando optimización de la malla con ángulos alrededor de 60 y 80°

Fuente: (SHI SAS, 2025)

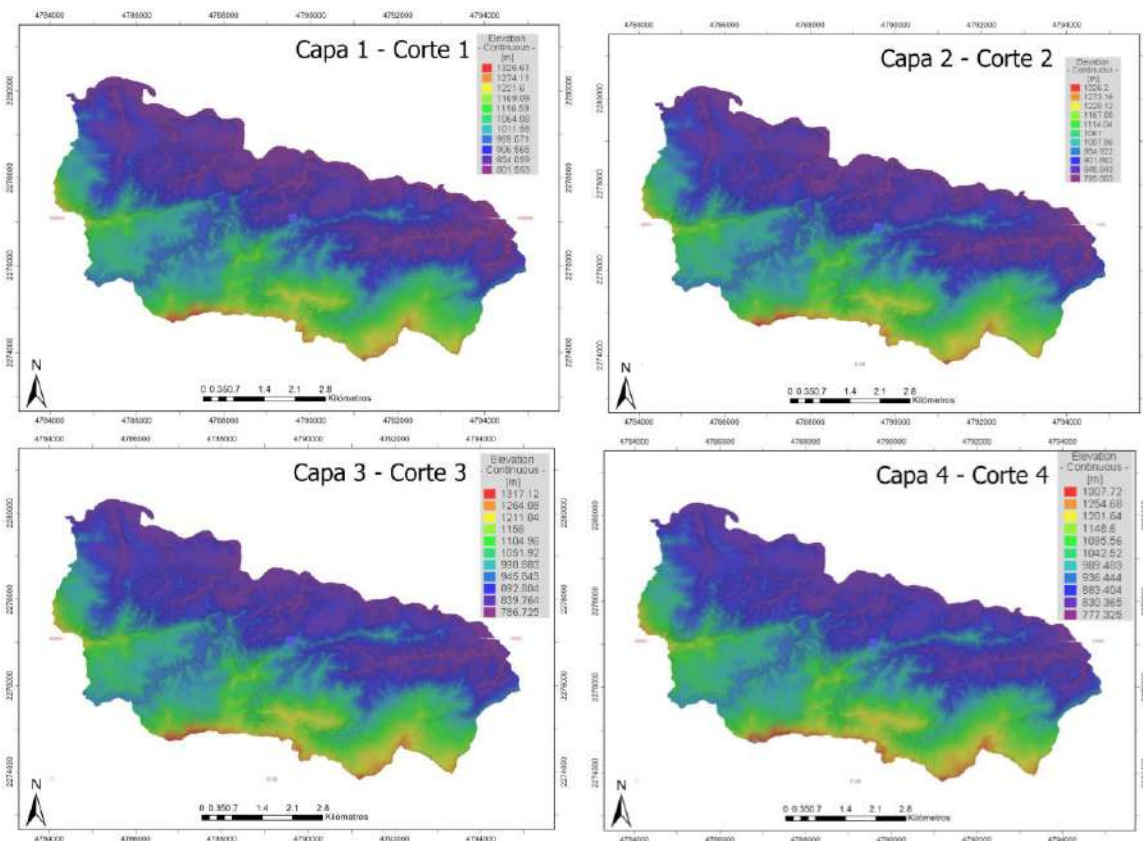
5.1.6.5.4 Representación de las unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas (UHG) han sido definidas en el Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC), estas configuran el modelo numérico tanto en geometría como en parámetros. La geometría vertical del modelo numérico es configurada a partir de los espesores de las UHG, los cuales han sido previamente interpolados e incorporados en FEFLOW, para tal incorporación se estima primero el techo de cada UHG en cada uno de los nodos que conforman la malla de EF, al incorporarse en el modelo, las rutinas internas de FEFLOW generan la interpolación aplicando el método determinístico IDW (*Inverse distance weighting*), obteniéndose el techo de cada UHG como se ilustra en la Figura 5.1.6.230. De esta manera el modelo numérico en la vertical se configura por cinco (5) capas (volumen) y seis (6) cortes (superficies). Los espesores de las capas (UHG) dentro del modelo se muestran en la Figura 5.1.6.231 (SHI S.A.S., 2025).

Es importante mencionar que la condición de frontera inferior (bottom total del modelo) es configurada como no flujo (no-flow) y se ha asumido en 450 msnm, teniendo en cuenta que el Pit que se proyecta alcanzará una cota mínima de 490 msnm. Una de las ventajas notables de los elementos finitos es la facilidad para incorporar nuevas capas y subdividir capas existentes, por ende, la capa 5 resultante de gran espesor, será subdividida en

subcapas en la fase prospectiva, para incorporar el detalle en la vertical del avance minero del Pit, sin embargo en la fase estacionaria y transitoria natural, se mantiene como una sola capa, para facilidades de calibración, por tratarse del mismo material litológico y por ende de la misma unidad hidrogeológica (SHI S.A.S., 2025).

Definida la malla de EF y la configuración vertical de las capas y cortes, se obtiene el modelo tridimensional de EF para el sistema hidrogeológico del área de influencia, tal como se ilustra en la Figura 5.1.6.231 y en la Figura 5.1.6.232.



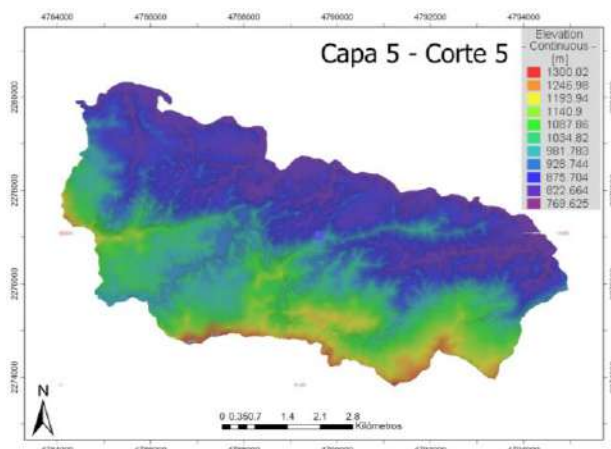
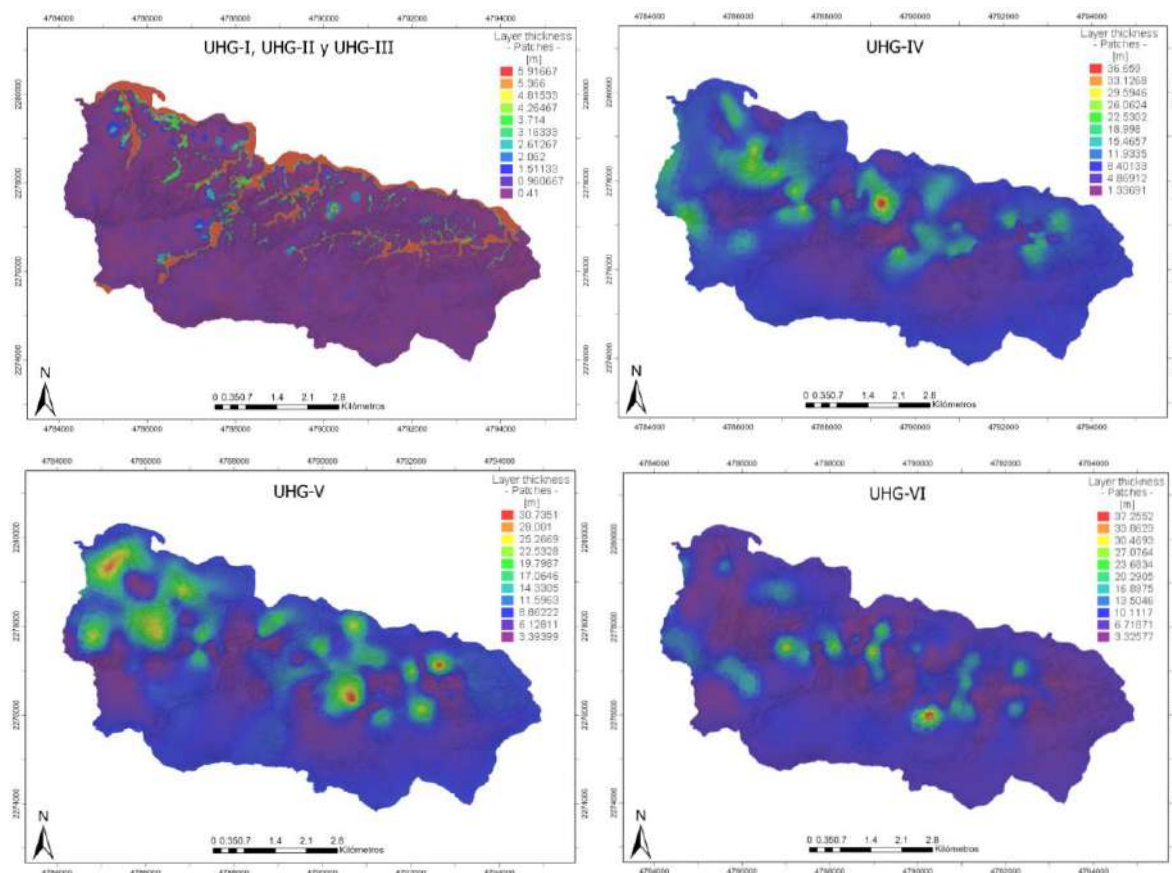


Figura 5.1.6.230 Elevación (top) de cada una de las capas y cortes (slices) que conforman la geometría vertical del modelo

Fuente: (SHI SAS, 2025)



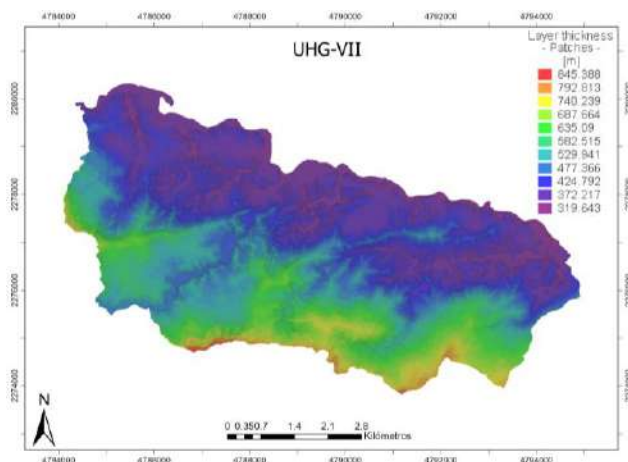


Figura 5.1.6.231 Espesores de las unidades hidrogeológicas incorporados dentro del modelo numérico de flujo y que definen su configuración geométrica vertical

Fuente: (SHI SAS, 2025)

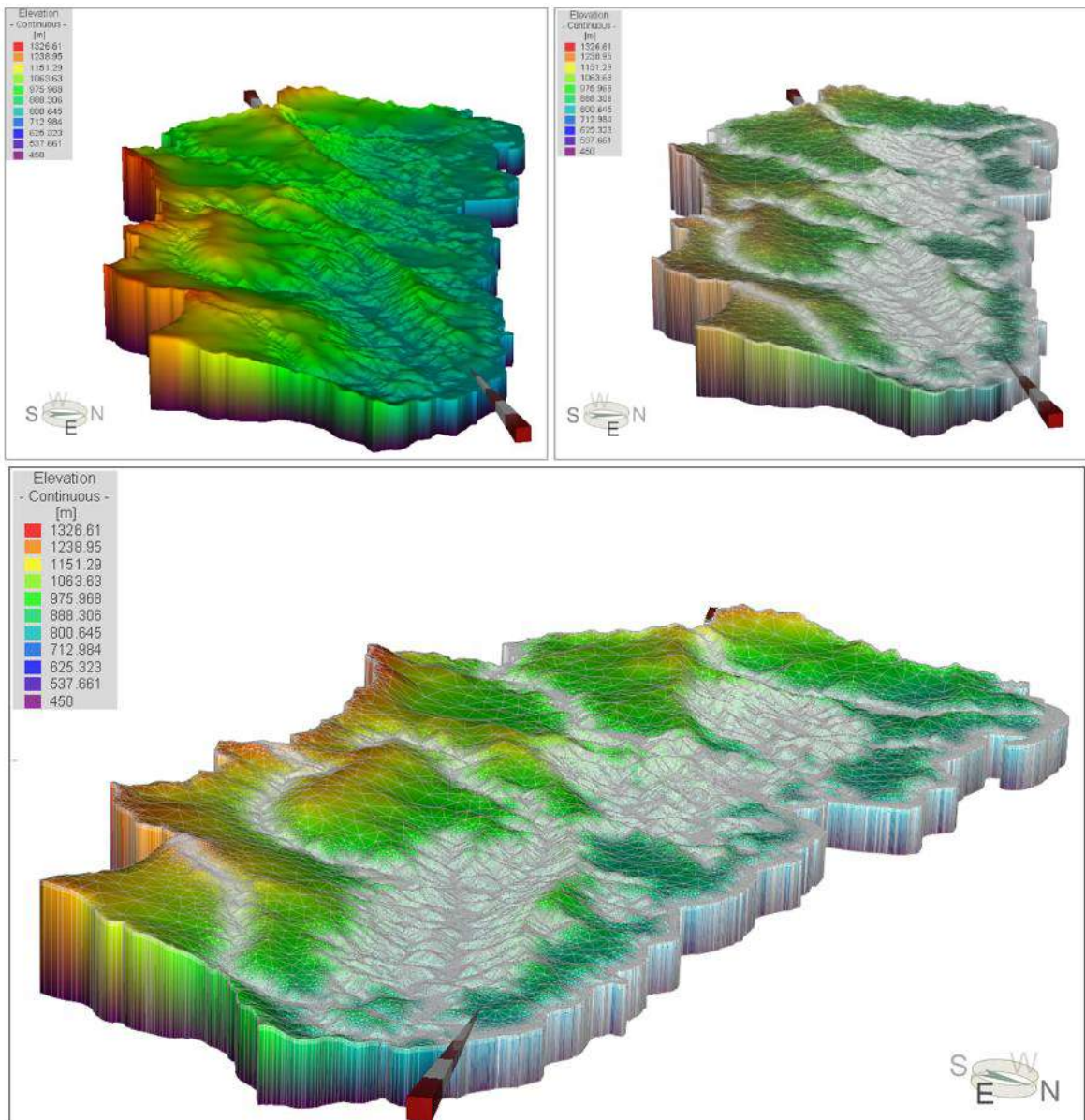


Figura 5.1.6.232 Vistas 3D de la configuración geométrica del modelo numérico, representando las elevaciones (panel superior izquierdo) y las elevaciones con la configuración de la malla 3D de elementos finitos (panel superior derecho y panel inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

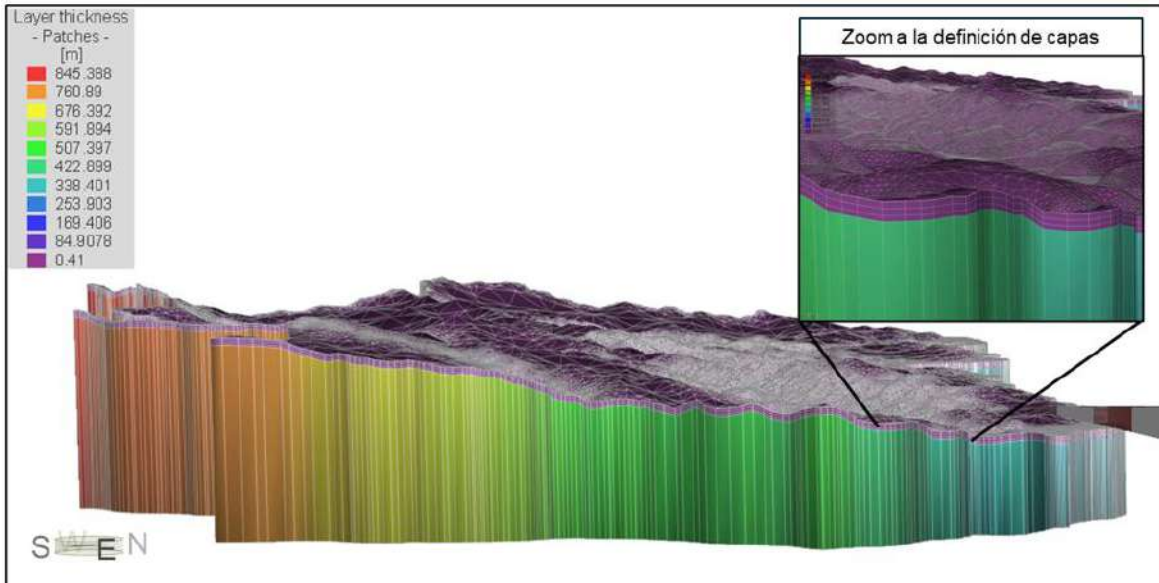


Figura 5.1.6.233 Corte transversal del borde Este del dominio del modelo donde se evidencia la configuración de las capas y espesores de las unidades hidrogeológicas de interés

Fuente: (SHI SAS, 2025)

5.1.6.5.5 Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera de un modelo numérico son condiciones matemáticas que especifican la variable dependiente (niveles piezométricos h) o derivaciones de la variable dependiente (flujo) en los límites del dominio del problema. Las fronteras utilizadas para el modelo construido constituyen fronteras físicas del sistema hidrogeológico y son las siguientes.

A. No Flow

En un modelo tradicional de diferencias finitas (DF) representaría las celdas del mallado donde el modelo no opera, donde no hay flujo dentro o fuera de la celda, conformando la zona inactiva de modelamiento, dicha definición es similar para un modelo de elementos finitos (EF) con la diferencia que al tratarse de mallas irregulares, producto de dicha construcción no se obtienen elementos y nodos inoperantes por fuera del dominio de la malla, únicamente nodos y bordes de frontera (que coinciden con el límite de la *supermesh*), los cuales automáticamente son categorizados por FEFLOW como No-Flow, por lo cual es necesario verificar si dicha condición requiere ser cambiada. Para este modelo, se conservan los límites occidentales, orientales, sur y surorientales como No-Flow, dado que fueron definidos utilizando la divisoria de cuencas, por lo que dicha condición de frontera resulta conceptualmente acorde. Los límites Norte y Suroccidente, que coinciden con cauces de cuerpos de agua son modificados para tratarse con la condición de frontera de Flow Transfer (SHI S.A.S., 2025).

B. Flow Transfer

Esta condición de frontera es de tipo 3 (*Cauchy*); es decir, corresponde a la segunda derivada de la ecuación gobernante, representado así la tasa de intercambio de flujo, por lo que resulta adecuada para representar cuerpos de agua donde se espera intercambio de caudales ya sea como efluentes o afluentes, dependiendo del gradiente entre las cargas hidráulicas de los elementos (UHGs y nodos de Flow Transfer), así como de parámetros de conexión como la conductancia hidráulica, parámetros que son objeto de calibración.

Teniendo en cuenta los resultados encontrados en el MHC y el refinamiento propuesto de la malla de EF en este modelo, se ha considerado como Flow Transfer a los nodos que coincidan con el alineamiento de los drenajes sencillos de las quebradas El Topacio, La Negra, La Linda y Cauce 233, así como los nodos al interior de los polígonos que definen los drenajes dobles del río Nus y de la quebrada Guacas, tal como se muestra en la Figura 5.1.6.234 (SHI S.A.S., 2025).

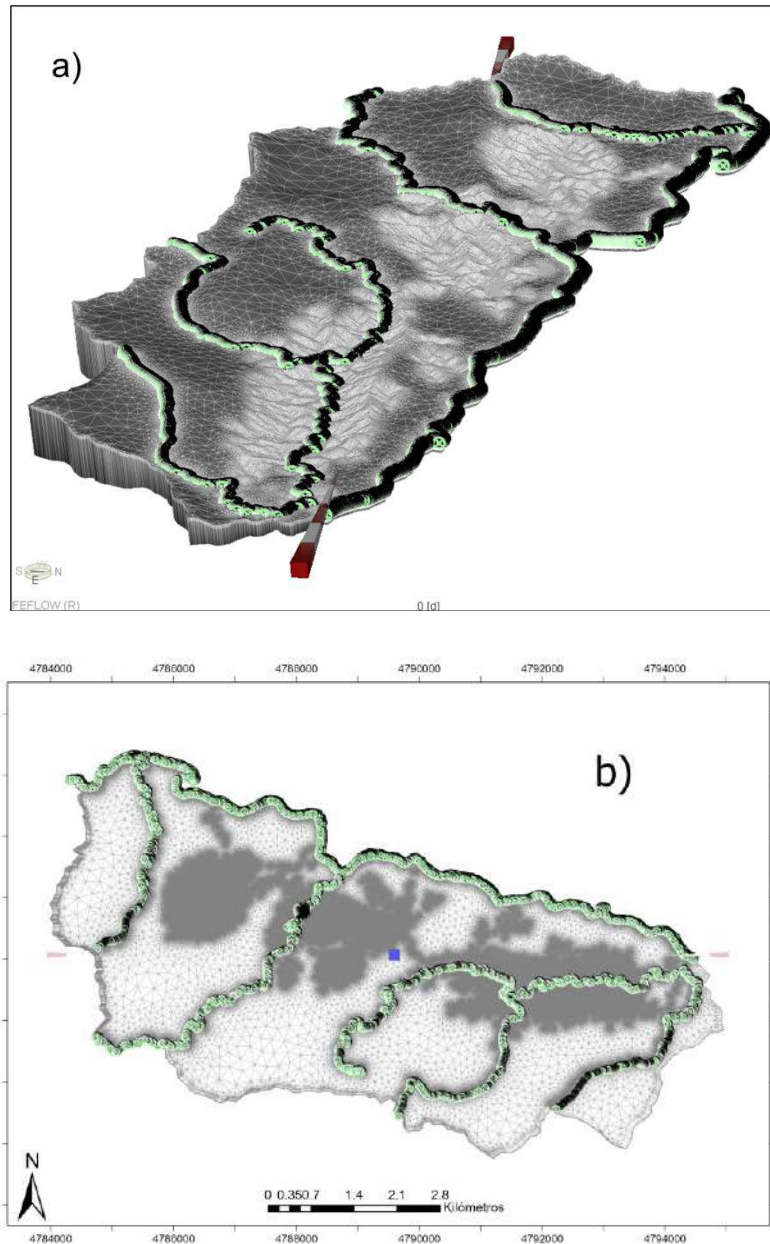


Figura 5.1.6.234 Representación de los nodos configurados con la condición de frontera tipo Transfer Flow (TFBC) en el modelo

Fuente: (SHI SAS, 2025)

5.1.6.5.6 Parametrización y calibración

En este apartado se detallan los parámetros adicionales que configuran el modelo numérico, para el caso de FEFLOW se denominan propiedades de los materiales (*material properties*), dichos parámetros en su mayoría son objeto de calibración, de acuerdo con el protocolo de modelación de aguas subterráneas, buscando la mejor representación posible

de la red hidrogeológica en el área de influencia, por lo cual en este mismo apartado se presentarán los resultados de la calibración.

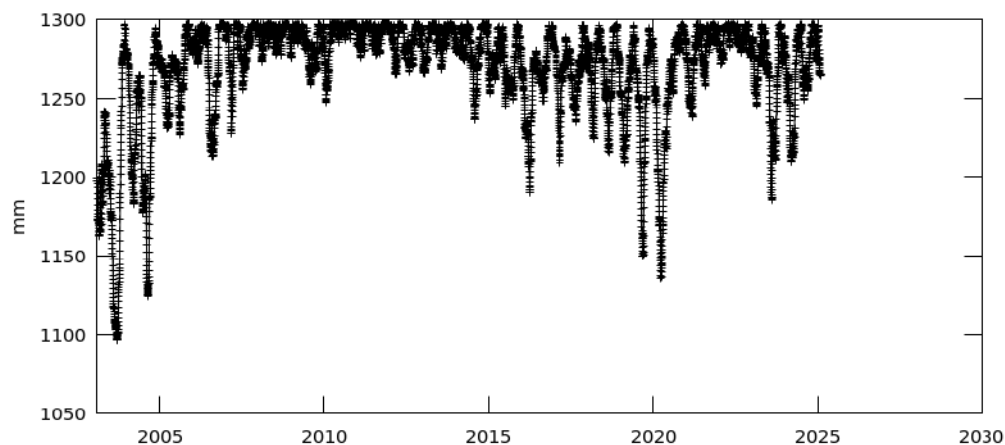
Como se ha mencionado anteriormente, la modelación hidrogeológica es un proceso cíclico, que depende de la información que se recolecta y siempre implica una serie de simplificaciones condicionadas por el nivel de información disponible. La finalidad de la modelación es encontrar un grupo de parámetros óptimos o representativos del medio real que, junto con unas condiciones de frontera apropiadas, brinden aproximaciones razonables al problema de flujo en el medio subterráneo y permitan realizar predicciones adecuadas de la respuesta del sistema hidrogeológico a cambios en el medio superficial y/o subterráneo (SHI S.A.S., 2025).

A. Objetivos de calibración

El proceso de calibración busca ajustar un conjunto de parámetros que condicionan al modelo numérico para que sea capaz de reproducir observaciones de variables hidrogeológicas obtenidas en el modelo conceptual, tales como niveles en piezómetros y caudales base en ríos, quebradas y manantiales. Para este proyecto, se cuenta con información de niveles piezométricos con monitoreo recurrente en los últimos tres meses del 2025 (febrero a abril) en 15 piezómetros distribuidos representativamente en el área de influencia, dichos niveles y su oscilación en el tiempo serán los objetivos de calibración principal tanto en el estado estacionario como transitorio (SHI S.A.S., 2025). Se resalta que todos los piezómetros están nivelados topográficamente con precisión milimétrica. Para la parte alta de la zona donde no hay cobertura de este tipo de puntos se usó como objetivo de calibración 4 manantiales, M101, M124, M193 y M197, que representan descargas de agua subterránea desde el medio rocosos, específicamente la UHGVII, por lo cual se consideran representativos del nivel piezométrico en la zona.

Adicionalmente, como parte de los elementos de la calibración transitoria, se han obtenido estimaciones de variaciones temporales del almacenamiento hídrico subterráneo (Groundwater storage GWS) para el área de influencia a escala regional, las cuales se derivan a partir de la asimilación numérica de los datos de las misiones satelitales GRACE (Gravity recovery and Climate Experiment) y GRACE-FO (follow-one) (Lenderer, 2020), dicha asimilación es realizada por el Global Land Data Assimilation System (GLDAS) de la NASA, que consiste en modelos hidrológicos globales de asimilación de datos, destacándose el modelo CLSM (Catchment Land Surface Model) que permite derivar los datos de GWS a escala diaria. Los datos son descargados de la plataforma GIOVANNI de la NASA (<https://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/>). En la Figura 5.1.6.235 se muestran los datos originales derivados de la plataforma para el área de influencia, para el periodo disponible 2003 – 2024.

Time Series, Area-Averaged of Ground water storage daily 0.25 deg. [GLDAS Model GLDAS_CLSM025_DA1_D v2.2] mm over 2003-02-01 00:00:00Z - 2025-02-01 00:00:00Z, Region 74.954W, 6.474N, 74.853W, 6.534N



- The user-selected region was defined by 74.954W, 6.474N, 74.853W, 6.534N. The data grid also limits the analyzable region to the this point: 74.875W, 6.625N. This analyzable region indicates the spatial limits of the subsetting granules that went into making this visualization result.
- Selected date range was 2003-02-01 - 2025-01-31. Title reflects the date range of the granules that went into making this result.

Figura 5.1.6.235 Serie diaria de variaciones del almacenamiento hídrico subterráneo (GWS) para la zona de estudio en promedio espacial derivados de GRACE y GLDAS – CLSM

Fuente: (SHI SAS, 2025)

En la Figura 5.1.6.236 se muestra el procesamiento de dicha serie diaria para agregarla a escala mensual y anual, comparándola gráficamente con el comportamiento de la precipitación en la zona, a partir de la estación hidrometeorológica más cercana (Granja Experimental El Nus 23085080), mientras que en la Figura 5.1.6.237 se muestra el ciclo promedio anual de la variación en el almacenamiento hídrico subterráneo (GWS) y la precipitación para el área de influencia. En todos los casos se observa una relación temporal entre la precipitación y GWS, con un rezago aproximado de al menos un mes; adicionalmente en la escala diaria se observan oscilaciones del orden de 20 cm, mientras que en la escala mensual – multianual pasan a ser del orden de 15 y 10 cm respectivamente, dichas variaciones aunque pequeñas en magnitud no son despreciables en variabilidad temporal, pues son comparables con oscilaciones del nivel piezométrico (WTF por sus siglas en inglés), a su vez dichas variaciones se relacionan con la capacidad de almacenamiento que tiene el medio hidrogeológico, permitiendo obtener insumos fundamentales para calibrar el parámetro de almacenamiento específico, el cual es fundamental para la estimación de caudales de infiltración en los escenarios prospectivos (SHI S.A.S., 2025).

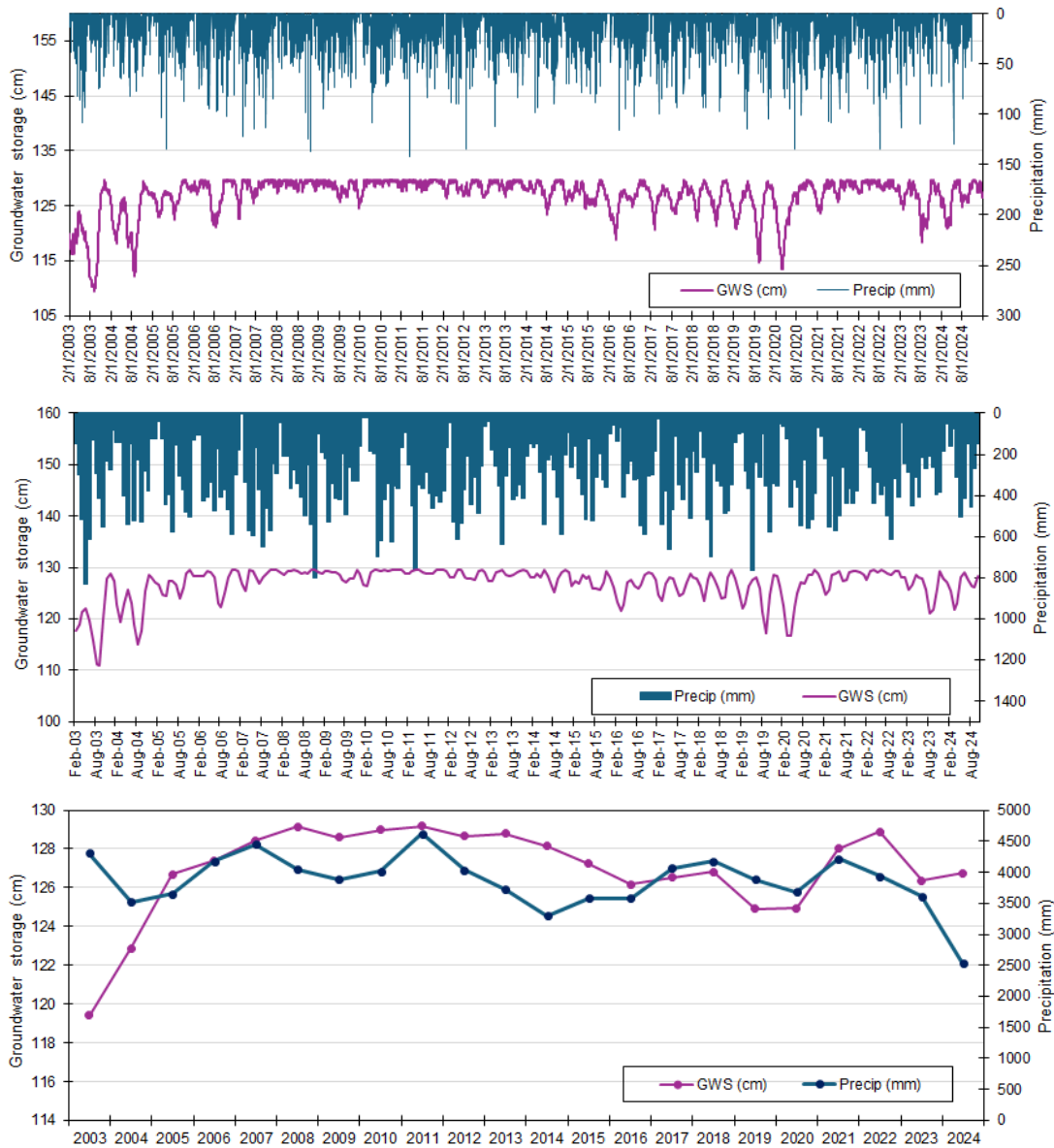


Figura 5.1.6.236 Comparación del comportamiento diario, mensual y anual de GWS y la precipitación en la zona de estudio

Fuente: (SHI SAS, 2025)

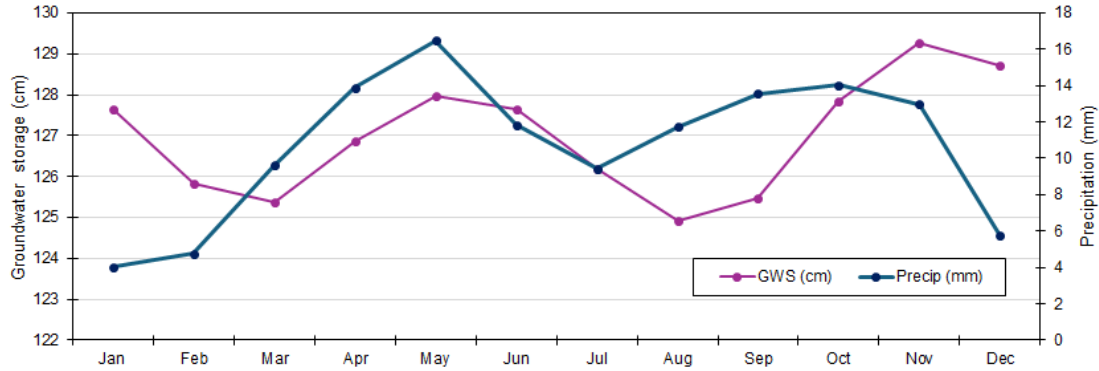


Figura 5.1.6.237 Ciclo promedio anual de GWS y la precipitación para el periodo 2003 – 2024 en la zona de estudio

Fuente: (SHI SAS, 2025)

B. Parámetros iniciales

Los parámetros objeto de calibración son: conductividades hidráulicas de las UHG, almacenamiento específico de las UHG (esta, tasa de recarga real distribuida en el dominio del modelo) y conductancias de los nodos de Transfer Flow. Para iniciar el proceso de calibración, es necesario definir los parámetros iniciales, los cuales se imponen lo más próximos a la realidad esperada, es decir corresponden a los obtenidos del MHC. Para el caso de la conductividad hidráulica, en la Tabla 5.1.6.100 se sintetizan las conductividades asignadas a partir de las evaluaciones hidráulicas realizadas y compiladas en el MHC, considerando que es la misma en la orientación X e Y ($k_{xx} = k_{yy}$), y reduciéndose en un orden de magnitud en la orientación Z, con el fin de simular la condición ideal de flujo horizontal, el cumplimiento de dicho supuesto se evalúa en función de los resultados de calibración. En la Figura 5.1.6.238 y en la Figura 5.1.6.239 se muestra la incorporación de las zonas de conductividad hidráulica en el modelo numérico, representado así en conjunto con el espesor de las capas la geometría total de las UHGs (SHI S.A.S., 2025).

Adicionalmente, en el marco de la MEIA, se ha estimado en el MHC la recarga potencial por precipitación (RPP) espacialmente distribuida, y a escala diaria, lo cual permitirá realizar la calibración en estado transitorio, teniendo como objetivo de calibración las oscilaciones de nivel piezométrico de los piezómetros monitoreados y las oscilaciones de GWS derivados de GRACE. Dicha RPP es incorporada al modelo como una acción exterior de tipo influjo sobre el tope de la capa 1, y se ingresa espacialmente distribuida mediante interpolación ráster en FEFLOW, tal como se muestra en la Figura 5.1.6.240. Es importante mencionar que esta primera condición corresponde a la recarga promedio anual de un año normal, dada en [m/d], para llevar a cabo inicialmente la calibración estacionaria, posterior a ello se incorporará la recarga de cada mes del año hidrológico típico para la calibración transitoria (SHI S.A.S., 2025).

Tabla 5.1.6.100. Asignación de las conductividades hidráulicas iniciales para la calibración del modelo numérico.

UHG	$K_{xx} = k_{yy}$		K_{zz}	
	m/s	m/d	m/s	m/d

UHG1	5,05E-05	4,3632	5,05E-06	0,43632
UHG2	3,97E-06	0,3430	3,97E-07	0,03430
UGH3	1,17E-04	10,1088	1,17E-05	1,01088
UGH4	5,24E-08	0,0045	5,24E-09	0,00045
UHG5	8,00E-05	6,9120	8,00E-06	0,69120
UGH6	6,63E-06	0,5728	6,63E-07	0,05728
Límite roca poco fracturada	2,67E-08	0,0023	2,67E-09	0,00023

Fuente: (SHI SAS, 2025)

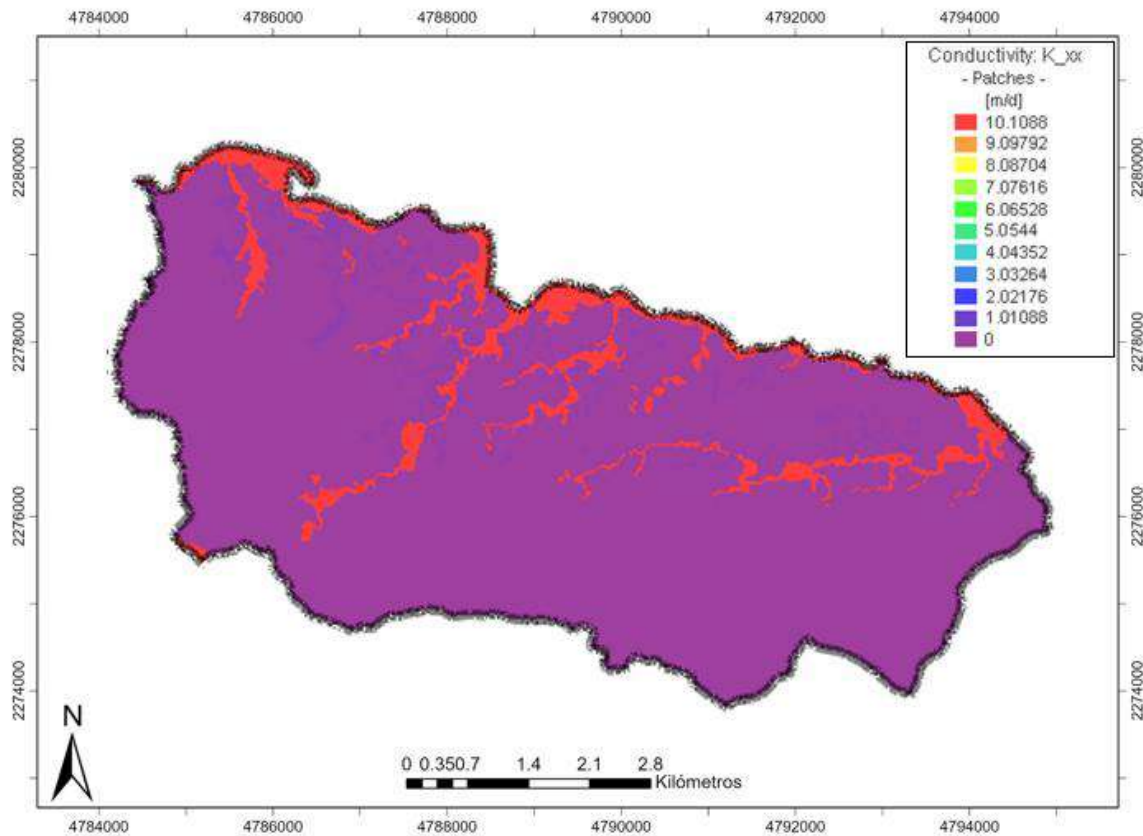


Figura 5.1.6.238 Conductividad hidráulica horizontal asignada a la capa 1 – corte 1 en el modelo numérico, representando la distribución espacial de las UHG

Fuente: (SHI SAS, 2025)

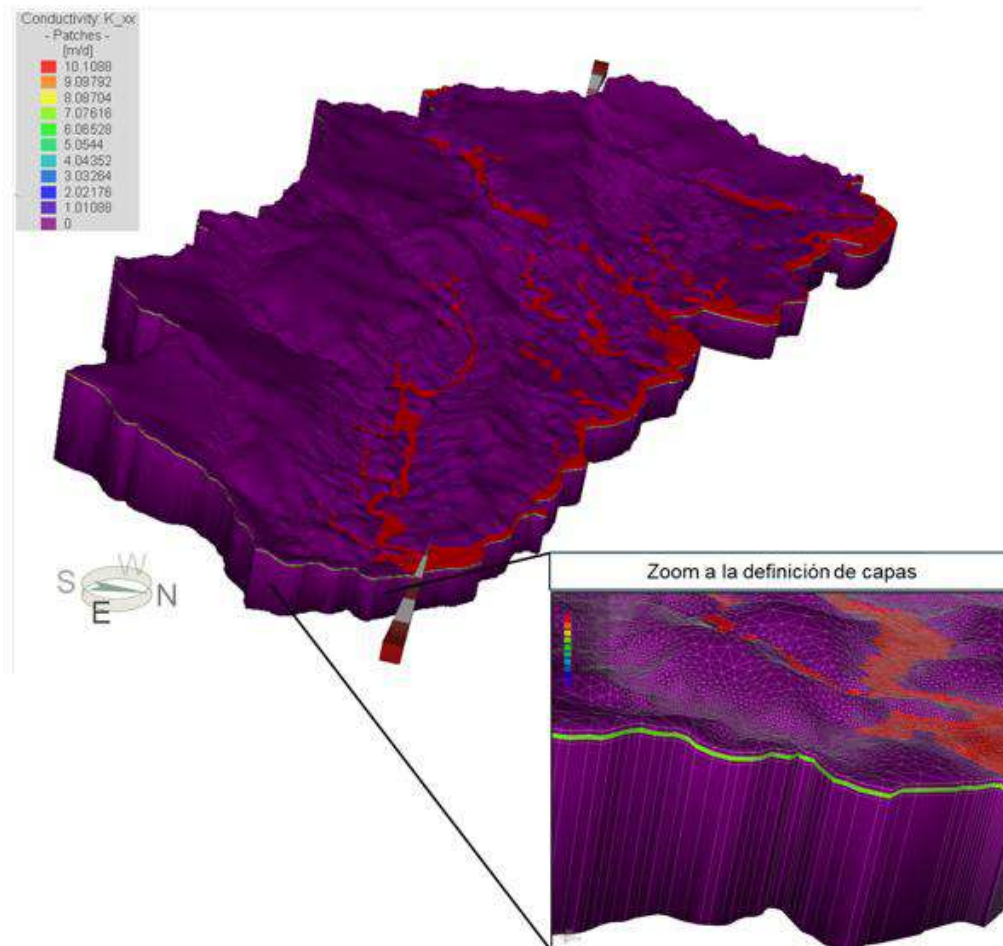


Figura 5.1.6.239 Conductividad hidráulica horizontal asignada en el modelo numérico en todas las capas (vista 3D), representando la distribución la geometría espacial de las UHG

Fuente: (SHI SAS, 2025)

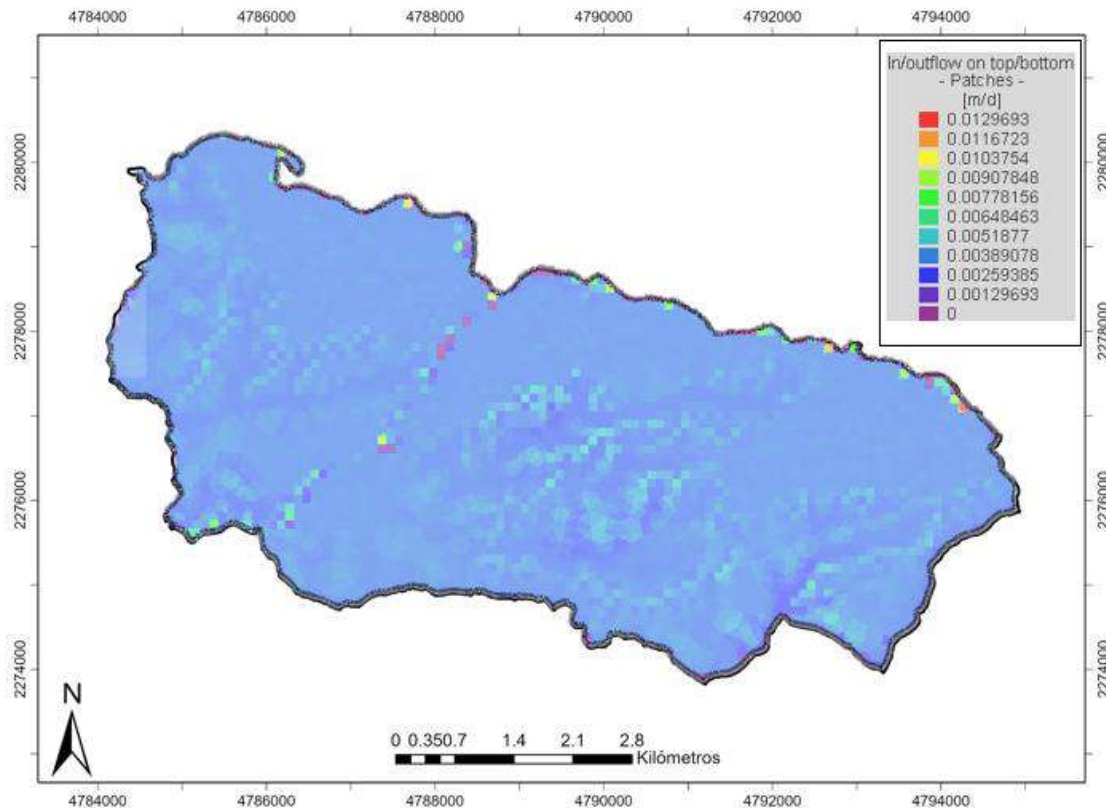


Figura 5.1.6.240 Tasa de recarga potencial (en m/d) incorporada al modelo numérico para fines de calibración estacionaria

Fuente: (SHI SAS, 2025)

Para el caso de los nodos que representan la condición de frontera Transfer Flow, fueron asignadas geográficamente en superposición espacial con los drenajes dobles y sencillos previamente mencionados, considerando un área de influencia de alrededor de 5 m, para dichos nodos se asigna la condición de nivel piezométrico de referencia (h_{ref}) considerado igual a la lámina de agua en las corrientes, que se aproxima de acuerdo con las elevaciones obtenidas del Modelo de Elevación Digital (MED) de la zona (SHI S.A.S., 2025).

Adicionalmente, para la condición de frontera Transfer Flow se requiere especificar la conductancia hidráulica (Φ) del lecho de los cauces, parámetro de difícil medición, por lo cual hace parte del conjunto de parámetros a ser calibrados, pero se requiere asignar valores iniciales, los cuales se han asignado con base en la experiencia en modelación y la magnitud de flujos de intercambio que se podrían dar (tanto en flujo base como recarga indirecta), dichos valores corresponden a 10 [1/día] para los drenajes dobles y 5 [1/día] (SHI S.A.S., 2025).

C. Proceso de calibración estacionaria y resultados

Los 15 piezómetros que conforman los objetivos de calibración del modelo numérico en estado estacionario son incorporados en las capas respectivas del modelo, tal como se sintetiza en la Tabla 5.1.6.101 y en la Figura 5.1.6.241, es importante mencionar que el

nivel piezométrico que se considera para esta etapa es el promedio temporal de las campañas de monitoreo, tal como se consigna en la Tabla 5.1.6.101.

Tabla 5.1.6.101. Objetivos de calibración estacionaria incorporados al modelo numérico.

Código piezómetro	Este (m)	Norte (m)	Unidad	Capa / Corte	Nodo	Elevación (m.s.n.m)	Nivel piezométrico promedio (m.s.n.m)
PZA12-03	4.788.695,00	2.278.385,00	UHGIV (Suelo residual)	2	597195	820,00	813,50
PZA12-08	4.786.818,00	2.279.510,00	UHGIII (Depósitos aluviales)	1	39103	819,39	816,39
PZS12-12	4.785.710,98	2.279.056,64	UHGV (Saprolito)	3	927359	833,86	829,46
PZS12-14	4.789.241,20	2.278.423,32	UHGIV (Suelo residual)	2	609645	818,79	817,09
PZR 13-05	4.788.795,74	2.278.273,32	UHGVI (roca fracturada)	5	1349230	818,05	814,95
PZR 13-07	4.788.059,71	2.277.532,15	UHGVI (roca fracturada)	5	1357027	914,25	912,15
PZR 13-09	4.788.416,71	2.278.012,22	UHGVI (roca fracturada)	5	1351479	824,53	815,13
PZS 13-17	4.788.803,74	2.278.276,30	UHGIV (Suelo residual)	2	369706	818,03	814,33
DH-FS-309	4.792.271,49	2.277.047,34	UHGVI (Zona transición)	4	1194440	915,32	895,32
DH-FS-315	4.794.134,26	2.276.696,50	UHGIV (Suelo residual)	2	579325	809,00	805,20
DH-TM-100	4.793.025,14	2.276.684,86	UHGIV (Suelo residual)	2	551658	814,26	810,96
BH-5M-03	4.790.577,00	2.277.496,00	UHGVI (roca fracturada)	5	1632317	871,49	833,89
BH-5M-08	4.790.827,00	2.277.484,00	UHGVI (roca)	5	1631685	866,31	838,11

Código piezómetro	Este (m)	Norte (m)	Unidad	Capa / Corte	Nodo	Elevación (m.s.n.m)	Nivel piezométrico promedio (m.s.n.m)
			fracturada)				
PZS-12-05	4.794.234,1 2	2.276.778,4 6	UHGVI (roca fracturada)	5	15591 55	871,49	842,89
PZ4	4.791.328,0 0	2.277.254,0 0	UHGVI (Zona transición)	4	13028 27	940,55	922,45

Fuente: (SHI SAS, 2025)

La calibración estacionaria se realiza de manera manual e iterativa, se evaluaron 14 escenarios de variación de los parámetros de calibración y combinación de estos (conductividad hidráulica, recarga y conductancias). Para evaluar la bondad de ajuste de los escenarios se utilizaron tres métricas estadísticas: el coeficiente de correlación lineal de Pearson, el error absoluto medio (MAE) y la raíz cuadrada del error estadístico medio (RMSE):

$$MAE = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |N_j - \hat{N}_j| \quad \text{Mean Absolute Error} \quad \bullet$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (N_j - \hat{N}_j)^2} \quad \text{Root Mean Squared Error} \quad \bullet$$

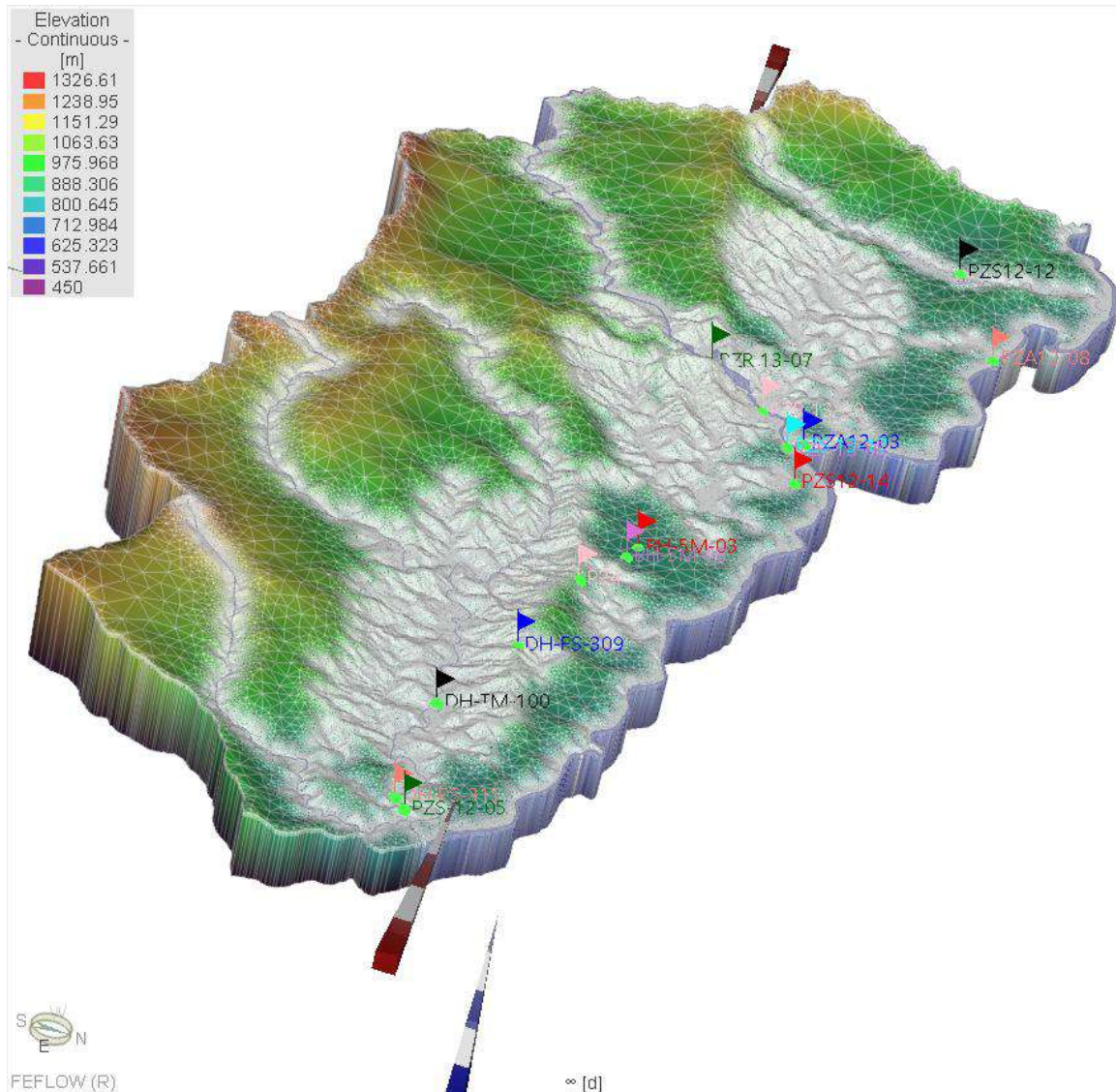


Figura 5.1.6.241. Localización de los piezómetros que constituyen los objetivos de calibración

Fuente: (SHI SAS, 2025)

En la Tabla 5.1.6.102 se presentan los parámetros del escenario inicial en comparación con el escenario de calibración final (preliminar), mientras que en la Tabla 5.1.6.103 se presentan las métricas de ajuste en ambos escenarios, donde se observa la notable mejoría en las métricas de ajuste, de igual forma, la verificación de una calibración aceptable se muestra en el diagrama de dispersión de la Figura 5.1.6.242, donde se observa que únicamente 3 piezómetros de los 15 totales se alejan de la línea de pendiente del 100%. Los parámetros resultantes de la calibración mantienen coherencia conceptual (SHI S.A.S., 2025).

Tabla 5.1.6.102 Parámetros del modelo numérico de flujo en escenario inicial y final de calibración

Parámetros iniciales					Parámetros finales				
UHG	K _{xx} = k _{yy}		K _{zz}		UHG	K _{xx} = k _{yy}		K _{zz}	
	m/s	m/d	m/s	m/d		m/s	m/d	m/s	
UHG1	5,05E-05	4,3632	5,05E-06	0,43632	UHG1	5,05E-05	4,3632	5,05E-06	0,43632
UHG2	3,97E-06	0,343	3,97E-07	0,0343	UHG2	3,97E-06	0,343	3,97E-07	0,0343
UGH3	1,17E-04	10,1088	1,17E-05	1,01088	UGH3	1,17E-04	10,1088	1,17E-05	1,01088
UGH4	5,24E-08	0,0045	5,24E-09	0,00045	UGH4	1,16E-06	0,10000	1,16E-07	0,01000
UHG5	8,00E-05	6,912	8,00E-06	0,6912	UHG5	1,16E-05	1,00000	1,16E-06	0,10000
UGH6	6,63E-06	0,5728	6,63E-07	0,05728	UGH6	9,26E-06	0,80000	9,26E-07	0,08000
Límite roca poco fracturada	2,67E-08	0,0023	2,67E-09	0,00023	Límite roca poco fracturada	2,67E-07	0,023069	2,67E-08	0,00230688
Conductancia hidráulica drenaje doble (1/d)			Conductancia hidráulica drenaje doble (1/d)						
10			2						
Conductancia hidráulica drenaje sencillo (1/d)			Conductancia hidráulica drenaje sencillo (1/d)						
5			1						
Recarga promedio anual			Recarga promedio anual						
100% de la recarga proveniente del modelo SWB			100% de la recarga proveniente del modelo SWB						
Drenajes principales como transfer Flow			Incremento en la cantidad de drenajes menores como transfer Flow en la parte baja						

Fuente: (SHI SAS, 2025)

Tabla 5.1.6.103 Síntesis de las métricas estadísticas de evaluación de ajuste

Métrica de ajuste	Escenario inicial	Escenario final
MAE	112,8%	7,1%
RMSE	145,4%	11,2%
Coefficiente de correlación	64,4%	98.84%

Fuente: (SHI SAS, 2025)

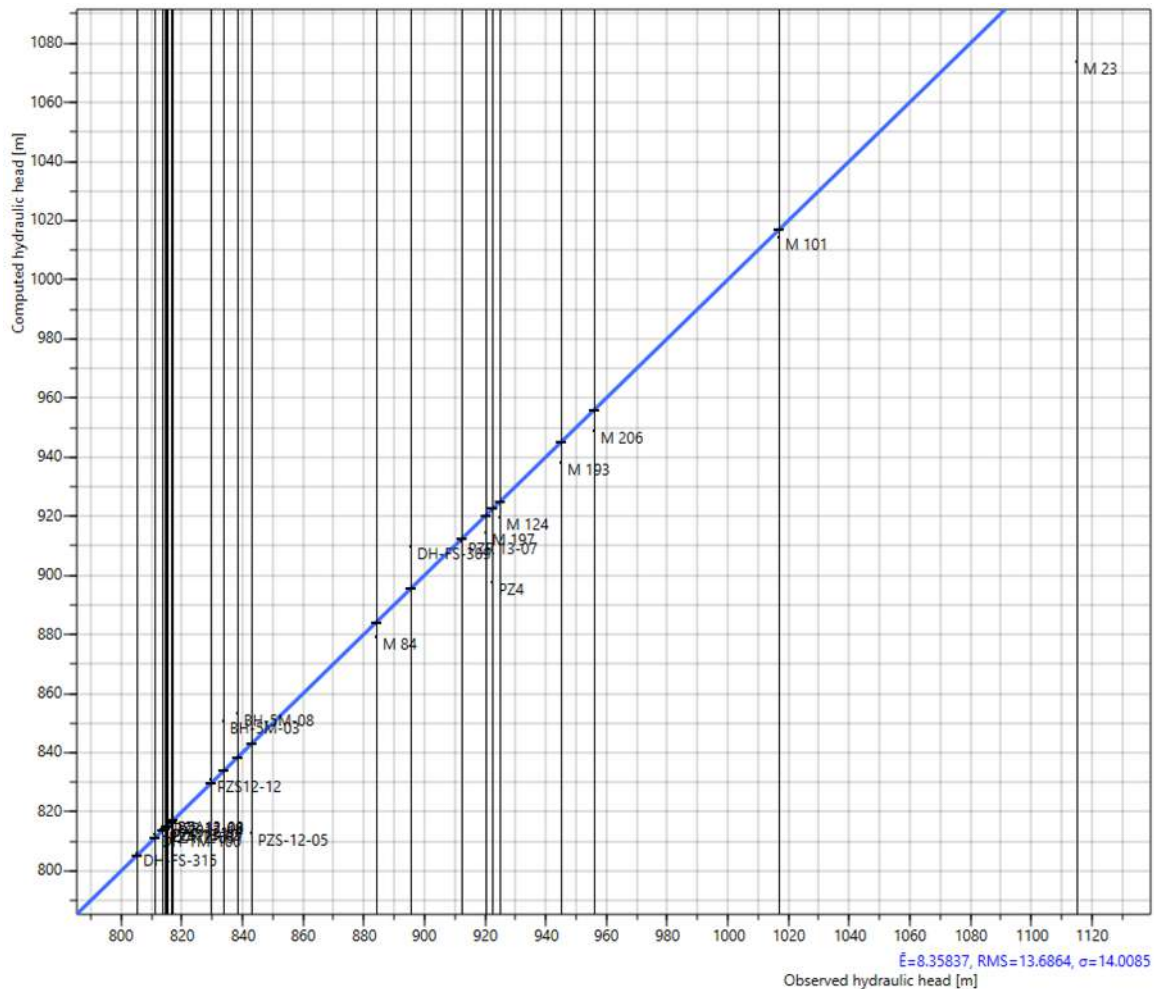


Figura 5.1.6.242 Diagrama de dispersión entre los niveles piezométricos (hydraulic head) observados y simulados a partir del modelo numérico de flujo calibrado en estado estacionario

Fuente: (SHI SAS, 2025)

A partir del modelo calibrado en estado estacionario, se obtiene la superficie piezométrica para el área de influencia que se muestra en la Figura 5.1.6.243 y en la Figura 5.1.6.244; así como el perfil piezométrico de la Figura 5.1.6.245, donde se valida la tendencia general de flujos subterráneos mayoritariamente someros y de carácter local evidenciada en el Modelo Hidrogeológico Conceptual, exhibiendo una correlación con las tendencias topográficas, y mostrando afloramientos de nivel piezométrico en superficie, lo cual es lógico pues explica los flujos de intercambio entre las quebradas de la zona y las aguas subterráneas más superficiales, así como la presencia de diversos manantiales (SHI S.A.S., 2025).

Finalmente, a partir del modelo calibrado en estado estacionario, se obtiene el balance hídrico general de la zona de modelamiento, que se resume en la Tabla 5.1.6.104, donde se observa que, en términos netos, la recarga real se distribuye principalmente hacia las principales quebradas, presentando un comportamiento mixto, entre cauces ganadores y

perdedores de flujo, pero siendo mayoritariamente ganadores, conformando así su flujo base, sin embargo la totalidad de la recarga no satisface el flujo base de las corrientes; por tanto, tramos de cuerpos de agua resultan perdedores, cuyo flujo transita por el medio hidrogeológico y después dichos flujos aportan a conformar el flujo base de los tramos de cuerpo de agua ganadores. Esta situación conlleva a validar la hipótesis de la amplia necesidad de realizar la calibración transitoria, ya que el cambio en el almacenamiento puede ser significativo y ayudar a explicar dichos flujos de intercambio (SHI S.A.S., 2025).

Tabla 5.1.6.104 Resultado del balance hídrico en estado estacionario en el modelo calibrado

Componente	Entrada (m³/s)	Salida (m³/s)	Neto (m³/s)
Drenajes (transfer Flow)	0,374028	2,105903	-1,731875
Recarga (source (+))	1,731829	0,000000	1,731829
Inbalance			-0,000046

Fuente: (SHI SAS, 2025)

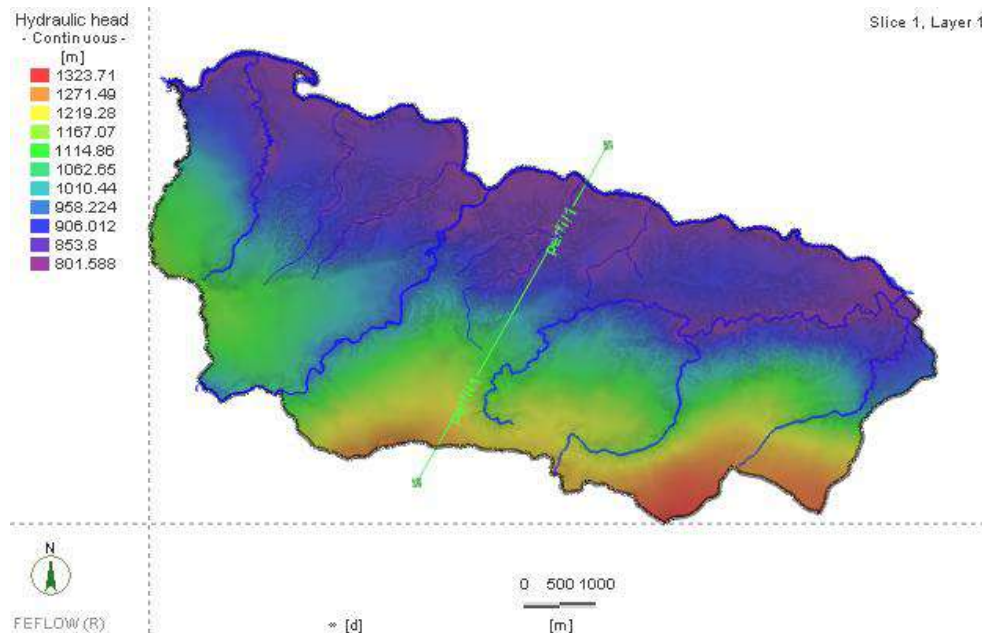


Figura 5.1.6.243 Piezometría simulada en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

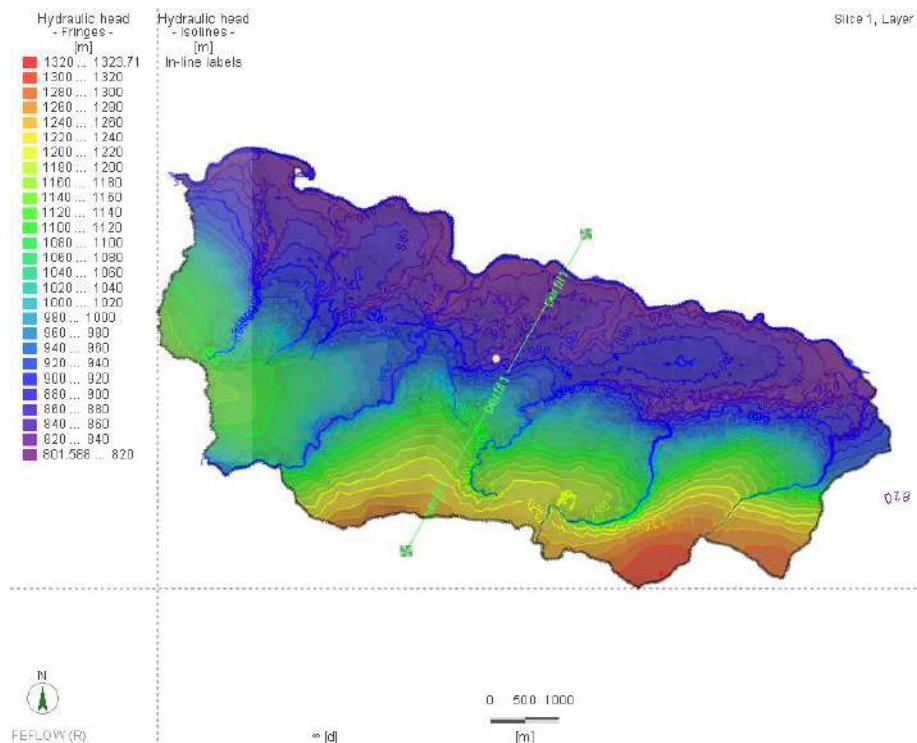


Figura 5.1.6.244 Isopiezas simuladas en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

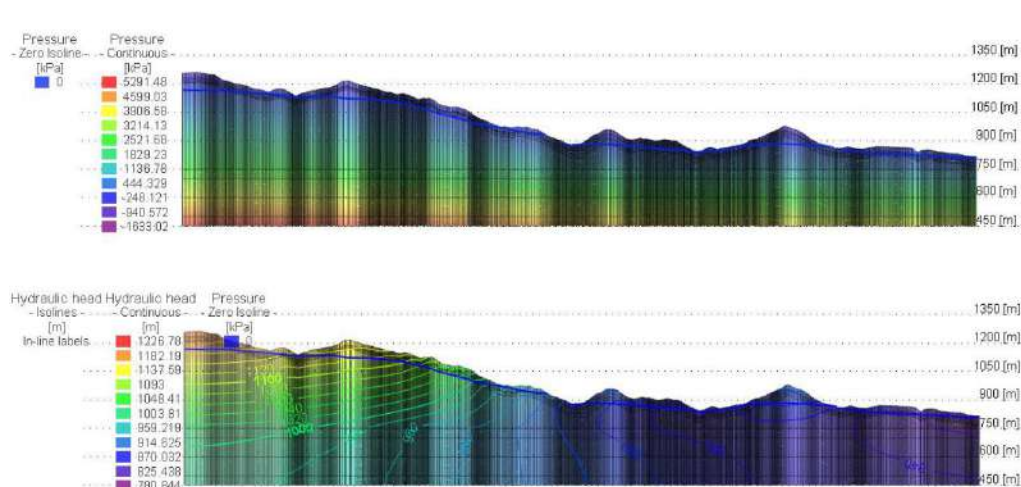


Figura 5.1.6.245 Perfil piezométrico en la zona de modelamiento en condiciones estacionarias (equilibrio)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

5.1.6.5.7 Ajuste y validación en estado transitorio

La fase prospectiva del modelo, es decir la simulación en estado intervenido, debe realizarse en condiciones transitorias; para la cual es necesario resolver la ecuación de flujo de agua subterránea considerando las variaciones en el almacenamiento; por tanto, los parámetros hidráulicos de las unidades hidrogeológicas relacionados con dicho almacenamiento deben ser considerados y ajustados previamente a dicha modelación.

Los parámetros de almacenamiento son el coeficiente de almacenamiento específico (S_s) y la porosidad eficaz (S_y). Dichos parámetros deben ser ajustados a partir de una modelación transitoria en estado natural, dicho ajuste se realiza considerando las variaciones de recarga estimadas a partir del modelo de balance de humedad en el suelo, considerando un año normal, para lo cual, después de múltiples simulaciones se ha optado por discretizar el tiempo en cuatro periodos de estrés con longitud de 90 días cada periodo, representando así la variabilidad trimestral de un año normal. Para el ajuste se tuvo en cuenta las variaciones de niveles piezométricos registrados en 15 piezómetros entre febrero y mayo de 2025, tal como se mostró en la sección 5.1.6.2.4, donde se evidencia que sí existen variaciones de nivel piezométrico, pero dichas variaciones son relativamente pequeñas, del orden centimétrico, por lo cual el modelo en estado transitorio no deberá simular variaciones en órdenes superiores. En la Figura 5.1.6.246 y en la Tabla 5.1.6.105 se resumen las variaciones observadas de nivel piezométrico en promedio mensual para 2025 (SHI S.A.S., 2025).

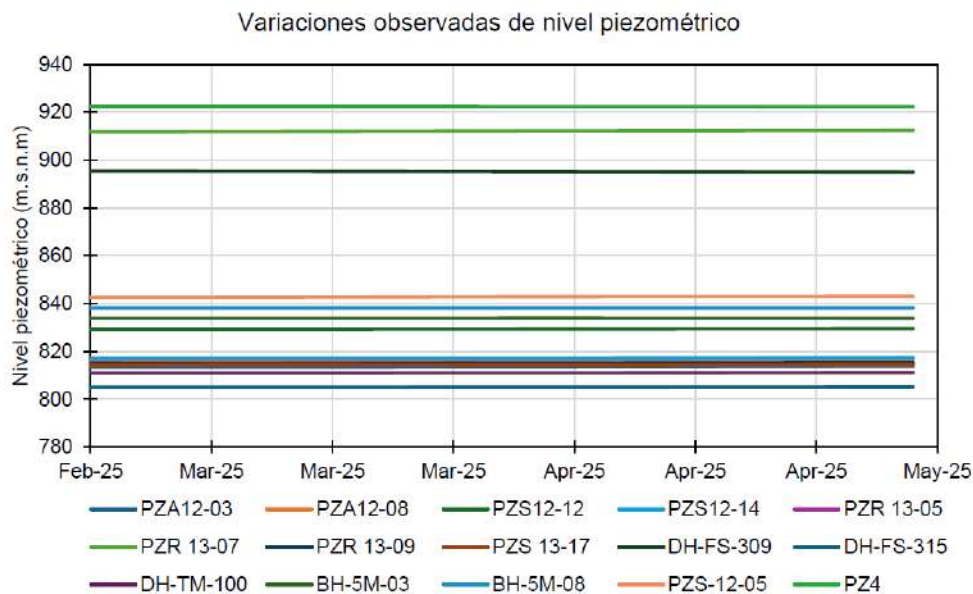


Figura 5.1.6.246 Variaciones temporales de nivel piezométrico observadas en los puntos de monitoreo

Fuente: (SHI SAS, 2025)

Tabla 5.1.6.105 Variaciones temporales mensuales del nivel piezométrico registrados en los puntos de monitoreo

Piezómetro	Niveles piezométricos (m.s.n.m)				Rango variación (m)
	feb-25	mar-25	Apr-25	may-25	

PZA12-03	813,3	813,3	813,46	813,74	0,44
PZA12-08	816,19	816,19	816,39	816,7	0,51
PZS12-12	829,36	829,31	829,41	829,52	0,21
PZS12-14	816,89	817,09	817,09	817,31	0,42
PZR 13-05	814,95	814,9	814,98	815	0,1
PZR 13-07	911,85	911,95	912,2	912,35	0,5
PZR 13-09	815,53	814,93	815,05	815,26	0,6
PZS 13-17	813,43	814,43	814,38	814,5	1,07
DH-FS-309	895,52	895,47	895,27	895,04	0,49
DH-FS-315	805,1	805,15	805,18	805,25	0,14
DH-TM-100	810,76	810,91	810,96	811,16	0,4
BH-5M-03	833,99	833,89	833,94	833,88	0,12
BH-5M-08	838,11	838,11	838,11	838,11	0
PZS-12-05	842,89	842,79	842,97	843,03	0,24
PZ4	922,55	922,55	922,5	922,41	0,13

Fuente: (SHI SAS, 2025)

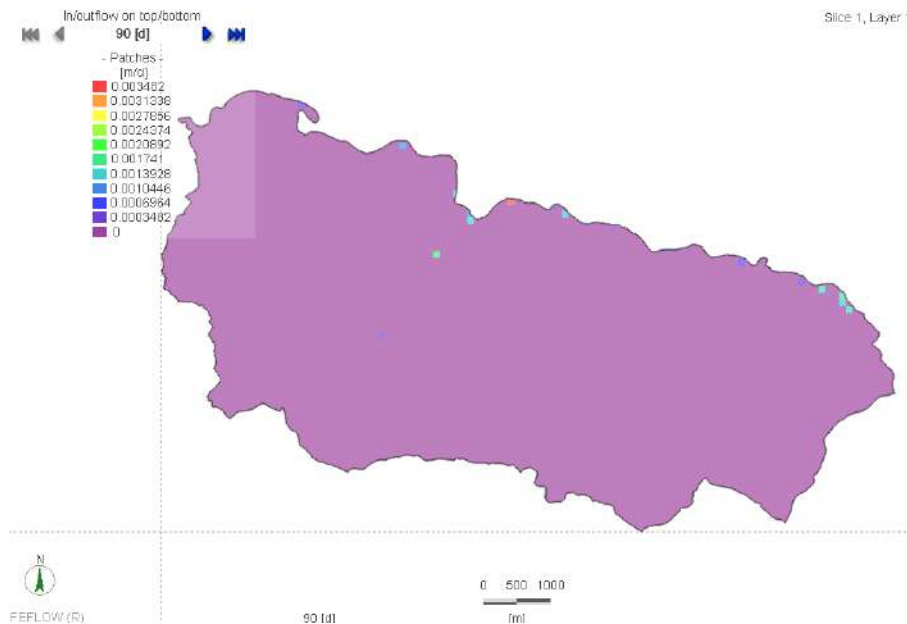
En la Figura 5.1.6.247 y en la Figura 5.1.6.248 se muestra la recarga asignada a cada periodo de estrés, la simulación transitoria se realiza bajo un escenario inicial de parámetros de almacenamiento asignados de manera conceptual (en función del tipo de litología de cada unidad hidrogeológica), los cuales se presentan en la Tabla 5.1.6.106 (escenario inicial), con dicha asignación la simulación se desborda computacionalmente, sin generar convergencia en la solución, de tal forma fue necesario cambiar dichos parámetros y empezar a iterar para lograr en primera instancia la estabilidad numérica, una vez lograda dicha estabilidad, se debe garantizar coherencia en los niveles piezométricos simulados y en el balance de masas, de forma tal que más de 10 escenarios de parámetros de almacenamiento fueron probados, llegando a la asignación final que se presenta también en la Tabla 5.1.6.106 (escenario final). Una vez obtenido un escenario consistente conceptual y numéricamente, se obtiene la superficie piezométrica simulada al final del año normal que se muestra en la Figura 5.1.6.249, y el perfil de flujo representativo que se muestra en la Figura 5.1.6.250, donde se observa que no hay cambios significativos respecto a la condición estacionaria, lo cual resulta lógico puesto que los niveles observados en los piezómetros no muestran variaciones significativas, dicho resultado también es representado adecuadamente en los niveles piezométricos simulados en dichos piezómetros, tal como se resume en la Figura 5.1.6.251 y en el diagrama de dispersión de la Figura 5.1.6.252 (SHI S.A.S., 2025).

Finalmente, en la Tabla 5.1.6.107 se resume el balance hídrico en cada periodo de estrés para la totalidad del dominio del modelo, donde se observan las variaciones estacionales lógicas representadas en la recarga/descarga de los cuerpos de agua superficial y los cambios en el almacenamiento, en función de los cambios en la recarga (SHI S.A.S., 2025).

Tabla 5.1.6.106 Asignación de los parámetros de almacenamiento a las unidades hidrogeológicas dentro del modelo numérico

Unidad hidrogeológica (UHG)	Almacenamiento específico Ss (1/m)	
	Escenario inicial	Escenario final
UHG1	5,00E-04	1,00E-02
UHG2	1,00E-04	1,00E-02
UGH3	2,00E-03	1,00E-02
UGH4	1,00E-02	1,50E-01
UHG5	2,00E-03	1,00E-03
UGH6	1,00E-02	1,00E-04
Límite roca poco fracturada	2,00E-06	2,00E-05
Roca fracturada de mayor profundidad (capa 8, 9 y 10)	2,00E-06	2,00E-06

Fuente: (SHI SAS, 2025)



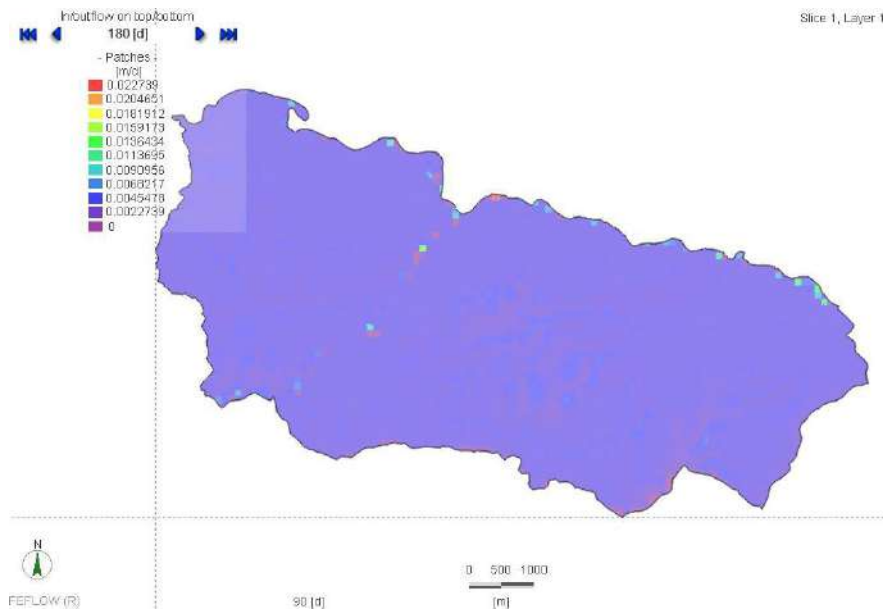
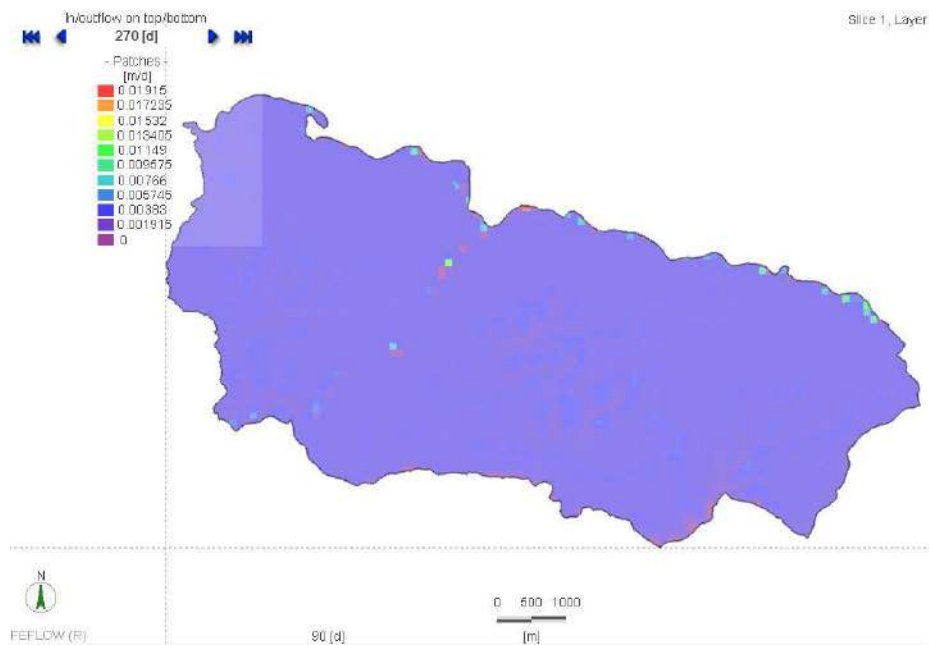


Figura 5.1.6.247 Recarga asignada en m/d para el trimestre Enero – Marzo (superior) y Abril – Junio (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2025)



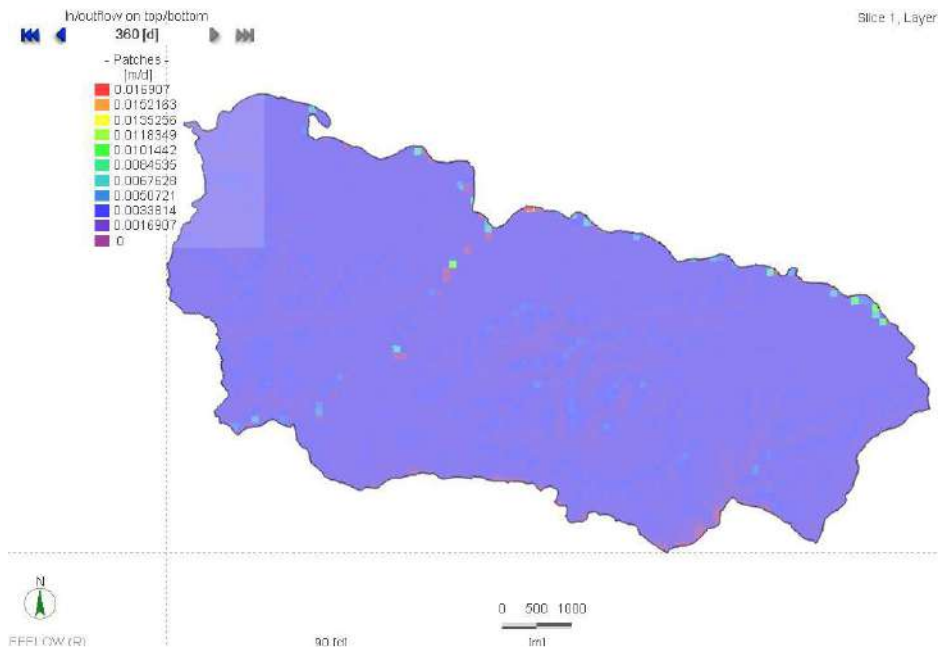


Figura 5.1.6.248 Recarga asignada en m/d para el trimestre Julio – Septiembre (superior) y Octubre – Diciembre (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

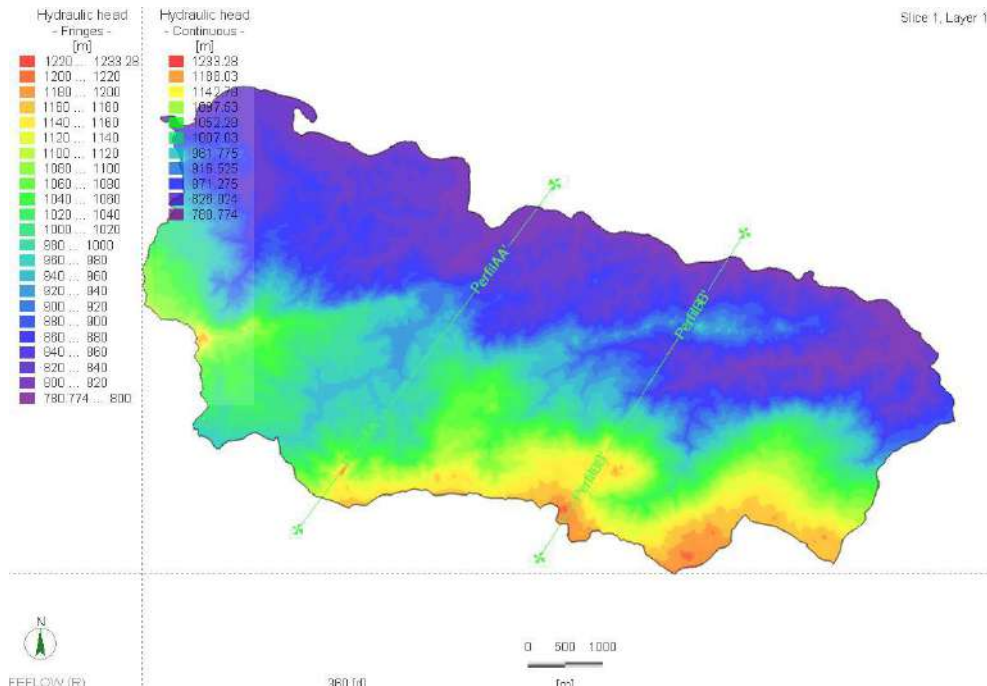


Figura 5.1.6.249 Piezometría simulada en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

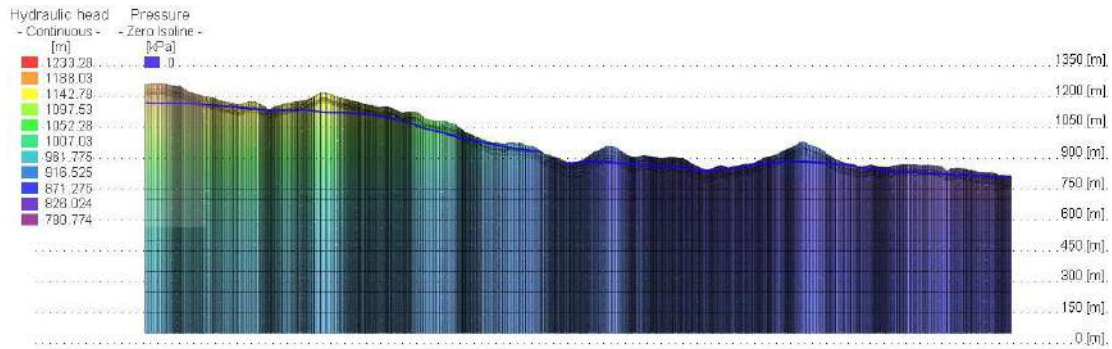


Figura 5.1.6.250 Perfil piezométrico BB' en la zona de modelamiento en condiciones transitorias (final del año normal)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

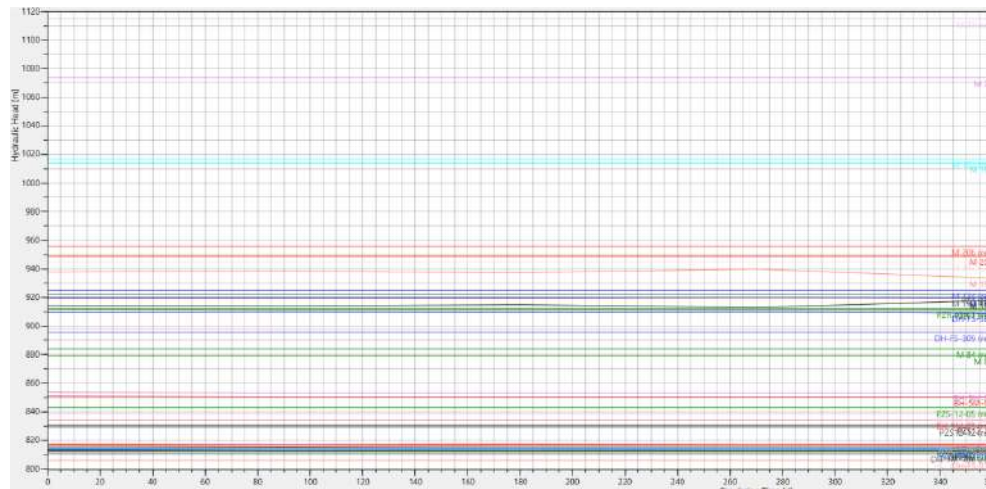


Figura 5.1.6.251 Variaciones de nivel piezométrico en los puntos de calibración simuladas para un año normal en el modelo numérico de flujo

Fuente: (SHI SAS, 2025)

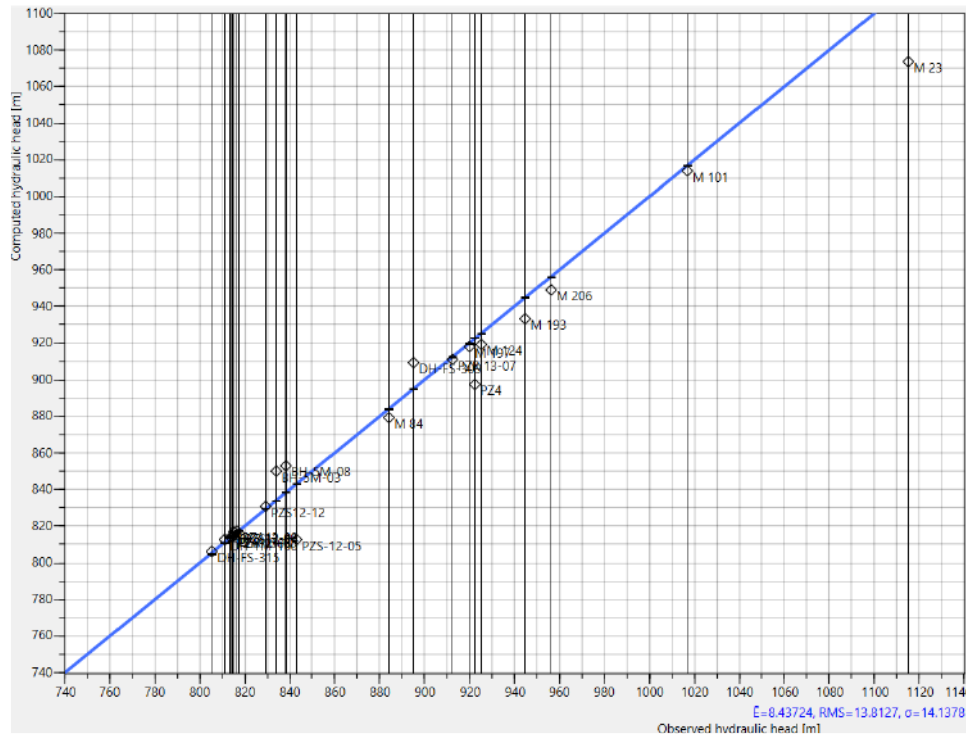


Figura 5.1.6.252 Diagrama de dispersión entre los niveles piezométricos (hydraulic head) observados y simulados a partir del modelo numérico de flujo ajustado en estado transitorio

Fuente: (SHI SAS, 2025)

Tabla 5.1.6.107 Síntesis del balance hídrico en el dominio del modelo en cada periodo de estrés

Periodo	Drenajes (Transfer Flow)		Recarga (source(+))		Almacenamiento (Storage)	
	Entrada (m3/s)	Salida (m3/s)	Entrada (m3/s)	Salida (m3/s)	Entrada (m3/s)	Salida (m3/s)
Enero-Marzo	1,479	2,866	0,002	0	1,574	0,077
Abril-Junio	1,258	2,958	1,58	0	0,295	0,29
Julio-Septiembre	2,319	4,08	1,378	0	0,471	0,094
Octubre-Diciembre	3,547	4,805	1,284	0	0,518	0,347

Fuente: (SHI SAS, 2025)

5.1.6.5.8 Simulación prospectiva

A. Metodología general

En esta etapa se incorpora al modelo calibrado en condiciones naturales transitorias (final de un año hidrológico normal), la influencia de la infraestructura asociada al proyecto. De acuerdo con el Programa de Trabajo y Obras (PTO) actual, el PIT Gramalote tendrá un periodo de desarrollo de 10 años, empezando en 2029 y terminando en 2038, donde alcanza su máxima profundidad, estimada en 480 msnm, por ello desde el inicio del modelo la base del dominio completo se estableció en 450 msnm, sin embargo iteraciones posteriores mostraron que el cono de abatimiento puede alcanzar niveles inferiores a este, por lo cual se incorporaron capas adicionales, con espesores entre 50 y 100 m, alcanzando una cota mínima de 50 msnm, el modelo se configuró con un total de 13 capas y 14 superficies (slices), permitiendo simular la totalidad de la excavación y sus potenciales abatimientos. (SHI S.A.S., 2025).

La topografía resultante del PIT se tiene disponible anualmente, por lo cual la simulación prospectiva se ha configurado en estado transitorio con longitud de periodo de estrés de 365 días, para un total de 10 periodos de estrés. En la Figura 5.1.6.253 se muestra la secuencia minera incorporada al modelo en términos de elevación, que resulta ser la variable fundamental para la simulación (SHI S.A.S., 2025).

La estrategia para incorporar la geometría del Pit es la siguiente:

- **Configuración de frontera Transfer Flow (TF):** esta condición de frontera (BC) permite que el flujo se transfiera de un nodo a otro siguiendo la ecuación de flujo y las propiedades hidrogeológicas del modelo (material properties), se seleccionan los nodos que representen las paredes del Pit en cada periodo de estrés (secuencia minera), así como el fondo del tajo, cada nodo es asignado en la capa más pertinente de acuerdo con el rango de elevaciones.
- **Configuración de las conductancias de la TF para que actúe como dren:** la condición de frontera TF puede transferir flujo tanto desde los nodos que representan las UHG hacia la BC, como en el sentido contrario desde la BC hacia las UHG, esto se logra configurando las conductancias, de forma tal que para que la TF represente un dren, únicamente se configura la conductancia de salida (out transfer rate), de forma tal que permita transferencia de flujo desde la UHG hacia la BC, pero no al contrario, sin embargo iteraciones posteriores mostraron que una conductancia nula de entrada (in transfer rate) genera inestabilidad y no convergencia del modelo, por lo cual se configuró una conductancia relativamente baja, la cual fue objeto de análisis de sensibilidad.
- **Desactivación de los elementos al interior del Pit para simular la excavación:** para evitar incongruencias e inestabilidades numéricas, conforme ingresan los elementos que representan las paredes del Pit, los elementos que se localizan al interior de este en cada capa del modelo se desactivan, permitiendo representar la excavación resultante. Operativamente es importante mencionar que en los primeros periodos de estrés se conservó activa la última capa, la cual representaba el fondo del Pit en el tiempo simulado, de igual forma los elementos que se desactivaron siempre debían estar al interior de la excavación, para evitar la inoperancia de nodos con condiciones de frontera asignadas, por lo que se consideró un buffer al interior de las paredes de 10 m para aplicar la desactivación. (SHI S.A.S., 2025).

Adicionalmente al Pit Gramalote, dentro del modelo fueron incorporadas las obras de almacenamiento y manejo de material sobrante, específicamente las más grandes y representativas que contaban con la topografía proyectada anualmente según el PTO y sus actualizaciones. Dichas obras corresponden a: depósitos de estériles (Waste Rock Facilities - WRF) de San Antonio, depósito submarginal (Stockpile) de San Antonio, depósito de estériles El Balsal, depósito de relaves (Tailings Management Facilities – TMF) y la presa o pila de arena. La ubicación en planta de estas obras fue presentada en el capítulo del Modelo Hidrogeológico Conceptual. De la Figura 5.1.6.253 a la Figura 5.1.6.257 se muestran perfiles representativos de las zonas de almacenamiento mencionadas, para algunos pasos de tiempo. (SHI S.A.S., 2025).

Todos estos elementos representan una mayor cota que la del terreno, y tienden a cerrar valles estrechos como el de la quebrada La Palestina, por lo que su configuración puede favorecer la acumulación de aguas contactadas con los materiales sobrantes, que potencialmente podrían infiltrarse a las unidades hidrogeológicas de la zona, dado el gradiente hidráulico que representan, por tanto, la estrategia para incorporar estos depósitos es la siguiente:

- **Configuración de frontera Hydraulic Head (HH):** esta condición de frontera impone una carga hidráulica conocida, a partir de la cual se pueden generar flujos hacia el nodo o desde el nodo, dependiendo del sentido del gradiente hidráulico que se genere con las cargas hidráulicas (nivel piezométrico) de los alrededores. El nivel impuesto corresponde justamente a la cota resultante de la conformación del depósito, por tanto, es importante resaltar que esta condición de frontera representará un escenario siempre potencial, bajo el supuesto de saturación desde el nivel impuesto hacia abajo, permitiendo el tránsito del frente de humedad y con ello el potencial transporte de aguas contactadas.
- **Asignación de los depósitos como unidades hidrogeológicas (UHG):** adicionalmente, tal como lo especifican los términos de referencia para elaboración de estudios de impacto ambiental para proyectos de minería (ANLA, 2016) y como es requerido numéricamente para el funcionamiento adecuado del modelo, las zonas de depósitos que se han mencionado con anterioridad se representan en el modelo numérico prospectivo como Unidades Hidrogeológicas (UHG) antrópicas, generando un cambio en la conductividad hidráulica superficial en las tres direcciones ($K_x = K_y$, $K_z = 0.1K_x$). Las conductividades se asignan en función del tipo de material que se retiene en los depósitos de acuerdo con las definiciones dadas por GCL (2025) y el modelo hidrogeológico conceptual actualizado en este informe. De esta manera, la conductividad hidráulica es un parámetro variable en el tiempo, pero únicamente de manera localizada y en la capa superficial (capa 1).

Finalmente, otra obra de interés para ser incorporada al modelo numérico de flujo subterráneo corresponde al **túnel de decantación** que se localizará atravesando del valle de la quebrada La Palestina al valle de la quebrada El Torito, como obra de soporte para el correcto funcionamiento de la TMF, dicho túnel tendría una longitud de 700 m, pendiente de 0.005, cubierta de subsuelo entre 45 y 165 m y diámetro aproximado de 3.6 m (Golder Associates, 2017). La estrategia para incorporar el túnel de decantación al modelo es la siguiente:

- **Configuración de frontera Transfer Flow (TF):** actúa de forma similar a como ya se explicó para el tajo, pero en este caso de manera muy localizada, representando

una obra lineal, con una elevación de 835 m.s.n.m, de acuerdo con los planos constructivos. Se consideran escenarios con revestimiento pobre y con revestimiento robusto.

- **Configuración de las conductancias de la TF para que actúe como dren:** similar a lo explicado para el tajo, se configuran los elementos que coinciden con la TF que representa el eje del túnel, a dichos elementos se les asigna conductancias de entrada y salida, en este caso se configuró la misma, ya que después de diversas iteraciones se encontró que los nodos actúan fundamentalmente como salida de flujo porque en todos los casos el nivel piezométrico estaría por encima del eje del túnel. El valor asignado de conductancia ha sido objeto de análisis de sensibilidad.

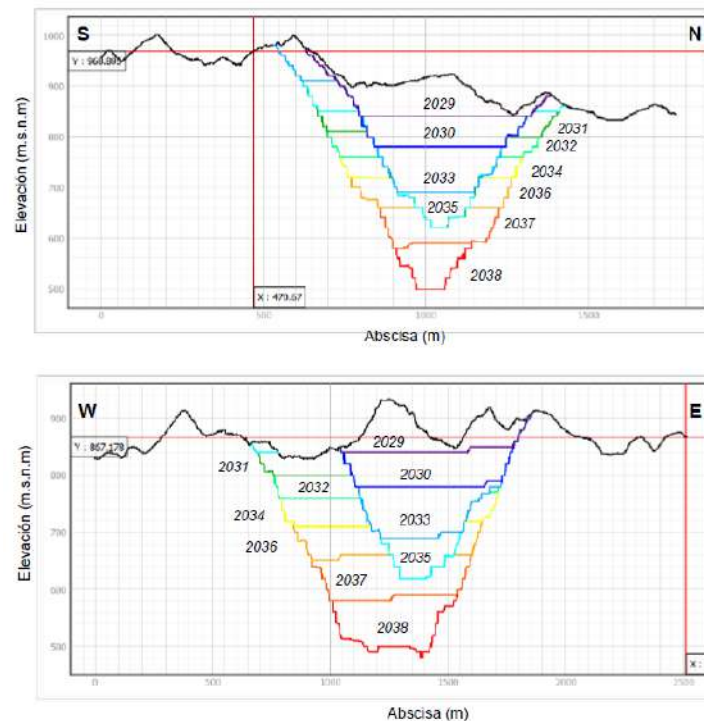


Figura 5.1.6.253 Configuración topográfica del Pit Gramalote entre 2029 y 2038: perfiles en dirección Sur – Norte (superior) y Oeste – Este (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

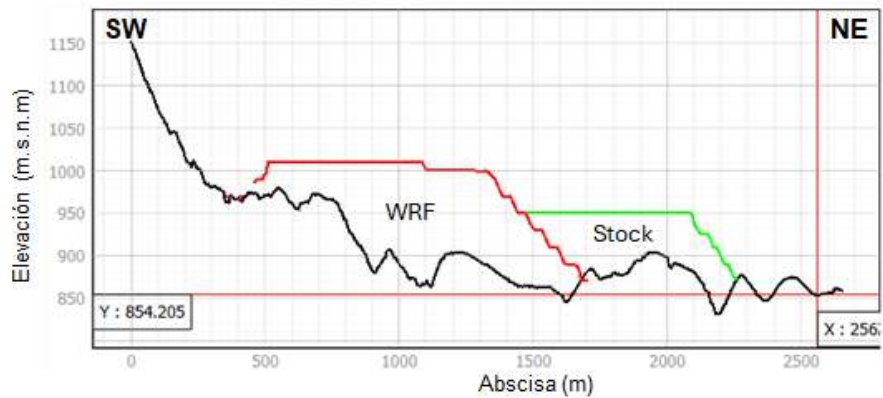


Figura 5.1.6.254 Configuración topográfica de los depósitos WRF (línea roja) y Stockpile (línea verde) San Antonio para el año 2038. Perfil en dirección SW – NE.

Fuente: (SHI SAS, 2025)

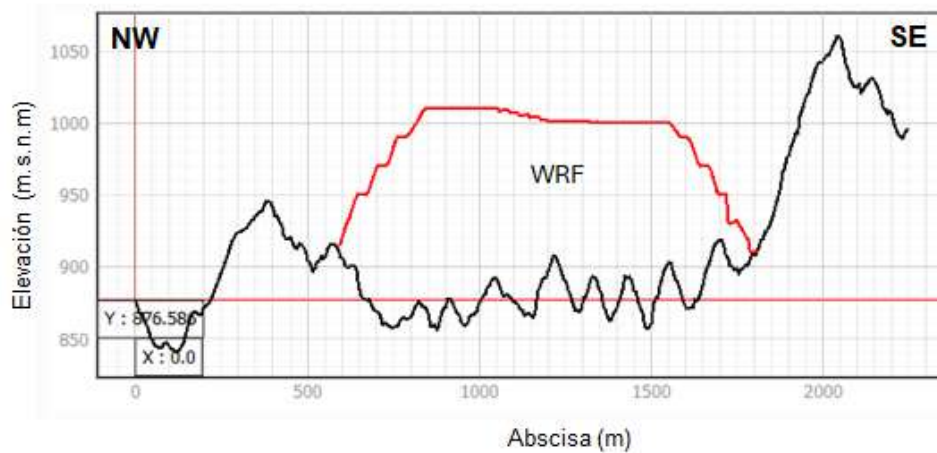


Figura 5.1.6.255 Configuración topográfica del depósito WRF San Antonio (línea roja) para el año 2038. perfil en dirección NW -SE

Fuente: (SHI SAS, 2025)

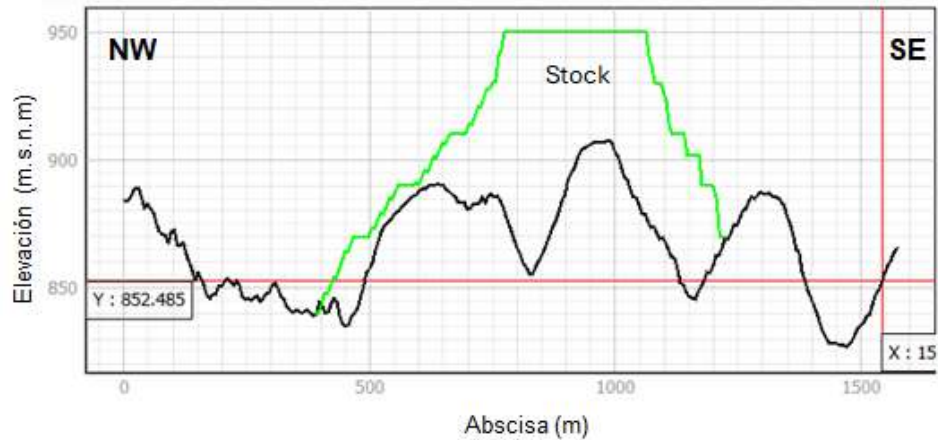


Figura 5.1.6.256 Configuración topográfica del depósito Stockpile San Antonio para el año 2038. perfil en dirección NW – SE.

Fuente: (SHI SAS, 2025)

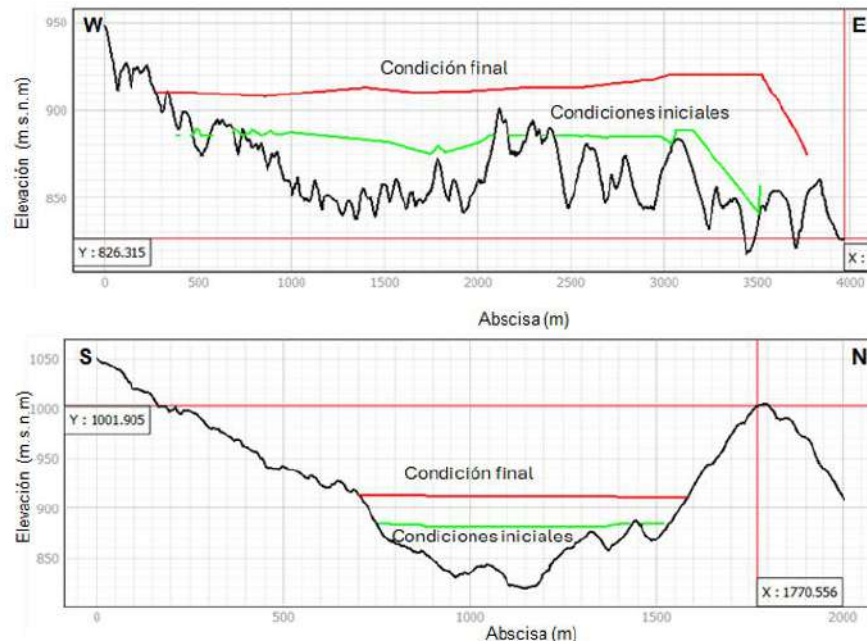


Figura 5.1.6.257 Configuración topográfica del depósito de relaves y el contrafuerte de arenas (presa o pila) para los años iniciales (línea verde) y para la condición final del proyecto (línea roja). Perfiles en dirección W-E (superior) y S-N (inferior).

Fuente: (SHI SAS, 2025)

B. Parametrización

Las obras mineras se han incorporado al modelo numérico de flujo subterráneo para representar el escenario prospectivo de simulación, para lo cual se han usado las

estrategias de combinar condiciones de frontera y modificación de materiales (conductancias y conductividades hidráulicas), así como inactivación de celdas en el tiempo, dichas estrategias requieren de una parametrización, la cual se basa en la información del Modelo Hidrogeológico Conceptual (MHC) y en las pruebas numéricas realizadas a los diferentes parámetros en el análisis de sensibilidad. Los parámetros mencionados y utilizados para la obtención de los resultados finales de la modelación prospectiva se muestran en la Tabla 5.1.6.108. Es de aclarar que, en las fases de desarrollo del proyecto, el modelo deberá ser validado y actualizado con datos observados de caudales y descensos, por lo cual esta parametrización podría cambiar de manera significativa

Tabla 5.1.6.108 Parametrización de las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo

Obra	Periodicidad incorporada	Condición de frontera**	Material		
			Conductividad hidráulica (m/d)	Conductancia a entrada (1/d)	Conductancia a salida (1/d)
Pit Gramalote	Anual	Transfer Flow	NA	0.1	2*
Túnel de decantación	Anual	Transfer Flow	NA	0.001	0.001
WRF San Antonio	Anual	Hydraulic Head	0.04	NA	NA
Stockpile San Antonio	Anual	Hydraulic Head	0.04	NA	NA
Depósito El Balsal	Anual	Hydraulic Head	0.04	NA	NA
Presa de colas	Periodo inicial - Periodo final	Hydraulic Head	0.02	NA	NA
Contrafuerte de arenas		Hydraulic Head	0.25	NA	NA

Fuente: (SHI SAS, 2025)

* el primer año se simula con conductancia de 5 (1/día) porque las excavaciones correspondientes serán las más someras, atravesando las UHG de mayor potencial.

** los niveles piezométricos de referencia en cada condición de frontera son asignados a partir de la interpolación de la topografía proyectada de cada obra a tamaño de píxel de 5 m x 5 m, logrando un buen nivel de detalle.

La incorporación del Pit, tanto en planta como en profundidad (perfiles) dentro del modelo numérico para el año inicial (2029) y el año final (2038) se muestra de la Figura 5.1.6.258 a la Figura 5.1.6.260. La incorporación del túnel se muestra en la Figura 5.1.6.258 a la Figura 5.1.6.260. Y la incorporación y representación de las zonas de depósitos en planta, se muestra en la Figura 5.1.6.261 y en la Figura 5.1.6.262 para los años 2029 y 2038 respectivamente.

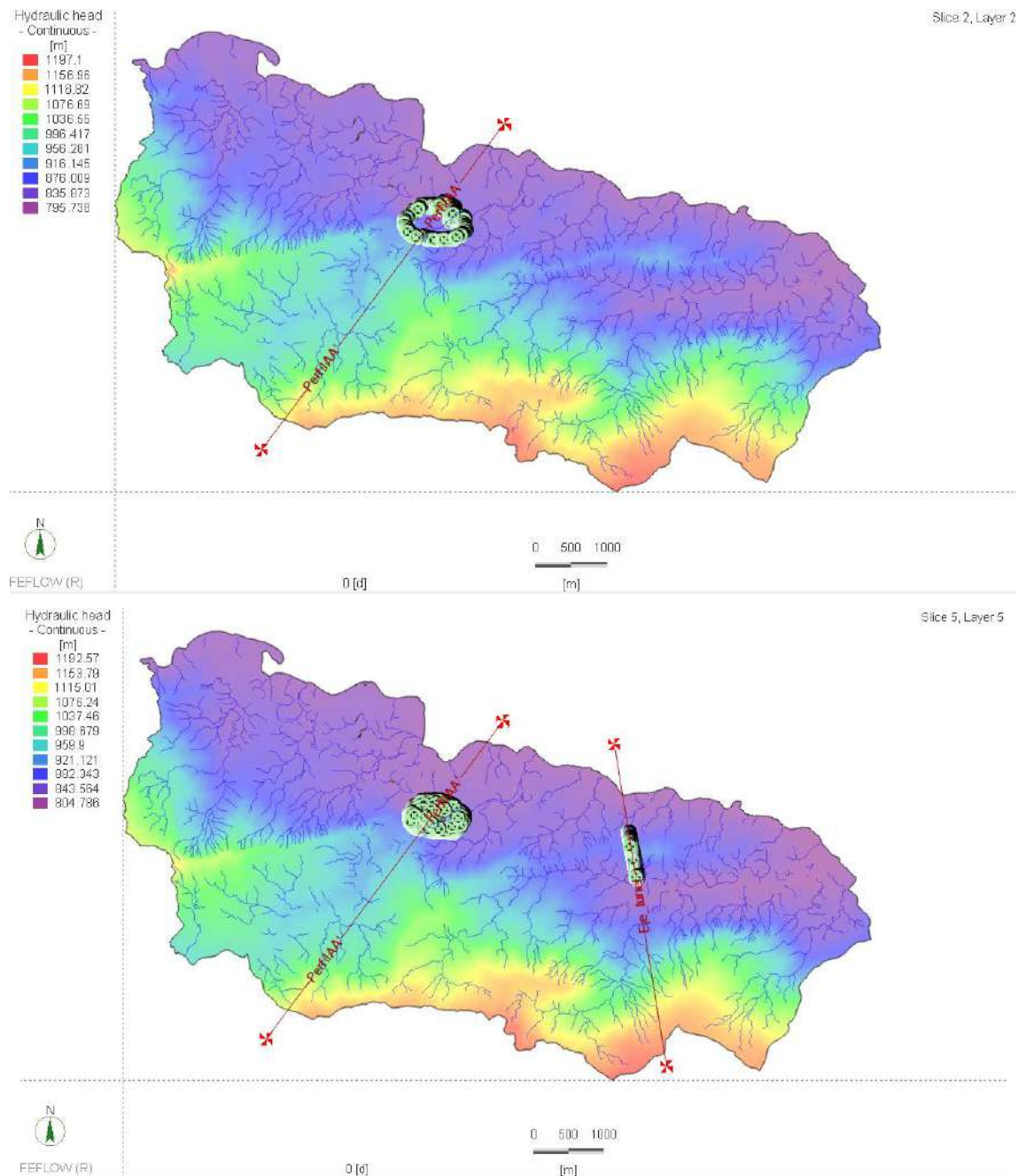


Figura 5.1.6.258 Ubicación en planta de los nodos (Transfer Flow – círculos verdes) que representan las paredes del Pit en la capa 2 (superior) y las que representan el fondo del Pit en la capa 5 (inferior) para el año 2029, acompañado del túnel de decantación (Transfer Flow) en la capa 5 (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

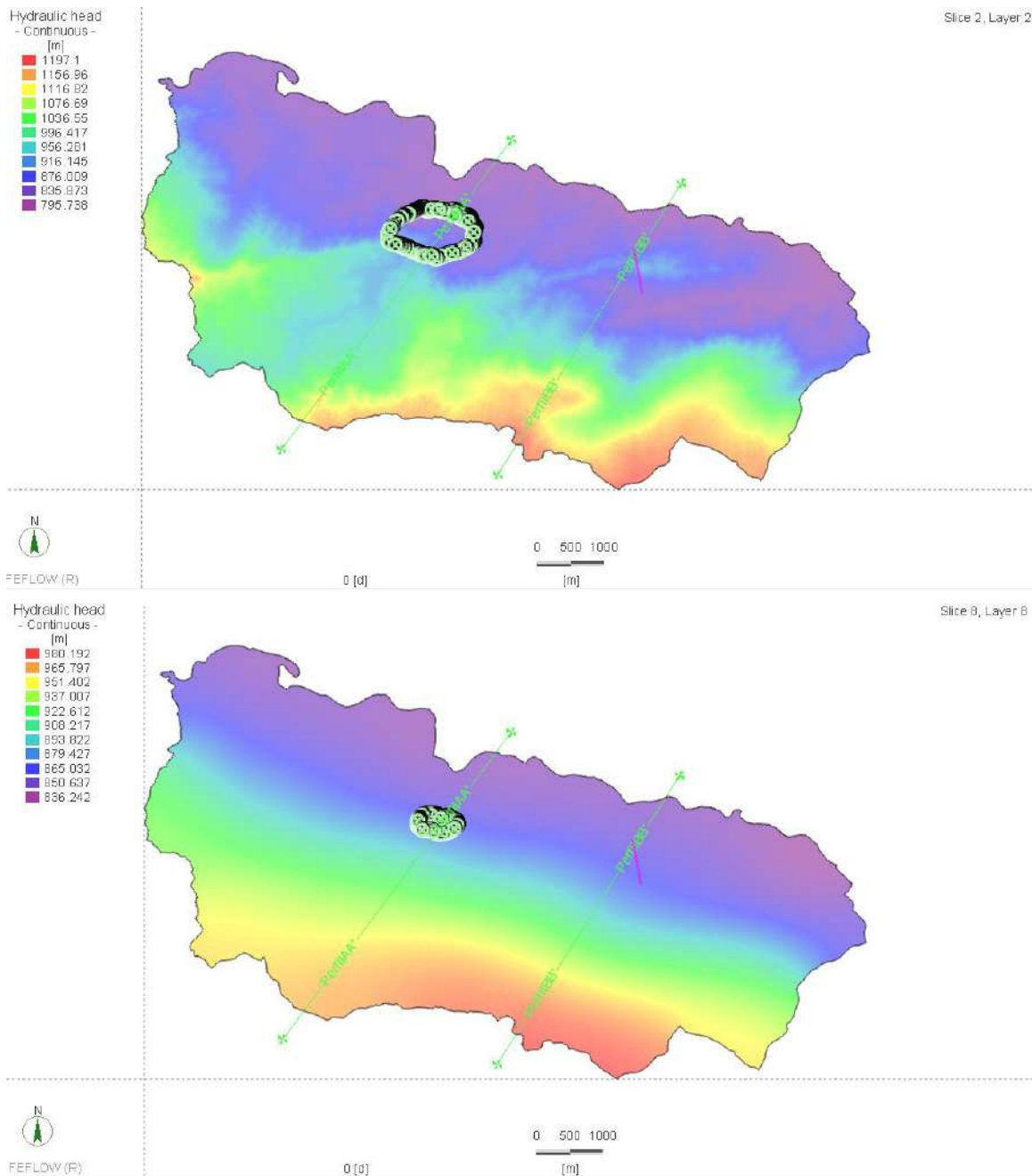


Figura 5.1.6.259 Ubicación en planta de los nodos (Transfer Flow – círculos verdes) que representan las paredes del Pit en la capa 2 (superior) y las que representan el fondo del Pit en la capa 8 (inferior) para el año 2038

Fuente: (SHI SAS, 2025)

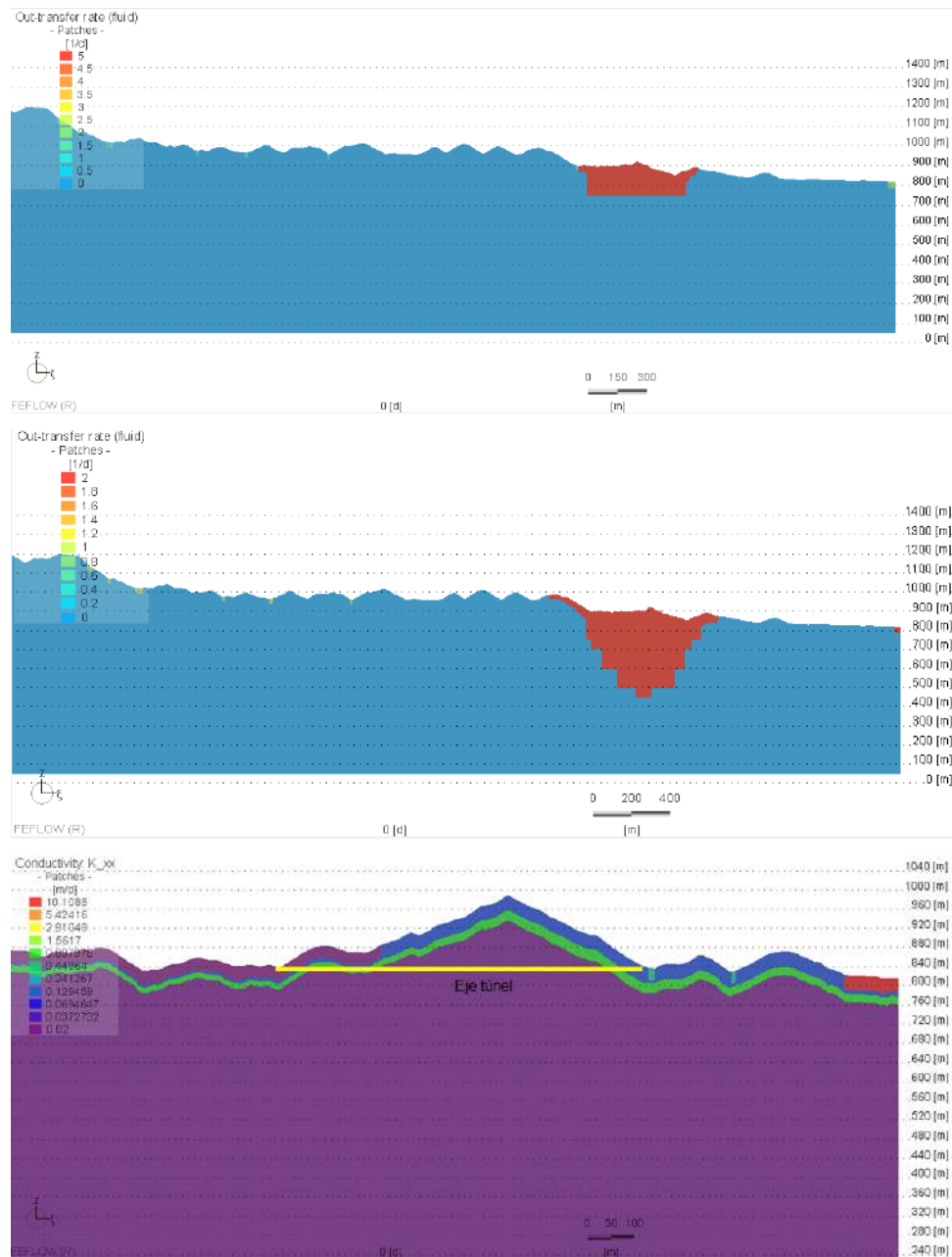


Figura 5.1.6.260 Perfil AA' evidenciando la incorporación del Pit mediante cambios en la conductancia para el año 2029 (superior) y 2038 (intermedia) y perfil del eje del túnel de decantación (inferior)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

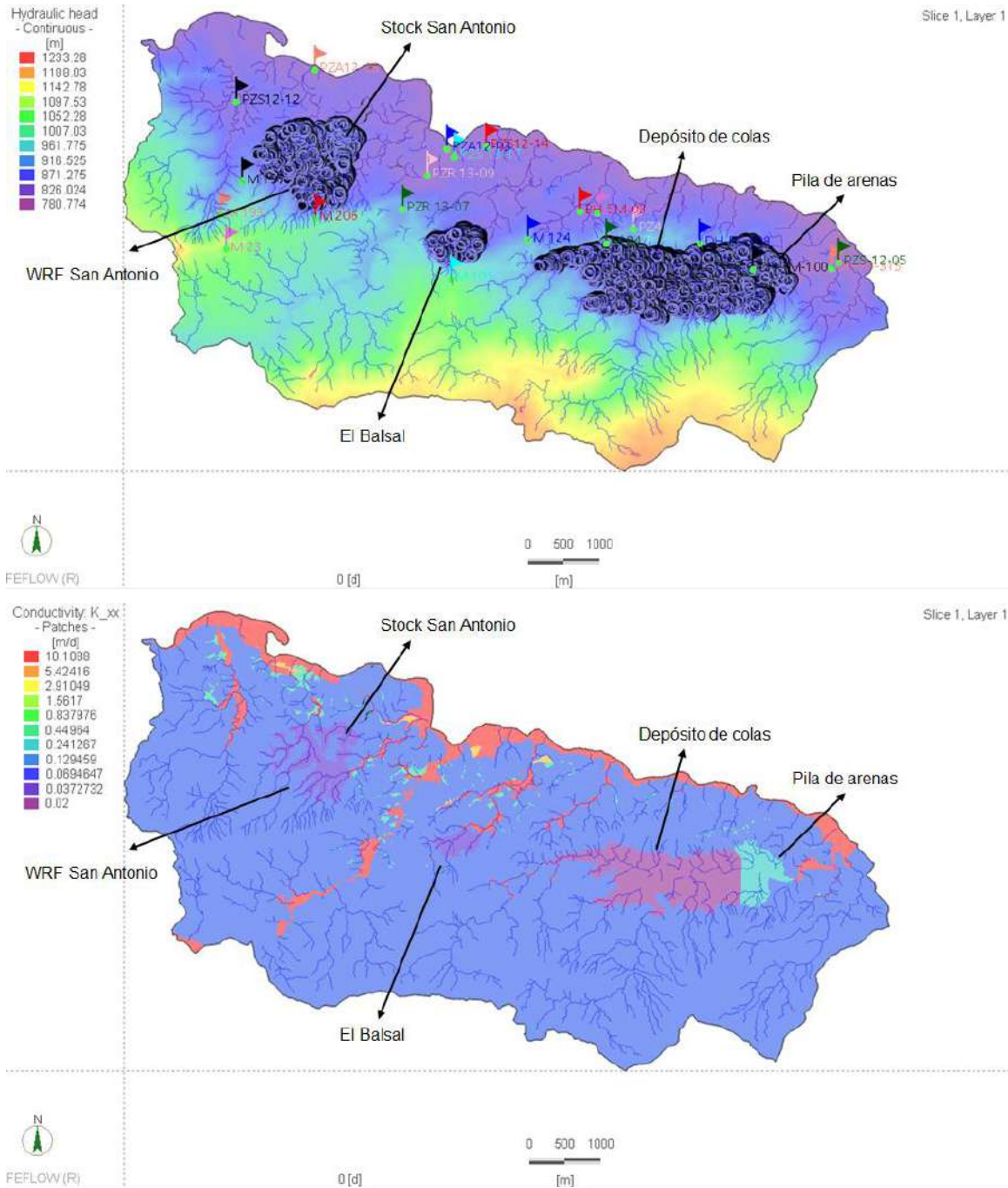


Figura 5.1.6.261 Ubicación en planta de los nodos (Hydraulic Head – círculos morados) que representan las superficies terminadas de los depósitos (superior) y los cambios en la conductividad hidráulica (inferior) para el año 2029

Fuente: (SHI SAS, 2025)

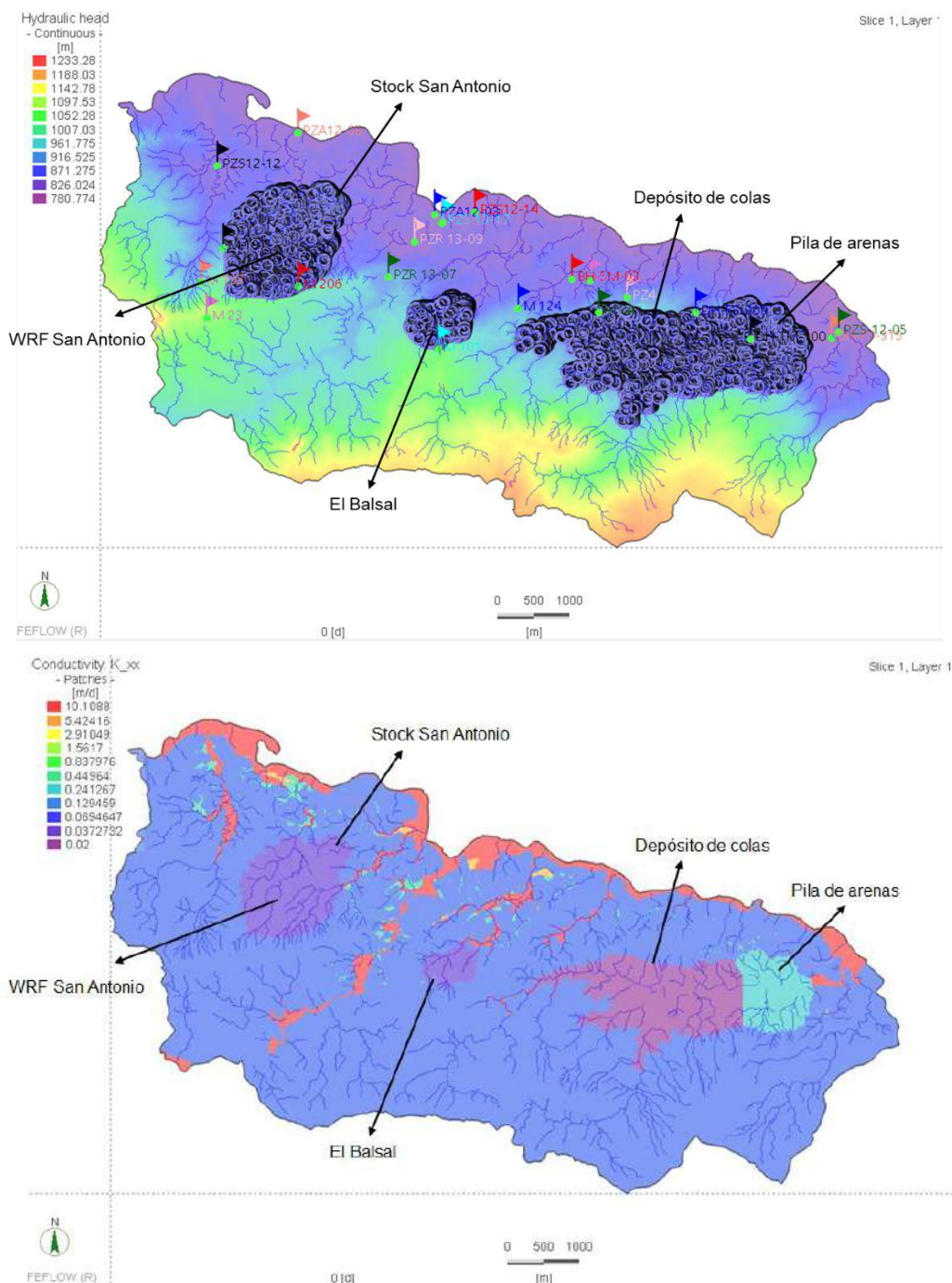


Figura 5.1.6.262 Ubicación en planta de los nodos (Hydraulic Head – círculos morados) que representan las superficies terminadas de los depósitos (superior) y los cambios en la conductividad hidráulica (inferior) para el año 2038

Fuente: (SHI SAS, 2025)

C. Resultados

De la Figura 5.1.6.263 a la Figura 5.1.6.272 se muestra el resultado de los niveles piezométricos alrededor del Pit Gramalote entre los años 2029 y 2038 en forma de perfil (AA'), donde se observan variaciones significativas pero proporcionales a la cota de excavación de cada año y a la extensión en horizontal de dichas obras, de igual manera, dichas variaciones se concentran alrededor del Pit y se propagan especialmente en profundidad (capa 5 en adelante, profundidades mayores a 700 m), mostrando que los niveles piezométricos superficiales sufrirían impactos locales, más no propagaciones regionales, adicionalmente, el resultado evidencia que los caudales de flujo proyectados provendrían fundamentalmente de variaciones en el almacenamiento.

En la Tabla 5.1.6.109 y de la Figura 5.1.6.273 a la Figura 5.1.6.276 se resumen los caudales de descarga hacia las obras subterráneas, tales como el Pit y el túnel de decantación, y los caudales potenciales de filtración desde los diferentes depósitos, siendo estos últimos los máximos posibles bajo condiciones constantes de saturación total en la superficie de cada obra, por lo que estos deben tomarse solo como valores indicativos.

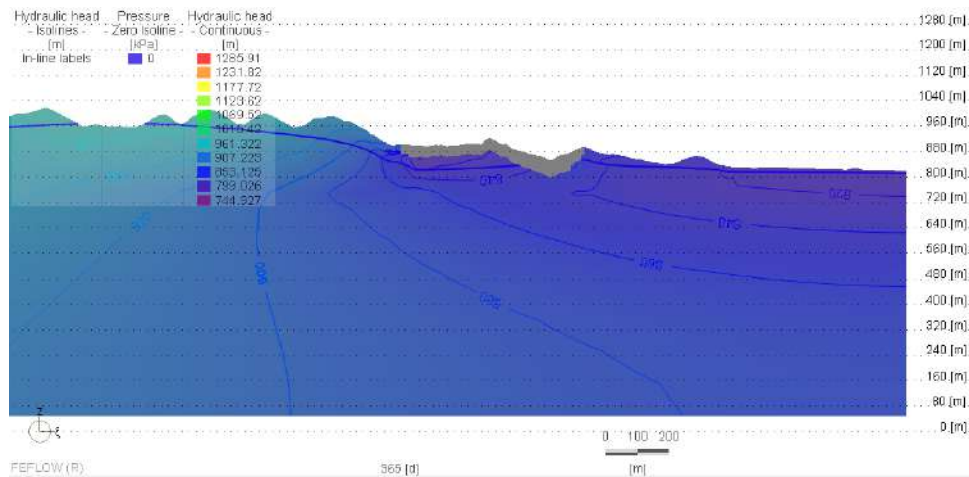


Figura 5.1.6.263 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2029 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

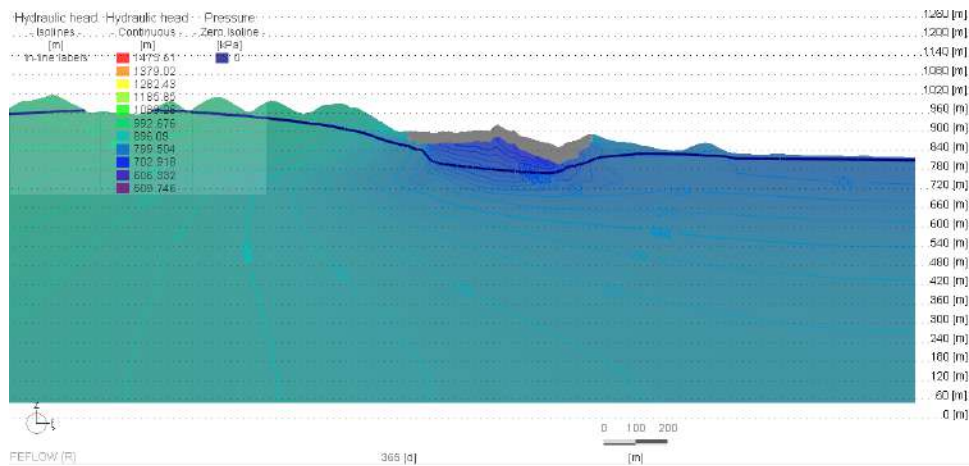


Figura 5.1.6.264 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2030 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

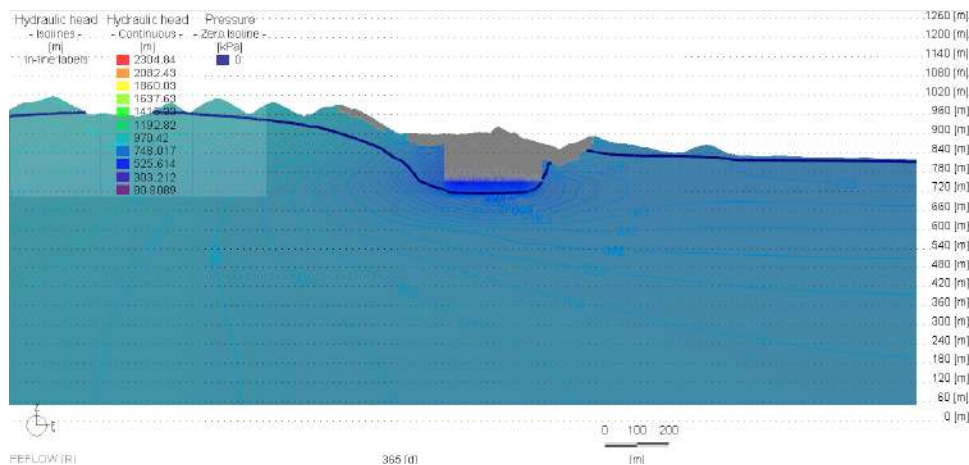


Figura 5.1.6.265 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2031 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

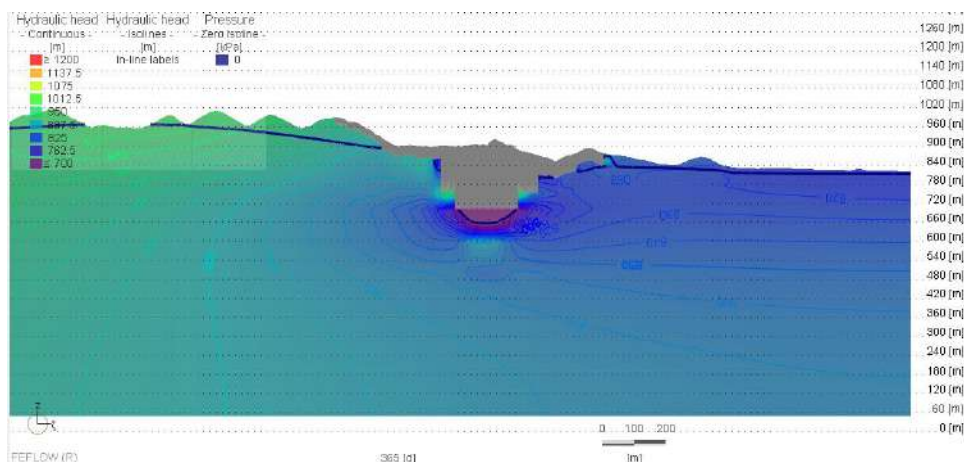


Figura 5.1.6.266 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2032 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

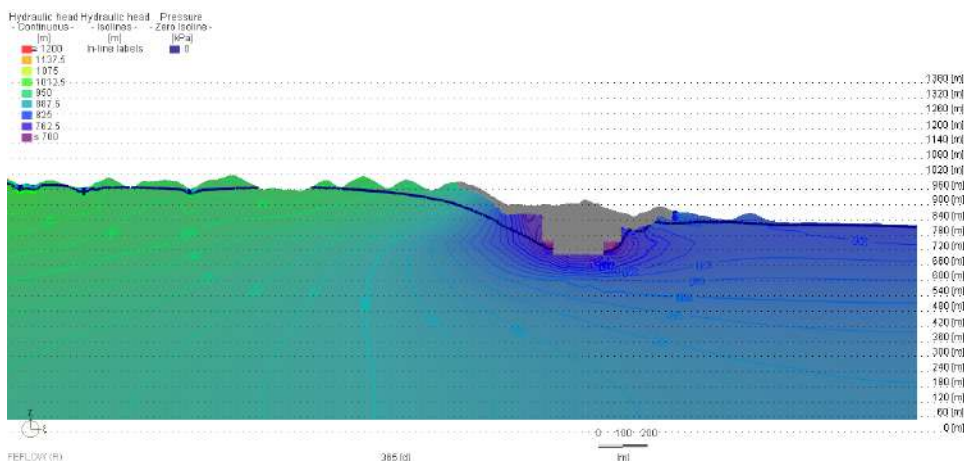


Figura 5.1.6.267 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2033 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

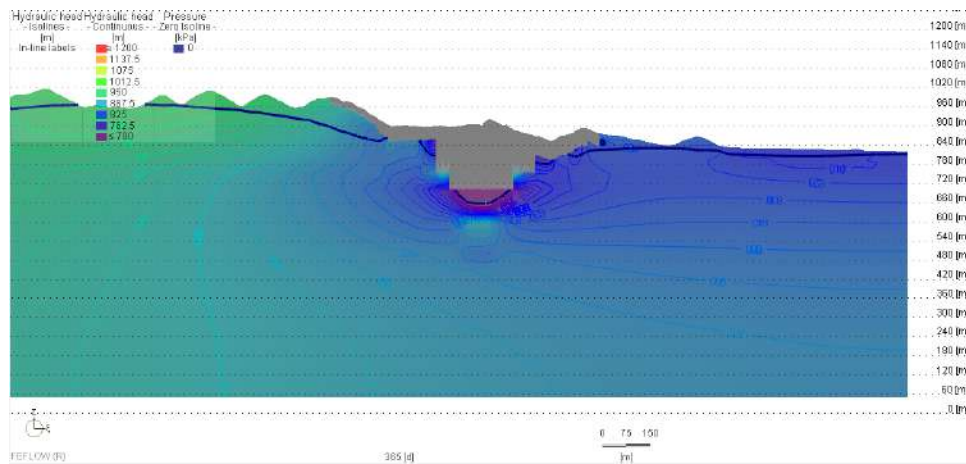


Figura 5.1.6.268 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2034 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

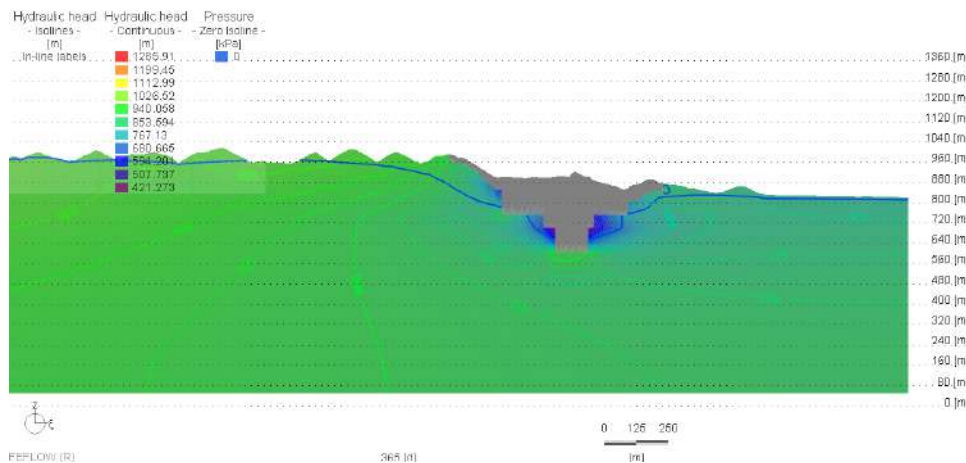


Figura 5.1.6.269 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2035 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

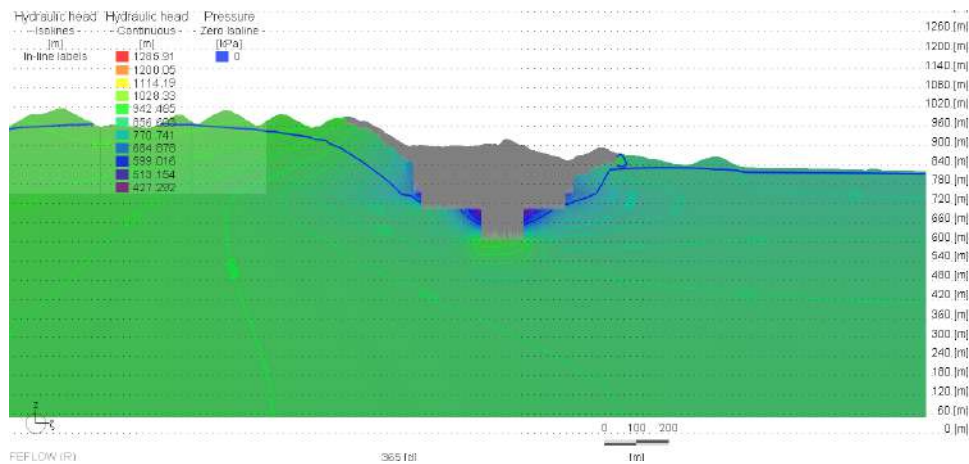


Figura 5.1.6.270 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2036 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

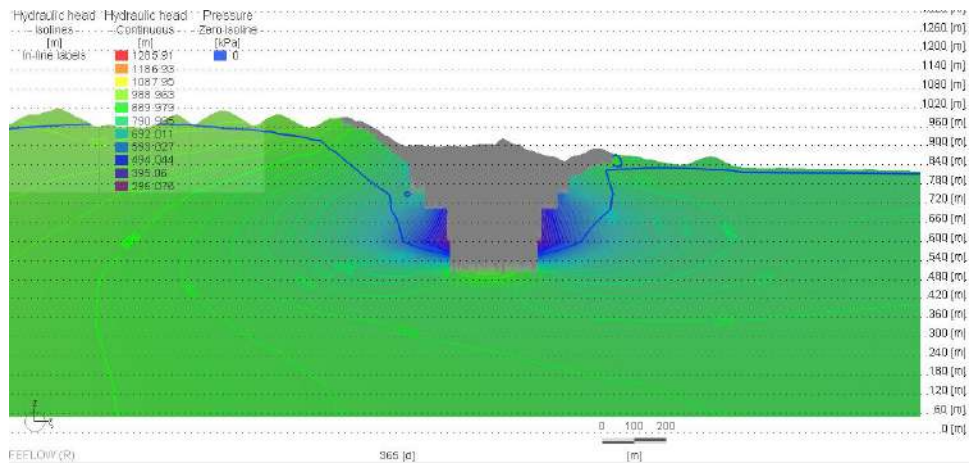


Figura 5.1.6.271 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2037 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

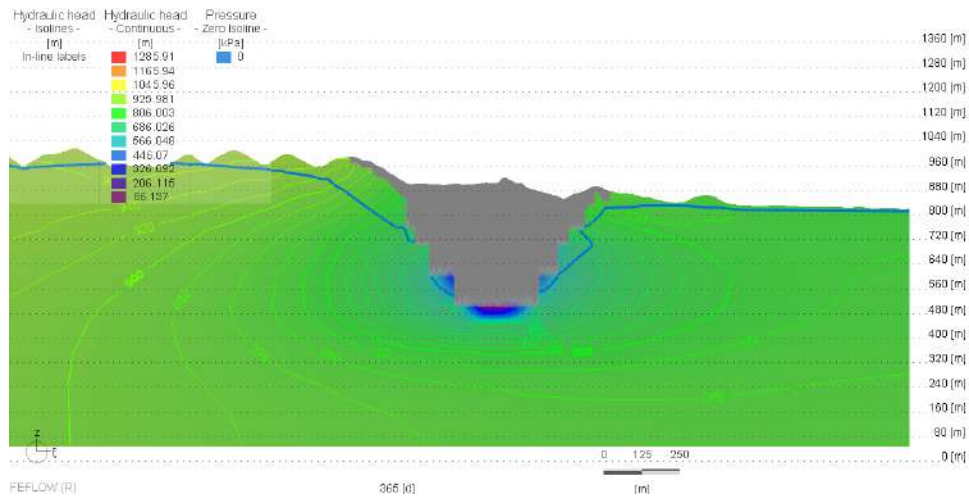


Figura 5.1.6.272 Cono de abatimiento alrededor del Pit Gramalote proyectado para el año 2038 (línea azul: posición del nivel freático, zona gris: elementos inactivos del modelo simulando la excavación)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

Tabla 5.1.6.109 Caudales proyectados en las obras mineras proyectadas e incorporadas dentro del modelo numérico de flujo subterráneo

Año	Caudales de ingreso hacia las obras propuestas (l/s)		Caudales de filtración desde las obras propuestas (l/s)				
	Pit Gramalote	Túnel de decantación	WRF San Antonio	Stockpiles San Antonio	Depósito El Balsal	Depósito de relaves	Presa de arenas
2029	70	4,35	68,04	138,17	163,81	209,46	492,33
2030	292,51	0	158,85	149,57	45,28	152,71	161,93
2031	154,28	4,45	175,25	119,78	103,51	129,03	120,25
2032	91,35	0	311,34	147,27	91,58	89,7	52,65
2033	219,31	4,53	411,9	123,29	38,18	78,85	56,87
2034	54,09	0	531,42	157,67	44,27	28,52	32,98
2035	243,33	4,35	900,21	279,4	111,46	209,46	492,33
2036	148,34	4,11	912,52	225,31	116,79	647,93	2164
2037	191,01	4,11	1143,87	332,97	238,14	647,93	2164
2038	199,48	4,96	1274,31	383	64,44	647,94	2164

Fuente: (SHI SAS, 2025)

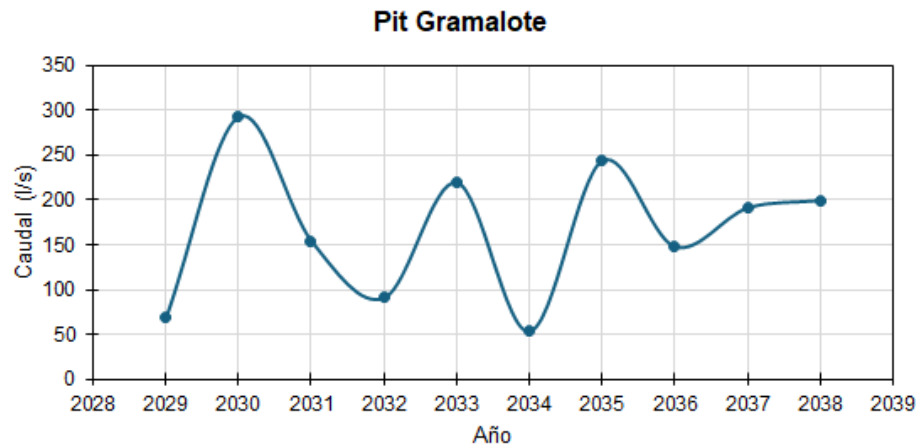


Figura 5.1.6.273 Caudales de descarga hacia el Pit Gramalote durante los años de operación de la obra de acuerdo con el avance minero del PTO

Fuente: (SHI SAS, 2025)

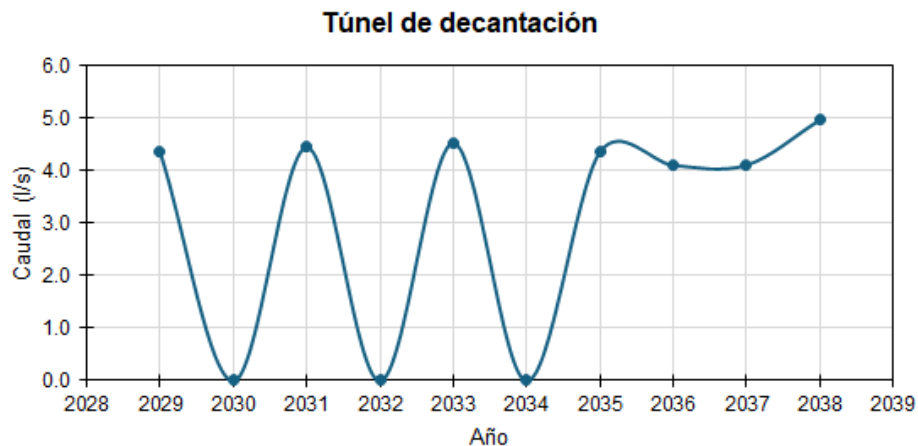


Figura 5.1.6.274 Caudales de descarga hacia el túnel de decantación durante los años de operación del proyecto

Fuente: (SHI SAS, 2025)

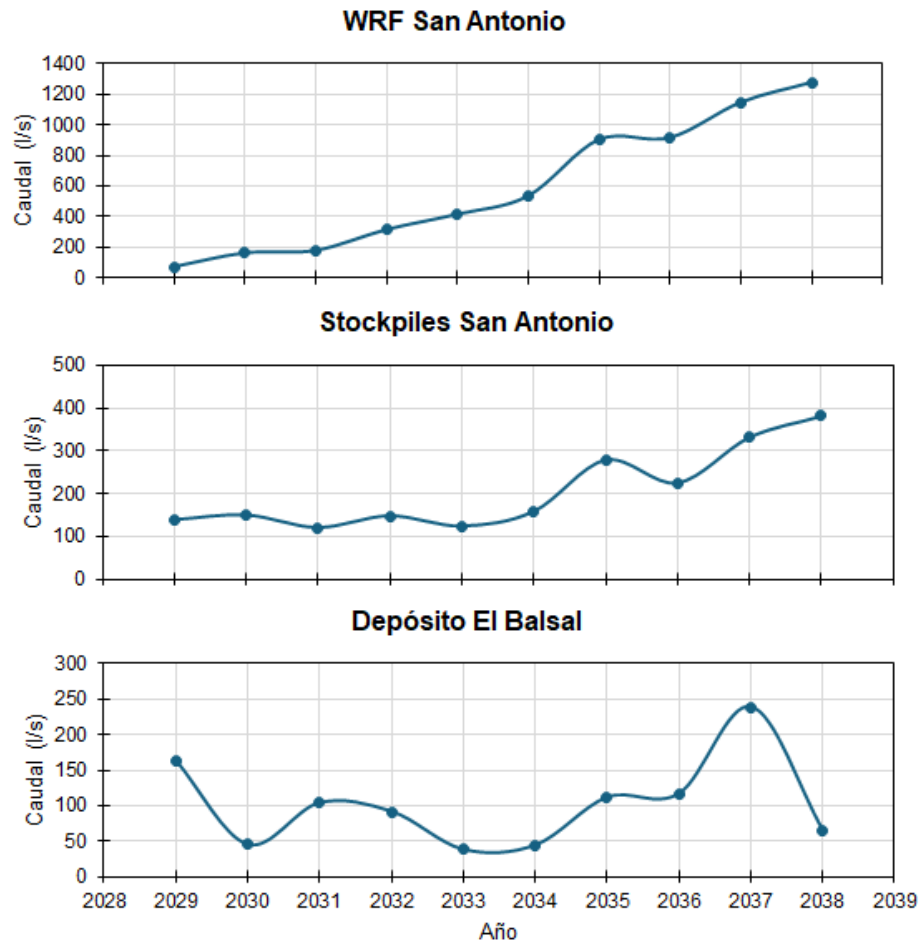


Figura 5.1.6.275 Caudales potenciales de filtración desde las obras de almacenamiento de material en San Antonio y El Balsal de acuerdo con los avances proyectados del PTO

Fuente: (SHI SAS, 2025)

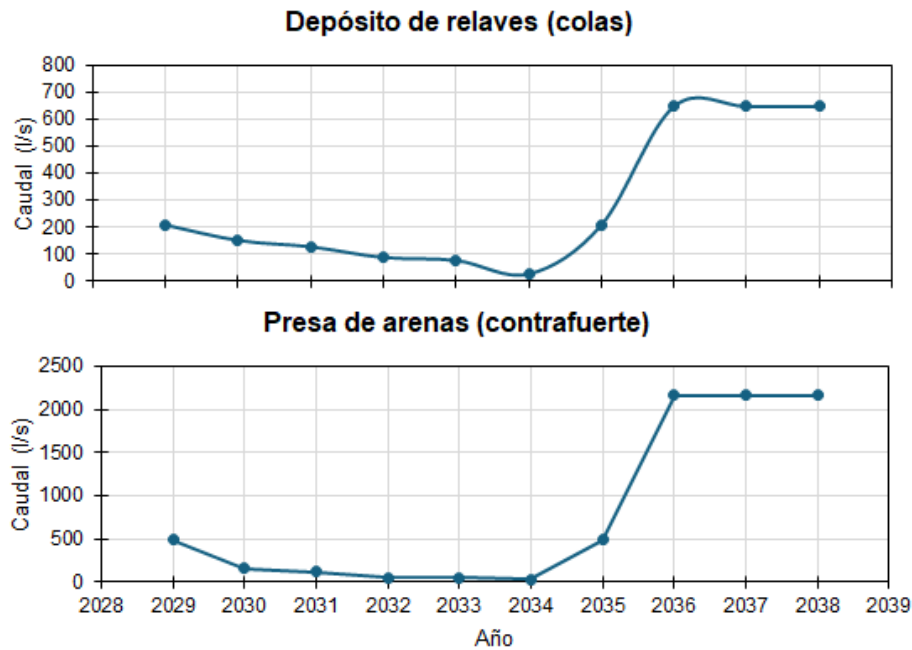


Figura 5.1.6.276 Caudales potenciales de filtración desde las obras de la zona de manejo de colas de acuerdo con los reportes de los planos constructivos y el PTO

Fuente: (SHI SAS, 2025)

El comportamiento de los caudales en el Pit muestra variaciones en función de los avances de la excavación, donde se generan liberaciones y recuperaciones de almacenamiento de agua en forma oscilatoria, este comportamiento solo es posible capturarse por la simulación transitoria efectuada. Conforme se llegan a las capas más profundas el caudal tiende a un comportamiento asintótico. Resulta clave identificar que el caudal de ingreso al Pit está variando entre 70 l/s para el año 1 y 292.5 l/s para el año 2, donde al final del año 10 se esperaría un caudal de 199.5 l/s. El caudal máximo entonces se estaría presentando cuando se atraviesan las unidades hidrogeológicas superficiales, que son las que cuentan con mayor potencial hidrogeológico, también cuando el Pit aumenta su extensión, más que su profundidad.

En cuanto a los caudales de infiltración hacia el túnel, se evidencia también un comportamiento oscilatorio en los primeros años, con tendencia a la estabilidad en los últimos años, sin embargo, su magnitud nunca supera los 5 l/s.

En cuanto a los caudales potenciales de filtración desde las obras de almacenamiento de superficie, se resalta nuevamente su carácter potencial, donde se destaca la tendencia temporal de dichos flujos, mostrando que el WRF y el Stockpile de San Antonio exhiben en general un comportamiento siempre creciente, donde el máximo flujo se da en el último año (2038), siendo mayor en el WRF, lo mismo no sucede en el depósito El Balsal, donde se presentan los menores flujos de todos los depósitos, con un comportamiento oscilatorio posiblemente influenciado por la dinámica del Pit, dada su cercanía. El máximo caudal de filtración desde El Balsal se presentaría en 2037.

Finalmente, en relación con la zona de manejo de colas, se evidencian caudales potenciales significativos, dada la cabeza hidráulica impuesta en los últimos años del proyecto que puede generar desnivel hidráulico de más de 50 m, siendo mayores los flujos en el contrafuerte de arenas, dada su notable mayor permeabilidad, es importante resaltar que en estas simulaciones no se han incluido las medidas de manejo de estas potenciales infiltraciones, las cuales son objeto de refinamiento en el PTO.

Para evidenciar los descensos en planta, así como las variaciones en las superficies piezométricas, se consideran dos periodos representativos: año inicial (2029) que se ilustra de la Figura 5.1.6.277 a la Figura 5.1.6.279 y año final (2038) que se ilustra de la Figura 5.1.6.280 a la Figura 5.1.6.283. A partir del año 2038, siendo un periodo de efecto acumulativo, se obtienen los descensos, tanto para la capa superficial, como para la capa que se ubica inmediatamente por debajo del fondo del Pit, tal como se muestra en la Figura 5.1.6.283 se ratifica lo mencionado con anterioridad, los descensos no se propagan en los niveles someros (capa 1) más allá de alrededor de 100 m del perímetro del Pit, lo que indica que el efecto en el nivel freático es esencialmente local. En contraste en profundidad (capa 9) los descensos tienden a exhibir su mayor propagación, con una distancia horizontal de hasta 1000 m alrededor del límite del pit, considerando un umbral de descenso de 10 m. No obstante, es importante aclarar que estos descensos profundos no representan un abatimiento del nivel freático, sino una despresurización del fluido en la roca en profundidad, que no necesariamente se extienden por fuera del dominio del modelo, ya que, la capa 9 se encuentra por debajo de la cota mínima del pit, por lo que el agua (en caso de existir) se encontraría en un sistema confinado. En consecuencia, los cambios en el nivel piezométrico reflejan variaciones de presión asociadas al ajuste del estado interno de la roca debido a la construcción del PIT y no deben interpretarse como un descenso real del nivel de saturación.

Es relevante destacar que en la zona de estudio el medio profundo está constituido por roca cristalina, en la cual el flujo subterráneo se desplaza a través de fracturas, y que a medida que aumenta la profundidad el estado de esfuerzos tiende a ocasionar que las fracturas sean menos continuas y mucho más cerradas, lo que condiciona la distribución del agua subterránea e impide una transmisión vertical significativa. En estas condiciones, el sistema funciona como un recurso de almacenamiento hidráulico desconectado de los drenajes superficiales. Por su parte en el modelo se adopta un enfoque de medio poroso equivalente, que permite identificar las zonas preferentes del medio en profundidad, que liberan presión en forma de agua de almacenamiento hacia el pit, lo que no implica aportes de ríos, quebradas o manantiales, que estarían asociadas a la capa 1.

En consecuencia, aunque los niveles piezométricos más profundos puedan quedar por debajo de la elevación del río Nus, ello no implica el riesgo de desecación, ya que, de acuerdo con el modelo conceptual, estos drenajes superficiales, así como los nacimientos de agua, se asocian al medio poroso superficial y no existe conectividad hidráulica vertical que permita que los descensos profundos se transmitan hacia el acuífero superficial que alimenta los cursos de agua. El sistema profundo regional se comporta de manera independiente del sistema somero y su despresurización no afectaría los afluentes superficiales.

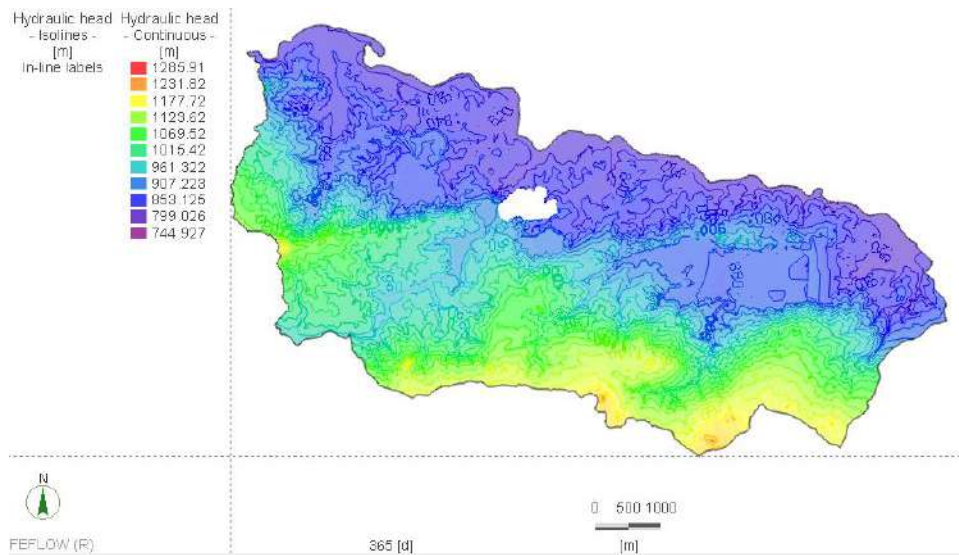


Figura 5.1.6.277 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

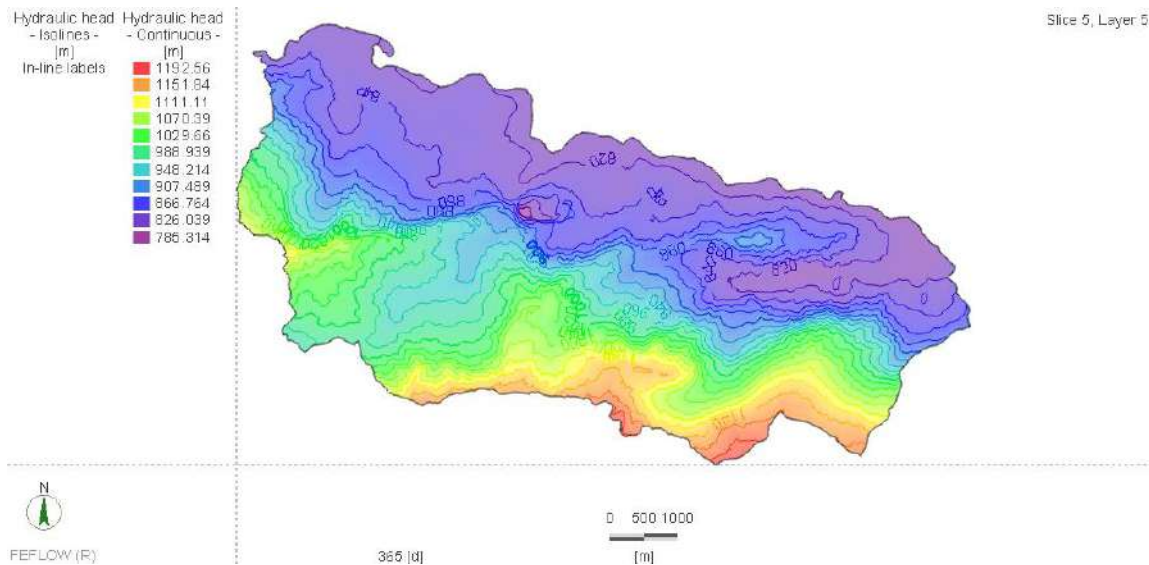


Figura 5.1.6.278 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 5 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

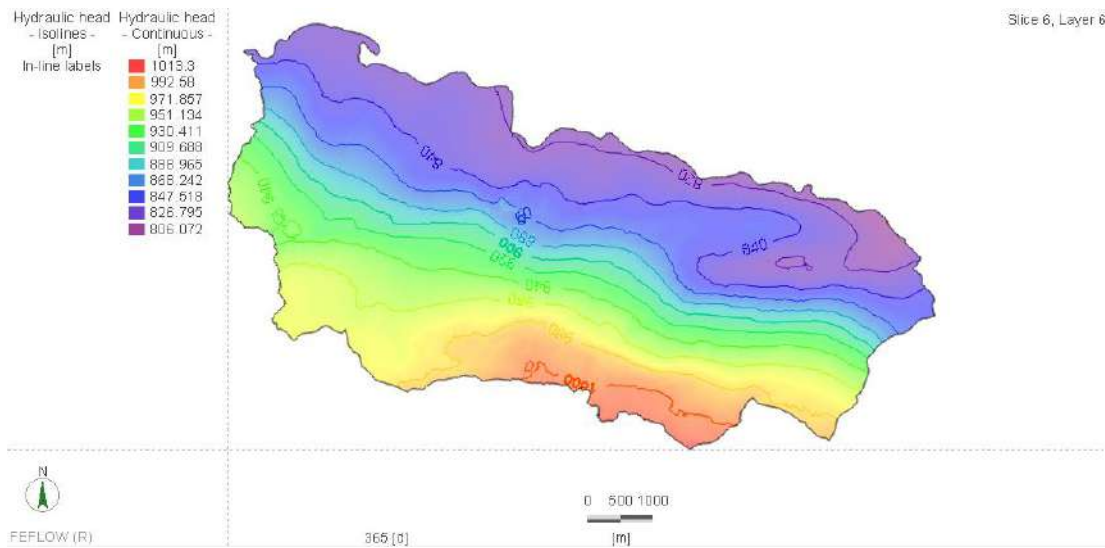


Figura 5.1.6.279 Superficie piezométrica simulada a 2029 en la capa 6 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

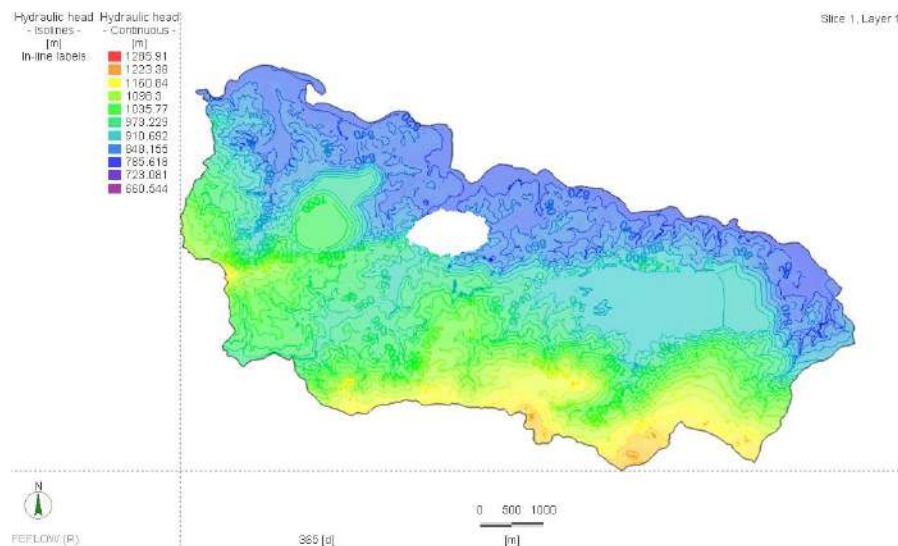


Figura 5.1.6.280 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 1 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y de las obras de superficie (ascensos locales)

Fuente: (SHI SAS, 2025)

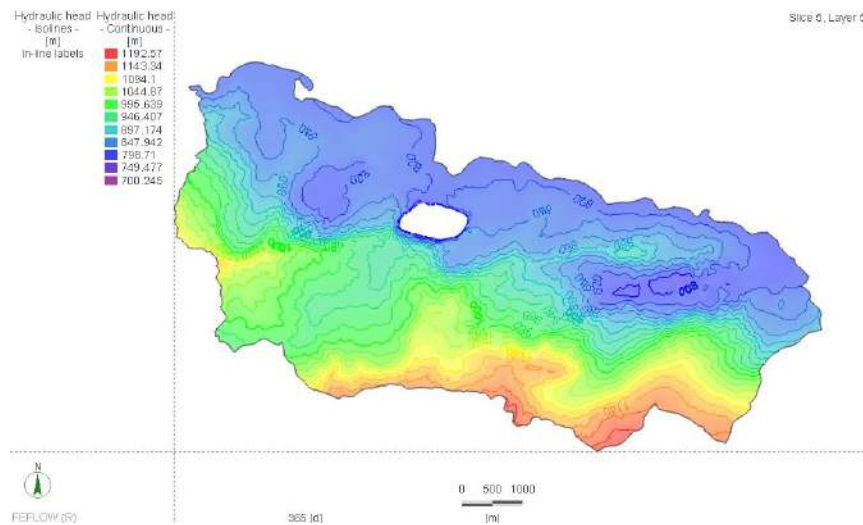


Figura 5.1.6.281 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 5 del modelo numérico – evidencia de cambios piezométricos alrededor del Pit (descensos locales) y la no propagación de los efectos de las obras de superficie a las capas más profundas

Fuente: (SHI SAS, 2025)

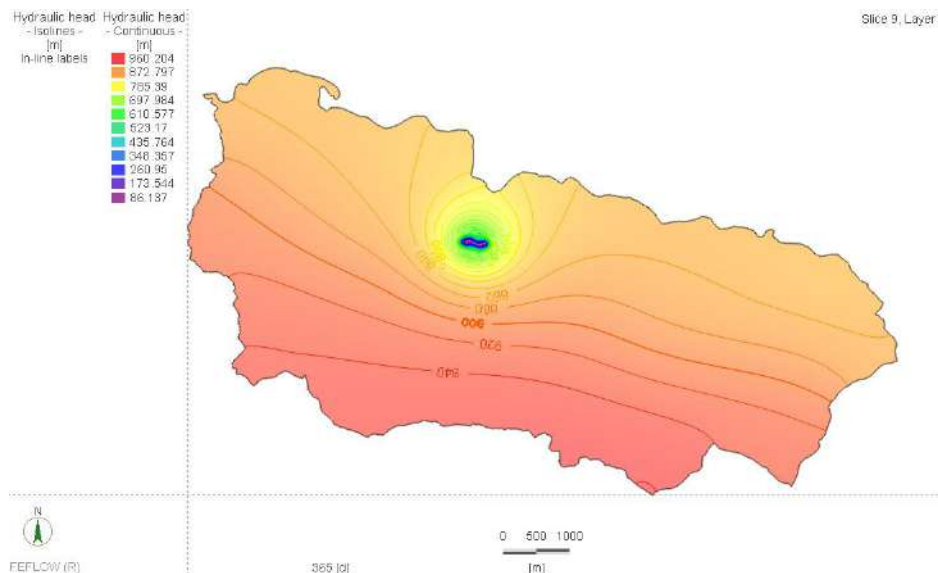


Figura 5.1.6.282 Superficie piezométrica simulada a 2038 en la capa 8 del modelo numérico (por debajo del fondo del Pit) – evidencia de cambios piezométricos locales alrededor del Pit

Fuente: (SHI SAS, 2025)

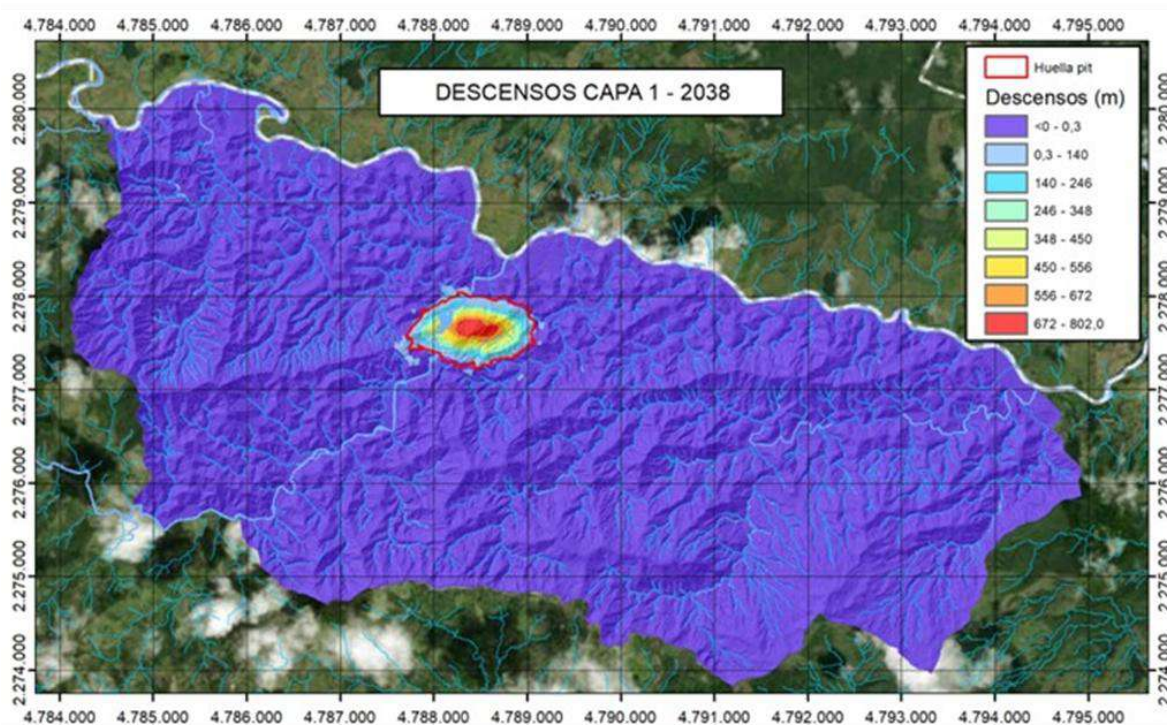


Figura 5.1.6.283 Descensos estimados en las capas someras (capa 1) del modelo en relación con la localización del Pit para el año 2038

Fuente: (SHI SAS, 2025)

A partir de los resultados de la modelación numérica es posible analizar las variaciones esperadas en el nivel piezométrico como consecuencia del avance minero. En la Figura 5.1.6.284 se comparan los niveles piezométricos del modelo transitorio en un año normal, que representa la superficie piezométrica sin influencia del proyecto; con los niveles obtenidos en la capa 1 del modelo transitorio para el año 2038, en donde se observan mayores abatimientos.

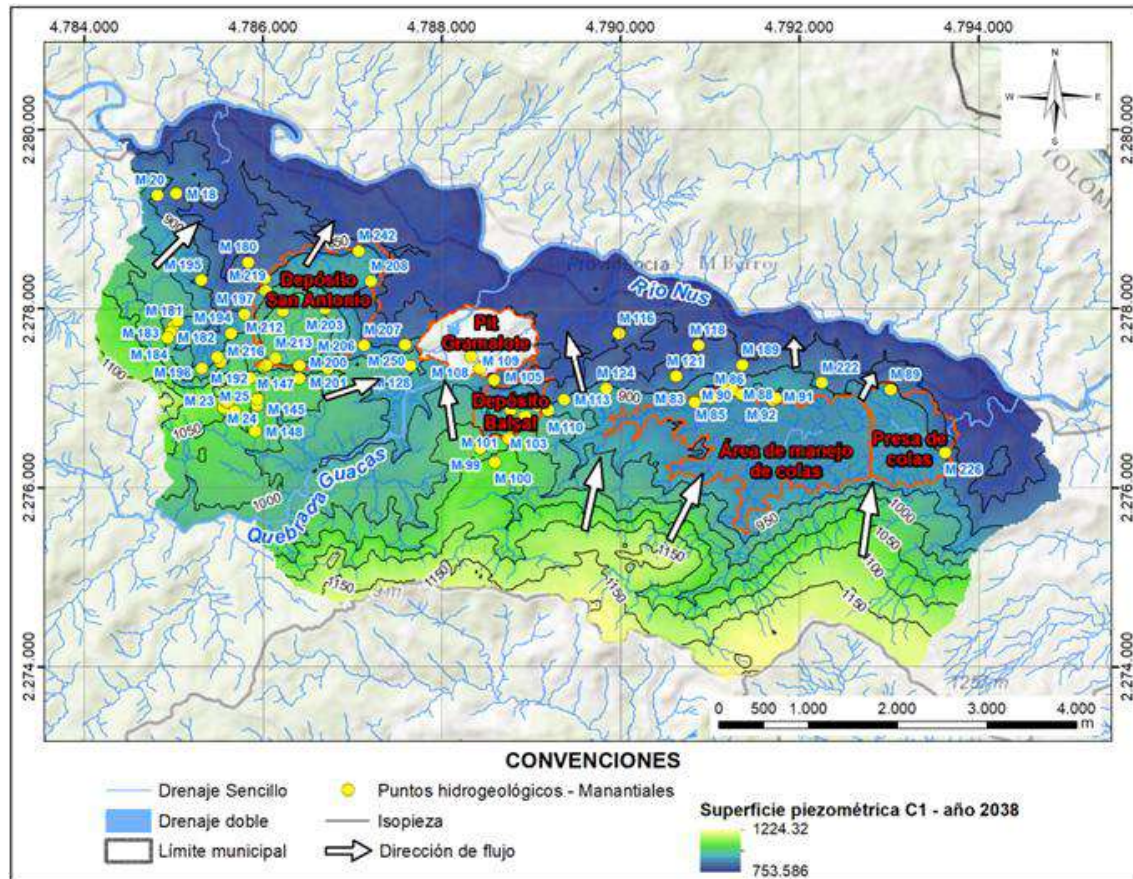


Figura 5.1.6.284 Comparación de los niveles piezométricos del modelo transitorio en un año normal (sin influencia del proyecto) y los niveles esperados para el año 2038

Fuente: (SHI SAS, 2025)

En la Figura 5.1.6.284 se observa que las mayores modificaciones en las tendencias de flujo del agua subterránea se presentan sobre los depósitos mineros, donde se evidencia un incremento en el nivel piezométrico asociado al aumento del material disponible para almacenar agua. Este efecto es más notable en el área de manejo de colas, donde la colmatación de la cuenca de la quebrada La Palestina modifica el flujo que antes se dirigía hacia el interior de la cuenca, en sentido norte, hacia el río Nus. Sin embargo, es importante señalar que en el diseño y desarrollo de estos depósitos se incorporan elementos de control hidráulico, como filtros, cunetas y capas compactadas, los cuales están diseñados para redirigir el flujo superficial y limitar tanto la infiltración como el flujo subterráneo a través de estos materiales.

Con respecto a las modificaciones resultantes del desarrollo del pit, no se observan variaciones importantes en la dirección del flujo en las zonas más próximas a este. Esto se explica porque, de acuerdo con los resultados del modelo numérico, los abatimientos ocasionados por el pit en las capas superficiales son muy localizados y no se extienden de manera significativa hacia las áreas circundantes.

Por otro lado, en la Figura 5.1.6.285 se presentan los abatimientos calculados para la capa 1 en el año 2038, junto con la ubicación de los puntos de agua caracterizados como manantiales, con el fin de evaluar los posibles impactos que puede ocasionar el abatimiento de agua subterránea sobre estos. De acuerdo con los resultados, los puntos M108 y M109 serían potencialmente afectados por el avance minero, debido a su cercanía al pit y a la magnitud del cono de abatimiento que se concentró principalmente en esta zona.

Fuera del área del pit, los abatimientos modelados son predominantemente menores a 0,3 m, aunque se identifican sectores con abatimientos ligeramente superiores a 1 m hasta una distancia aproximada de 200 m, por lo que no se prevén afectaciones significativas sobre los manantiales restantes, ya que abatimientos de esta magnitud pueden atribuirse a fluctuaciones estacionales o a la incertidumbre propia del modelo.

De igual forma, se destaca que los puntos M250, M128 y M105 se encuentran a menos de 100 m del cono de abatimiento; por lo tanto, aunque no se ubiquen dentro del área de afectación, se recomienda un seguimiento constante.

Finalmente, se resalta que varios puntos de agua se localizan dentro de las zonas destinadas para el manejo de material. Aunque, de acuerdo con los resultados del modelo numérico, no se verán afectados por los abatimientos asociados al avance del pit, sí se verán comprometidos por el desarrollo del proyecto minero y la ubicación de sus depósitos principales. Entre estos puntos se encuentran: M103, M104, M200, M203, M208, M212, M213, M219, M220, M226, M229, M230, M233, M242, M84, M85, M86, M87, M88, M89, M90, M91, M216, M217, M83 y M228.

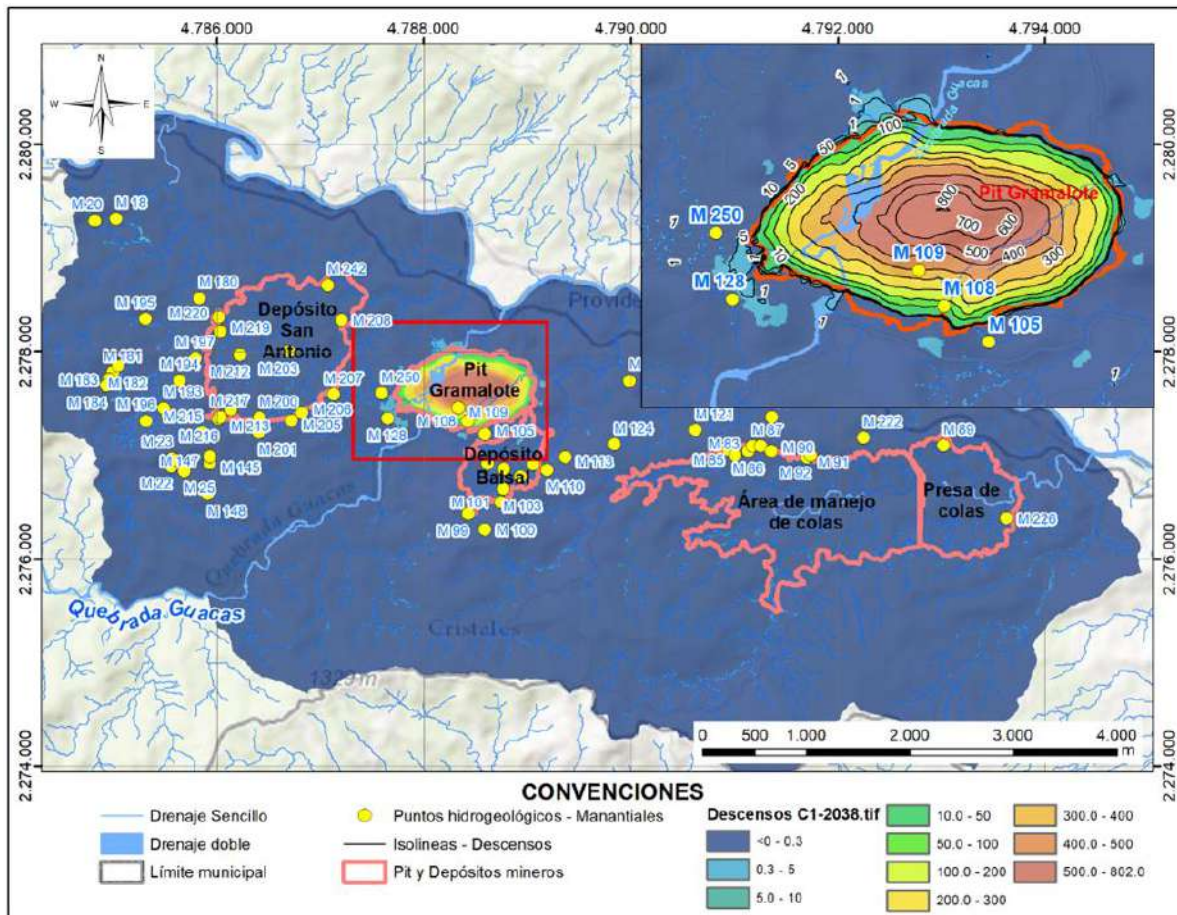


Figura 5.1.6.285 Manantiales potencialmente afectados por el abatimiento de aguas subterráneas

Fuente: (SHI SAS, 2025)

En relación con la quebrada Guacas, teniendo en cuenta la obra de desviación proyectada y la extensión tanto de las obras asociadas al Pit como del cono de descensos máximos resultantes en la capa 1 (capa conectada con las corrientes superficiales), se obtiene la superposición de dichas áreas con la cuenca natural de la quebrada Guacas, para estimar los potenciales impactos sobre los flujos superficiales y subterráneos de la cuenca. En la Tabla 5.1.6.110 se obtienen los parámetros considerados y los resultados a nivel de áreas y flujos. Se aclara que la partición entre flujo superficial y subterráneo se ha obtenido mediante el índice de Flujo Base (IFB) estimado a partir de la serie diaria de caudales de la estación Caramanta del río Nus, considerando que el río Nus y sus afluentes (incluyendo la quebrada Guacas) mantienen constante esta relación hidrológica. El IFB se ha estimado mediante análisis gráfico y como el equivalente al caudal mínimo recurrente, es decir al asociado al periodo de retorno de 2,33 años siguiendo una función de distribución de probabilidad Gumbel (ver capítulo de Hidrología). Los flujos se han estimado aplicando balance hídrico de largo plazo de acuerdo con el capítulo de Hidrología y las áreas aquí estimadas (Tabla 32).

Tabla 5.1.6.110 Variables y parámetros del análisis de afectación en la quebrada Guacas

Variable o parámetro (unidad)	Valor
Área cuenca (km ²)	64,13
Caudal medio (m ³ /s)	5,163
Índice de Flujo Base (IFB)	39%
Caudal superficial promedio (l/s)	3,140
Caudal subterráneo promedio (l/s)	2,023
Área de la cuenca dentro de la zona de modelación (km ²)	7,04
Área remanente sustrayendo el área del Pit (Km ²)	6,61
Área remanente sustrayendo el área descensos (km ²)	6,59
Diferencia de área por flujos superficiales (km ²)	0,43
Diferencia de área por flujos subterráneos (km ²)	0,45
% de cambio de áreas de flujos superficiales	0,68%
% de cambio de áreas de flujos subterráneos	0,70%
Reducción De flujos superficiales (m ³ /s)	0,017
Reducción de flujos subterráneos (m ³ /s)	0,011
% de cambio de flujos superficiales	0,54%
% de cambio de flujos subterráneos	0,56%

Fuente: SHI S.A.S., (2025)

Se concluye que a nivel de flujos superficiales la cuenca de la quebrada Guacas podría tener una potencial pérdida de 17 l/s para la situación más crítica del desarrollo del proyecto (efecto acumulado del desarrollo de las obras del Pit), lo que represente un 0.54% de reducción del caudal superficial promedio de dicha quebrada hasta su descarga en el río Nus, a nivel de flujos subterráneos la cuenca de la quebrada Guacas podría tener una potencial pérdida de 11 l/s para la misma situación ya expuesta, representando un 0.56% de reducción del caudal subterráneo (flujo base) de dicha quebrada hasta su descarga en el río Nus.

Es importante mencionar que, dado que el traslado del cauce de la quebrada Guacas se daría hacia la quebrada San Antonio, el área aportante de dicha quebrada suple la totalidad de los caudales de reducción en el componente superficial, y en el componente subterráneo también puede suplirlo en función del nivel de revestimiento del canal (que varía según el tipo de sección y tramo del canal por condiciones constructivas y morfométricas fluviales de acuerdo con el PTO).

5.1.6.5.9 Análisis de sensibilidad

El modelo numérico de flujo subterráneo ha sido evaluado bajo diferentes configuraciones de parámetros, lo cual ha permitido obtener el conjunto de parámetros más representativos que se ajuste al Modelo Hidrogeológico Conceptual, a las descripciones de las obras del PTO y que genere estabilidad numérica y valores consistentes. En la Tabla 5.1.6.11 se resume un conjunto de variaciones realizadas a los parámetros más significativos del modelo, teniendo por variable de evaluación principal el caudal, ya sea de ingreso a obras subterráneas como el Pit y el túnel, así como de filtración desde las obras superficiales. Las variaciones se realizaron en los años extremos del PTO, es decir en el año inicial (2029) y en el año final (2038)

Tabla 5.1.6.111 Síntesis de la variación de parámetros y los resultados de la sensibilidad de las variables frente a dichos parámetros

Parámetro	Rango de variación del parámetro		Variable de evaluación	Rango de variación de la variable de evaluación		Observación
	Mínimo	Máximo		Mínimo	Máximo	
Conductancia del túnel (1/d)	0,001	0,05	Caudal de ingreso al túnel (l/s)	4,96	109,4	cuatro simulaciones, dos intermedias
Conductancia de salida las paredes del Pit (1/d)	2	50	Caudal de ingreso al Pit año 2038 (l/s)	199,5	500	Tres simulaciones, una intermedia
Conductividad hidráulica de las capas más profundas (m/d)	0,00023	0,0023	Estabilidad numérica y convergencia	Inestabilidad y no convergencia	Convergencia y resultados coherentes	cuatro simulaciones, dos intermedias, solo en la máxima se genera convergencia
Conductancia de entrada en las paredes del Pit (1/d)	0,0001	0,1	Estabilidad numérica y convergencia	Inestabilidad y no convergencia	Convergencia y resultados coherentes	Conceptualmente debería ser cero, pero numéricamente no resulta válido para convergencia
Conductividad hidráulica de los depósitos superficiales (m/d)	0,02	0,475	Caudales potenciales de filtración año 2029 (l/s)	68	534	cuatro simulaciones, dos intermedias

Fuente: (SHI SAS, 2025)

BIBLIOGRAFIA

Agencia Internacional de Energía Atómica. (1981). *Statistical Treatment of Enviromental Isotope Data in Precipitation*. Austria: Technical Reports Series No. 206.

Álvarez-Villa, O. D. (2017). *MODELOS DE USO CONJUNTO DE AGUAS SUPERFICIALES Y SUBTERRÁNEAS*. Unidad 6: Modelos de párametros distribuidos. Medellín , Colombia.

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. (2023). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (24^a ed.). Washintong, DC: American Public Health Association.

Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (1991). *Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport* (Primera ed.). Academic Press.

Anderson, M. P., Woessner, W. W., & Hunt, R. J. (2015). *Applied groundwater modeling: simulation of flow and advective transport* (Segunda ed.). London: Elsevier.

ANLA. (2016). *Términos de referencia para la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental – EIA Proyectos de Explotación Minera*. Bogotá.

Barrera de Calderón, M. L. (2010). Caracterización Hidrogeoquímica e Isotópica de Áreas de Recarga en el Acuífero de San Salvador.

Chica. (2012). *Elaboración del modelo estructural para un área de 59 km² localizados en las zonas de influencia directa e indirecta proyecto gramalote, localizado en el municipio san roque, Antioquia, Colombia*.

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill International editions.

Custodio, E., & Llamas, M. (1975). *Hidrología Subterránea*. Barcelona: Editorial Omega, 2 vol.

DHI. (2025). Training Manual FEFLOW 10.0: Groundwater modeling with Feflow 10.0.

Diersch, H. (2014). *Finite Element Modeling of Flow, Mass and Heat Transport in Porous and Fractured Media*. Berlin: Springer.

Domenico, P. A., & Schwartz, F. W. (1997). *Physical and Chemical Hydrogeology* (Segunda edición ed.). John Wiley E Sons, Inc.

Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall.

Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., & Paris, M. (2002). *Groundwater Quality Protection: A Guide for Water Utilities, Municipal Authorities, and Environment Agencies*. Banco Mundial.

Freeze Cherry. (1979). *Aguas subterráneas*. Prentice-Hall Inc., Englewood Cliffs, vol. 7632, 604.

Golder. (2013). *TMF Three-Dimensional Hydrogeology Modeling (Feflow)*.

Golder. (2013). *TMF Three-Dimensional Hydrogeology Modeling (Feflow)*.

Golder. (2020). *Memorando Tecnico N° de Referencia 20-06-01_20146474. REQUERIMIENTO LICENCIA - POTENCIAL DE GENERACIÓN DE DRENAJE ÁCIDO, PROYECTO GRAMALOTE, COLOMBIA*.

Golder Associates. (2017). *EVALUACIÓN HIDROGEOLÓGICA - DOCUMENTO TÉCNICO. Informe 1797151179_4300-2_087_TR_0.*

Golder Associates Perú S.A. (2013). *TMF Dam Design Analyses Report.*

Golder Associates Perú S.A. (2020). *Hydrogeological conceptual model - Gramalote feasibility stage.* Lima.

Golder Associates Perú S.A. (2020). *Hydrogeological conceptual model - Gramalote feasibility stage.*

Golder Associates Perú S.A. (2021). *Hydrogeological Numerical Model - Gramalote Feasibility Stage.*

Gonfiantini, R., & Araguas, L. (1988). *Los Isótopos Ambientales en el Estudio de la Intrusión Marina.* Organismo Internacional de Energía Atómica, Granada.

González I, H. (2001). *Memoria Explicativa del Mapa Geológico del Departamento de Antioquia. Escala 1:400.000.* INGEOMINAS, Antioquia, Medellín.

Gramalote. (2016). *San Antonio Plant Location – Geotechnical-Hydrogeological Characterization Factual Report.*

Gramalote Colombia Limited. (2018). *Modificación de Estudio de Impacto Ambiental para el proyecto de minería de oro a cielo abierto denominado "Gramalote".* Medellín.

Hidrogeocol. (2012). *Estudio Hidrogeológico Para la Línea Base del Proyecto Gramalote, en el Municipio de San Roque-Departamento de Antioquia. Informe Técnico de Prefactibilidad. Bogotá, July 2012.*

Hidrogeocol. (2012). *Estudio Hidrogeológico para la Línea Base Del Proyecto Gramalote.*

IAEA/WWO. (2024). *Global Network of Isotopes in Precipitation.* Retrieved from The GNIP Database: <https://nucleus.iaea.org/wiser>

ICONTEC. (2014). *Guía Técnica Colombiana GTC-ISO 30 -Términos y definiciones usados en relación con los materiales de referencia .* Bogotá.

IDEAM. (2013). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la Evaluación Regional del Agua - ERA.* Bogotá, D.C.

IDEAM. (2018). *Estudio Nacional del Agua 2018. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.* 386 p.

Ideam, Invemar. (2021). *Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua.* Bogotá, D.C.

INAP. (2014). *Global acid rock drainage guide GARD Guide.*

Instituto Geológico y Minero de España. (1997). *Guía operativa para la recogida, almacenamiento y transporte de muestras de aguas subterráneas destinadas al análisis químico y bacteriológico. .*

Integral S.A. (2018). *Respuesta de requerimientos de información adicional Modificación de licencia ambiental - I-0010208-GA_Resp_Autos_R00*.

INTEGRAL S.A. (2025). *Modificación de licencia ambiental del proyecto de minería de oro a cielo abierto Gramalote*.

Inteinsa. (2025). *Ensayos geofísicos de refracción sísmica y MASW Zona Planta - Gramalote*.

International Atomic Energy Agency. (2001). *Hidrología a Base de Isótopos Ambientales*.

Intgral S.A. (2018). *Modificación de Licencia Ambiental. I-0010208-GA-ML-R00*.

Kennessey, B. (1930). *Lefolyasi ténnyezok és retencik. Vizugy, Kuziemények*.

Knight Piésold. (2013). *Tailings Management Facility (TMF) / Waste Rock Facility (WRF) Front-end Engineering Design (FEED) Hydrogeology Evaluation Report*.

Lenderer, F. W. (2020). Extending the Global Mass Change Data Record: GRACE Follow-On Instrument and Science Data Performance. *Geophysical Research Letters*.

Londoño Aguirre, R. D. (2015). *Definición de un Volumen Elemental de Referencia y Estimación de un Modelo de Conductividades Hidráulicas Equivalentes para un Sistema Acuífero en un Medio Fracturado*. Medellín: Tesis de Maestría - Universidad Nacional de Colombia.

Lozano Hernández, B. L., Marín Celestino, A. E., Martínez Cruz, D. A., & Ramos Leal, A. J. (2024). A Systematic Review of the Current State of Numerical Groundwater Modeling in American Countries: Challenges and Future Research. *Hydrology*, 11(179), 1-18.

MADS. (2014). *Guía técnica para la formulación de planes de ordenamiento del recurso hídrico*. Bogotá: Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible.

Martonne, E. (1926). *Aréisme et Indice d'aridité. Paris: Comptes Rendus de L'Academy of Science*.

MEND. (2009). *Report, Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geological Material MEND*.

Microlab Industrial. (2017, Septiembre 28). Retrieved from <https://www.microlabindustrial.com/blog/orp-el-otro-potencial-en-el-agua>

pHase Geochemistry Inc. (2013). *Geochemical Characterization, Gramalote Project*.

Ribera, F. (2016). Salinidad y aguas subterráneas. *ResearchGate*.

S.C.S. (1964). *Hydrology, National Engineering Handbook*. Washington D.C.: Soil Conservation Service, U.S.D.A.

SHI. (2025). *REPORTE DEL DIAGNÓSTICO Y MONITOREO DE NIVELES PIEZOMÉTRICOS PARA EL PROYECTO MINERO GRAMALOTE*.

SHI S.A.S. (2025). *Reporte del diagnóstico y monitoreo de niveles piezométricos, Monitoreo de isótopos ambientales y muestreo hidroquímico para el Proyecto Minero Gramalote Colombia.*

SHI SAS. (2025). *ACTUALIZACIÓN DEL MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL Y NUMÉRICO PARA EL PROYECTO MINERO GRAMALOTE.* Medellín: GRAMALOTE COLOMBIA LIMITED.

Tardi, A., & Vittorini, S. (1977). *Il calcolo del coefficiente di deflusso su basi fisiografiche.*

Toth, J. (1963). A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, 68, 4795-4811.

UNESCO - IAEA. (2001). *Environmental isotopes in the hydrological cycle. Principles and applications*

Vargas, M. (2010). *Propuesta metodológica para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación.* Bogotá: Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial, Viceministerio de Ambiente, Grupo de Recurso Hídrico.

Velez O., M. V., & Rhenals G., R. L. (2008). Determinación de la Recarga con Isótopos Ambientales en los Acuíferos de Santa Fe de Antioquia.

Vélez, M. V. (2004). *Hidráulica de aguas subterráneas.* Medellín: Escuela de Geociencias y Medio Ambiente. Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín.

WSP. (2025). *Actualización del estudio geoquímico, Proyecto Gramalote Proyecto N° 24725192-D-2100-HQ-MEM-00001-1-0.*