



TGI
Grupo Energía Bogotá

AMBIENTAL

3.2.7. HIDROGEOLOGÍA

TABLA DE CONTENIDO

3.	CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA.....	1
3.2	Medio Abiótico.....	1
3.2.7	Hidrogeología.....	1
3.2.7.1	Marco hidrogeológico general.....	1
3.2.7.2	Exploración geofísica.....	4
3.2.7.2.1	Marco Teórico.....	8
3.2.7.2.2	Interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales.....	9
3.2.7.2.2.1	Unidades Geoeléctricas.....	17
3.2.7.2.2.2	Perfiles Geoeléctricos.....	18
3.2.7.3	Inventario de puntos de agua.....	21
3.2.7.4	Caracterización hidrogeológica de las Unidades Geológicas.....	23
3.2.7.4.1	Unidad A3: Qca - Depósitos Coluvio aluviales, Qfl - Depósitos de lahar.....	26
3.2.7.4.2	Unidad A4: Qal - Depósitos aluviales recientes, Qfl - Depósitos Fluvio-lacustres, Qpi - Depósitos de plano de inundación.....	27
3.2.7.4.3	Unidad B2: Kvc - Complejo Quebradagrande (conjunto volcánico), Kies - Complejo Arquía-Esquistos de Lisboa-Palestina.....	27
3.2.7.5	Dirección de flujo.....	28
3.2.7.6	Zonas de recarga y descarga.....	30
3.2.7.6.1	Zonas de recarga.....	30
3.2.7.6.1.1	Recarga regional.....	30
3.2.7.6.1.2	Recarga local por infiltración en suelo – Recarga potencial.....	30
3.2.7.6.2	Zonas de descarga.....	37
3.2.7.7	Vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación.....	38
3.2.7.7.1	Método GOD.....	40
3.2.7.7.1.1	Ponderación del método.....	41
3.2.7.8	Caracterización hidrogeoquímica.....	44
3.2.7.8.1	Balance Iónico.....	45
3.2.7.8.2	Diagrama de Piper.....	46
3.2.7.8.3	Diagrama de Stiff.....	53
3.2.7.8.4	Índice de saturación de Langelier.....	54
3.2.7.9	Modelo Hidrogeológico Conceptual.....	55
3.2.7.9.1	Clima.....	57
3.2.7.9.2	Topografía y relieve.....	57
3.2.7.9.3	Geología.....	57
3.2.7.9.4	Hidrología.....	58
3.2.7.9.5	Estimación de recarga (Balance Hídrico en Suelo).....	58
3.2.7.9.5.1	Coefficiente de infiltración.....	59
3.2.7.9.5.2	Fracción que infiltra por la textura del suelo.....	63
3.2.7.9.5.3	Humedad del suelo (Hs).....	64
3.2.7.9.6	Recarga del acuífero.....	68
3.2.7.9.7	Zonas de recarga.....	72
3.2.7.9.7.1	Recarga regional.....	72
3.2.7.9.7.2	Recarga local por infiltración en suelo.....	72
3.2.7.9.8	Zonas de descarga.....	73
3.2.7.9.9	Direcciones de flujo.....	73
3.2.7.9.10	Unidades hidrogeológicas en el área de influencia.....	73
3.2.7.9.10.1	Unidad A3: Qca - Depósitos Coluvio aluviales, Qfl - Depósitos de lahar. ...	73
3.2.7.9.10.2	Unidad A4: Qal - Depósitos aluviales recientes, Qfl - Depósitos Fluvio-lacustres, Qpi - Depósitos de plano de inundación.....	73

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	I

3.2.7.9.10.3	Unidad B2: Kvc - Complejo Quebradagrande (conjunto volcánico), Kies - Complejo Arquía-Esquistos de Lisboa-Palestina	74
3.2.7.9.11	Vulnerabilidad	74
3.2.7.9.12	Hidrogeoquímica	74
BIBLIOGRAFÍA.....		75

LISTADO DE FIGURAS

Figura 3-1	Provincias hidrogeológicas de Colombia.....	2
Figura 3-2	Mapa de permeabilidad regional para el área de influencia.....	3
Figura 3-3	Distribución de los Sondeos eléctricos verticales en el área de influencia	5
Figura 3-4	Disposición simétrica de electrodos, tipo Schlumberger	8
Figura 3-5	Rangos de resistividad para correlaciones litológicas e hidrogeológicas	10
Figura 3-6	Valores típicos de resistividad para diferentes litologías	11
Figura 3-7	Ubicación del perfil geoelectrónico trazado para el área de influencia	19
Figura 3-8	Perfil geoelectrónico A – A'	20
Figura 3-9	Puntos de agua subterránea en el área de influencia	23
Figura 3-10	Distribución de las unidades hidrogeológicas en el área de influencia del estudio	28
Figura 3-11	Direcciones de flujo a nivel local en el área de influencia del estudio.....	29
Figura 3-12	Zonas de descarga y potencial de recarga a unidades acuíferas	38
Figura 3-13	Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca	41
Figura 3-14	Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación	44
Figura 3-15	Diagrama de Piper	47
Figura 3-16	Diagrama de Piper - Definición de los tipos de aguas.....	48
Figura 3-17	Secuencia de Chevotareb	49
Figura 3-18	Resultados del Diagrama de Piper	51
Figura 3-19	Gráfica de distribución con base en los resultados del Diagrama de Piper	52
Figura 3-20	Resultados del Diagrama de Stiff	53
Figura 3-21	Precipitación Vs Recarga potencial	71

LISTADO DE TABLAS

Tabla 3-1	Información secundaria incorporada al estudio de hidrogeología	4
Tabla 3-2	Información secundaria incorporada al estudio de hidrogeología	4
Tabla 3-3	Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's).....	6
Tabla 3-4	Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV01.....	12
Tabla 3-5	Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV02.....	13
Tabla 3-6	Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV03.....	14
Tabla 3-7	Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV04.....	15

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	II

Tabla 3-8 Unidades geoelectricas del área de influencia	17
Tabla 3-9 Inventario de Puntos de Agua para el Área de Influencia del estudio	22
Tabla 3-10 Clasificación unidades hidrogeológicas	24
Tabla 3-11 Clasificación del terreno según T (m ² /día).....	25
Tabla 3-12 Clasificación de la conductividad hidráulica K (m/día) según el terreno	25
Tabla 3-13 Características hidráulicas de las unidades geológicas dentro del área de influencia del proyecto	26
Tabla 3-14 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de pendiente	31
Tabla 3-15 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de suelo	31
Tabla 3-16 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de roca	32
Tabla 3-17 Ponderación de la posibilidad de recarga según la cobertura vegetal	32
Tabla 3-18 Ponderación de la posibilidad de recarga según uso del suelo	33
Tabla 3-19 Ponderación de la posibilidad de recarga según los porcentajes de pendiente en los que se encuentra localizado el área de influencia del estudio	34
Tabla 3-20 Ponderación de la posibilidad de recarga según las características del suelo en el que se encuentra localizado el área de influencia del estudio	34
Tabla 3-21 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipos de roca o depósitos no consolidados en los que se encuentra localizado el área de influencia	35
Tabla 3-22 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de cobertura vegetal en la que se encuentra localizado el área de influencia del estudio.....	35
Tabla 3-23 Ponderación de la posibilidad de recarga según uso actual de los suelos en los que se encuentra localizado el área de influencia del estudio.....	36
Tabla 3-24 Potencial de recarga hídrica	37
Tabla 3-25 Rangos de vulnerabilidad método GOD	42
Tabla 3-26 Resultado de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación	43
Tabla 3-27 Balance iónico en la muestra evaluada	46
Tabla 3-28 Balance iónico aceptable a partir de la conductividad eléctrica	46
Tabla 3-29 Contenido en meq/L de aniones y cationes principales en la muestra evaluada.....	50
Tabla 3-30 Resumen clasificación hidrogeoquímica del agua subterránea	52
Tabla 3-31 Cálculo del Índice de Saturación de Langelier	55
Tabla 3-32 Intersección de lluvia en el follaje	61
Tabla 3-33 Componente por acción de la pendiente (Kp)	61
Tabla 3-34 Calificación de Kp para el área de influencia.....	61
Tabla 3-35 Componente por acción de la cobertura vegetal (Kv)	62
Tabla 3-36 Profundidad de raíces por tipo de cultivo.....	62
Tabla 3-37 Calificación según cobertura vegetal para el área de influencia	62

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	III

Tabla 3-38 Calificación y parámetros de los suelos en el área de influencia	64
Tabla 3-39 Cálculo de la evapotranspiración	67
Tabla 3-40 Coeficientes de humedad	67
Tabla 3-41 Resumen estimación de la recarga	70
Tabla 3-42 Recarga real.....	71

LISTADO DE ANEXOS

Anexo H GEOSFERICO

4. Hidrogeología

- 4.1 Sondeos Eléctricos Verticales
- 4.2. FUNIAS
- 4.3. Balance Hídrico En Suelos
- 4.4. Pruebas De Infiltración

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	IV

3. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE INFLUENCIA

3.2 Medio Abiótico

3.2.7 Hidrogeología

La hidrogeología se define como una ciencia de carácter multidisciplinar, donde se combinan los conocimientos de geología y química con el estudio del flujo en medio poroso, que tiene como objetivo el conocimiento y la evaluación de los recursos hídricos existentes en el subsuelo, la posibilidad de su captación y de su explotación en un contexto de gestión sostenible. Esto incluye el análisis del movimiento del agua, el conocimiento de sus propiedades y composición química, el estudio de su origen dentro del ciclo hidrológico, y la consideración de sus usos potenciales (Cruz San Julián, 2018).

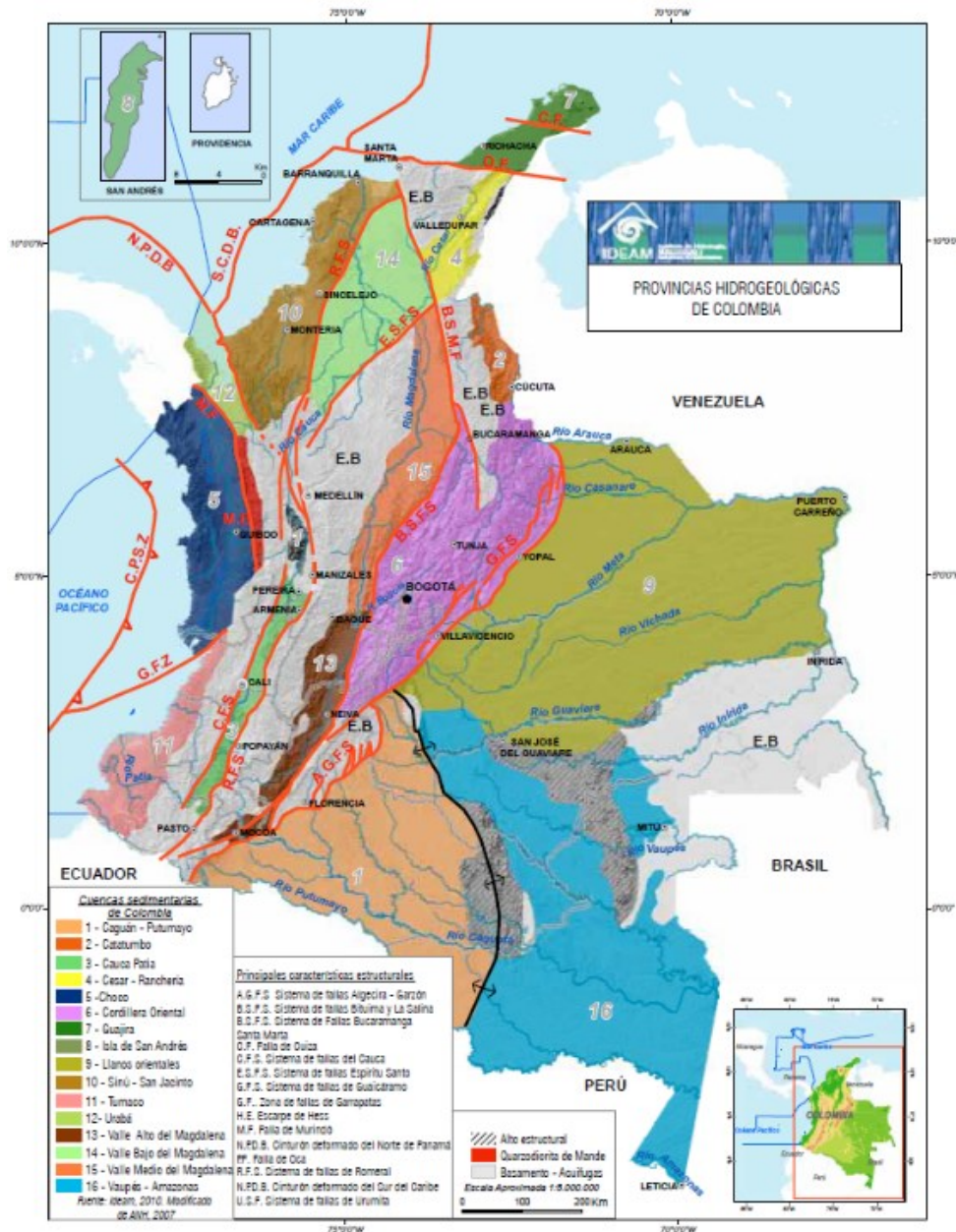
En este componente se presenta la caracterización de las unidades hidrogeológicas, el comportamiento del agua subterránea y la distribución en espesor y profundidad promedio de cada una de las unidades acuíferas dentro del área de estudio. La determinación de las unidades hidrogeológicas se fundamentó en la identificación, delimitación y caracterización composicional de las formaciones geológicas, información complementada con el correspondiente inventario de puntos de agua subterránea y cuatro (04) Sondeos Eléctricos Verticales (SEV); con lo cual fue posible determinar el tipo de acuífero, la clasificación de acuerdo a la productividad, dirección de flujo, zonas y mecanismos de recarga y descarga de los acuíferos, entre otros aspectos.

3.2.7.1 Marco hidrogeológico general

De acuerdo con el Estudio Nacional del Agua (IDEAM, 2014) el área de estudio se ubica entre la provincia hidrogeológica PM3 Cauca – Patía y la zona del país conformadas por macizos de rocas cristalinas o volcánicas de la cordillera central (Figura 3-1), en esta zona, se localizan provincias hidrogeológicas de tipo montañas e intramontañas, las cuales se encuentran en la zona Andina y sus valles intramontanos. Hacia el norte del área de estudio se encuentra el sistema acuífero SAM6.2 – Sistema Acuífero Santagueda.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	1
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	---

Figura 3-1 Provincias hidrogeológicas de Colombia



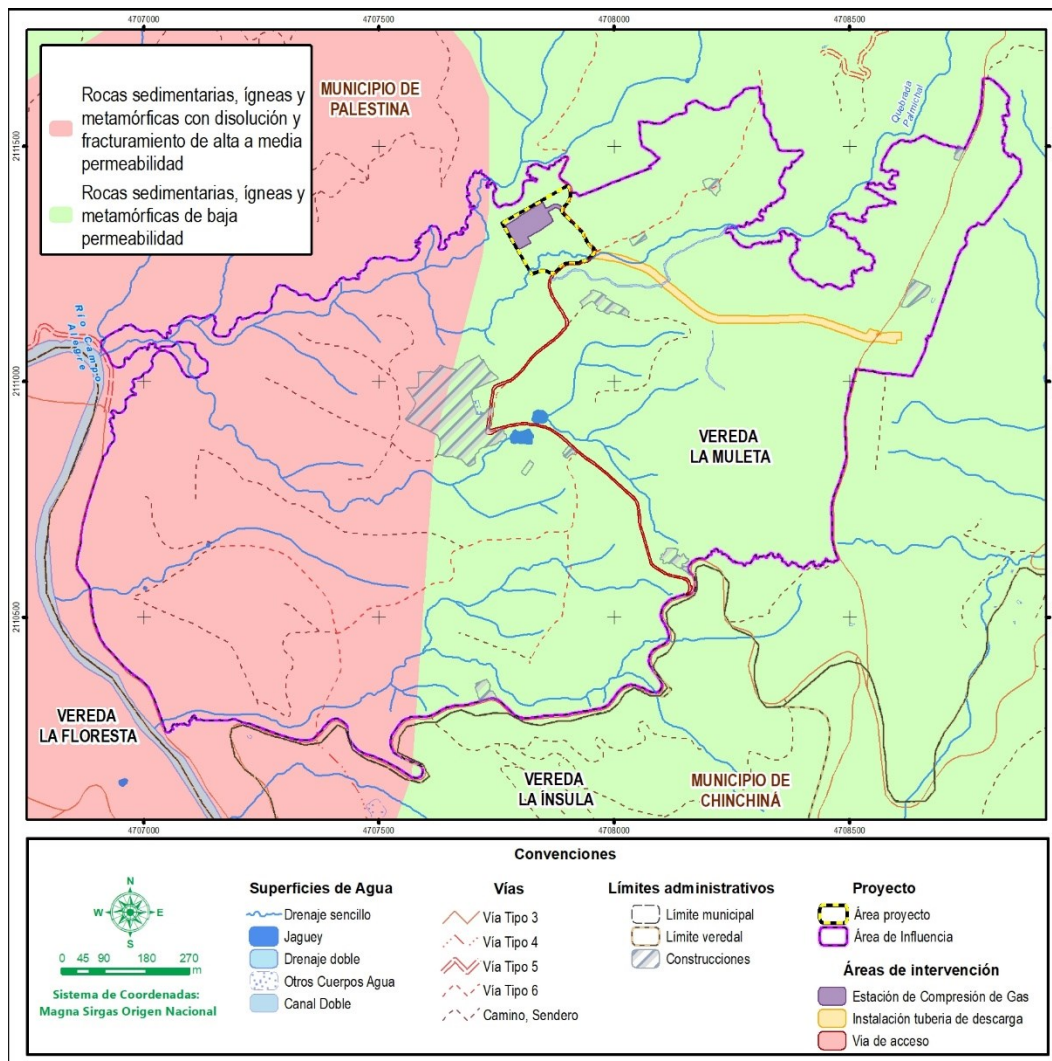
Fuente: IDEAM, 2010.

En la Figura 3-1 las zonas de color gris concuerdan con áreas integradas por rocas ígneas y metamórficas que han sido clasificadas como acuíferas. Sin embargo, se conocen sectores (en los departamentos de Caldas, Cauca y Nariño, entre otros) en los cuales dichas rocas están fracturadas y pueden constituir acuíferos de naturaleza local.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	2

En la “Memoria Técnica Plancha 5-08 Mapa de Permeabilidades de Colombia en Escala 1:500.000” (INGEOMINAS, 2010) se identifica que el área de influencia del proyecto se encuentra localizada en zonas con permeabilidades de tipo B y D correspondientes con unidades geológicas fracturadas o con disolución y unidades geológicas sin capacidad de absorber o transmitir agua respectivamente (Figura 3-2).

Figura 3-2 Mapa de permeabilidad regional para el área de influencia



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Como punto de partida para la caracterización hidrogeológica del área de influencia del presente estudio, se realizó la revisión de información existente para la misma. Para ello se llevó a cabo una consulta en el Motor de Integración de Información Geocientífica (MIIG)

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	3

del Servicio Geológico Colombiano (SGC), resultando en la identificación de los mapas, memorias y estudios presentados en la Tabla 3-1.

Tabla 3-1 Información secundaria incorporada al estudio de hidrogeología

ID	DESCRIPCIÓN	AUTOR	FECHA DE PUBLICACIÓN
1	Cartografía Geológica de la Plancha 205 Chinchiná	INGEOMINAS	1998
2	Memoria Explicativa de la Geología de la Plancha 205 Chinchiná	INGEOMINAS	2001
3	Mapa de Permeabilidades de Colombia	INGEOMINAS	2008
4	Memoria Técnica Plancha 5-08 Mapa de Permeabilidades de Colombia en Escala 1:500.000	INGEOMINAS	2010
5	Estudio Nacional del Agua 2010	Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial - IDEAM	2010
6	Estudio Nacional del Agua 2022	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible – IDEAM	2022

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Toda la información secundaria obtenida de los componentes evaluados fue revisada en detalle, con el fin de realizar un acercamiento a las características generales del área del proyecto y consolidar información de referencia a nivel documental que sirvió como base en la planeación de las actividades desarrolladas a lo largo del estudio.

Durante la ejecución del trabajo de campo se desarrollaron las actividades que se relacionan en la Tabla 3 2.

Tabla 3-2 Información secundaria incorporada al estudio de hidrogeología

COMPONENTE	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD
Hidrogeología	Inventario de puntos de agua subterránea en el área de influencia del estudio, empleando el FUNIAS (INGEOMINAS, MADS, IDEAM, 2009).	1
	Prospección geoelectrica mediante la ejecución de Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).	4
	Pruebas de infiltración para estimación de recarga real.	5
	Muestreo para caracterización fisicoquímica y bacteriológica de aguas subterráneas.	1

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

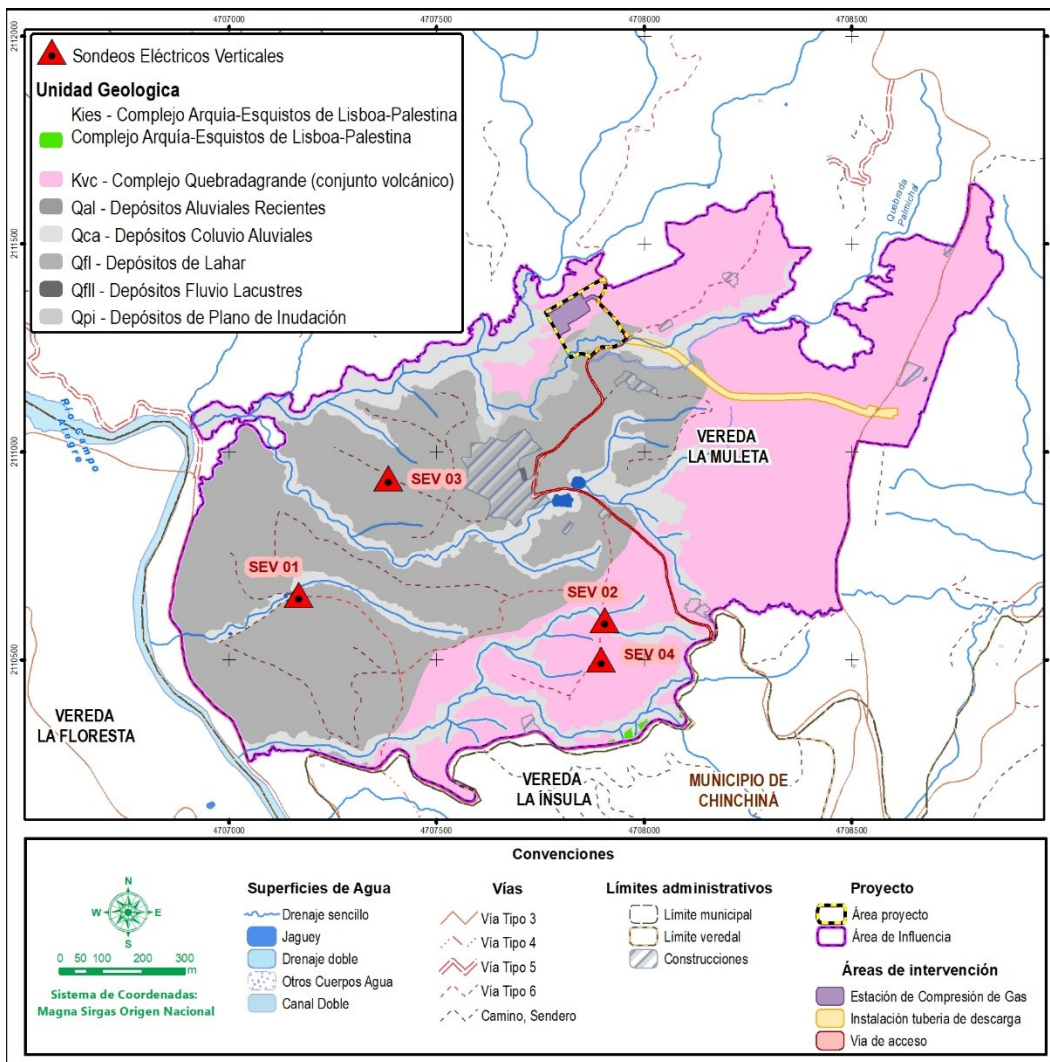
3.2.7.2 Exploración geofísica

La prospección geoelectrica para el área de Influencia se llevó a cabo mediante cuatro (04) sondeos eléctricos verticales – SEV's, ubicados a partir de la distribución en superficie de las unidades geológicas aflorantes y sobre terrenos planos con materiales no consolidados,

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología
			PO-CO-2024-008	Ver: 01

lo que ayudó a poder introducir completamente y de forma correcta los electrodos de voltaje y potencial. La extensión máxima alcanzada fue de 175 m (AB/2). En la Figura 3-3 y en la Tabla 3-3 se aprecia la información de los puntos donde se realizaron los Sondeos Eléctricos Verticales y el registro fotográfico de la ejecución de estos dentro del Área de Influencia del estudio. En ANEXOS\H. GEOSFERICO\4 Hidrogeología\4.1. Sondeos Eléctricos Verticales, se presentan los datos de campo y los ejecutables en software ZondIP1D de los SEV's realizados.



Figura 3-3 Distribución de los Sondeos eléctricos verticales en el área de influencia





Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	5

Tabla 3-3 Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV's)

CÓDIGO	VEREDA	UNIDAD GEOLÓGICA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN NACIONAL		COTA (m.s.n.m)	FOTOGRAFÍA
			ESTE	NORTE		
SEV 01	La Muleta	Depósitos de Lahar (Qfl)	4.707.169	2.110.656	1.288,67	
SEV 02	La Muleta	Complejo Quebradagrande (Kvc)	4.707.906	2.110.595	1.339,13	

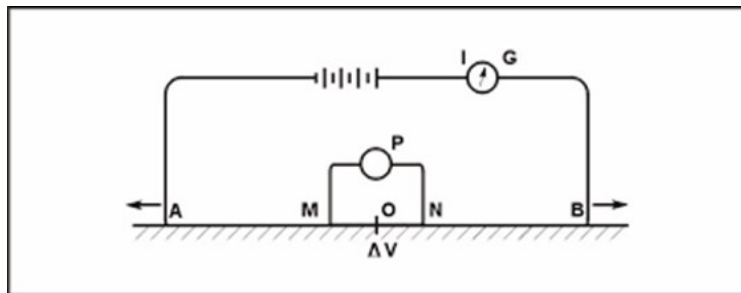
CÓDIGO	VEREDA	UNIDAD GEOLÓGICA	COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN NACIONAL		COTA (m.s.n.m)	FOTOGRAFÍA
			ESTE	NORTE		
SEV 03	La Muleta	Depósitos de Lahar (Qfl)	4.707.384	2.110.936	1.329,20	
SEV 04	La Muleta	Complejo Quebradagrande (Kvc)	4.707.897	2.110.501	1.351,94	

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.7.2.1 Marco Teórico

El método geoelectrico empleado consiste en inducir al terreno una corriente eléctrica para crear así un campo eléctrico, esto, con el fin de medir los contrastes de voltaje resultantes de acuerdo con las características físicas del suelo. Se utilizan cuatro (4) electrodos, distanciados simétricamente de un centro común (disposición de electrodos tipo Schlumberger); dos (2) de corriente A y B y dos (2) de voltaje M y N (Figura 3-4). A través de los electrodos A-B se hace circular la corriente, produciéndose el campo eléctrico cuya diferencia de potencial se mide en dos electrodos centrales M-N.

Figura 3-4 Disposición simétrica de electrodos, tipo Schlumberger



Fuente: Auge., 2008.

Para un medio homogéneo, la resistividad aparente (ρ_{∂}) se obtiene al multiplicar la resistencia R por una constante geométrica K, la cual, depende de la posición relativa de los electrodos entre sí:

$$\rho_{\partial} = \frac{\pi}{4MN} (AB^2 - MN^2) \frac{\Delta V}{I}$$

Con estos datos se construye una curva cuyos ejes son la profundidad ($AB/2$) versus la Resistividad Aparente ($\Omega \cdot m$), la cual, se interpreta dando como resultado una serie de barras que representan los espesores y resistividades de cada una de las capas presentes en el subsuelo.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	8

3.2.7.2.2 Interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales

A continuación, entre las Tabla 3-4 y Tabla 3-7, se presentan los resultados y la interpretación de los sondeos eléctricos verticales (SEV's) realizados durante la fase de campo en el área de influencia. Estos sondeos fueron analizados empleando el software IPI2win, el cual está basado en la metodología de "aproximaciones sucesivas" (Ver ANEXOS\H. GEOSFERICO\4 Hidrogeología\4.1. Sondeos Eléctricos Verticales). Esta metodología consiste en comparar las curvas de campo con curvas sintéticas previamente establecidas por el software, generadas a partir de modelos hipotéticos del mismo. La comparación se realiza hasta cuando las curvas de campo y las sintéticas alcanzan un grado de ajuste predeterminado.

La interpretación de los modelos fue correlacionada con los datos del reconocimiento geológico de campo. A su vez, se realizó el respectivo análisis cuantitativo de los valores obtenidos, asignando a los mismos, a partir de lo presentado en la "Memoria Geofísica plancha 5-13 Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia" (INGEOMINAS, 2003) (Figura 3-5), en la Figura 3-6 se presentan los valores típicos de resistividad para diferentes litologías utilizados también en el análisis de los SEV's; el nombre y características del material se definieron teniendo en cuenta el valor de la resistividad ya unidad geológica donde se hizo el SEV. A cada una de las curvas se le añadió la tabla descriptiva con la definición de los niveles (capas), especificando el espesor, resistividad, unidad y composición.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	9

Figura 3-5 Rangos de resistividad para correlaciones litológicas e hidrogeológicas

Unidad Geológica	Resistividad (Ohm-m)	Litología Principal	Permeabilidad
Depósitos Cuaternarios, Rocas Terciarias y Cretácicas	3 – 15	Arcillas o arcillolitas	Impermeables a poco Permeables
	15 - 30	Limos, arenas limo-arcillas o areniscas limo-arcillosas, intercalaciones de arcillolitas y areniscas con predominio de las primeras	Moderadamente permeables
	30 - 100	Arenas, gravas, areniscas, intercalaciones de areniscas y arcillolitas con predominio de las primeras, conglomerado grano fino a medio	Permeables
	100 - 400	Cantos Rodados, gravas y areniscas de grano grueso, conglomerados, roca alterada	Permeables
	>400	Rocas ígneo-metamórficas o material seco de granulometría gruesa	Permeables o impermeables dependiendo del grado de compactación

Fuente: INGEOMINAS, 2003.

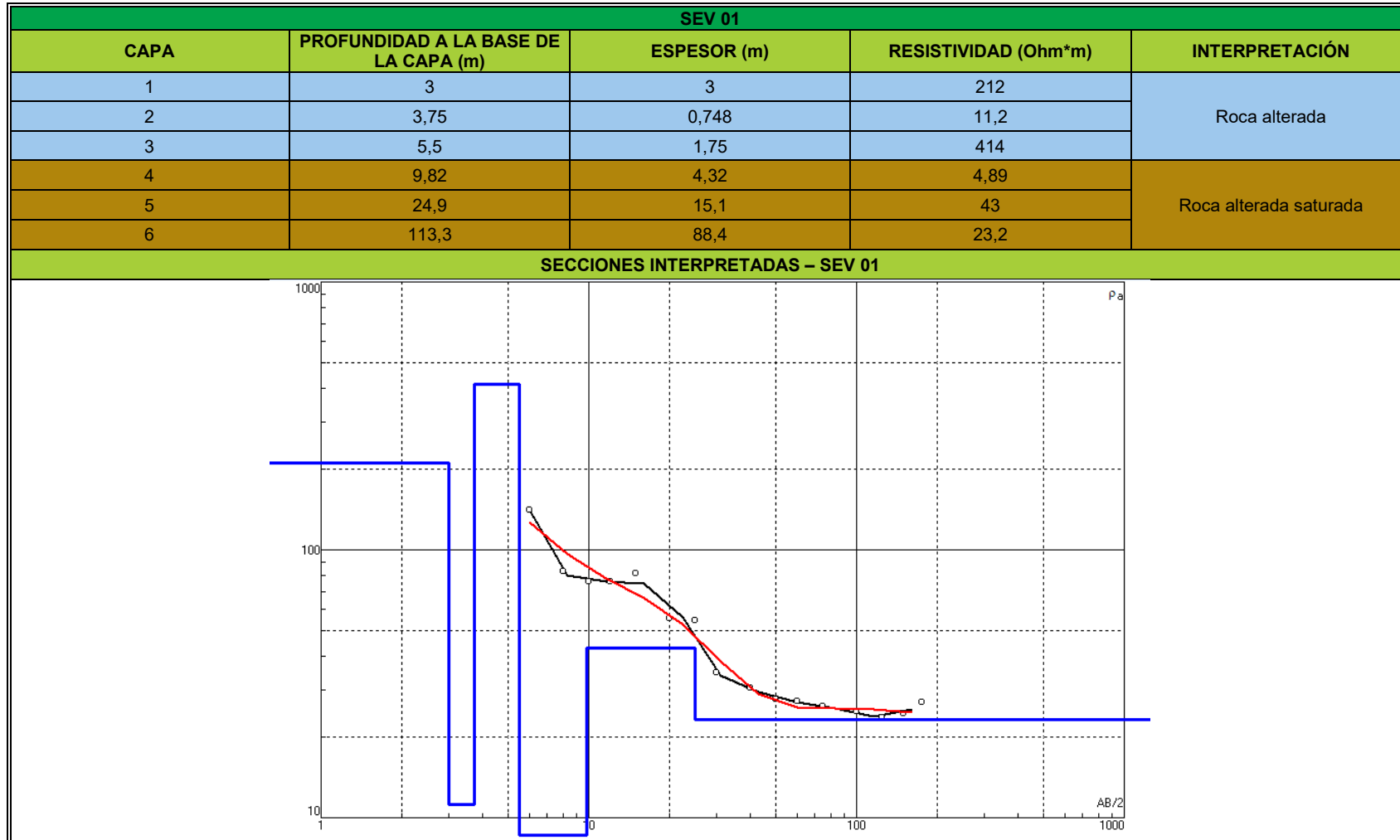
Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	10

Figura 3-6 Valores típicos de resistividad para diferentes litologías

<i>Aguas y rocas</i>	<i>Resistividad (ohm*m)</i>
Agua de mar.....	0.2
Agua de acuíferos aluviales.....	10 – 30
Agua de fuentes.....	50 – 100
Arenas y gravas secas.....	1000 – 10000
Arenas y gravas con agua dulce.....	50 – 500
Arenas y gravas con agua salada.....	0.5 – 5
Arcillas.....	2 – 20
Margas.....	20 – 100
Calizas.....	300 – 10000
Areniscas arcillosas.....	50 – 300
Areniscas cuarcitas.....	300 – 10000
Tobas volcánicas.....	20 – 100
Lavas.....	300 – 10000
Esquistos grafitosos.....	0.5 – 5
Esquistos arcillosos.....	100 – 300
Esquistos sanos.....	300 – 3000
Gneis, granito alterado.....	100 – 1000
Gneis, granito sanos.....	1000 - 10000

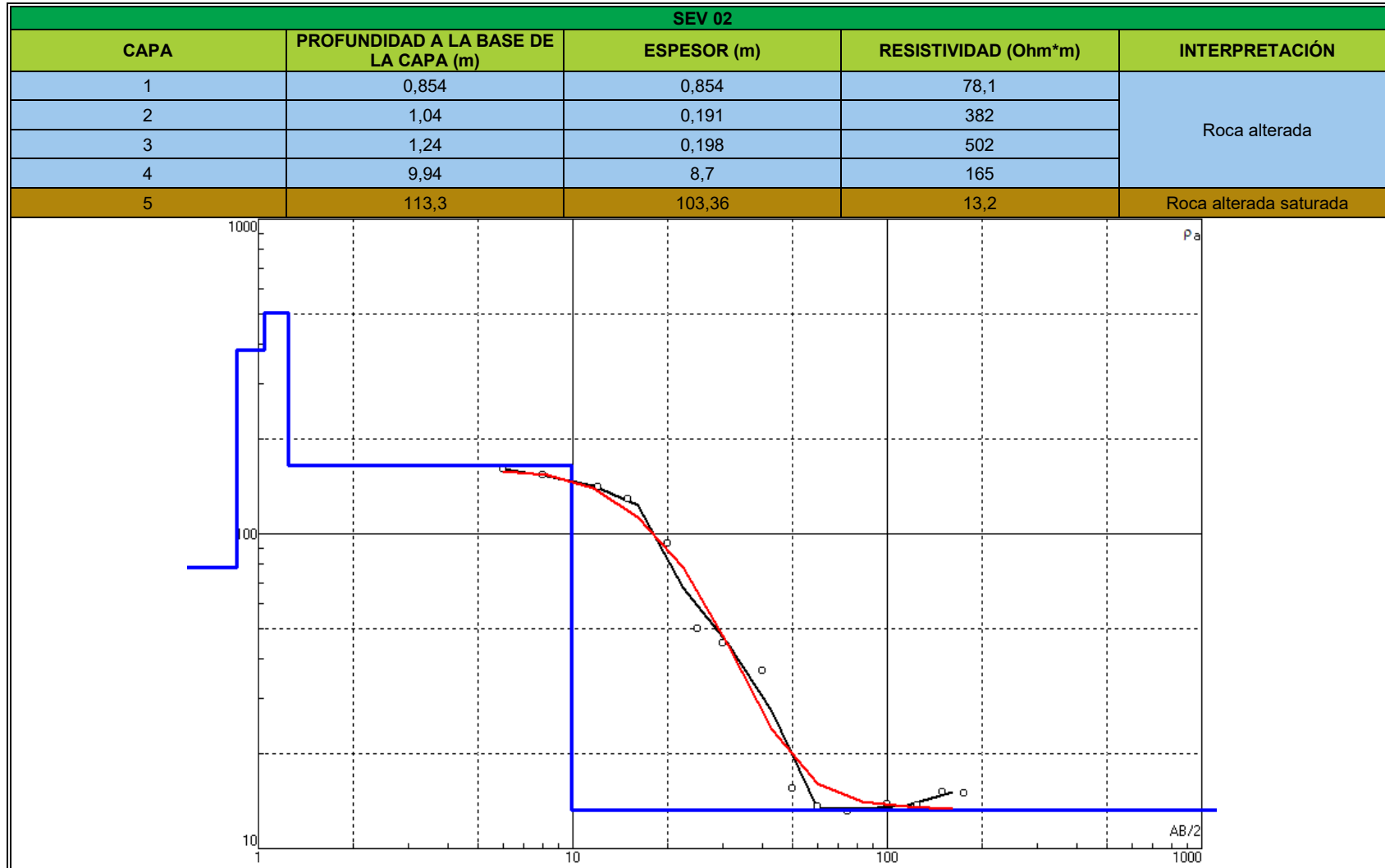
Fuente: Astier, 1975.

Tabla 3-4 Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV01



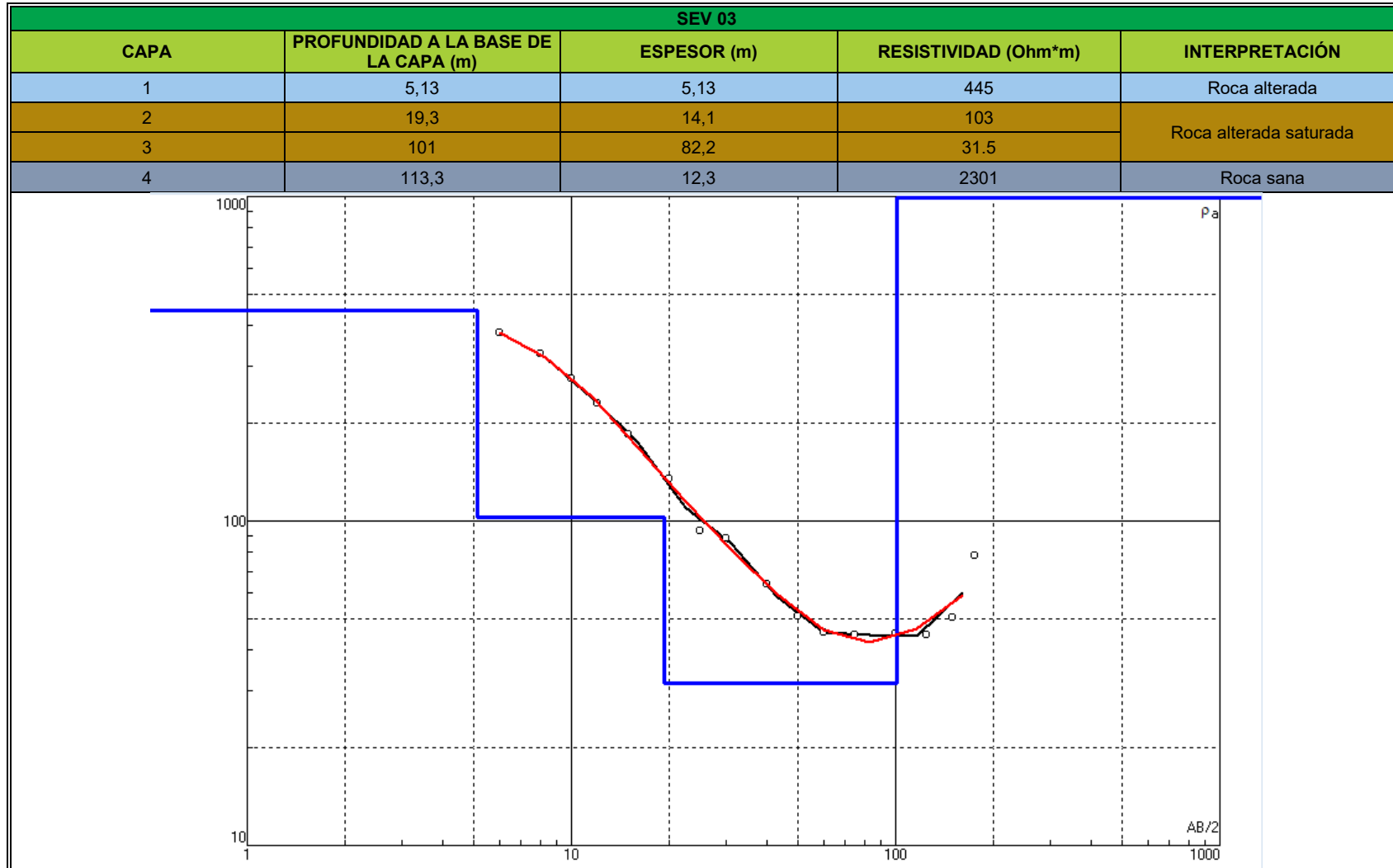
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-5 Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV02



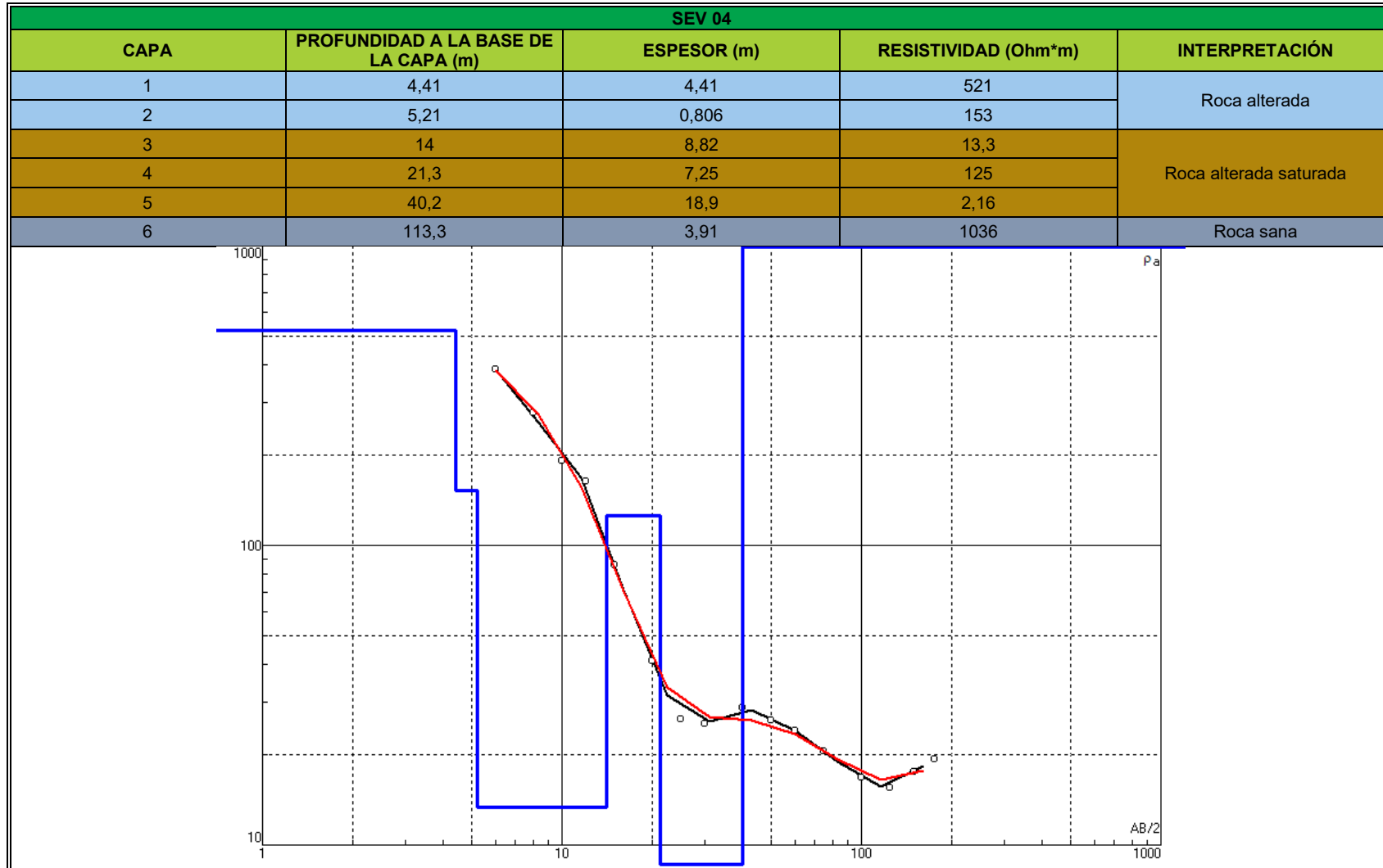
Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-6 Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV03



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-7 Interpretación de resultados – Sondeo eléctrico vertical SEV04



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

La resistividad de un componente geológico se encuentra influenciada entre otros por el material que lo conforma, sin embargo, los métodos geoelectricos aplicados en exploración hidrogeológica se ven afectados por diversos factores, siendo el más destacado la presencia de agua. Lo anterior es debido a que la resistividad de la mayoría de las rocas y sedimentos secos es elevada, por lo que actúan como semiconductores o conductores de baja capacidad. Este comportamiento cambia significativamente cuando hay fisuras o poros ocupados por agua, lo que genera una disminución de la resistividad o aumento de la capacidad de conducción de la corriente eléctrica. Los contrastes en las resistividades son los que permiten aplicar con éxito los métodos de prospección geoelectrica mediante la inyección de corrientes continuas.

El este del área de estudio se encuentra compuesto geológicamente por bloques imbricados de rocas deformadas en las que es común la presencia de foliación milonítica de dirección NNE – SSW y buzamiento al este, localmente con diaclasamiento columnar y horizontes de lavas almohadilladas con márgenes de enfriamiento rápido, la deformación impide la identificación de secuencias estratigráficas por lo cual las unidades litoestratigráficas que lo constituyen carecen de límites precisos. Hacia el oeste del área de influencia del estudio se encuentran arenas tobáceas, flujos aluviales con niveles arenosos y conglomeráticos y flujos de escombros, estos, presentan una meteorización que origina canales verticales por tener niveles conglomeráticos ricos en fragmentos de rocas volcánicas de composición andesítica. Los flujos de escombros se caracterizan por presentar bloques, preferencialmente de composición andesítica, hasta de 1 metro de diámetro, con una selección mala.

Considerando la heterogeneidad composicional e irregularidad estratigráfica de las unidades geológicas presentes en el área de influencia del estudio, relacionadas principalmente con el control estructural de las fallas y lineamientos geológicos regionales y locales, los resultados del análisis geofísico presentan gran variedad de resistividades, por lo tanto, en la interpretación de estos se agruparon las resistividades y se relacionaron con un material geológico tipo que las representa.

Para la interpretación de los SEV's adquiridos, se utilizaron como valores de referencia los presentados en la Figura 3-5 y Figura 3-6; que son valores típicos de resistividad

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	16

(incluyendo los rangos de valor) y la interpretación litológica dada para los datos del presente estudio, aplicando información base de geología y las correcciones pertinentes.

3.2.7.2.2.1 Unidades Geoeléctricas

Las unidades geoeléctricas que conforman el área de influencia fueron determinadas a partir de los cuatro (4) sondeos eléctricos verticales ejecutados. Con base en estos, se determinó la existencia de tres (3) unidades geoeléctricas, las cuales se describen en la Tabla 3-8.

Tabla 3-8 Unidades geoeléctricas del área de influencia

UNIDAD GEOELÉCTRICA	ESPESOR (m)	RESISTIVIDAD (Ohm*m)	LITOLOGÍA
Zona 3	3,907 – 11,506	156 - 839	Roca alterada
Zona 4	55,8 – 105,2	4,69 – 84,2	Roca alterada saturada
Zona 5	3,91 – 51,04	1.036 – 14.261	Roca sana

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

A continuación, se describen las zonas de resistividad identificadas para el área de influencia del proyecto, en el marco de la elaboración del Estudio de Impacto Ambiental para la Modificación de Licencia para la construcción de la estación de compresión de Gas Palestina (ECG).

- Zona de resistividad 1: Presenta una geometría irregular, con un rango de resistividades entre 156 y 839 ohm-m y profundidades de máximo 15 metros aproximadamente, medidos a partir de la superficie. Esta unidad está representada por los depósitos cuaternarios y las rocas ígneas y metamórficas alteradas.
- Zona de resistividad 2: Presenta una geometría irregular, con un rango de resistividades entre 4,69 y 84,2 ohm-m y profundidades de máximo 110 metros aproximadamente, medidos a partir de la superficie. Esta unidad está representada por rocas ígneas y metamórficas alteradas saturadas.
- Zona de resistividad 3: Presenta una geometría irregular, con un rango de resistividades entre 1.036 y 14.261 ohm-m y profundidades de máximo 114 metros aproximadamente, medidos a partir de la superficie. Esta unidad está representada por rocas ígneas y metamórficas alteradas saturadas.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	17

Teniendo en cuenta las características topográficas y geológicas del área, las zonas geoelectricas mencionadas no son continuas a lo largo de toda el área de influencia, a pesar de ello, todas las propiedades litológicas definidas para cada una de las zonas corresponden con rocas y materiales de origen ígneo y metamórfico, concordado así, con la geología del área de influencia.

3.2.7.2.2.2 Perfiles Geoelectricos

Con el fin de evaluar espacialmente el comportamiento de las unidades geoelectricas existentes en el subsuelo del área de influencia, se realizó un (1) perfil geoelectrico cuya localización se puede observar en la Figura 3-7.

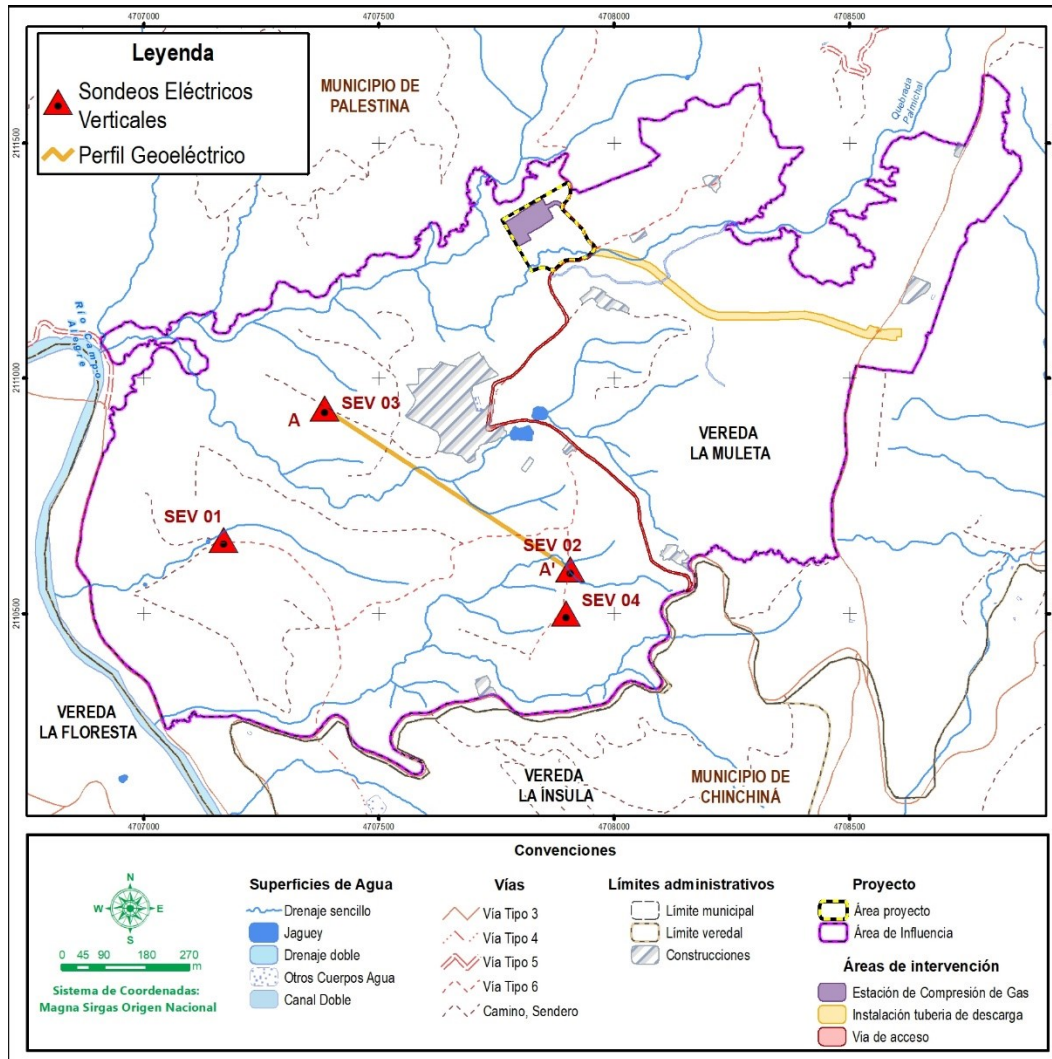
– Perfil geoelectrico A- A'

El perfil geoelectrico A – A' (Figura 3-8) se realizó con base en la información de los sondeos eléctricos verticales SEV3 y SEV2, correlacionando la resistividad verdadera de las capas de cada sondeo. Presenta una longitud aproximada de 623,5 metros con una orientación NW - SE.

Se observa una zona compuesta por rocas ígneas alteradas hasta aproximadamente los 13,5 metros de profundidad y presentan valores de resistividad verdadera entre 156 – 456 Ω .m; infrayaciendo esta unidad geoelectrica se encuentra una capa de rocas ígneas alteradas saturadas de agua hasta una profundidad de aproximadamente 113 metros en el SEV02 y 62 metros en el SEV03, y presentan valores de resistividad verdadera entre 11,4 – 83,6 Ω .m; finalmente, en la base del SEV03 se encuentra una capa geoelectrica de roca sana desde los 62,26 metros hasta los 113,3 metros de profundidad, con una resistividad verdadera de 14261 Ω .m. En la Figura 3-8 se presenta la interpretación litológica del perfil geoelectrico A – A'

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	18
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

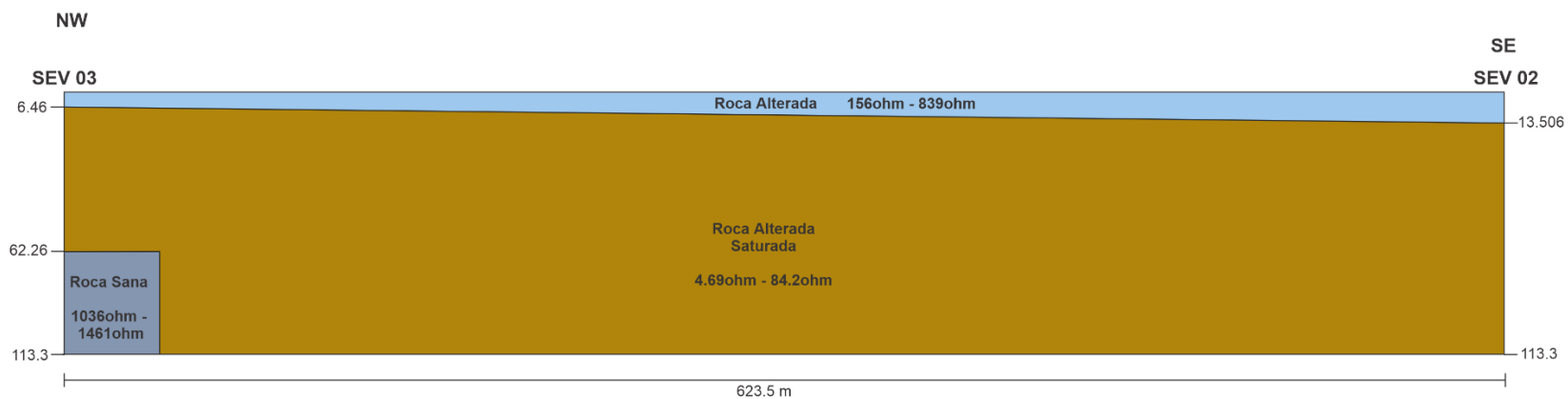
Figura 3-7 Ubicación del perfil geoelectrónico trazado para el área de influencia



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	19
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Figura 3-8 Perfil geoelectrico A – A'



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología
			PO-CO-2024-008	Ver: 01 20

3.2.7.3 Inventario de puntos de agua

El inventario de puntos de agua subterránea es un método de recopilación y análisis de datos e información relacionados con la hidrogeología y niveles captados en el área, constituyendo un aporte fundamental para la construcción tanto del modelo hidrogeológico conceptual como para la definición de usos y usuarios. En ANEXOS\H. GEOSFERICO\4 Hidrogeología\4.2. FUNIAS se presentan los formatos del Inventario de puntos de agua dentro del área de influencia del estudio.

Este inventario se realizó durante la temporada de lluvias en el mes de abril de 2024, realizando recorridos en el total de los predios ubicados dentro del área de Influencia definida para la actual Modificación de Licencia para la construcción de la estación de compresión de Gas Palestina (ECG) en los que se contó con el permiso de acceso, y diligenciando el FUNIAS (Formulario Único Nacional Para Inventarios de Puntos de Agua Subterránea).


Durante los recorridos realizados no se identificó ningún punto de agua subterránea asociado con pozos y aljibes, sin embargo, se registró la existencia de un punto de agua subterránea asociado a un manantial localizado en el predio La Ínsula del cual los propietarios del predio captan agua a través de una tubería que lleva el agua por gravedad hasta tanques de almacenamiento de 10.000 litros localizados a una distancia de 300 metros del punto, desde allí el agua es distribuida en el predio para realizar actividades domésticas e industriales.

Teniendo en cuenta las características topográficas y de coberturas del terreno fue imposible llegar al punto exacto del manantial, sin embargo, los habitantes de la zona y el administrador del predio indicaron que el suministro de agua para el consumo doméstico de la finca proviene de un nacedero (manantial). La coordenada que se relacionó en el FUNIAS corresponde con el punto más cercano a este al que se pudo llegar durante los recorridos de campo.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	21
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

En la Tabla 3-9 se presenta la información general del punto de agua inventariado, en esta se puede identificar el tipo de punto, ubicación y uso principal del recurso y en la Figura 3-9 la localización de este.

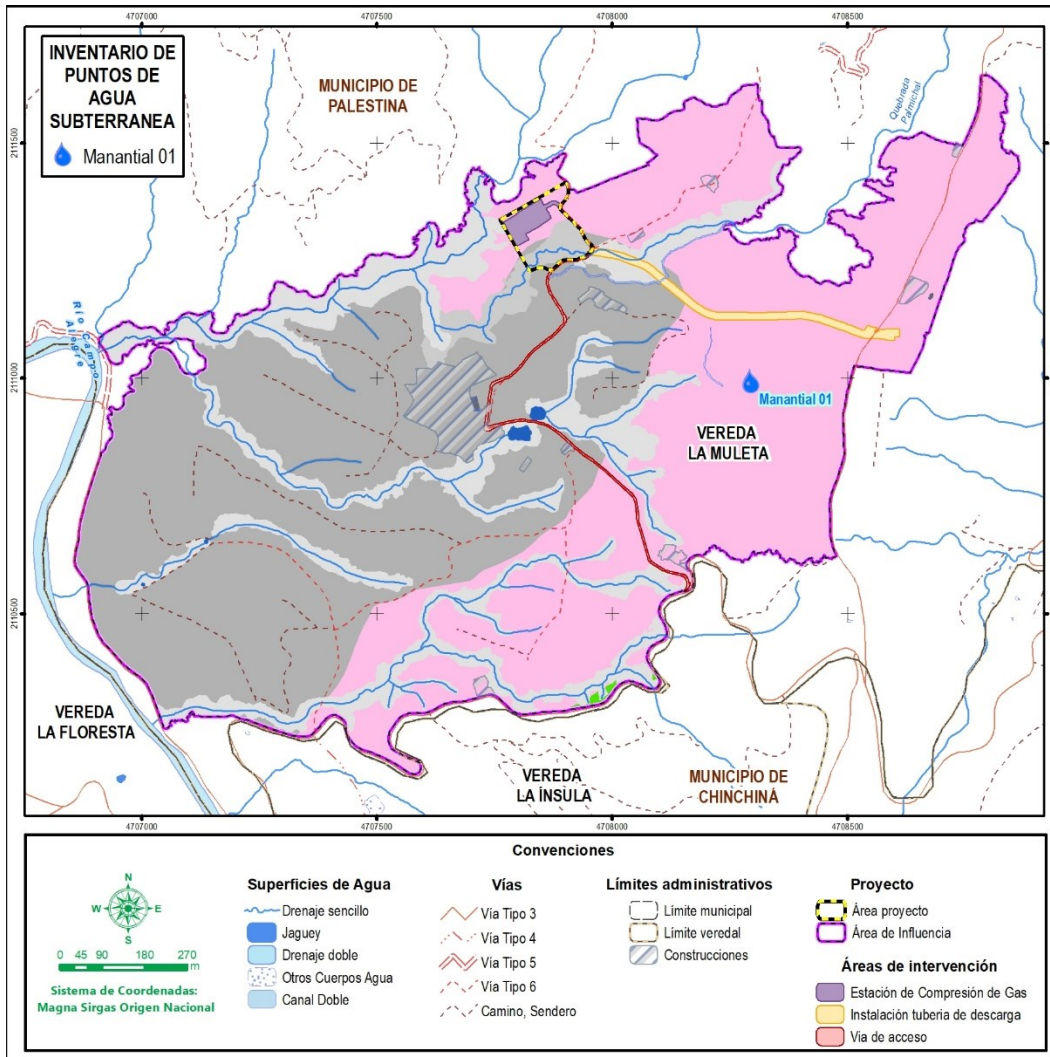
Tabla 3-9 Inventario de Puntos de Agua para el Área de Influencia del estudio

ASB_01	
ID	Manantial 01
VEREDA	Vereda La Muleta
PREDIO	La Ínsula
TIPO DE PUNTO	Manantial
UNIDAD GEOLÓGICA	Complejo Quebradagrande - Kvc
NIVEL DEL AGUA	0 m
USO PRINCIPAL DEL AGUA	Doméstico
COORDENADAS MAGNA SIRGAS ORIGEN NACIONAL	
ESTE (m)	4.708.294
NORTE (m)	2.110.994
COTA (m.s.n.m.)	1.407,45
REGISTRO FOTOGRÁFICO	
	

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	22

Figura 3-9 Puntos de agua subterránea en el área de influencia



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.7.4 Caracterización hidrogeológica de las Unidades Geológicas

Las unidades hidrogeológicas fueron determinadas tomando como base la información generada y analizada de los cuatro (4) Sondeos Eléctricos Verticales realizados, la información de la geología local descrita en el *Capítulo 03.2.1.ABIOT(GEOL)* y la geomorfología local descrita en el *Capítulo 03.2.2.ABIOT(GEOM)* del presente estudio, la clasificación de las unidades hidrogeológicas existentes en el área de influencia del estudio se realizó a partir de la nomenclatura definida por el INGEOMINAS (2004), tal como se detalla en la Tabla 3-10.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	23
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Tabla 3-10 Clasificación unidades hidrogeológicas

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS		
SEDIMENTOS Y ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE INTERGRANULAR		
CONVENCIONES	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA PROMEDIO (L/s/m)
A1	Acuíferos continuos de extensión regional, de muy alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados de ambiente fluvial. Acuíferos libres y confinados con agua generalmente de buena calidad química.	Muy Alta Mayor de 5,0
A2	Acuíferos continuos de extensión regional, de alta productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente fluvial, glaciifluvial, marino y volcánoclastico. Acuíferos libres y confinados con agua de buena calidad química	Alta Entre 2,0 y 5,0
A3	Acuíferos continuos de extensión regional de mediana productividad, conformados por sedimentos cuaternarios no consolidados y rocas sedimentarias terciarias poco consolidados de ambiente fluvial, glaciifluvial, marino y volcánoclastico. Acuíferos generalmente confinados con agua de buena calidad química.	Media Entre 1,0 y 2,0
A4	Acuíferos discontinuos de extensión local de baja productividad, conformados por sedimentos cuaternarios y rocas sedimentarias terciarias poco consolidadas de ambiente aluvial, lacustre, coluvial, eólico y marino marginal. Acuíferos libres y confinados con agua de regular calidad química.	Baja Entre 0,05 y 1,0
ROCAS CON FLUJO ESENCIALMENTE Y A TRAVÉS DE FRACTURAS (ROCAS FRACTURADAS Y/O CARSTIFICADAS)		
CONVENCIONES	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA PROMEDIO (L/s/m)
B1	Acuíferos discontinuos de extensión regional de muy alta productividad, conformados por rocas sedimentarias carbonatadas cretácicas, consolidadas de ambiente marino. Acuíferos generalmente confinados con agua de buena calidad química	Muy Alta Mayor de 5,0
B2	Acuíferos continuos de extensión regional de mediana productividad, conformados por rocas sedimentarias y volcánicas piroclásticas de ambiente marino continental. Acuíferos libres y confinados con aguas de buena calidad química. Con frecuencia se encuentran fuentes termales asociadas a la tectónica.	Media Entre 1,0 y 2,0
B3	Acuíferos discontinuos de extensión regional y local, de baja productividad, conformados por rocas sedimentarias y volcánicas, terciarias a paleozoicas consolidadas, de ambiente marino y continental. Acuíferos generalmente confinados con aguas de buena calidad química.	Baja Entre 0,05 y 1,0
SEDIMENTOS Y ROCAS CON LIMITADOS A NINGUN RECURSO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS		
CONVENCIONES	CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA PROMEDIO (L/s/m)
C1	Complejo de sedimentos y rocas con muy baja productividad, constituidos por depósitos cuaternarios no consolidados de ambientes lacustres, deltaicos y marinos y por rocas sedimentarias terciarias a cretácicas poco consolidadas a muy consolidadas, de origen continental o marino. Almacenan aguas de regular a mala calidad química, aislada en las regiones costeras	Muy Baja Menor de 0,05
C2	Complejo de rocas ígneo-metamórficas con muy baja a ninguna productividad, muy compactas y en ocasiones fracturadas, terciarias	Muy Baja a ninguna Menor de 0,05

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	24

CLASIFICACIÓN GENERAL DE LAS UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS		
	a precámbricas. Almacenan aguas de buena calidad química. Con frecuencia se encuentran fuentes termales asociadas a la tectónica.	

Fuente: INGEOMINAS, 2004.

Teniendo en cuenta que durante el trabajo de campo no se identificaron estructuras hidrogeológicas asociadas a pozos profundos y aljibes, y considerando la dificultad en el acceso al manantial inventariado, no fue posible realizar ensayos hidráulicos de bombeo y recuperación, por lo tanto, las características hidráulicas de las unidades geológicas identificadas dentro del área de influencia del proyecto se definieron teniendo en cuenta su litología y lo presentado en las Tabla 3-11 y Tabla 3-12. En la Tabla 3-13 se presentan las características hidráulicas definidas para estas unidades.

Tabla 3-11 Clasificación del terreno según T (m²/día)

CALIFICACIÓN	RANGO T (m ² /día)				
	T < 1	1 ≤ T < 10	10 ≤ T < 100	100 ≤ T < 1000	1000 ≤ T
	IMPERMEABLE	POCO PERMEABLE	ALGO PERMEABLE	PERMEABLE	MUY PERMEABLE
Calificación del acuífero	Sin acuífero	Acuífero muy pobre	Acuífero Pobre	Acuífero de regular a bueno	Acuífero excelente
Ejemplos de materiales	Arcilla compacta / Pizarra / Granito.	Limo arenoso / Limo / Arcilla Limosa.	Arena fina / Arena Limosa / Caliza poco Fracturada / Basaltos	Arena Limpia / Grava y arena / Arena fina.	Grava Limpia / Calizas muy fracturadas

Fuente: Custodio, E & Llamas, M.R., 1996.

Tabla 3-12 Clasificación de la conductividad hidráulica K (m/día) según el terreno

PERMEABILIDAD	10 ⁴	10 ³	10 ²	10 ¹	1	10 ⁻¹	10 ⁻²	10 ⁻³	10 ⁻⁴	10 ⁻⁵	10 ⁻⁶
Tipo de terreno	Grava limpia		Arena limpia; mezcla de grava y arena			Arena fina; arena arcillosa; mezcla de arena, limo y arcilla; arcillas estratificadas			Arcillas no meteorizadas		
Calificación	Buenos acuíferos					Acuíferos pobres			Impermeables		
Capacidad de drenaje	Acuíferos pobres					Drenan mal		No drenan			

Fuente: Custodio, E & Llamas, M.R., 1996.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	25

Tabla 3-13 Características hidráulicas de las unidades geológicas dentro del área de influencia del proyecto

UNIDAD GEOLÓGICA	LITOLOGÍA	CLASIFICACIÓN TRANSMISIVIDAD (T)	CLASIFICACIÓN CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (K)
Qal - Depósitos aluviales recientes	Depósitos recientes sin compactación	10 – 100 m ² /día	10 ⁻¹ – 10 ⁻³ m/día
Qca - Depósitos Coluvio aluviales	Depósitos recientes con arenas a bloques, se distribuye a lo largo de los afluentes	100 – 1000 m ² /día	10 ² – 1 m/día
Qfl - Depósitos Fluvio-lacustres	Depósitos recientes relacionado con cuerpos lenticos antrópicos	1 – 10 m ² /día	10 ⁻¹ – 10 ⁻³ m/día
Qpi - Depósitos de plano de inundación	Depósitos en zona de acumulación está compuesta por arenas y limos	10 – 100 m ² /día	10 ⁻¹ – 10 ⁻³ m/día
Qfl - Depósitos de lahar	Depósitos de origen volcánico, matriz soportados.	100 – 1000 m ² /día	10 ² – 1 m/día
Kvc - Complejo Quebradagrande (conjunto volcánico)	Unidad básica volcánica de textura porfirítica de grano fino a medio	10 – 100 m ² /día	10 ⁻¹ – 10 ⁻³ m/día
Kies - Complejo Arquía-Esquistos de Lisboa-Palestina	Esquisto cuarzo-sericitico con crenulación	10 – 100 m ² /día	10 ⁻¹ – 10 ⁻³ m/día

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Es necesario recordar, que, para la delimitación de unidades hidrogeológicas, se tomó, en primera instancia la distribución de las unidades geológicas, y con base en los resultados de cada una de las variables que definen el acuífero, se clasificaron estos niveles y su productividad.

Partiendo de lo presentado en la Tabla 3-10 y la Tabla 3-13 se clasificaron y definieron las unidades hidrogeológicas como se describe a continuación:

3.2.7.4.1 Unidad A3: Qca - Depósitos Coluvio aluviales, Qfl - Depósitos de lahar.

Esta unidad está definida debido a sus características litológicas e hidráulicas, capta niveles acuíferos de extensión regional con porosidad primaria y productividad media. Litológicamente está conformada por depósitos recientes con arenas, en tamaños y porcentajes variables. La unidad representa acuíferos libres con porosidad primaria, tiene transmisividades entre los 100 – 1000 m²/día y conductividad hidráulica de 10² – 1 m/día, recibe recarga directa producto de lluvias.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	26

3.2.7.4.2 Unidad A4: Qal - Depósitos aluviales recientes, Qfl - Depósitos Fluvio-lacustres, Qpi - Depósitos de plano de inundación.

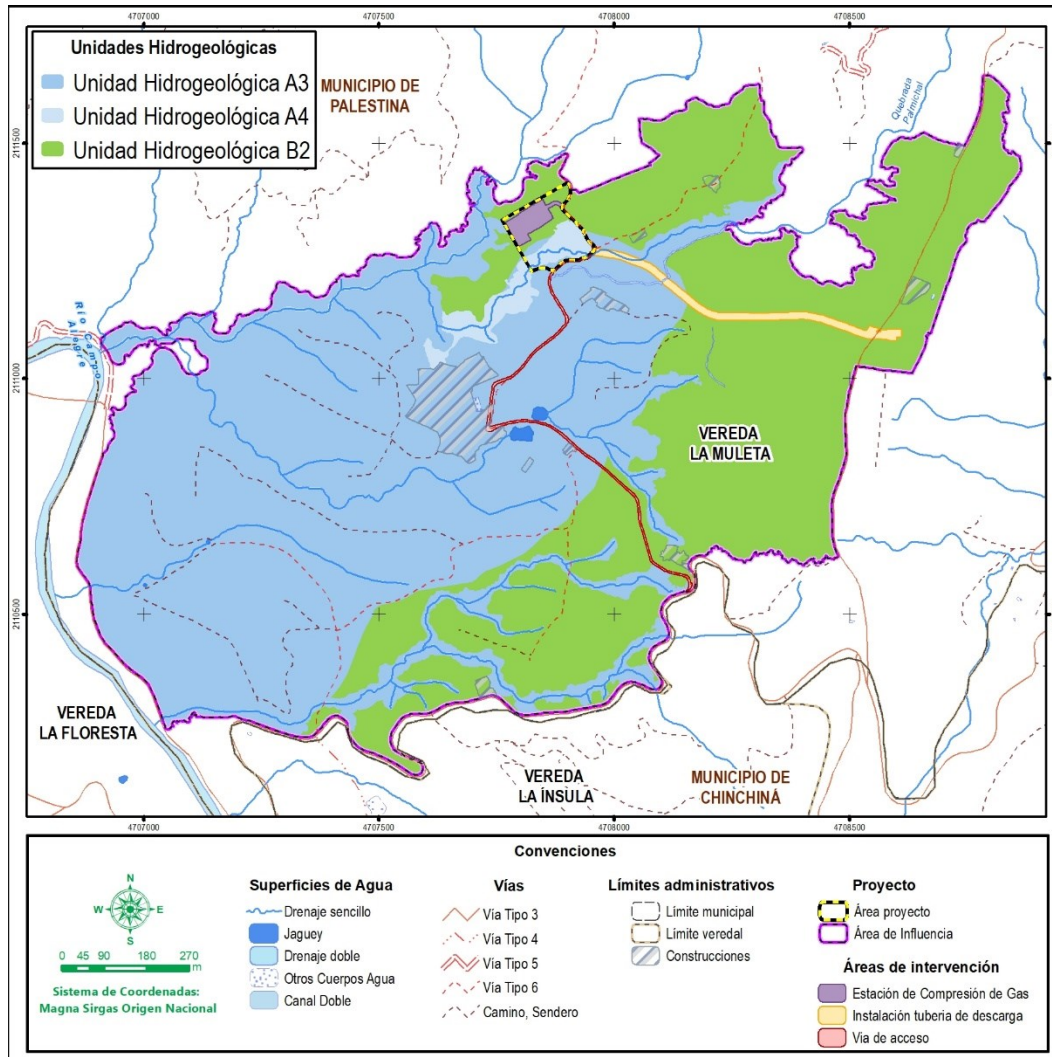
Esta unidad está definida debido a sus características litológicas e hidráulicas, capta niveles acuíferos de extensión local con porosidad primaria y productividad baja. Litológicamente está conformada por depósitos de arenas, limos y arcillas, en tamaños y porcentajes variables. La unidad representa acuíferos libres con porosidad primaria, tiene transmisividades entre los 1 – 100 m²/día y conductividad hidráulica de 10⁻¹ – 10⁻³ m/día, recibe recarga directa producto de lluvias.

3.2.7.4.3 Unidad B2: Kvc - Complejo Quebradagrande (conjunto volcánico), Kies - Complejo Arquía-Esquistos de Lisboa-Palestina.

Esta unidad está definida debido a sus características litológicas e hidráulicas, capta niveles acuíferos continuos con porosidad secundaria de extensión regional de mediana productividad, conformados por rocas volcánicas y metamórficas. Recibe recarga producto de percolación de agua de los niveles superiores.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	27
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Figura 3-10 Distribución de las unidades hidrogeológicas en el área de influencia del estudio



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

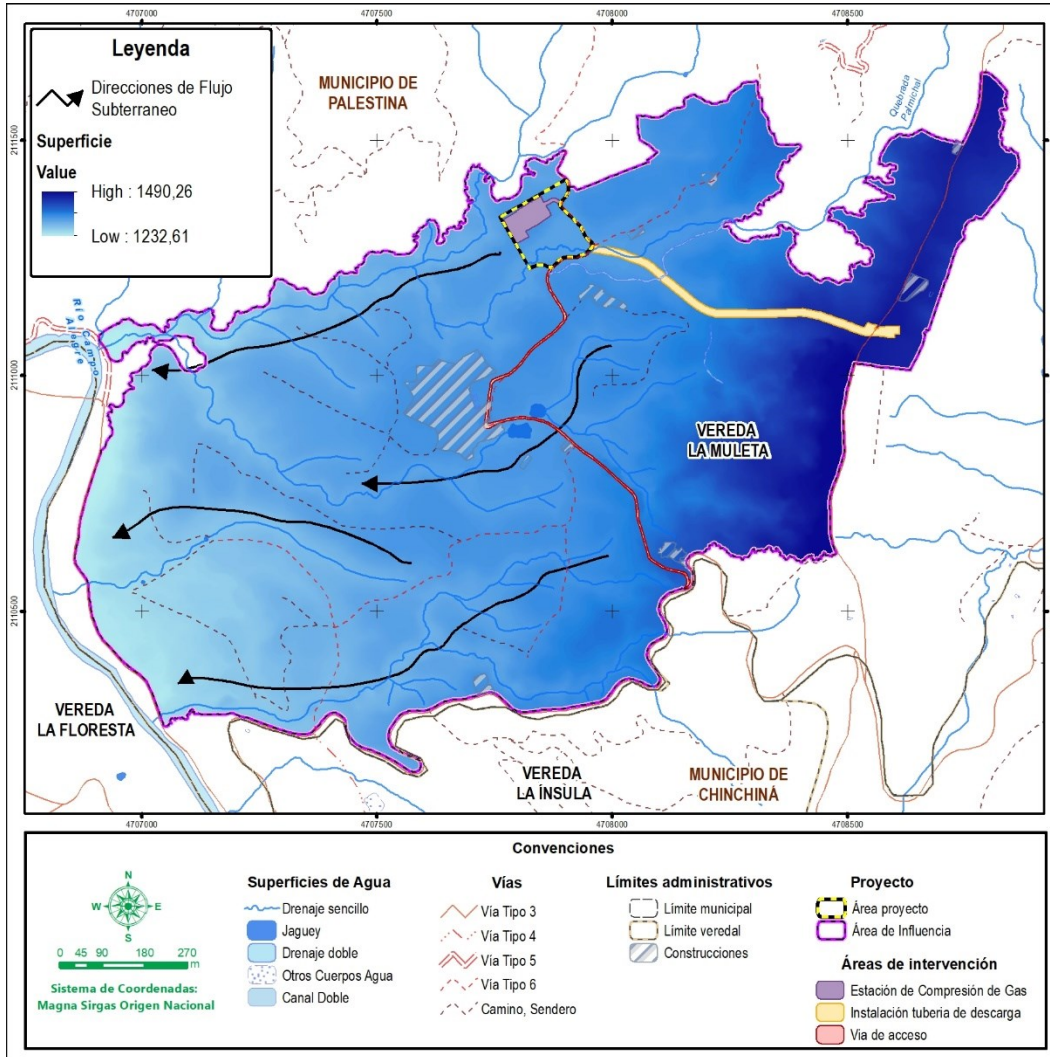
3.2.7.5 Dirección de flujo

Tomando en consideración que no se identificaron puntos hidrogeológicos de tipo pozo y aljibe, y únicamente se identifica un manantial que indica que el nivel freático se encuentra cortando la topografía del terreno, se determina la dirección preferencial del flujo subterráneo tomando como referencia la dirección preferencial de flujo de los cuerpos de agua lótics presentes dentro del área de influencia del estudio, es así que, se concluye

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	28
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

que la dirección predominante de flujo es en sentido NE-SW, como se observa en la Figura 3-11.

Figura 3-11 Direcciones de flujo a nivel local en el área de influencia del estudio



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	29

3.2.7.6 Zonas de recarga y descarga

3.2.7.6.1 Zonas de recarga

La recarga constituye el agua que ingresa a la zona saturada, y que por lo tanto entra a ser parte de las reservas subterráneas. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (en general la más importante) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua de otro acuífero (Custodio & Llamas, 1996). El área o zona donde ocurre la recarga son sitios donde la capacidad de infiltración es alta.

Para el área de estudio de la Estación Compresora de Gas Palestina, los niveles acuíferos caracterizados presentan dos (2) mecanismos de recarga: la recarga regional desde la parte alta de la cordillera central y la recarga local por infiltración en suelo.

3.2.7.6.1.1 Recarga regional

Desde el punto de vista hidrogeológico, los acuíferos con porosidad secundaria asociados a rocas ígneas y metamórficas representan una alta importancia para el área de influencia del estudio. Su mecanismo de recarga es tipo regional y se presenta por infiltración en su afloramiento en la cordillera central.

3.2.7.6.1.2 Recarga local por infiltración en suelo – Recarga potencial

La recarga por infiltración en suelo se presenta recarga en toda la extensión del área de influencia a través de las precipitaciones que pasan por un proceso de infiltración y posterior percolación del agua de lluvia, a lo largo de materiales de alta permeabilidad y pendiente moderada a baja.

El ingreso de agua proveniente de la precipitación a la zona saturada está principalmente relacionado con una disposición estructural que favorece la infiltración de agua, la pendiente del terreno, cobertura vegetal y con la composición y/o textura de las diferentes unidades que componen el perfil del suelo.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	30
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

La evaluación de las áreas de recarga de las unidades hidrogeológicas más superficiales fue abordada desde la zonificación de las susceptibilidades a la recarga de unidades acuíferas mediante la metodología propuesta por Matus et al (2009) en la “Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica”, que contempla como factores que intervienen en la recarga a:

- Pendientes

Las pendientes determinan el tiempo de contacto entre el agua y la superficie. Las pendientes fuertes favorecen la escorrentía superficial, disminuyen el tiempo de contacto y reducen la infiltración del agua. Tabla 3-15, presenta la ponderación de la posibilidad de recarga según el tipo de pendiente.

Tabla 3-14 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de pendiente

MACRORELIEVE	PENDIENTE (%)	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Plano o casi plano, con o sin rugosidad	0 - 6	Muy alta	5
Moderadamente ondulado o cóncavo	6 - 15	Alta	4
Ondulado/ cóncavo	15 - 45	Moderada	3
Escarpado	45 - 65	Baja	2
Fuertemente escarpado	> 65	Muy baja	1

Fuente: Matus et al., 2009, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

- Tipo de suelos

Los suelos impermeables y compactados impiden o dificultan la infiltración, mientras que los suelos permeables facilitan la recarga. Las características del suelo que influyen en la recarga son: la textura, densidad aparente, grado de saturación o contenido de humedad y la capacidad de infiltración. La Tabla 3-15, presenta la ponderación de la posibilidad de recarga según el tipo de suelo.

Tabla 3-15 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de suelo

TEXTURA	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Suelos franco-arenosos a arenosos, con tamaño de agregados o partículas de gruesos a medios, con muy rápida capacidad de infiltración (más de 25 cm/h).	Muy alta	5
Suelos francos, con partes iguales de arena, limo y arcilla, con rápida capacidad de infiltración (12,7 – 25 cm/h)	Alta	4
Suelos franco-limosos, con partículas de tamaño medio a finas, con moderada a moderadamente rápida capacidad de infiltración (2 – 12,7 cm/h).	Moderada	3

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	31

TEXTURA	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Suelos franco-arcillosos, combinación de limo y arcilla, con partículas finas, suelos pesados, con muestras de compactación, con lenta a moderadamente lenta capacidad de infiltración (0,13 – 2 cm/h).	Baja	2
Suelos arcillosos, muy pesados, con partículas muy finas, compactados, con muy lenta capacidad de infiltración (menos de 0,13 cm/h).	Muy baja	1

Fuente: Matus et al., 2009, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

- Tipo de roca

La disposición de los diferentes materiales geológicos en los distintos estratos o capas de suelos hasta llegar a la zona saturada, afectan significativamente la recarga hídrica. La Tabla 3-16, presenta la ponderación de la posibilidad de recarga según el tipo de roca.

Tabla 3-16 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de roca

ROCAS	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Rocas muy permeables, muy suaves, constituidas por cristales o agregados gruesos, con macroporos interconectados; por ejemplo, arena gruesa, piedra pómez, grava o cascajo.	Muy alta	5
Rocas permeables, suaves, constituidas por cristales o agregados medianos, con poros interconectados; por ejemplo, arena fina o arenisca con poca cementación	Alta	4
Rocas moderadamente permeables, semisuaves, con regular conexión entre poros.	Moderada	3
Rocas poco permeables, un poco duras, moderadamente compactadas, constituidas por partículas finas, con presencia de fracturas interconectadas; por ejemplo, la combinación de gravas con arcillas.	Baja	2
Rocas impermeables, duras, cementadas, compactadas, constituidas por partículas muy finas, sin presencia de fracturas.	Muy baja	1

Fuente: Matus et al., 2009, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

- Cobertura vegetal

Ésta disminuye la escorrentía superficial y permite un mayor tiempo de contacto del agua con la superficie facilitando el proceso de infiltración, además de que un porcentaje importante de lluvia es interceptada por la cobertura vegetal. La Tabla 3-17, presenta la ponderación de la posibilidad de recarga según la cobertura vegetal.

Tabla 3-17 Ponderación de la posibilidad de recarga según la cobertura vegetal

COBERTURA VEGETAL PERMANENTE (Porcentaje)	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
>80	Muy alta	5
70 - 80	Alta	4
50 - 70	Moderada	3
30 - 50	Baja	2
<30	Muy baja	1

Fuente: Matus et al., 2009, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología
			PO-CO-2024-008	Ver: 01

- **Uso del suelo**

La recarga hídrica depende del régimen de precipitación, de la escorrentía superficial y del caudal de los ríos, así como de la permeabilidad de los suelos, de su contenido de humedad, de la duración e intensidad de la lluvia y del patrón de drenaje de la cuenca. La Tabla 3-18, presenta la ponderación de la posibilidad de recarga según el uso del suelo.

Tabla 3-18 Ponderación de la posibilidad de recarga según uso del suelo

USO DEL SUELO	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Bosque donde se dan los tres estratos: árboles, arbustos y hierbas o zacate denso	Muy alta	5
Sistemas agroforestales o silvopastoriles	Alta	4
Terrenos cultivados y con obras de conservación de suelo y agua	Moderada	3
Terrenos cultivados sin ninguna obra de conservación de suelo y agua	Baja	2
Terrenos agropecuarios con manejo intensivo	Muy baja	1

Fuente: Matus et al., 2009, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

- **Elaboración del mapa de zonas potenciales de recarga hídrica**

Para determinar el potencial de recarga hídrica se emplea la ecuación que se presenta a continuación. En ella se sustituye cada uno de los elementos del modelo por los valores respectivos obtenidos en la evaluación en campo:

$$ZE = 0,27(Pend) + 0,23(Ts) + 0,12(Tr) + 0,25(Cve) + 0,13(Us)$$

Donde,

ZE: Zonas potenciales de recarga hídrica

Pend: Pendiente y relieve

Ts: Tipo de suelo

Tr: Tipo de roca

Cve: Cobertura vegetal permanente

Us: Usos del suelo

A continuación, se presenta la valoración de las variables pendiente, tipo de suelo, tipo de roca, cobertura vegetal y uso de suelo que hacen parte del área de influencia del estudio.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	33

◇ Pendientes

En la Tabla 3-19 se presenta la ponderación de contribución a la recarga de unidades acuíferas en el área de influencia del estudio que podría presentarse por pendientes.

Tabla 3-19 Ponderación de la posibilidad de recarga según los porcentajes de pendiente en los que se encuentra localizado el área de influencia del estudio

PENDIENTE	NOMENCLATURA	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
A nivel	0 - 1 %	Muy Alta	5
Ligeramente plana	1 - 3 %	Muy Alta	5
Ligeramente inclinada	3 - 7 %	Muy Alta	5
Moderadamente inclinada	7 - 12 %	Alta	4
Fuertemente inclinada	12 - 25 %	Moderada	3
Ligeramente escarpada o ligeramente empinada	25 - 50 %	Moderada	3
Moderadamente escarpada o moderadamente empinada	50 - 75 %	Baja	2
Fuertemente escarpada o fuertemente empinada	75 - 100 %	Muy Baja	1
Totalmente escarpada	>100%	Muy Baja	1

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

◇ Tipo de suelos

En la Tabla 3-20 se presenta la ponderación de contribución a la recarga de unidades acuíferas en el área de influencia del estudio que podría presentarse por las características de los suelos.

Tabla 3-20 Ponderación de la posibilidad de recarga según las características del suelo en el que se encuentra localizado el área de influencia del estudio

UNIDAD	TEXTURA	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (cm/h)	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
CAA	Cuerpos de agua artificial	-	Muy Baja	1
CAN	Cuerpos de agua natural	-	Muy Baja	1
MQAd	Textura franco-arenosa	-	Muy Alta	5
MQAe	Textura franco-arenosa	-	Muy Alta	5
MQBd	Textura franco-arenosa	96	Muy Alta	5
MQbdi	Textura franco-arenosa	-	Muy Alta	5
MQBe	Textura franco-arenosa	-	Muy Alta	5
MQBei	Textura franco-arenosa	-	Muy Alta	5
MQCd	Textura franco-arenosa	120	Muy Alta	5
MQCe	Textura franco-arenosa	-	Muy Alta	5
MQDd	Textura franco-arenosa	171,43	Muy Alta	5
MQDe	Textura franco-arenosa	300	Muy Alta	5
MQEe	Textura franco-arenosa	16,97	Muy Alta	5
MQEf	Textura franco-arenosa	-	Muy Alta	5

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	34

UNIDAD	TEXTURA	VELOCIDAD DE INFILTRACIÓN (cm/h)	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
ZQZ	Suelos antrópicos	-	Muy Baja	1

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

◇ Tipo de roca

La Tabla 3-21 presenta la ponderación de contribución a la recarga de unidades acuíferas en el área de influencia del estudio que podría aportar las características de las rocas.

Tabla 3-21 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipos de roca o depósitos no consolidados en los que se encuentra localizado el área de influencia

UNIDAD GEOLÓGICA	NOMENCLATURA	DESCRIPCIÓN	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Depósitos aluviales recientes	Qal	Depósitos de recientes sin compactación	Muy Alta	5
Depósitos Coluvio aluviales	Qca	Depósitos recientes con arenas a bloques, se distribuye a lo largo de los afluentes	Alta	4
Depósitos Fluvio-lacustres	Qfl	Depósitos recientes relacionado con cuerpos lenticos antrópicos	Baja	2
Depósitos de plano de inundación	Qpi	Depósitos en zona de acumulación está compuesta por arenas y limos	Moderada	3
Depósitos de lahar	Qfl	Depósitos de origen volcánico, matriz soportados.	Moderada	3
Complejo Quebradagrande (conjunto volcánico)	Kvc	Unidad básica volcánica de textura porfirítica de grano fino a medio	Baja	2
Complejo Arquía-Esquistos de Lisboa-Palestina	Kies	Esquisto cuarzo-sericitico con crenulación	Baja	2

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

◇ Cobertura vegetal

La Tabla 3-22 presenta la ponderación de contribución a la recarga de unidades acuíferas en el área de influencia definida para la modificación de Licencia para la construcción de la estación de compresión de Gas Palestina (ECG) que podría aportar la cobertura vegetal.

Tabla 3-22 Ponderación de la posibilidad de recarga según tipo de cobertura vegetal en la que se encuentra localizado el área de influencia del estudio

COBERTURA VEGETAL	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Aguacate	Muy Alta	5
Café	Muy Alta	5
Canales	Muy Baja	1
Cuerpos de agua artificiales	Muy Baja	1
Explotación de hidrocarburos	Muy Baja	1

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	35

COBERTURA VEGETAL	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Guaduales	Muy Alta	5
Guayaba	Alta	4
Jaguey	Muy Baja	1
Mosaico de cultivos	Muy Alta	5
Pastos enmalezados	Moderada	3
Pastos limpios	Moderada	3
Plátano	Moderada	3
Red vial y territorios asociados	Muy Baja	1
Tejido urbano continuo	Muy Baja	1
Tejido urbano discontinuo	Baja	2
Terrenos en preparación	Muy Baja	1
Tomate	Alta	4
Vegetación secundaria baja	Moderada	3

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

◇ Uso del suelo

La Tabla 3-23 presenta la ponderación de contribución a la recarga de unidades acuíferas en el área de influencia definida para la modificación de Licencia para la construcción de la estación de compresión de Gas Palestina (ECG) que podría aportar el uso actual del suelo.

Tabla 3-23 Ponderación de la posibilidad de recarga según uso actual de los suelos en los que se encuentra localizado el área de influencia del estudio

USO ACTUAL DEL SUELO	POSIBILIDAD DE RECARGA	PONDERACIÓN
Cultivos permanentes intensivos (CPI)	Muy Baja	1
Sistemas forestales protectores (FPR)	Muy Alta	5
Pastoreo intensivo (PIN)	Muy Baja	1
Industrial (I)	Muy Baja	1
Residencial (R)	Muy Baja	1
Áreas para la conservación y/o recuperación de la naturaleza, recreación (CRE)	Moderada	3
Cultivos transitorios intensivos (CTI)	Muy Baja	1
Transporte (T)	Muy Baja	1
Servicios (S)	Muy Baja	1

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

• Resultados

Una vez evaluadas las características del área de influencia del proyecto, considerando los elementos de la metodología y las tablas diseñadas para tal efecto (Tabla 3-14 a Tabla 3-18), a través de la suma ponderada de mapas en software ArcGIS se multiplica cada resultado obtenido por su factor correspondiente y se suman los elementos. La asignación

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	36

de pesos relativos a cada elemento se hace en función de la importancia de ese elemento en el proceso de infiltración del agua; es decir, que los criterios que más favorecen la infiltración del agua en el suelo son los de mayor importancia. Los indicadores en la ecuación presentada corresponden a los pesos relativos estándar de la metodología. En la Tabla 3-24 se presenta los rangos empleados para determinar el potencial de recarga hídrica según la metodología utilizada, mientras que en la Figura 3-12 se presenta el mapa de zonas de potencial recarga para el área de influencia del estudio.

Tabla 3-24 Potencial de recarga hídrica

POSIBILIDAD DE RECARGA	RANGOS
Muy alta	4,1 - 5
Alta	3,5 – 4,09
Moderada	2,6 – 3,49
Baja	2 – 2,59
Muy baja	1 – 1,99

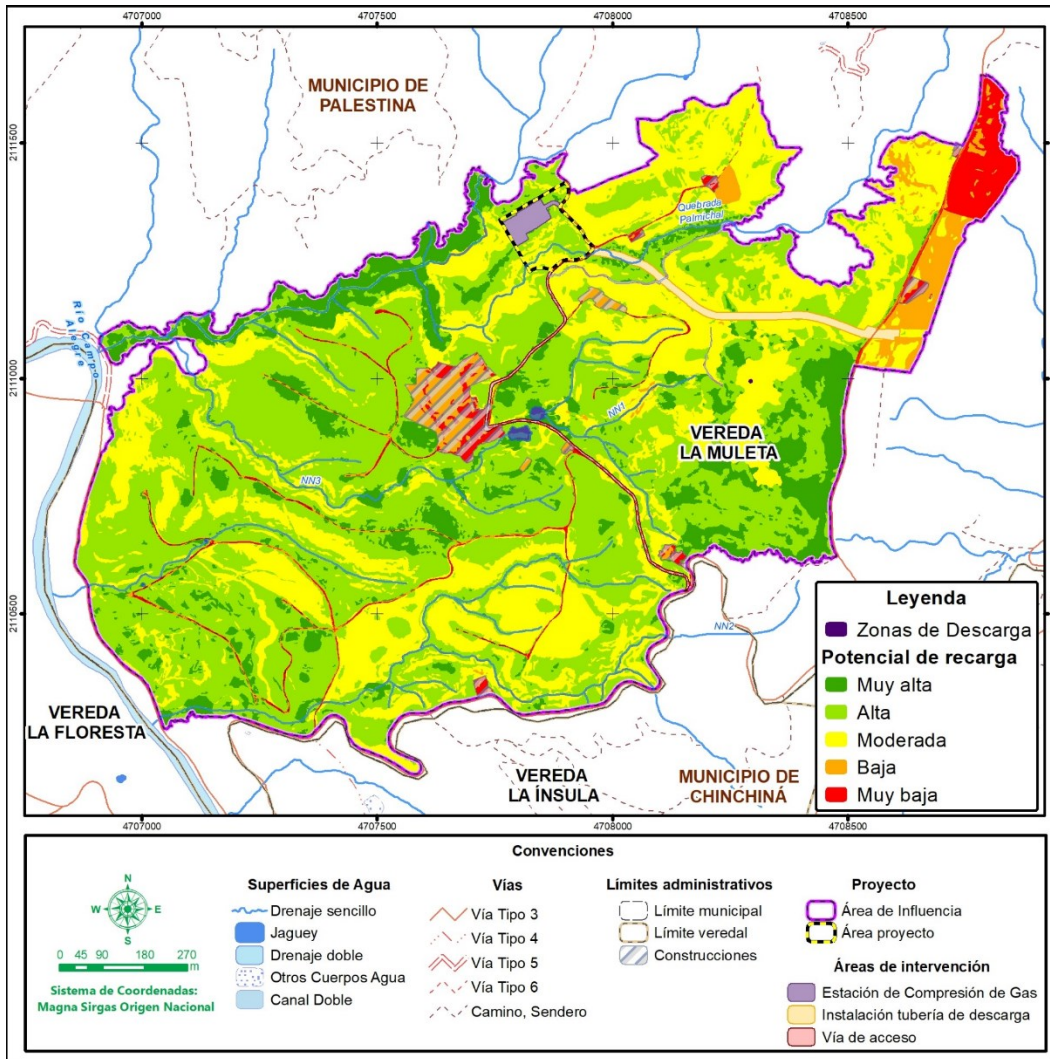
Fuente: Matus et al., 2009, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.7.6.2 Zonas de descarga

Las zonas más deprimidas, que para el caso del área del estudio corresponden con los corredores de los drenajes existentes, sirven como zonas de descarga del nivel freático, aportando agua al sistema hidrológico superficial.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	37

Figura 3-12 Zonas de descarga y potencial de recarga a unidades acuíferas



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

3.2.7.7 Vulnerabilidad de acuíferos a la contaminación

La vulnerabilidad a la contaminación engloba las características intrínsecas que determinan la susceptibilidad de un acuífero a ser adversamente afectado por una carga contaminante; ésta establece la facilidad con la cual ingresan las sustancias que puedan degradar la calidad del agua subterránea, mediante infiltración – percolación a través del suelo y la zona no saturada, esto según lo definido por Foster & Hirata (1991).

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	38
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Así mismo, la vulnerabilidad a la contaminación representa una propiedad cualitativa, relativa y adimensional, siendo que la exactitud de la evaluación depende en gran medida de la cantidad, calidad, fiabilidad y representatividad de los datos ingresados a la evaluación.

Por otra parte, el riesgo de contaminación es entendido, como la probabilidad de que las aguas subterráneas, alcancen concentraciones altas en determinadas sustancias por las cuales peligre la salud humana (Massone, 2022). Organismos internacionales como la Organización Mundial de la Salud (OMS) y la Environmental Protection Agency (EPA), recomiendan valores máximos permisibles, y en el país existe una regulación con respecto a los valores permisibles en agua potable, establecidos inicialmente en el Decreto 475 de 1998 y ajustados en la Resolución No. 2115 de 2007 emitida por el Ministerio de la Protección Social, el cual deroga el decreto 475/98.

En el ámbito de las aguas subterráneas el riesgo de contaminación está condicionado por la interacción de dos (2) componentes:

- La pasiva: representada por la vulnerabilidad, que no depende de la actividad humana y no cambia perceptiblemente con el tiempo.
- La activa: representada por la amenaza, que depende directamente de la actividad humana en la superficie y puede variar con el tiempo.

Se debe tener especial cuidado con la definición de activo y pasivo. La actividad humana en algunos casos puede cambiar características “intrínsecas” del acuífero, como la capacidad de atenuación de las capas sobre el acuífero, el mecanismo de recarga y el espesor de suelo; siendo que, si se establece como hipótesis de partida, que el riesgo de los acuíferos frente a un determinado contaminante es equivalente a la vulnerabilidad de los mismos, estos índices se podrán utilizar para evaluar el riesgo, en este caso riesgo y vulnerabilidad están estrechamente relacionados.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	39
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

3.2.7.7.1 Método GOD

A continuación, se describe el método GOD desarrollado por Foster & Hirata (1988). Este se caracteriza por ser simple y sistemático. La determinación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación, se considera el paso previo a la determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas con el fin de establecer prioridades. El método determina la vulnerabilidad intrínseca por lo que no toma en cuenta el tipo de contaminante.

De acuerdo con el método, la vulnerabilidad del acuífero es función de la inaccesibilidad de la zona saturada desde el punto de vista hidráulico a la penetración de contaminantes, y la capacidad de atenuación de los estratos encima de la zona saturada, como resultado de su retención física y la reacción química con los contaminantes (Foster & Hirata, 1988).

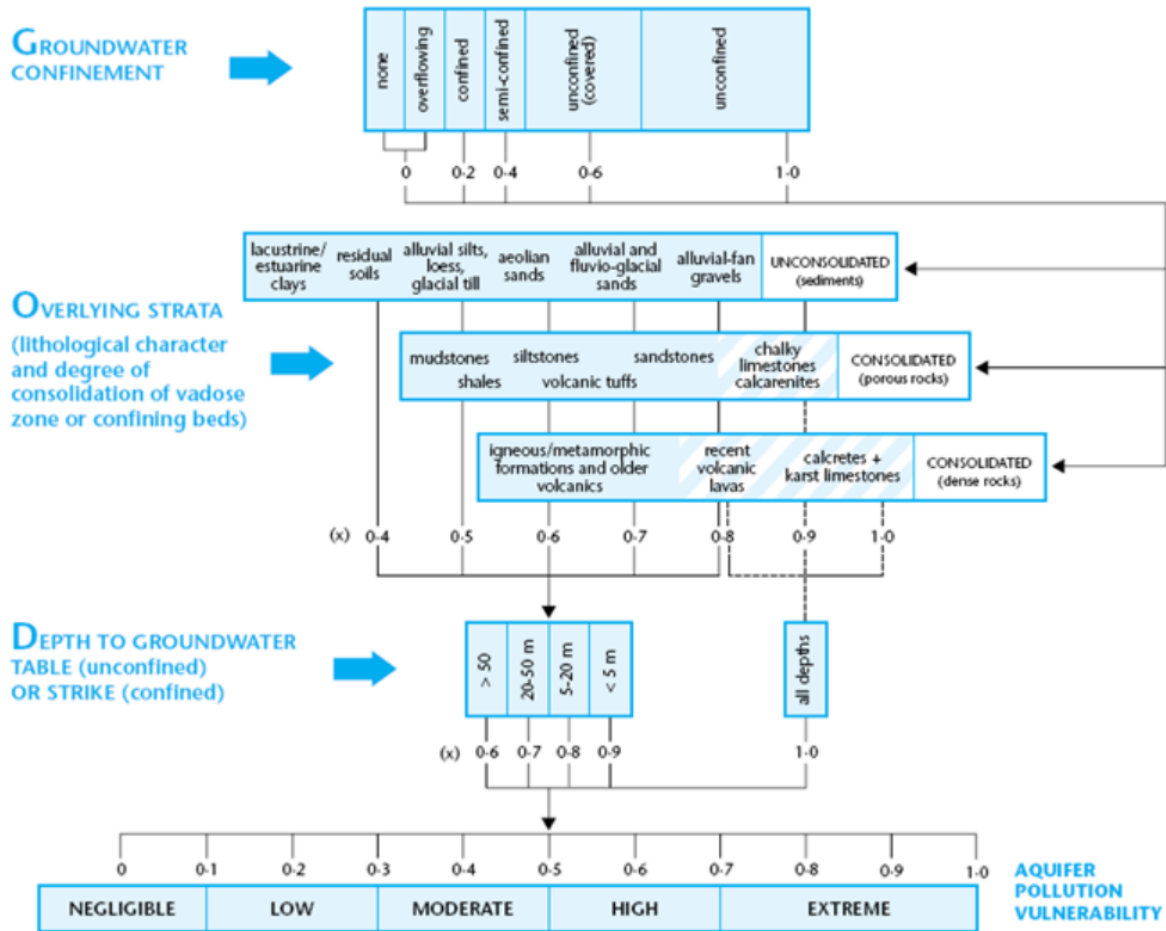
A pesar de que el método establece la vulnerabilidad relativa como la interacción entre la inaccesibilidad hidráulica y la capacidad de atenuación, existen factores que poseen relaciones complejas, que dependen de una gran cantidad de variables sencillas. Por ello, para solventar este inconveniente la metodología clasifica las siguientes variables:

- Distancia desde la fuente contaminante hasta la unidad hidrogeológica
- Ocurrencia del agua subterránea. Esto se refiere al grado de confinamiento que tiene la unidad hidrogeológica.
- Litología de la capa confinante o de la zona no saturada en caso de que la unidad hidrogeológica sea de tipo libre.

En la Figura 3-13 se presentan de manera esquemática las variables tomadas en cuenta por el método GOD y la valoración establecida por el mismo.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	40
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Figura 3-13 Método GOD para la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca



Fuente: Foster & Hirata, 1988.

3.2.7.7.1.1 Ponderación del método

La vulnerabilidad según el método se calcula como el producto de los siguientes factores:

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = G * O * D$$

Donde:

G= Índice por condición de confinamiento del acuífero u ocurrencia del agua subterránea (Groundwater occurrence).

O= Índice por litología de la capa confinante o zona no saturada (Overall Aquifer class).

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	41
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

D= Índice de profundidad o distancia medida desde la fuente contaminante y el techo de la unidad hidrogeológica (Depth).

Cada uno de los factores posee valores entre cero y uno, entre mayor es el valor más desfavorable es la condición. Este método solo asigna un peso indirecto a las variables a través de sus valores. La clasificación para determinar el grado de vulnerabilidad del acuífero se presenta en la Tabla 3-25.

Tabla 3-25 Rangos de vulnerabilidad método GOD

VULNERABILIDAD	RANGOS
Muy Baja	< 0,1
Baja	0,1 – 0,3
Moderada	0,3 – 0,5
Alta	0,5 – 0,7
Muy Alta	>0,7

Fuente: Foster & Hirata, 1988, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

El método sólo toma en cuenta la posible atenuación antes de alcanzar la zona saturada, este, no toma en cuenta la dilución y dispersión de los contaminantes, sino que únicamente considera la posible atenuación del contaminante antes de alcanzar la zona saturada, por lo cual se considera un método conservador. Por estas razones se escogió el método GOD para calcular la vulnerabilidad de las unidades hidrogeológicas a la contaminación.

A continuación, en la Tabla 3-26 se presenta el análisis de cada uno de los parámetros empleados y la valoración del índice de vulnerabilidad GOD según la metodología de Foster & Hirata (1988).

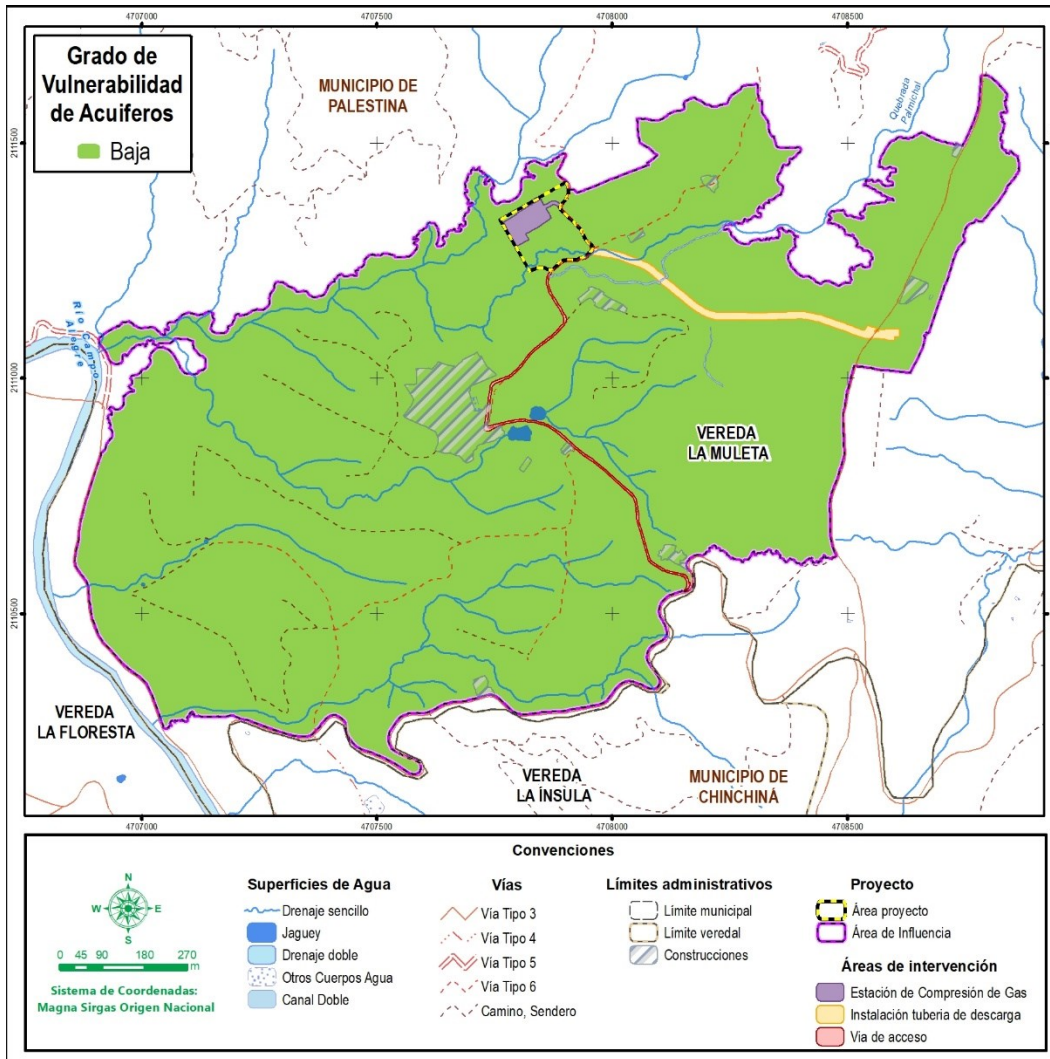
Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	42

Tabla 3-26 Resultado de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación

UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	CARACTERÍSTICAS	CAPACIDAD ESPECÍFICA	PRODUCTIVIDAD	G	O	D	ÍNDICE GOD	VULNERABILIDAD
A3	Acuíferos libres de extensión regional con porosidad primaria, litológicamente está conformada por depósitos recientes con arenas, en tamaños y porcentajes variables. Recibe recarga directa producto de lluvias	Media Entre 1,0 y 2,0 L/s/m	Media	0,6	0,4	0,9	0,216	Baja
A4	Acuíferos libres discontinuos de extensión local con porosidad primaria, litológicamente está conformada por depósitos de arenas, limos y arcillas, en tamaños y porcentajes variables. Recibe recarga directa producto de lluvias.	Baja Entre 0,05 y 1,0 L/s/m	Baja	0,6	0,4	0,9	0,216	Baja
B2	Acuíferos continuos con porosidad secundaria de extensión regional, conformados por rocas volcánicas y metamórficas. Recibe recarga producto de percolación de agua de los niveles superiores.	Media Entre 1,0 y 2,0 L/s/m	Media	0,4	0,4	0,9	0,144	Baja

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-14 Vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.7.8 Caracterización hidrogeoquímica

La hidroquímica es una rama que estudia las propiedades químicas del agua superficial y subterránea y su relación con la geología regional. Analiza los iones disueltos en agua y los procesos de interacción del agua y el medio sólido. Estos últimos, dependen de la naturaleza del medio, de la composición del agua original, de las características de la zona no saturada, de la temperatura, de las acciones antrópicas, de los mecanismos de recarga y descarga y de los parámetros fisicoquímicos (Custodio & Llamas, 1996).

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	44
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

El objetivo de este análisis es conocer la composición iónica del agua subterránea y su interacción con las rocas y los minerales presentes en las unidades geológicas acuíferas con las cuales está relacionada. Por lo tanto, la observación de la distribución espacial de estas características y la explicación de sus variaciones, pueden informar sobre el movimiento del agua subterránea, recarga, circulación, almacenamiento, descarga y cantidad de sustancias disueltas en la misma.

3.2.7.8.1 Balance Iónico

Para la caracterización hidrogeoquímica inicialmente se toman las concentraciones analíticas obtenidas para los iones principales y se convierten las concentraciones de mg/L a meq/L (miliequivalentes por litro), utilizando los pesos equivalentes de cada ion:

$$\begin{array}{ll} \text{meq/L HCO}_3^{-1} = (\text{mg/L}) / 61 \text{ mg/meq} & \text{meq/L Na}^{+1} = (\text{mg/L}) / 23 \text{ mg/meq} \\ \text{meq/L SO}_4^{-2} = (\text{mg/L}) / 48 \text{ mg/meq} & \text{meq/L Ca}^{+2} = (\text{mg/L}) / 20 \text{ mg/meq} \\ \text{meq/L Cl}^{-1} = (\text{mg/L}) / 35,5 \text{ mg/meq} & \text{meq/L Mg}^{+2} = (\text{mg/L}) / 12 \text{ mg/meq} \end{array}$$

Luego se suman por aparte los meq/L de aniones y los meq/L de cationes y finalmente se calcula el balance iónico, definido como:

$$\text{BALANCE} = (\text{suma cationes} - \text{suma aniones}) / (\text{suma cationes} + \text{suma aniones}) * 100$$

Con esta definición, si el balance iónico da negativo indica un exceso o sobre estimación de aniones y si da positivo es exceso o sobre estimación de cationes. El porcentaje que se acepta para concluir que no hubo sobre estimaciones (o, al contrario, sub estimaciones) es entre -10% y 10%. En la Tabla 3-27 se presentan los resultados estimados por el laboratorio (Ver ANEXOS\J. MONITOREOS\2. Agua Subterránea) para el Balance Iónico del punto analizado.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	45

Tabla 3-27 Balance iónico en la muestra evaluada

TIPO DE PUNTO	ID INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	ID LABORATORIO	CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	SUMA ANIONES (meq/L)	SUMA CATIONES (meq/L)	BALANCE IÓNICO (%)
MANANTIAL	MANANTIAL 01	25588	80,4	0,72	0,85	7,84

Fuente: MCS Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S., 2024.

Custodio & Llamas (1996) establecen valores aceptables para el balance iónico a partir de la conductividad eléctrica, ver Tabla 3-28.

Tabla 3-28 Balance iónico aceptable a partir de la conductividad eléctrica

CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	50	200	500	2000	>2000
BALANCE IÓNICO (%)	30	10	8	4	4

Fuente: (Custodio & Llamas, 1996).

Teniendo en cuenta que la conductividad eléctrica del agua del punto muestreado se encuentra por debajo de 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, se contempla como aceptable la muestra si tiene un balance iónico por debajo del 30%, considerando lo anterior, la muestra de agua subterránea del Manantial 01 se consideran aceptable.

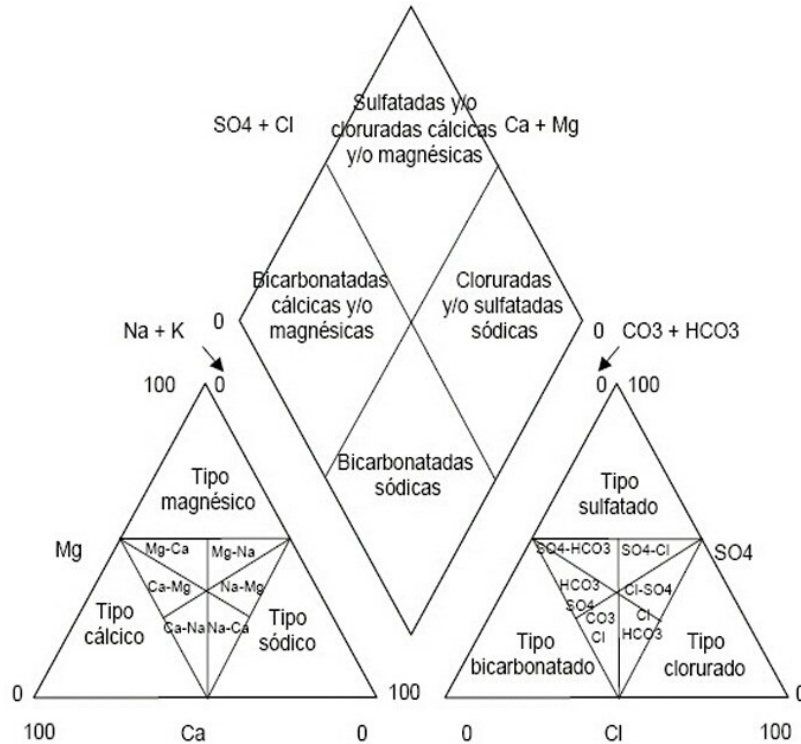
3.2.7.8.2 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es una herramienta efectiva en la segregación analítica de datos para un estudio con respecto a los orígenes de los constituyentes disueltos en aguas. Las características y tipo del agua se pueden ver modificadas por las propiedades del suelo y sus aniones y cationes (Moreno Merino et al., 2021).

En este Diagrama se representa dos (2) componentes (aniones y/o cationes) en forma simultánea, es triangular, y cada uno de los vértices de este triángulo equilátero representa el 100% de la concentración de un elemento en meq/L , y el 0% del elemento se sitúa en el vértice siguiente, según el sentido de las agujas del reloj. Los valores de la concentración de cada elemento se ubican trazando desde el punto del lado del triángulo que representa el porcentaje, una recta paralela al lado opuesto del vértice correspondiente al 100% del elemento que se considera. Solo es posible representar tres iones (tres aniones o tres cationes) de cada análisis, pero es posible representar muchos análisis en el mismo gráfico como se muestra en la Figura 3-15.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	46

Figura 3-16 Diagrama de Piper - Definición de los tipos de aguas



Fuente: Martínez Alfaro et al., 2006.

La estructura del diagrama de Piper contiene dos triángulos y un rombo, de los cuales cada uno tiene su interpretación:

- Un triángulo para los cationes mayoritarios: ion calcio (Ca^{2+}) ion magnesio (Mg^{2+}) y la suma de los iones sodio y potasio ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido de las agujas del reloj.
- Un triángulo para los aniones mayoritarios: ion cloruro (Cl^{-}), ion sulfato (SO_4) y la suma de los iones carbonato y bicarbonato ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^{-}$), cada uno de ellos incrementándose en el sentido antihorario.
- Un diagrama romboidal integrador en el que se representan la suma de los cationes ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) y ($\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$) en un par de lados paralelos y complementarios, mientras en el otro par de lados se presenta la suma de aniones ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3^{-}$) y sus complementarios ($\text{SO}_4 + \text{Cl}^{-}$).

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	48

Desde que el agua alcanza la superficie freática más próxima hasta que sale en un río, manantial o captación, pueden transcurrir unos días, semanas o años, y el recorrido puede ser de unos metros o varios kilómetros. Por tanto, la evolución química del agua dependerá de los minerales con los que entre en contacto y de la duración de dicho contacto, que a su vez depende de la velocidad del flujo subterráneo.

A mayor tiempo de permanencia en el terreno mayor será la salinidad del agua. Aunque las reacciones y los procesos químicos que se desarrollan son muy variados, como norma general, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son generalmente bicarbonatadas, después predomina el sulfato y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chevotareb (Figura 3-17).

Figura 3-17 Secuencia de Chevotareb

	...→ Recorrido y tiempo de permanencia en el acuífero - ...→
Aniones predominantes:	$\text{HCO}_3^- \rightarrow \text{HCO}_3^- \text{ y } \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \rightarrow \text{SO}_4^{2-} \text{ y } \text{Cl}^- \rightarrow \text{Cl}^-$
	...→ Aumento de la salinidad ...→

Fuente: Kehew, 2001.

Esta secuencia se debe a la solubilidad y abundancia de las distintas sales en el subsuelo. El agua disuelve o altera los minerales que encuentra (si tiene tiempo suficiente para ello), hasta que se alcanza el tope marcado por la constante de equilibrio correspondiente, después de alcanzar este tope, ya no disolverá más ese mineral. Continuará disolviendo otros minerales con una constante más elevada, hasta que de nuevo se alcance el equilibrio y así sucesivamente. La solubilidad de los carbonatos es mucho más baja que la de los sulfatos, que, a su vez, son menos solubles que los cloruros; por tanto, se alcanza primero el tope para los bicarbonatos, después para los sulfatos y finalmente para los cloruros.

En cuanto a la abundancia, se refiere a la probabilidad que existe de que un agua encuentre minerales que le aporten bicarbonatos, sulfatos o cloruros. En general la disponibilidad de las distintas sales es así: siempre existe un aporte de bicarbonatos representado por el CO₂

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	49

del suelo, (cuando no existan sales carbonatadas, estará normalmente la calcita, que también es muy abundante), en segundo lugar, los yesos (sulfatos cálcicos) son relativamente frecuentes en series sedimentarias y finalmente las sales cloruradas son las menos abundantes.

En la Tabla 3-29 se presentan los resultados de las concentraciones de los aniones y cationes principales en cada una de las muestras.

Tabla 3-29 Contenido en meq/L de aniones y cationes principales en la muestra evaluada

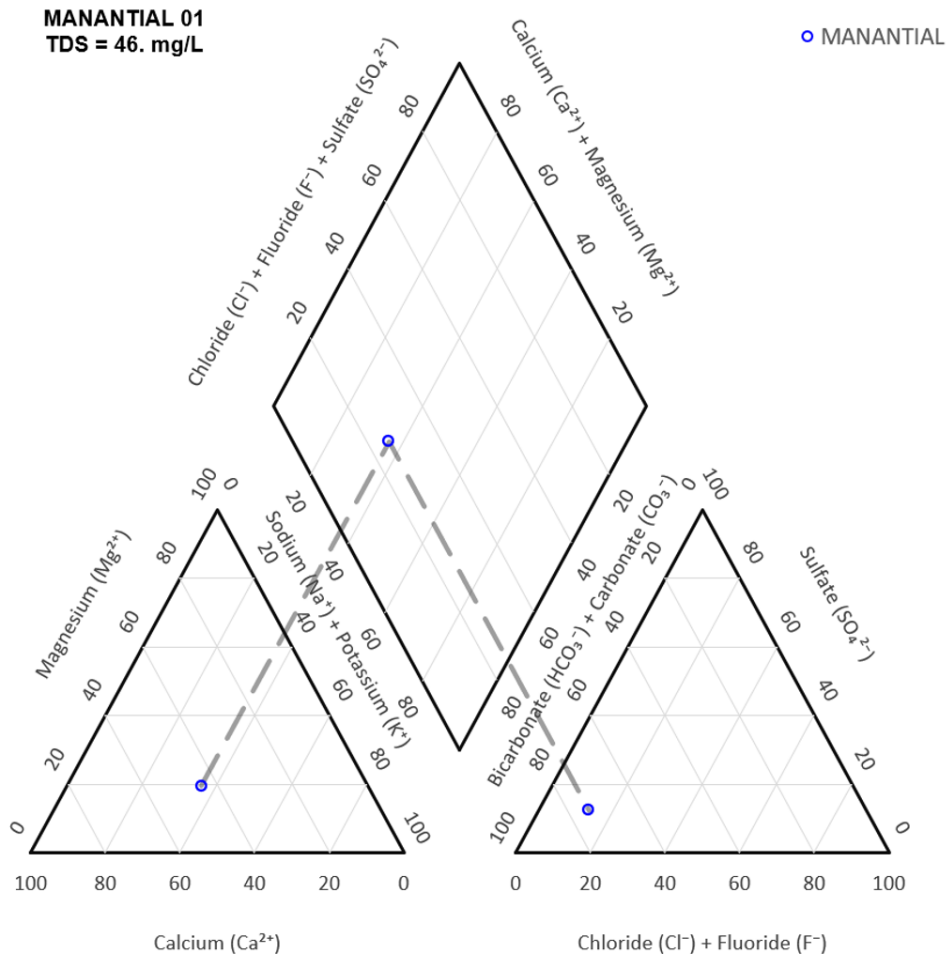
IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO	MANANTIAL
ID INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	MANANTIAL 01
ID LABORATORIO	25588
CARBONATOS (meq/L)	0,03
BICARBONATOS (meq/L)	0,59
CLORUROS (meq/L)	0,11
SULFATOS (meq/L)	0,10
POTASIO (meq/L)	0,04
MAGNESIO (meq/L)	0,17
SODIO (meq/L)	0,27
CALCIO (meq/L)	0,38

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Teniendo en cuenta los resultados obtenidos en el análisis de laboratorio, se realizó el Diagrama de Piper, los datos utilizados se presentan en la Tabla 3-29. En la Figura 3-18 se muestra la distribución y composición de estas.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	50

Figura 3-18 Resultados del Diagrama de Piper

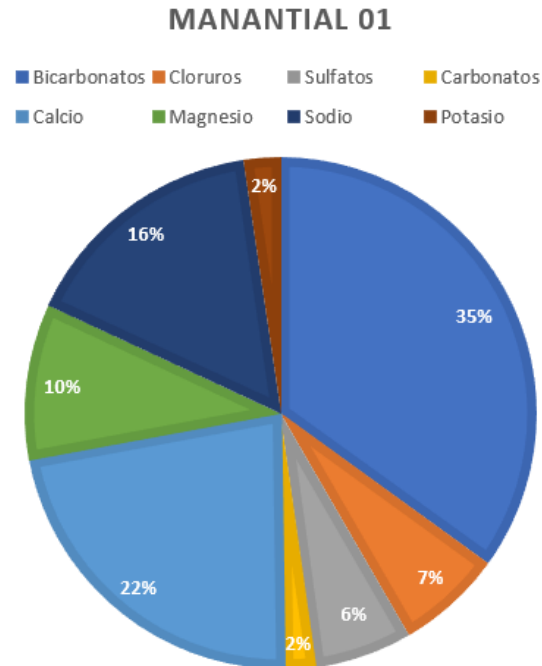


Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

A continuación, se presenta la composición de los puntos de monitoreo a través de un diagrama de pie (torta), en los cuales se podrá visualizar el porcentaje de cada elemento. Se podría decir que esto es información complementaria al diagrama de Piper, puesto que especifica a través de porcentajes, los contenidos de cationes (Na. K. Ca. Mg) y aniones (Cl. SO₄. CO₃. HCO₃) presentes en cada una de las muestras. Este método permite seleccionar los constituyentes (iones) con más altos porcentajes, los cuales indicaran el tipo de agua presente en un área determinada. Para interpretar el diagrama debe considerarse que, para su construcción, es necesario que los iones estén reducidos a porcentaje de miliequivalentes por litro (meq/L).

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	51

Figura 3-19 Gráfica de distribución con base en los resultados del Diagrama de Piper



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

En la Tabla 3-30 se presenta la clasificación del agua obtenida en la muestra de agua subterránea analizada, a partir de la interpretación de los diagramas de Piper y Pie presentados en la Figura 3-18 y Figura 3-19 respectivamente. Cabe resaltar que esta clasificación obedece únicamente a las proporciones en que se obtuvieron los diferentes iones (en meq/L) y no a las cantidades en sí de estos.

Tabla 3-30 Resumen clasificación hidrogeoquímica del agua subterránea

IDENTIFICACIÓN DEL PUNTO	ID INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	ID LABORATORIO	ESTE	NORTE	CLASIFICACIÓN SEGÚN IONES PREDOMINANTES
MANANTIAL	MANANTIAL 01	25588	4.708.294	2.110.994	Bicarbonatada Cálctica

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Como se resume en la Tabla 3-30, se observa en los Diagramas de Piper de la Figura 3-18 y en el diagrama de Pie de la Figura 3-19, que el agua encontrada en el manantial ubicado dentro del área de influencia del estudio es agua “bicarbonatada cálcica”.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	52

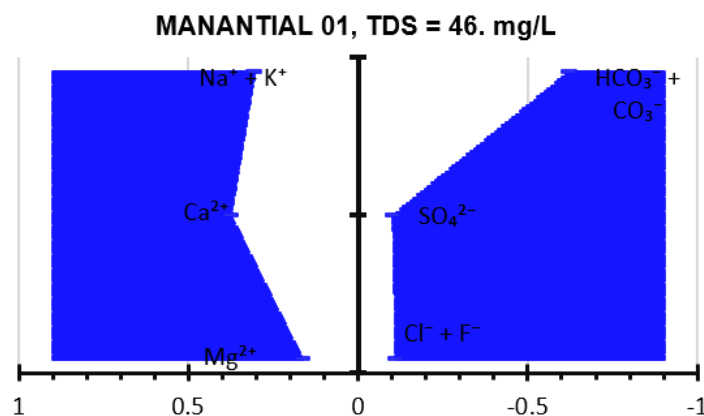
3.2.7.8.3 Diagrama de Stiff

Esta gráfica está compuesta por tres (3) ejes horizontales, cada uno de ellos uniendo un catión y un anión. Todos los cationes se disponen al costado izquierdo del diagrama, y los aniones al derecho. Siempre el Na^+ se confronta con el Cl^- , el Ca^{+2} con el HCO_3^- y el Mg^{+2} con el SO_4^{2-} (a veces también se pueden mostrar otros dos (2) iones, como el Fe^{+2} contra el NO_3). Todos los ejes horizontales están a la misma escala (lineal) y las concentraciones están dadas en meq/L.

Dos (2) características sobresalen en este tipo de diagrama: por un lado, permite visualizar claramente diferentes tipos de agua (cada una con una configuración particular) y, en forma simultánea, permite dar idea del grado de mineralización (ancho de la gráfica). Permite apreciar los valores de las relaciones iónicas con respecto a la unidad y la variación de las relaciones entre cationes y entre aniones de una muestra.

En la Figura 3-20 se presenta el diagrama de Stiff asociado al punto muestreado de agua subterránea; para realizar este diagrama se utilizó la información que se muestra en la Tabla 3-29.

Figura 3-20 Resultados del Diagrama de Stiff



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

El dióxido de carbono (CO_2) disuelto en agua y los diversos compuestos que forma en ella juegan un papel importantísimo en la química del agua, este, procede fundamentalmente de la zona edáfica (respiración de organismos y descomposición de la materia orgánica) y

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	53

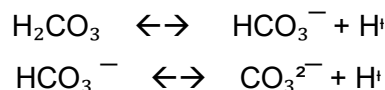
se disuelve en el agua en función de su presión parcial, una parte permanece en disolución en forma de gas mientras otra reacciona con el agua para dar ácido carbónico (H_2CO_3) que se disocia parcialmente para dar iones carbonato y bicarbonato (IGME, 2020). De acuerdo con lo anterior, el alto contenido de bicarbonatos encontrados en las muestras puede estar relacionado con la disolución y reacción del dióxido de carbono (CO_2) presente en el suelo con el agua.

Los altos contenidos de calcio en las aguas subterráneas se deben a que este suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales, en rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonato: CaCO_3 (calcita y aragonito), $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ (dolomita) o de sulfato: $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (yeso) o CaSO_4 (anhidrita).

3.2.7.8.4 Índice de saturación de Langelier

El Índice de Saturación de Langelier (LSI) es un modelo de equilibrio derivado del concepto teórico de saturación y proporciona un indicador del grado de saturación del agua con respecto al carbonato de calcio. El nivel de saturación de Langelier usa el concepto de saturación basado en el pH como variable principal. El LSI puede ser interpretado como el cambio requerido para llevar el agua a equilibrio.

Cuando el agua posee un Índice de Saturación de Langelier (LSI) de 1,0 es una unidad por encima de la saturación, entonces reduciendo el pH por 1 unidad llevará el agua a equilibrio. Esto ocurre porque la porción de alcalinidad total presente como CO_3^{2-} disminuye con el pH, de acuerdo con las reacciones de equilibrio que describen la disociación del ácido carbónico (H_2CO_3):



- Si el LSI es negativo: No hay potencial de incrustaciones, el agua disolverá CaCO_3 .
- Si el LSI es positivo: Se pueden formar incrustaciones y puede ocurrir precipitación de CaCO_3 .

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	54
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

- Si LSI es cercano a cero: Línea Límite Potencial de Incrustación. Cambio en la Calidad del agua o la temperatura, o evaporación pueden cambiar este índice.

El LSI simplemente indica la fuerza impulsora para la formación de incrustaciones y crecimiento, en términos del pH como la variable maestra. A fin de calcular el LSI, es necesario conocer la alcalinidad (mg/l as CaCO₃), la dureza cálcica (mg/l Ca²⁺ más CaCO₃), los sólidos totales disueltos (mg/l STD), el pH actual, y la temperatura del agua (°C).

En la Tabla 3-31 se muestran los resultados de los Índices de Saturación de Langelier para el punto muestreado en el área de estudio y su indicación de acuerdo con este autor.

Tabla 3-31 Cálculo del Índice de Saturación de Langelier

ID INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA	MANANTIAL 01
pH (Unidades)	7,35
CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA (μS/cm)	80,4
CALCIO - Ca ²⁺ (mg/L)	7,53
BICARBONATO - HCO ₃ ⁻ (mg/L)	36,0
TEMPERATURA (°C)	24,0
pH S	11
LSI	-.3,3
INDICACIÓN BASADA EN LANGELIER	El agua está subsaturada con respecto al carbonato de calcio. El agua subsaturada tiende a eliminar los revestimientos protectores de carbonato de calcio existentes en tuberías y equipos. Corrosión seria.

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.7.9 Modelo Hidrogeológico Conceptual

Un modelo conceptual se puede definir como una versión simplificada del mundo real (en este caso de un sistema de acuíferos), el cual representa de manera aproximada los aspectos más relevantes respecto a las características hidrogeológicas del medio. Como el mundo real es complejo, se hace necesario simplificarlo mediante el empleo de los datos levantados en campo y la información obtenida a partir de estos. La simplificación es introducida como un grupo de suposiciones las cuales expresan el mundo real para obtener un análisis predictivo que sirva como herramienta de gestión para planificar el uso del recurso hídrico subterráneo. En línea con lo anterior, el modelo hidrogeológico conceptual descrito a continuación involucra o es acotado por las unidades geológicas correspondiente con: Depósitos aluviales recientes (Qal), Depósitos Coluvio aluviales (Qca) y Depósitos

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	55

Fluvio-lacustres (Qfl), los cuales alcanzan en el área un espesor promedio de 5 metros, Depósitos de plano de inundación (Qpi) que alcanzan un espesor de 2 metros, Depósitos de lahar (Qfl) que logran un espesor de hasta 10 metros y espesos complejos rocosos de origen volcánico y metamórfico de edad cretácica, correspondientes con los Complejo Quebradagrande (Kvc) y Complejo Arquía (Kies); siendo que es en estas unidades geológicas donde se localizan los niveles acuíferos identificados en el área de evaluación.

A continuación, se relacionan los conceptos y aspectos más relevantes respecto al modelo hidrogeológico del área de influencia del presente estudio. Lo anterior, con el objetivo de representar de manera simplificada las características hidrogeológicas del medio físico a partir del conocimiento adquirido mediante la recopilación, análisis e interpretación de información primaria y secundaria.

Las suposiciones que constituyen un modelo conceptual están relacionadas con variables como:

- La geometría del acuífero en el área de estudio.
- Las condiciones de frontera (Zona de recarga, evapotranspiración, Niveles piezométricos iniciales, ríos, etc.).
- Características del medio poroso que conforma el acuífero (homogeneidad, isotropía).
- Tipo de flujo en el acuífero.
- Comportamiento de la tabla de agua.
- Propiedades hidráulicas.

Para el caso particular del modelo hidrogeológico conceptual para el área de influencia del estudio, se cuenta con información primaria y secundaria de geología, hidrogeología, hidrología y calidad de agua subterránea, la cual ha sido organizada y analizada obteniendo a partir de esta, las variables más relevantes.

A continuación, se presentan las variables generales que configuran el modelo hidrogeológico conceptual del área de influencia del estudio.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	56
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

3.2.7.9.1 Clima

De acuerdo con lo presentado en el numeral 3.2.9.1.9 *Clasificación Climática* del Capítulo 03.2.9.ABIOT(ATMOSF) del presente estudio, según la clasificación de Caldas – Lang, el área de influencia del presente estudio se encuentra en un piso térmico “Templado” de tipo climático “Templado Húmedo (TH)” debido a que se encuentra en una altitud promedio de 1.322 m.s.n.m., con una temperatura media de 16,5°C.

3.2.7.9.2 Topografía y relieve

De acuerdo con lo presentado en el numeral 3.2.2.2 *Geomorfología local* del capítulo 03.2.2.ABIOT(GEOM) del presente estudio, en el área de influencia se pueden observar dos (2) zonas diferenciables, en las cuales se aprecia una tendencia que va de pendientes ligeramente planas a ligeramente inclinadas hacia el centro, correspondientes a las cimas de los Depósitos de Lahar, asimismo, en este sector se observan zonas con escarpes que se evidencian en pendientes que pasan de empinadas a fuertemente empinadas, las cuales pueden ser consecuencia de la génesis volcánica del área y que son marcadas por los drenajes del área de influencia, a su vez, las pendientes permiten ver que al este del área en mención, se observan zonas que varían de predominantemente escarpadas a totalmente escarpadas, esta diferencia de pendientes se relaciona con materiales rocosos más competentes.

3.2.7.9.3 Geología

Geológicamente el área de interés está localizada sobre formaciones sedimentarias de origen fluvial de edad cuaternaria y espesas formaciones rocosas de edad cretácica y origen volcánico, y metamórfico; las primeras corresponden con los Depósitos aluviales recientes (Qal), Depósitos Coluvio aluviales (Qca) y Depósitos Fluvio-lacustres (Qfl), Depósitos de plano de inundación (Qpi), Depósitos de lahar (Qfl) que alcanzan en el área un espesor promedio de 5 metros para las tres primeras y posteriormente de 2 y 10 metros en el orden respectivo, las cuales se caracterizan por estar conformadas litológicamente por depósitos inconsolidados tipo arcillas, arenas, gravas y cantos de diversos tamaños que conforman acuíferos de porosidad primaria, debido a que poseen condiciones hidrogeológicas favorables, tanto para almacenamiento, como para el flujo de agua

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	57

subterránea; las segundas corresponden con el Complejo Quebradagrande (Kvc) y Complejo Arquía (Kies), los cuales están conformados litológicamente por rocas volcánicas de textura porfirítica de grano fino a medio y esquistos cuarzo-sericitico con crenulación respectivamente, conformando así acuíferos con porosidad secundaria asociada al alto grado de fracturamiento de la roca, resultado del control estructural identificado en la zona. Estas unidades se encuentran caracterizadas a profundidad en el *Capítulo 03.2.1.ABIOT(GEOL)* del presente estudio.

3.2.7.9.4 Hidrología

El área de estudio se ubica en medio de dos cauces de relevancia en el departamento de Caldas: El río Campoalegre que limita con el borde occidental del área de influencia y el río Chinchiná. Según la zonificación hidrográfica nacional establecida por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), la zona de estudio contemplada para la ECG Palestina está dentro del Área Hidrográfica Magdalena-Cauca (2, la Zona Hidrográfica del Cauca (26) y dos Subzonas Hidrográficas: Río Otún y otros Directos al Cauca (2613) y Río Chinchiná (2615) (IDEAM, 2021). Estos, tienen una dirección predominante de flujo en sentido este – oeste.

3.2.7.9.5 Estimación de recarga (Balance Hídrico en Suelo)

El potencial de las aguas subterráneas de un acuífero representa la máxima cantidad de agua a sustraer del acuífero. Dicho potencial se estima mediante la recarga al acuífero, que se determina mediante la estimación del balance hídrico que se realiza partiendo del análisis de los datos de precipitación y temperatura media mensual multianual presentada en el componente clima del presente estudio.

- Para estimar la recarga se emplearon parámetros como: la precipitación mensual, la retención pluvial, la capacidad de infiltración de los suelos y sus características, la cobertura vegetal, evapotranspiración real, uso del suelo y pendiente del terreno.

Lo anterior, empleando la metodología para estimación de recarga potencial en acuíferos mediante balance en suelos descrita en el artículo científico publicado en la

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	58
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Revista Geológica de América Central (Schosinsky, 2006) y que se describe a continuación. Los cálculos efectuados para la estimación del balance en suelos, la recarga potencial y real se relacionan en ANEXOS\H. GEOSFERICO\4 Hidrogeología\4.3. Balance Hidrico En Suelos.

- En primer lugar, se determina la fracción de lluvia que es interceptada por el follaje. En segundo lugar, se requiere conocer la infiltración del agua de lluvia hacia el suelo, generada por la precipitación que llega a su superficie y, en tercer lugar, se debe realizar un balance de suelos, que nos permita estimar el agua que drena del suelo hacia el acuífero, que se encuentra ubicado debajo del suelo (Schosinsky, 2006).
- Para el cálculo se considera que lluvias menores de 5 mm mensuales, no van a generar infiltración, estimando que, en un mes con lluvia, al menos 5 mm son retenidos por el follaje sin llegar al suelo (Schosinsky, 2006). Adicionalmente, se considera que la retención de la lluvia en los follajes es del 12% (Butler, 1957) de la precipitación mensual. (Tabla 3-32).

3.2.7.9.5.1 Coeficiente de infiltración

El coeficiente de infiltración (C_i), es función de los siguientes parámetros:

K_p : Fracción que se infiltra por acción de la pendiente.

K_v : Fracción que se infiltra por acción de la cobertura vegetal.

K_{fc} : Fracción que se infiltra por textura del suelo.

- Fracción que se infiltra por acción de la pendiente (K_p): La fracción que se infiltra por acción de la pendiente, es calificada según Schosinsky & Losilla (2000) (Ver Tabla 3-33). De acuerdo con los intervalos de pendiente y el área establecida para el balance hídrico, se determina el área de cada rango de pendiente dentro del área de influencia del proyecto, posteriormente a cada rango de pendiente se le ajusta un valor de K_p y este se pondera con respecto al porcentaje del área de influencia determinado haciendo uso de la herramienta "SUMAPRODUCTO" de Excel. (Ver Tabla 3-34).

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	59
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

- Fracción que se infiltra por acción de la cobertura vegetal (Kv): La fracción que se infiltra por acción de la cobertura vegetal y la profundidad de las raíces, es determinada a partir del mapa de cobertura vegetal elaborado para el componente biótico del área de estudio. Este criterio se califica según (Schosinsky & Losilla, 2000) (Ver Tabla 3-35 y Tabla 3-36) y de acuerdo con lo expuesto, en la Tabla 3-37 que presenta los valores ponderados de Kv y profundidad de las raíces para el área de estudio.

Los datos de precipitación consignada en la Tabla 3-32, fueron calculados como el promedio de la media mensual multianual incluidos en el *numeral 3.2.9.1 Clima* del presente estudio.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	60
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Tabla 3-32 Intersección de lluvia en el follaje

ID	PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
P	Precipitación (mm)	148,26	213,45	303,56	325,43	344,14	304,96	232,56	230,20	227,18	278,86	300,76	207,70
Cfo	Coefficiente de retención fluvial en follaje	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Ref	Retención de lluvia (mm)	17,79	25,61	36,43	39,05	41,30	36,60	27,91	27,62	27,26	33,46	36,09	24,92

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-33 Componente por acción de la pendiente (Kp)

POR PENDIENTE	PENDIENTE	Kp
Muy plana	0,02% – 0,06%	0,30
Plana	0,3% - 0,4%	0,20
Algo Plana	1% - 2%	0,15
Promedio	2% - 7%	0,10
Fuerte	Mayor de 7%	0,06

Fuente: Schosinsky, 2006, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-34 Calificación de Kp para el área de influencia

RANGO DE PENDIENTES	ÁREA TOTAL (ha)	ÁREA TOTAL (%)	Kp
Plana 0-1%	0,25	0,15%	
Ligeramente Plana, 1-3%	3,04	1,90%	
Ligeramente inclinada, 3-7%	10,70	6,68%	
Moderadamente Inclinada, 7-12%	15,53	9,71%	
Fuertemente inclinada, 12-25%	39,01	24,38%	
Ligeramente escarpada o ligeramente empinada, 25-50%	54,21	33,88%	
Moderadamente escarpada o moderadamente empinada, 50-75%	25,61	16,01%	
Fuertemente escarpada o fuertemente empinada, 75-100%	7,97	4,98%	
Totalmente escarpada, >100%	3,69	2,31%	
Total general	159,99	100,00	0,081

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-35 Componente por acción de la cobertura vegetal (Kv)

COBERTURA VEGETAL	Kv
Cobertura con zacate menos del 50%	0,09
Terrenos cultivados	0,10
Cobertura con pastizal	0,18
Bosques	0,20
Cobertura con zacate más del 75%	0,21

Fuente: Schosinsky, 2006, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-36 Profundidad de raíces por tipo de cultivo

PROFUNDIDAD DE RAICES	METROS
Alfalfa (pastos)	1 - 2
Algodón	1 – 1,7
Banano	0,5 – 0,8
Caña de azúcar	1,2 – 2,0
Frijol	0,5 – 0,7
Cebolla	0,3 – 0,5
Cítricos	1,2 – 2,0
Zacate	0,3 – 0,5
Bosques	2,0 – 3,0

Fuente: Schosinsky, 2006, adaptado por CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-37 Calificación según cobertura vegetal para el área de influencia

COBERTURA VEGETAL	ÁREA (%)	Kv	PROFUNDIDAD RAICES EFECTIVA (mm)
Aguacate	8,28%	0,1	3000
Café	30,43%	0,1	3000
Canales	0,12%	0	0
Cuerpos de agua artificiales	0,02%	0	0
Explotación de hidrocarburos	0,03%	0	0
Guaduales	13,14%	0,1	3000
Guayaba	9,40%	0,1	3000
Jaguey	0,11%	0	0
Mosaico de cultivos	7,79%	0,1	1500
Pastos enmalezados	14,24%	0,18	500
Pastos limpios	0,60%	0,21	100
Plátano	3,42%	0,1	3000
Red vial y territorios asociados	1,85%	0,09	0
Tejido urbano continuo	1,56%	0	0
Tejido urbano discontinuo	2,31%	0	0
Terrenos en preparación	2,20%	0,09	0
Tomate	4,41%	0,1	1500
Vegetación secundaria baja	0,09%	0,21	2000
TOTAL	100.00	0,108	2197

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	62

3.2.7.9.5.2 Fracción que infiltra por la textura del suelo

La fracción que se infiltra por textura de suelo se realiza con base a la información del inventario de clasificación de suelos del área de influencia (Tabla 3-38).

La infiltración básica a partir de las pruebas de infiltración (Ver ANEXOS\H. GEOSFERICO\4 Hidrogeología\4.4. Pruebas De Infiltración) realizadas en cada una de las unidades del área de estudio, se estimó en un valor ponderado de 33.183,4 mm/día.

Si f_c se encuentra entre 16 y 1.568 mm/día, se calcula el coeficiente k_{fc} mediante la siguiente ecuación:

$$Kf_c = 0,267 \ln(fc) - 0,000154fc - 0,723$$

Si f_c es menor a 16 mm/día:

$$Kf_c = 0,0148fc/16$$

Si f_c es mayor a 1.568 mm/día:

$$Kf_c = 1$$

Donde:

f_c : Infiltración básica (mm/día)

partiendo de las anteriores condiciones, se tiene que el valor de f_c es de 33.183,04 mm/día, por lo tanto, el valor de $k_{fc}=1$.

Seguido de obtener cada uno de los parámetros se calcula el coeficiente de infiltración (C_i) de la siguiente manera:

Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es mayor a 1 entonces $C_i = 1$

Si $K_p + K_v + K_{fc}$ es menor o igual a 1 entonces $C_i = K_p + K_v + K_{fc}$

A partir de los condicionales anteriores, se tiene como resultado $C_i = 1$

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	63
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

3.2.7.9.5.3 Humedad del suelo (Hs)

Para la estimación de la humedad disponible de suelo en cada período de análisis (periodicidad mensual), se estimaron los parámetros de capacidad de campo, punto de marchitez permanente y densidad aparente para el área de influencia, partiendo de análisis de estos parámetros realizados en el componente de suelos del presente estudio y de acuerdo con lo establecido en la Tabla 3-38.

Tabla 3-38 Calificación y parámetros de los suelos en el área de influencia

SIMBOLO	TEXTURA	ÁREA (ha)	% ÁREA	VI (mm/día)	PMP (%)	CC (%)	DENSIDAD APARENTE (g/cm ³)
CAA	Cuerpos de agua artificial	0,41	0,25	0	0	0	0
CAN	Cuerpos de agua natural	3,93	2,46	0	0	0	0
MQAd	Textura franco-arenosa	0,96	0,60	33811,2	6	14	1,5
MQAe	Textura franco-arenosa	1,11	0,69	33811,2	6	14	1,5
MQBd	Textura franco-arenosa	6,59	4,12	23040	3,12	7,54	1,27
MQbdi	Textura franco-arenosa	2,40	1,50	33811,2	3,12	7,54	1,27
MQBe	Textura franco-arenosa	8,11	5,07	33811,2	6	14	1,5
MQBei	Textura franco-arenosa	4,54	2,84	33811,2	6	14	1,5
MQCd	Textura franco-arenosa	32,82	20,52	28800	6	14	1,5
MQCe	Textura franco-arenosa	28,22	17,64	33811,2	6	14	1,5
MQDd	Textura franco-arenosa	8,40	5,25	41142,96	6	14	1,5
MQDe	Textura franco-arenosa	19,43	12,14	72000	6	14	1,5
MQEe	Textura franco-arenosa	17,54	10,96	4073,04	6	14	1,5
MQEf	Textura franco-arenosa	16,34	10,21	33811,2	6	14	1,5
ZQZ	Suelos antrópicos	9,19	5,74	33811,2	0	0	0
TOTAL		159,99	100,00	33.183,04	5,331	12,453	1,360

VI: Velocidad de Infiltración, PMP: Punto de Marchitez Permanente, CC: Capacidad de Campo

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

El coeficiente de humedad inicial se relaciona con el agua que se infiltra y se acumula en los poros del suelo cuando ocurre una precipitación, la cual lleva el suelo a capacidad de campo, siendo este la máxima acumulación de agua que puede tener un suelo no saturado.

El coeficiente de humedad final se refiere al agua disponible una vez ocurra la evapotranspiración y el suelo haya alcanzado su capacidad de campo; el sobrante del agua

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	64

se infiltra, percola para recargar al acuífero. Estos coeficientes se calculan de la siguiente manera (Schosinsky & Losilla, 2000):

$$C1 = (Hsi - PMP + Pi)/(CC - PMP)$$

Dónde:

C1: Coeficiente de humedad al final del mes antes de que ocurra la evapotranspiración.

Hsi: Humedad del suelo inicial (mm)

PMP: Punto de marchitez permanente (mm)

Pi: Precipitación que se infiltra (mm/mes)

CC: Capacidad de campo (mm)

$$C2 = (Hsi - PMP + Pi - ETR1)/(CC - PMP)$$

$$ETR1 = (C1) \times (ETP)$$

Dónde:

C2: Coeficiente de humedad al final del mes, después de que ocurra la evapotranspiración

Hsi: Humedad del suelo inicial (mm)

PMP: Punto de marchitez permanente (mm)

Pi: Precipitación que se infiltra (mm/mes)

CC: Capacidad de campo (mm)

ETR1: Evapotranspiración potencial real (mm/mes), afectada por el coeficiente *C1*

ETP: Evapotranspiración potencial [mm/mes].

La evapotranspiración promedio de la cuenca, la cual la se asume que es igual la evapotranspiración potencial (ETP). Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se empleó la ecuación de Blaney & Criddle (Blaney & Criddle, 1962) que se presenta a continuación:

$$ETP (mm/mes) = (8,10 + 0,46T)Ps$$

Dónde:

ETP: Evapotranspiración potencial (mm/mes)

T: Temperatura media mensual (°C)

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	65
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Ps: Porcentaje de horas luz solar (%)

Se debe tener en cuenta que para el balance en el suelo es necesario conocer el período en el cual finalizan la temporada de lluvias, para el área de influencia del proyecto corresponde con el mes de noviembre. Lo anterior debido a que al final del período de lluvias, se establece que la humedad final es igual a la capacidad de campo. Para el área de influencia este período finaliza en el mes de noviembre.

Así mismo se debe estimar la humedad disponible (*Hd*), que es aquella humedad que pueden tomar las raíces de las plantas, para poder evapotranspirar y está dada por la siguiente ecuación (Schosinsky, 2006):

$$Hd(mm/mes) = Hsi + Pi - PMP$$

Dónde:

Hsi: Humedad del suelo inicial (mm)

Pi: Precipitación que se infiltra (mm/mes)

PMP: Punto de marchitez permanente (mm)

Adicionalmente, para poder realizar el cálculo de la recarga del acuífero, se requiere conocer la humedad del suelo al final del mes, y dicha humedad no puede ser mayor que la capacidad de campo y se obtiene de la siguiente manera (Schosinsky, 2006):

$$Hsf(mm/mes) = Hd + PMP - ETR$$

Dónde:

Hd: Humedad disponible (mm/mes).

PMP: Punto de marchitez permanente (mm).

ETR: Evapotranspiración real (mm/mes).

Los datos de temperatura consignados en la Tabla 3-39, fueron calculados a partir de lo determinado en el balance hídrico realizado para el proyecto presentado en el numeral

3.2.4.8 Balance Hídrico del capítulo 03.2.7.ABIOT(HIDROG)

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	66
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Tabla 3-39 Cálculo de la evapotranspiración

ID	PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T (°C)	Temperatura	16,51	16,85	16,99	16,98	16,75	16,22	15,97	16,19	16,34	16,23	16,25	16,37
I	Índice de calor mensual	6,10	6,29	6,37	6,37	6,24	5,94	5,80	5,92	6,01	5,95	5,96	6,02
ETP	Evapotranspiración potencial (mm/mes)	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Tabla 3-40 Coeficientes de humedad

ID	PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
Hsi	Humedad inicial del suelo	372,13	363,57	372,11	372,11	372,11	372,11	372,11	372,11	372,11	372,11	372,11	372,11
CC	Capacidad de campo	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13
PM	Punto de marchitez	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30
C1	Factor de ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
ETPR	Evapotranspiración potencial real (mm/mes)	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24
C2	Factor de ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.7.9.6 Recarga del acuífero

La recarga al acuífero se lleva a cabo, si la cantidad de agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero (R_p) (Ver ANEXOS\H. GEOSFERICO\4 Hidrogeología\ 4.3. Balance Hídrico En Suelos), y se calcula con la siguiente ecuación (Schosinsky, 2006), página 21). Ver resumen en la Tabla 3-41 y Figura 3-21.

$$R_p = P_i + H_{si} - H_{sf} - ETR$$

Dónde:

R_p : Recarga potencial mensual (mm/mes)

P_i : Precipitación que se infiltra (mm/mes)

H_{si} : Humedad del suelo inicial (mm)

H_{sf} : Humedad del suelo final (mm)

ETR : Evapotranspiración real (mm/mes)

A partir de la información de precipitación histórica se realizó un balance hídrico para condiciones de precipitación media mensual multianual. Vale la pena destacar que, para la estimación de la recarga para condiciones anuales, se empleó la serie de datos teniendo en cuenta el fin de la temporada de lluvias en el mes de noviembre. Lo anterior, debido a que al final del período de lluvias, se establece que la humedad final es igual a la capacidad de campo.

Para ser consistente con las unidades de los parámetros que se utilizan en la metodología, se debe tener en cuenta que la capacidad de campo, punto de marchitez, humedad del suelo, precipitación y evapotranspiración deben estar en unidades de milímetros. En la Tabla 3-41 se observan los cálculos para la estimación de la recarga empleando valores medios mensuales multianuales. Los valores de precipitación, temperatura, porcentaje de luz solar mensual y evapotranspiración potencial fueron calculados a partir de la información consignada en el capítulo 03.2.9.ABIOT(ATMOSF), numeral 3.2.9.1 *Clima* del presente

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	68

estudio. De acuerdo con el balance hídrico, el área de influencia tiene una recarga potencial de **988,46** mm/año.

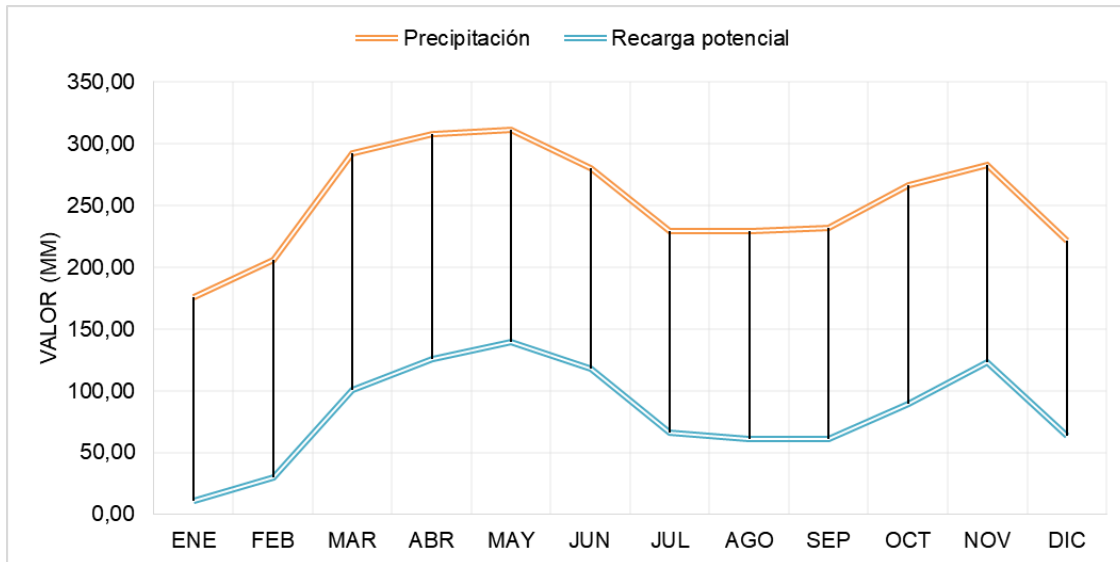
Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	69
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

Tabla 3-41 Resumen estimación de la recarga

ID	PARÁMETRO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	TOTAL
P	Precipitación	175,50	205,60	292,40	307,60	311,20	280,20	229,50	229,10	231,80	266,10	282,20	221,00	3032,20
Cfo	Coeficiente de retención del follaje	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
Ret	Retención de lluvia	21,06	24,67	35,09	36,91	37,34	33,62	27,54	27,49	27,82	31,93	33,86	26,52	363,86
Pi	Precipitación que infiltra	154,44	180,93	257,31	270,69	273,86	246,58	201,96	201,61	203,98	234,17	248,34	194,48	2668,34
Esc	Escorrentía superficial	32,15	54,70	135,36	162,90	176,70	151,70	93,70	88,43	88,95	121,28	156,71	89,76	1352,34
T(°C)	Temperatura	16,51	16,85	16,99	16,98	16,75	16,22	15,97	16,19	16,34	16,23	16,25	16,37	16,47
ETP	Evapotranspiración potencial	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24	1679,86
Hsi	Humedad de suelo inicial	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,11	372,13	N/A
CC	Capacidad de campo	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	372,13	N/A
PM	Punto de marchitez	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	159,30	N/A
C1	Factor de ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	N/A
ETR1	Evapotranspiración potencial real [mm/mes], considera la humedad correspondiente al coeficiente C1.	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24	N/A
C2	Factor de ETP	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	N/A
ETPR	Evapotranspiración real tentativa promedio (mm/mes)	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24	N/A
HD	Humedad disponible	367,27	393,76	470,14	483,52	486,69	459,41	414,79	414,44	416,82	447,00	461,15	407,31	N/A
ETR	Evapotranspiración real	143,35	150,90	157,04	144,70	134,50	128,50	135,80	140,67	142,85	144,82	125,49	131,24	1679,86
Rp	Recarga potencial	11,09	30,03	100,27	125,99	139,36	118,08	66,16	60,94	61,13	89,35	122,83	63,24	988,46

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

Figura 3-21 Precipitación Vs Recarga potencial



Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2025.

Sin embargo, la recarga real es sustancialmente inferior y corresponde a una fracción de la recarga potencial, que se puede estimar de manera aproximada como la relación entre el caudal mínimo y el caudal medio de los valores obtenidos para estos caudales en las diferentes corrientes dentro del área de influencia del estudio, caudales que fueron reportados en el *Capítulo 03.2.4.ABIOT(HIDROL)*, del presente estudio. Por lo anterior la recarga real estimada para condiciones medias mensuales multianuales corresponde a **6,45 mm/año**, como se puede observar en la Tabla 3-42.

Tabla 3-42 Recarga real

SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)	TIPO DE CAUDAL
Microcuenca Palmichal	0,12	Caudal medio
	0,0008	Caudal mínimo
	101,32	Caudal máximo
Directos rio Campo Alegre - NN	0,21	Caudal medio
	0,0014	Caudal mínimo
	83,83	Caudal máximo
Cuenca Comeguadua	0,52	Caudal medio
	0,0034	Caudal mínimo
	238,18	Caudal máximo
Área total	0,85	Caudal medio
	0,0056	Caudal mínimo
	423,33	Caudal máximo

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	71
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

SUBCUENCA	CAUDAL (m ³ /s)	TIPO DE CAUDAL
Recarga Potencial	988,46	
Qmin/ Qmed	0,0065291	
Recarga real	6,45	

Fuente: CONSGA BIC S.A.S., 2024.

3.2.7.9.7 Zonas de recarga

La recarga constituye el agua que ingresa a la zona saturada, y que por lo tanto entra a ser parte de las reservas subterráneas. Son varias las procedencias de esa recarga, desde la infiltración de la lluvia (en general la más importante) y de las aguas superficiales (importantes en climas poco lluviosos), hasta la transferencia de agua de otro acuífero (Custodio & Llamas, 1996). El área o zona donde ocurre la recarga son sitios donde la capacidad de infiltración es alta.

Para el área de estudio de la Estación Compresora de Gas Palestina, los niveles acuíferos caracterizados presentan dos mecanismos de recarga: la recarga regional desde la parte alta de la cordillera central y la recarga local por infiltración en suelo.

3.2.7.9.7.1 Recarga regional

Desde el punto de vista hidrogeológico, los acuíferos con porosidad secundaria asociados a rocas ígneas y metamórficas representan una alta importancia para el área de influencia del estudio. Su mecanismo de recarga es tipo regional y se presenta por infiltración en su afloramiento en la cordillera central.

3.2.7.9.7.2 Recarga local por infiltración en suelo

Se presenta recarga en toda la extensión del área de influencia del estudio a través de las precipitaciones, que pasan por un proceso de infiltración y posterior percolación del agua de lluvia, a lo largo de materiales de alta permeabilidad y pendiente moderada a baja. El ingreso de agua proveniente de la precipitación a la zona saturada está principalmente relacionado con una disposición estructural que favorece la infiltración de agua, la pendiente del terreno, cobertura vegetal y con la composición y/o textura de las diferentes unidades

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	72
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

que componen el perfil del suelo. El balance hídrico en suelos anteriormente presentado corresponde con este tipo de recarga.

3.2.7.9.8 Zonas de descarga

Las zonas más deprimidas que para el caso del área del estudio corresponde con los corredores de los drenajes existentes sirven de zonas de descarga del nivel freático, aportando agua al sistema hidrológico superficial.

3.2.7.9.9 Direcciones de flujo

Tomando en consideración que, no se identificaron puntos hidrogeológicos de tipo pozo y aljibe y únicamente se identifica un manantial, que indica que el nivel freático se encuentra cortando la topografía del terreno se determina la dirección preferencial del flujo subterráneo, tomando como referencia la dirección preferencial de flujo de los cuerpos de agua lóaticos presentes dentro del área de influencia del estudio, es así que se concluye que la dirección predominante de flujo es en sentido NE-SW.

3.2.7.9.10 Unidades hidrogeológicas en el área de influencia

3.2.7.9.10.1 Unidad A3: Qca - Depósitos Coluvio aluviales, Qfl - Depósitos de lahar.

Esta unidad está definida debido a sus características litológicas e hidráulicas, capta niveles acuíferos de extensión regional con porosidad primaria y productividad media. Litológicamente está conformada por depósitos recientes con arenas, en tamaños y porcentajes variables. La unidad representa acuíferos libres con porosidad primaria, tiene transmisividades entre los 100 – 1000 m²/día y conductividad hidráulica de 10² – 1 m/día, recibe recarga directa producto de lluvias.

3.2.7.9.10.2 Unidad A4: Qal - Depósitos aluviales recientes, Qfl - Depósitos Fluvio-lacustres, Qpi - Depósitos de plano de inundación.

Esta unidad está definida debido a sus características litológicas e hidráulicas, capta niveles acuíferos de extensión local con porosidad primaria y productividad baja. Litológicamente

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	73
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

está conformada por depósitos de arenas, limos y arcillas, en tamaños y porcentajes variables. La unidad representa acuíferos libres con porosidad primaria, tiene transmisividades entre los 1 – 100 m²/día y conductividad hidráulica de 10⁻¹ – 10⁻³ m/día, recibe recarga directa producto de lluvias.

3.2.7.9.10.3 Unidad B2: Kvc - Complejo Quebradagrande (conjunto volcánico), Kies - Complejo Arquía-Esquistos de Lisboa-Palestina.

Esta unidad está definida debido a sus características litológicas e hidráulicas, capta niveles acuíferos continuos con porosidad secundaria de extensión regional de mediana productividad, conformados por rocas volcánicas y metamórficas. Recibe recarga producto de percolación de agua de los niveles superiores.

3.2.7.9.11 Vulnerabilidad

De acuerdo con los resultados obtenidos después de realizar el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación a través del método GOD (Tabla 3-25), se llegó a la conclusión de que el 100% del área de influencia para la Modificación de Licencia para la construcción de la estación de compresión de Gas Palestina (ECG) tiene una vulnerabilidad baja.

3.2.7.9.12 Hidrogeoquímica

El agua subterránea caracterizada es agua bicarbonatada cálcica, en tanto, el alto contenido de bicarbonatos encontrados en las muestras puede estar relacionado con la disolución y reacción del dióxido de carbono presente en el suelo con el agua; los altos contenidos de calcio en las aguas subterráneas se deben a que este suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales, en rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonato: CaCO₃ (calcita y aragonito), CaMg (CO₃)₂ (dolomita) o de sulfato: CaSO₄·2H₂O (yeso) o CaSO₄ (anhidrita).

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto	Cap. 3.2.7. Hidrogeología	
			PO-CO-2024-008	Ver: 01	74

BIBLIOGRAFÍA

- Astier, J. L. (1975). *Geofísica Aplicada a la Hidrogeología*. Madrid: Paraninfo.
- Auge., M. (2008). *Métodos Geoeléctricos para la prospección de Agua Subterránea*. Buenos Aires.
- Blaney, H. F., & Criddle, W. D. (1962). *Determining Consumptive Use and Irrigation Water Requirements*. United States Department of Agriculture, Economic Research Service.
- Butler, S. S. (1957). *Engineering Hydrology*. Prentice Hall.
- Cruz San Julián, J. J. (2018). *Hidrogeología básica e hidráulica subterránea*. Universidad de Granada e Instituto Geológico y Minero de España.
- Custodio, E., & Llamas, M. (1996). *Hidrología Subterránea. Tomo I*. Omega.
- Foster, S., & Hirata, R. (1988). *Grounwater risk assesment: a methodology using available data*. Lima, Peru: WHO-PAHO/HPE-CEPIS.
- Foster, S., & Hirata, R. (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Lima.
- IDEAM. (2010). *Estudio Nacional del Agua 2010*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2014). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IDEAM. (2021). *Zonificación y Codificación de Unidades Hidrográficas e Hidrogeológicas de Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.
- IGME. (2020). *Contaminación de las aguas subterráneas*. Madrid: Instituto Geológico y minero de España .
- INGEOMINAS. (2003). *Memoria Geofísica Plancha 5-13 Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia*. Bogotá: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras.
- INGEOMINAS. (2004). *Atlas de Aguas Subterráneas de Colombia Escala 1:500.000*. Bogotá: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras.
- INGEOMINAS. (2010). *Memoria Técnica Plancha 5-08 Mapa de Permerabilidades de Colombia en Escala 1:500.000*. Bogotá: Instituto Nacional de Investigaciones Geológico-Mineras.
- Kehew, A. E. (2001). *Applied Chemical Hidrogeology*. Upper Saddle River: Prentice Hall.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	75
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----

- Martinez Alfaro, P., Martinez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2006). *Fundamentos de Hidrogeología*. Madrid: Ediciones Mundi-Prensa.
- Massone, H. E. (2022). El concepto de riesgo de contaminación de aguas subterráneas. Un análisis de sus perspectivas y alcances. *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 38, 112-125.
- Matus, O., Faustino, J., & Jiménez, F. (2009). *Guía para la identificación participativa de zonas con potencial de recarga hídrica*. Turrialba.
- MCS . (2024). *Monitoreo y caracterización fisicoquímica y microbiológica de agua subterránea. Estación de compresión de gas Palestina (ECG) Modificación de Licencia Ambiental*. Consultoría y Monitoreo Ambiental S.A.S.
- Moreno Merino, L., Aguilera Alonso, H., Gonzáles Jiménez, M., Diaz Losada, E., y Romero Prados, A. (2021). *D-Piper: Diagrama de Piper de densidad. Representación de grandes conjuntos de datos mediante el diagrama de Piper*. Instituto Geológico y Minero de España.
- Schosinsky, G. N. (2006). Cálculo de la recarga potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*.
- Schosinsky, G. N., & Losilla, M. (2000). Modelo analítico para determinar la infiltración con base en la lluvia mensual. *Revista Geológica de América Central*, 43-55.

Elaboró: CONSGA BIC S.A.S	Revisó: TGI S.A. ESP	Aprobó: TGI S.A. ESP	Código Proyecto PO-CO-2024-008	Cap. 3.2.7. Hidrogeología Ver: 01	76
---------------------------------	-------------------------	-------------------------	-----------------------------------	--------------------------------------	----