



**ESTUDIO GEOELÉCTRICO PARA APROVECHAMIENTO DE AGUAS
SUBTERRÁNEAS, VEREDA HUERTAS, MUNICIPIO DE PEREIRA**

Yerson Andrey Velásquez González

Trabajo de grado para optar por el título de:

Geólogo

Director:

Santiago Cano Bedoya

Asesores:

Diego Gómez Calle

Carlos Ramírez Arboleda

Jorge Mario Agudelo Duque

Universidad de Caldas
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales
Programa de Geología
Manizales
2023



NOTA DE ACEPTACIÓN

Santiago Cano Bedoya

Director Académico

Carlos Ramírez Arboleda

Asesor

Diego Gómez Calle

Asesor

Jorge Mario Agudelo Duque

Asesor



DEDICATORIA

A mis padres y hermano, cuyo sacrificio y aliento han sido mi fuente de fuerza a lo largo de este camino. Su amor incondicional ha sido mi mayor inspiración. A mis amigos, por compartir risas, desafíos y momentos inolvidables. Su amistad ha iluminado cada paso de esta travesía. A todos aquellos que me brindaron su apoyo y confianza, este informe lleva un pedazo de cada uno de ustedes. Gracias por ser parte de mi viaje.

AGRADECIMIENTO

Mi familia, Gloria, Jairo y Yair, merecen un agradecimiento especial por su constante aliento y respaldo a lo largo de esta travesía académica. Su amor incondicional y creencia en mí fueron mi motor en los momentos más desafiantes.

Quiero agradecer a GEOSUB S.A.S. en especial a Diego, Jorge Mario y Carlos, por su invaluable guía y conocimientos expertos. Su dedicación y paciencia me brindaron la dirección necesaria para desarrollar esta investigación de manera exitosa. Siempre estuvieron dispuestos a responder mis preguntas y a brindarme valiosas sugerencias que enriquecieron mi trabajo.

Además, quiero expresar mi gratitud a mis profesores, quienes contribuyeron con sus valiosos comentarios y sugerencias durante las etapas de mi carrera, en especial a Santiago, por sus indicaciones para realizar mi trabajo de grado.

No puedo dejar de mencionar a mis amigos Camila, José, Juliana, Luisa P, Luisa M, Pleya, Harold, Lito, Joan, Villa y White quienes me brindaron su apoyo moral y compartieron sus ideas en discusiones constructivas, y a Daniela quien me apoyo emocionalmente y me acompañó en cada momento para realizar este informe.

CONTENIDO

RESUMEN	11
1. INTRODUCCIÓN	12
1.2. LOCALIZACIÓN.....	13
2. OBJETIVOS	14
2.1. OBJETIVO GENERAL	14
2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. MARCO TEÓRICO.....	15
3.1. LIMITACIONES Y DELIMITACIONES	15
3.1.1. Siglas y acrónimos	15
3.1.2. Unidades de medida.....	15
3.2. FUNDAMENTOS DE LA HIDROGEOLOGÍA.....	16
3.2.1. Hidrogeoquímica.....	20
3.2.2. Fundamentos para pozos de agua subterránea.....	22
3.3. FUNDAMENTOS DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	24
4. METODOLOGÍA.....	29
4.1. ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE.....	32
4.2. LEVANTAMIENTO DE DATOS GEOFÍSICOS EN CAMPO.....	34
4.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA.....	36
4.4. ANÁLISIS Y ENTREGA DE RESULTADOS	38
5. MARCO GEOLÓGICO.....	39
5.1. GEOLOGÍA REGIONAL	39
5.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL	47
5.3. GEOLOGÍA LOCAL.....	50
5.4. GEOMORFOLOGÍA.....	55



6.	RESULTADOS.....	59
6.1.	HIDROGEOLOGÍA BIBLIOGRÁFICA	59
6.2.	QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	66
6.3.	FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	69
6.4.	GEOLOGÍA DE CAMPO	72
6.5.	SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES	79
6.6.	MODELO DE CAPAS	84
6.6.1.	Relación espacial de los Sondeos Eléctricos Verticales	88
6.7.	SECCIONES GEOELÉCTRICAS	89
6.7.1.	Diagrama panel Tribunus Córcega.....	90
6.7.2.	Sección C-C' esquemática con niveles base.....	94
6.7.3.	Sección A-A' - zona de estudio	95
6.8.	DISEÑO PRELIMINAR DE POZO DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	101
7.	DISCUSIONES.....	104
8.	CONCLUSIONES	106
9.	RECOMENDACIONES.....	107
10.	REFERENCIAS.....	108
	ANEXOS	112

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. <i>Localización de la zona de estudio, en la vereda Huertas.</i>	13
Figura 2. <i>Acuífero libre.</i>	17
Figura 3. <i>Acuífero confinado.</i>	18
Figura 4. <i>Acuífero semiconfinado.</i>	19
Figura 5. <i>Zonas de recarga y descarga.</i>	20
Figura 6. <i>Secuencia de Chebotarev.</i>	21
Figura 7. <i>Diagrama Piper 1944.</i>	22
Figura 8. <i>Pozo de agua subterránea.</i>	23
Figura 9. <i>Dispositivos geoeléctricos, Schlumberger.</i>	27
Figura 10. <i>Metodología para estudio de agua subterránea.</i>	31
Figura 11. <i>Equipo Terramer ABEM SAS 300 C.</i>	35
Figura 12. <i>Ejecución de SEV en campo.</i>	35
Figura 13. <i>Esquema del modelo de capas obtenido de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs).</i>	37
Figura 14. <i>Mapa geología regional, Cuenca Río La Vieja.</i>	46
Figura 15. <i>Principales fallas del área de estudio.</i>	49
Figura 16. <i>Abanico del Quindío.</i>	51
Figura 17. <i>Columna generalizada Río Barbas, parte intermedia del abanico del Quindío.</i>	53
Figura 18. <i>Diagrama tridimensional para los ambientes morfogenéticos cartografiados Plancha 224, Pereira.</i>	56
Figura 19. <i>Mapa de Unidades Geomorfológicas (Plancha-224 Pereira).</i>	57
Figura 20. <i>Modelo tridimensional de la geomorfología de la zona.</i>	58
Figura 21. <i>Unidades hidrogeológicas, cuenca Río La Vieja.</i>	61
Figura 22. <i>Dirección Regional Acuífero Dosquebradas Pereira.</i>	62
Figura 23. <i>Mapa de isopiezas para la cuenca Río La Vieja.</i>	63

Figura 24. Mapa de dirección de flujo de agua subterránea, Tribunias-Córcega.....	65
Figura 25. <i>Diagrama de Piper que muestra la configuración química del agua subterránea de las unidades acuíferas del sector de Tribunias Córcega.</i>	68
Figura 26. <i>Localización Pozos cercanos al área de estudio.</i>	71
Figura 27. <i>Depósito de flujos de lodo y escombros (Base).</i>	72
Figura 28. <i>Depósito de flujos de lodo y escombros (Techo).</i>	73
Figura 29. <i>Depósito de limos y arenas.</i>	74
Figura 30. <i>Depósito de ceniza volcánica.</i>	74
Figura 31. <i>Suelo residual.</i>	75
Figura 32. <i>Columna estratigráfica ilustrativa.</i>	77
Figura 33. <i>Mapa geología local, zona de estudio.</i>	78
Figura 34. <i>Localización Sondeos Eléctricos Verticales.</i>	80
Figura 35. <i>Toma de datos para el SEV 1.</i>	81
Figura 36. <i>Toma de datos para el SEV 2.</i>	82
Figura 37. <i>Toma de datos para el SEV 3.</i>	83
Figura 38. <i>Modelo de capas para el SEV 1.</i>	85
Figura 39. <i>Modelo de capas para el SEV 2.</i>	86
Figura 40. <i>Modelo de capas para el SEV 3.</i>	87
Figura 41. <i>Ubicación tridimensional de los SEVs y correlación de capas.</i>	88
Figura 42. <i>Localización de Cortes Geoeléctricos.</i>	89
Figura 43. <i>Diagrama panel de secciones geoeléctricas para el corregimiento Tribunias Córcega.</i>	92
Figura 44. <i>Sección esquemática C-C'.</i>	95
Figura 45. <i>Localización de corte geoeléctrico A – A'.</i>	96
Figura 46. <i>Corte geoeléctrico A – A'.</i>	97
Figura 47. <i>Modelo hidrogeológico conceptual-Tribunias-Córcega.</i>	99
Figura 48. <i>Formato para el diseño de pozo.</i>	103



Figura 49. Registro de datos en campo para el SEV 1.....	117
Figura 50. Curva de resistividad en función de la profundidad en escala logarítmica para el SEV 1, registrada en campo.	118
Figura 51. Registro de datos en campo para el SEV 2.....	119
Figura 52. Curva de resistividad en función de la profundidad en escala logarítmica para el SEV 2, registrada en campo.	120
Figura 53. Registro de datos en campo para el SEV 3.....	121
Figura 54. Curva de resistividad en función de la profundidad en escala logarítmica para el SEV 3, registrada en campo.	122
Figura 55. Registro eléctrico pozo Jamaica.....	126
Figura 56. Registro eléctrico pozo La Tarde.	127

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Recopilación de principales fuentes bibliográficas.</i>	33
Tabla 2. <i>Pozos cercanos con nivel estático y dinámico.</i>	63
Tabla 3. <i>Pozos cercanos al Área de Estudio.</i>	69
Tabla 4. <i>Puntos de agua subterránea cercanos a la zona de estudio.</i>	70
Tabla 5. <i>Coordenadas de los Sondeos Eléctricos Verticales.</i>	79
Tabla 6. <i>Información del modelo de capas SEV 1.</i>	93
Tabla 7. <i>Información del modelo de capas SEV 2.</i>	93
Tabla 8. <i>Información del modelo de capas SEV 3.</i>	94
Tabla 9. <i>Formato para toma de datos de los SEVs.</i>	112
Tabla 10. <i>Sistemas de fallas en el abanico del Quindío.</i>	113
Tabla 11. <i>Coordenadas de los Sondeos Eléctricos Verticales Estudio Tribunas Córcega.</i>	123
Tabla 12. <i>Información del modelo de capas SEV 1 Estudio Tribunas Córcega.</i>	123
Tabla 13. <i>Información del modelo de capas SEV 2 Estudio Tribunas Córcega.</i>	123
Tabla 14. <i>Información del modelo de capas SEV 3 Estudio Tribunas Córcega.</i>	124
Tabla 15. <i>Información del modelo de capas SEV 4 Estudio Tribunas Córcega.</i>	124
Tabla 16. <i>Información del modelo de capas SEV 5 Estudio Tribunas Córcega.</i>	124
Tabla 17. <i>Información del modelo de capas SEV 6 Estudio Tribunas Córcega.</i>	125
Tabla 18. <i>Información del modelo de capas SEV 7 Estudio Tribunas Córcega.</i>	125
Tabla 19. <i>Información del modelo de capas SEV 8 Estudio Tribunas Córcega.</i>	125

RESUMEN

Este estudio se desarrolló en la vereda Huertas del municipio de Pereira, para un cliente confidencial de GEOSUB S.A.S., con el objetivo de investigar la distribución de acuíferos potenciales en el subsuelo para el aprovechamiento de agua subterránea. Se utilizó la técnica de geoeléctrica, siendo fundamental en el proceso.

Las mediciones de resistividad se llevaron a cabo mediante Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) en diversas ubicaciones estratégicas. Estos SEVs proporcionaron perfiles de resistividad eléctrica que permitieron identificar posibles acuíferos. Además, se realizó una meticulosa recopilación de información geológica, geomorfológica e hidrogeológica, estos datos complementarios fueron cruciales para calibrar los resultados geofísicos, para obtener secciones y modelos detallados. Basándose en los resultados, se pudo evaluar la viabilidad de construir un pozo de agua subterránea, para proponer un diseño preliminar del pozo, considerando las implicaciones relacionadas con la ubicación y captación de agua subterránea.

La interpretación de los valores de resistividad se llevó a cabo en diferentes niveles estratigráficos y estos fueron representados visualmente mediante secciones y modelos. Estos se ajustaron utilizando información tanto directa como indirecta. Además, se clasificaron las formaciones según su comportamiento litológico frente a las aguas subterráneas y determinar los acuíferos con mejores condiciones.

La Formación Armenia, como principal acuífero de la región, fue objeto de estudio en este trabajo. No obstante, se enfatizó la importancia de comprender sus dimensiones y características específicas a nivel local, debido a las variaciones geológicas presentes en esta unidad.

1. INTRODUCCIÓN

La utilización del agua subterránea es de vital importancia para satisfacer las necesidades de agua potable, agrícolas, industriales y ambientales. El agua subterránea se encuentra almacenada en acuíferos, que actúan como reservorios naturales. Su acceso y uso adecuado son fundamentales para garantizar el suministro de agua a largo plazo, especialmente en áreas donde el agua superficial es escasa o de calidad limitada. Para la exploración de agua subterránea, se utilizan estudios de geoelectricidad, que se basa en las diferentes conductividades eléctricas que presentan los materiales geológicos. Esta técnica permite identificar áreas y profundidades adecuadas para el aprovechamiento de agua subterránea.

La zona de investigación se localiza en la vereda Huertas, la cual forma parte del municipio de Pereira. Con el fin de desarrollar un estudio preciso de esta área, es esencial contar con una exhaustiva información geológica, comprender la geomorfología general de las unidades y establecer conexiones entre los datos hidrogeológicos de diferentes estudios. Esta correlación de datos resulta fundamental para adquirir una mejor comprensión de las unidades presentes y, a partir de ello, proponer los mejores intervalos para la construcción de pozos de agua subterránea.

Debido a los términos de confidencialidad entre los clientes y la consultoría a cargo GEOSUB S.A.S., la información proporcionada para este trabajo será adaptada de los informes originales, para ello se evitará decir nombres propios y se presentará solo aquella información autorizada por la empresa.

1.2. LOCALIZACIÓN

La zona de estudio en Colombia se encuentra específicamente en la Cordillera Central, en el flanco occidental, dentro del municipio de Pereira, perteneciente al departamento de Risaralda. El estudio se llevó a cabo para un cliente privado en un predio en la vereda Huertas, que forma parte del corregimiento de Tribunas Córcega. La vereda Huertas se ubica al suroeste de la ciudad de Pereira, como se muestra en la Figura 1.

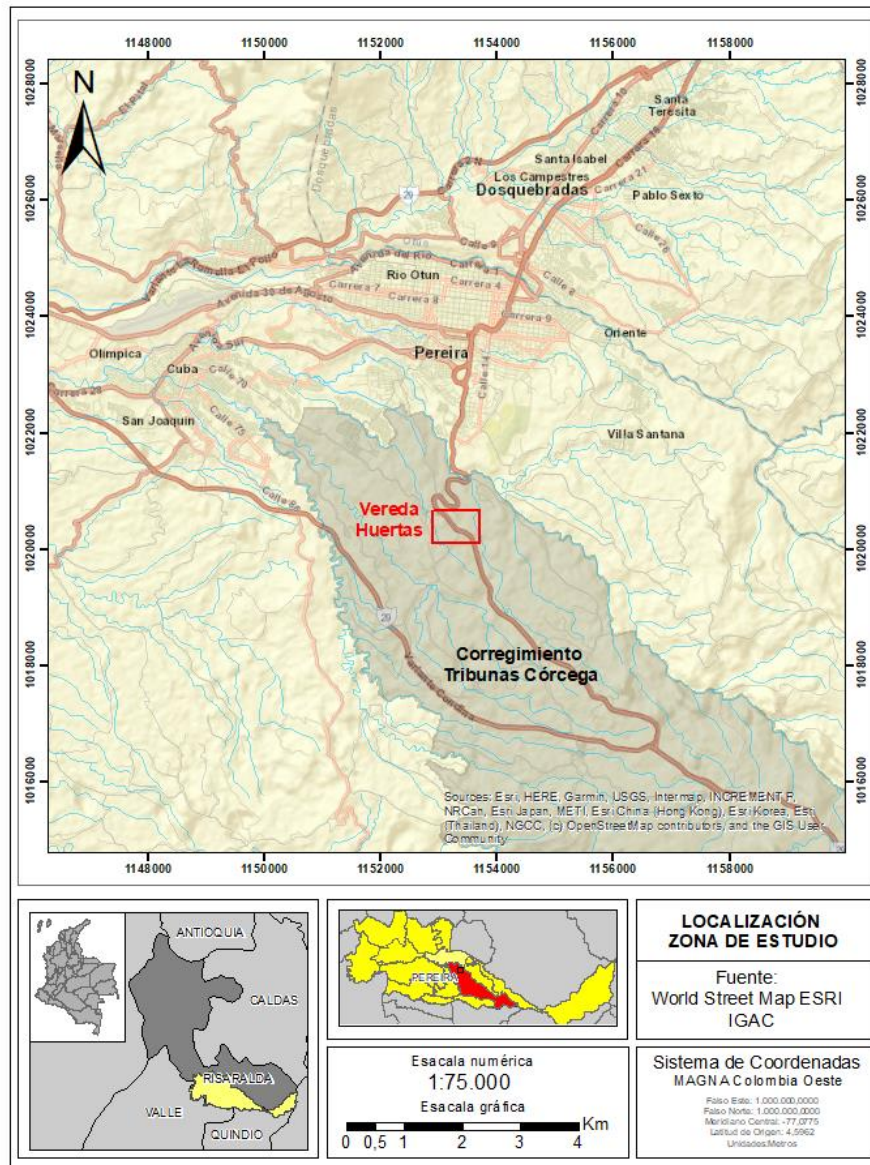


Figura 1. Localización de la zona de estudio, en la vereda Huertas.

Fuente: Elaboración propia.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Apoyar la investigación de las propiedades geoeléctricas del subsuelo a través de la realización de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs), con el propósito de determinar acuíferos.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Recopilar y analizar informes, tesis, artículos científicos y otros documentos relacionados con la geología, geomorfología e hidrogeología.
- Apoyar la elaboración de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) y su procesamiento e interpretación.
- Realizar mapas, cortes geoeléctricos, columnas estratigráficas, modelo de capas y esquemas tridimensionales.
- Apoyar en el diseño preliminar del pozo de agua subterránea.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. LIMITACIONES Y DELIMITACIONES

3.1.1. Siglas y acrónimos

SEVs:	Sondeos Eléctricos Verticales
SGC:	Servicio Geológico Colombiano
CARDER:	Corporación Autónoma Regional de Risaralda
CVC:	Corporación autónoma regional del Valle del Cauca
IGAC:	Instituto geográfico Agustín Codazzi
IDEAM:	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
ENA:	Estudio Nacional del Agua

3.1.2. Unidades de medida

LPS:	Litros por segundo
Mm³:	Millones de metros cúbicos
ha:	Hectárea o Hectáreas
m:	Metros
Ohm.m:	Ohmio por metro (unidad de resistividad eléctrica)

3.2. FUNDAMENTOS DE LA HIDROGEOLOGÍA

Para alcanzar una comprensión integral del informe y asimilar los conceptos hidrogeológicos presentados, se han incorporado definiciones clave y figuras de gran relevancia que ilustran la dinámica del agua subterránea. Estas adiciones contribuyen significativamente a la claridad y profundización de los temas abordados en el estudio.

Para comenzar, se define las diferentes clasificaciones de las formaciones geológicas, las cuales se establecen por el comportamiento hidrogeológico, estas definiciones obtuvieron de Sánchez (2022):

Acuífero: Se refiere a una formación geológica que contiene una cantidad apreciable de agua y permite que esta circule a través de ella con facilidad. Ejemplos de acuíferos son las arenas y gravas, así como ciertas rocas permeables con porosidad secundaria.

Acuicludo: Es una formación geológica que también contiene una cantidad apreciable de agua, pero no permite que el agua circule a través de ella. Ejemplos de acuicludos son los limos y arcillas, que atrapan el agua y no permiten su movimiento.

Acuitardo: Se trata de una formación geológica que contiene agua en cantidad apreciable, pero el agua circula a través de ella con dificultad. Es un término intermedio entre acuífero y acuicludo. Ejemplos de acuitardos incluyen arenas arcillosas y areniscas con moderada alteración o fracturación.

Acuífugo: Es una formación geológica que no contiene agua, ya que no permite que el agua circule a través de ella. Un ejemplo de acuífugo es el granito o esquisto inalterados y no fracturados.

Los acuíferos son formaciones geológicas subterráneas que albergan agua y pueden abastecer pozos y manantiales. Por esta razón, es importante resaltar los distintos tipos de acuíferos que pueden encontrarse durante la realización de este estudio. Los dos tipos principales de acuíferos son los acuíferos libres y los acuíferos confinados, y entre estos se encuentra una categoría intermedia conocida como acuíferos semiconfinados. Las definiciones presentadas para estos conceptos fueron tomadas de Sánchez (2022):

Acuíferos libres: Los acuíferos libres, también conocidos como acuíferos no confinados o freáticos, son aquellos en los que el agua se encuentra en una zona porosa y permeable en contacto directo con la atmósfera. La capa superior del acuífero está abierta a la superficie y se llama nivel freático. El nivel freático fluctúa con las variaciones de las precipitaciones, la evaporación y la extracción de agua. En los acuíferos libres, el agua puede moverse más fácilmente debido a que no está confinada por capas impermeables y puede fluir hacia abajo por gravedad (Figura 2).

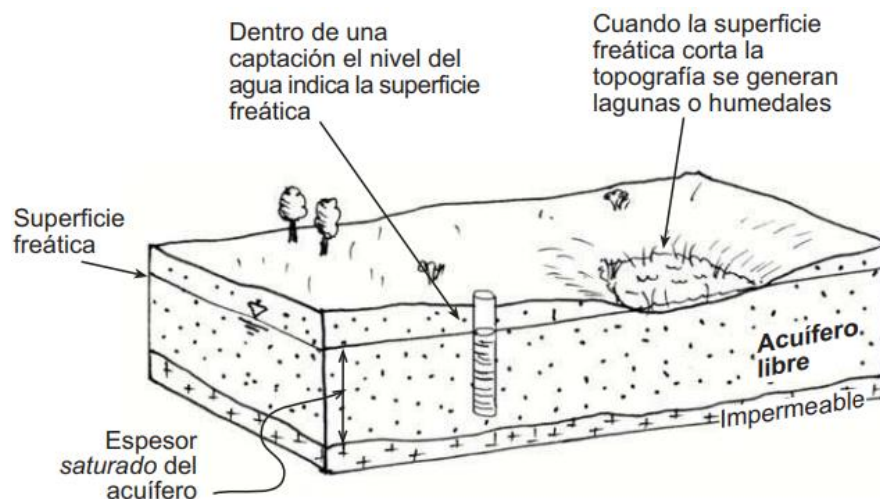


Figura 2. Acuífero libre.

Fuente: Sánchez (2022).

Acuíferos confinados: Los acuíferos confinados, también conocidos como acuíferos artesianos, son aquellos en los que el agua se encuentra atrapada entre dos capas de roca o suelo impermeable, una encima y otra debajo del acuífero. Estas capas impermeables impiden que el agua se mueva verticalmente y, en su lugar, se acumula bajo presión. La presión en el acuífero confinado puede ser suficiente para hacer que el agua fluya hacia la superficie sin necesidad de bombearla, formando manantiales artesianos (Figura 3).

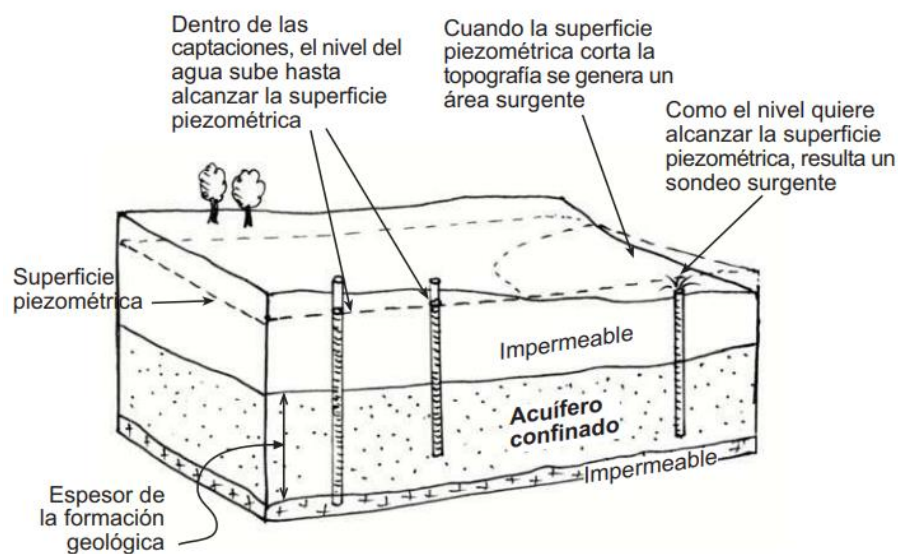


Figura 3. Acuífero confinado.

Fuente: Sánchez (2022).

Acuíferos semiconfinados: Son un tipo de acuífero que se encuentra bajo presión, similar a los acuíferos confinados, ya que tienen capas confinantes que restringen el movimiento vertical del agua. Sin embargo, en los acuíferos semiconfinados, al menos una de las capas confinantes es semipermeable o acuitarda, lo que significa que permite cierto grado de filtración o flujo de agua entre las capas. Estas capas semipermeables en los acuíferos semiconfinados permiten que el agua fluya hacia arriba o hacia abajo a través de ellas, ya sea por la presión existente o por las diferencias en el nivel de agua entre diferentes partes del acuífero (Figura 4).

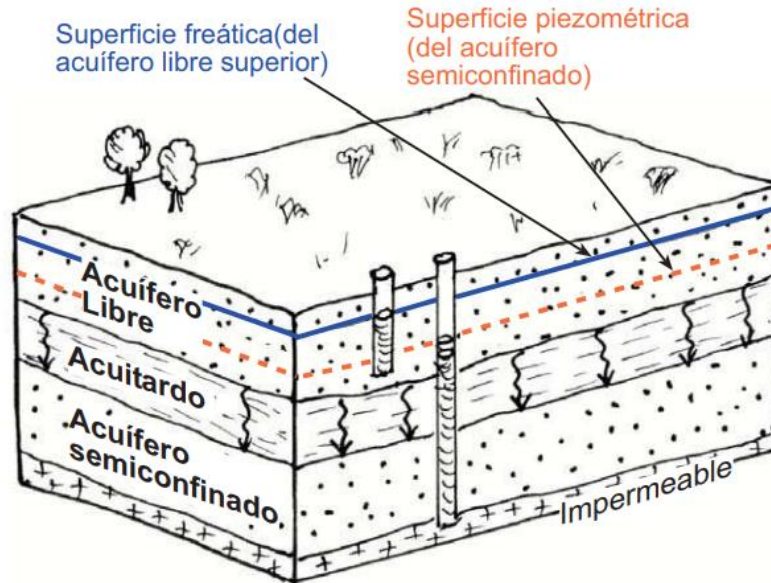


Figura 4. *Acuífero semiconfinado.*

Fuente: Sánchez (2022).

A nivel regional, es crucial comprender la dinámica del flujo de agua en relación a la topografía. Se define lo que es una zona de recarga y una zona de descarga, así como el nivel freático o tabla de agua. Estos conceptos son fundamentales para adquirir una comprensión visual del comportamiento del flujo de agua. En la Figura 5 se representan los vectores del flujo de agua en las zonas de recarga y descarga, tanto para acuíferos libres como confinados, las definiciones fueron tomadas de Sánchez (2022).

Zonas de recarga: Las zonas de recarga son áreas donde la porosidad primaria o secundaria de suelos, sedimentos y/o rocas permite la infiltración y percolación del agua proveniente de la precipitación atmosférica o de corrientes superficiales hacia los niveles acuíferos.

Zonas de descarga: Las zonas de descarga son áreas donde el agua subterránea sale del acuífero hacia la superficie o hacia otros cuerpos de agua, como manantiales, descargas en corrientes, ríos o el mar. También puede referirse a descargas artificiales en áreas donde el recurso hídrico subterráneo es aprovechable mediante la captación a través de pozos o aljibes. Estas zonas

son de vital importancia para entender cómo el agua subterránea alimenta los cuerpos de agua superficiales y satisface las demandas humanas y ecológicas.

Nivel freático: El nivel freático es la superficie de agua que representa la zona de saturación de un acuífero libre, donde la presión del agua contenida en el suelo es igual a la presión atmosférica. También es conocido como tabla de agua. Esta superficie marca la separación entre la zona no saturada, donde los poros del suelo están llenos de aire y agua, y la zona saturada, donde los poros están completamente llenos de agua.

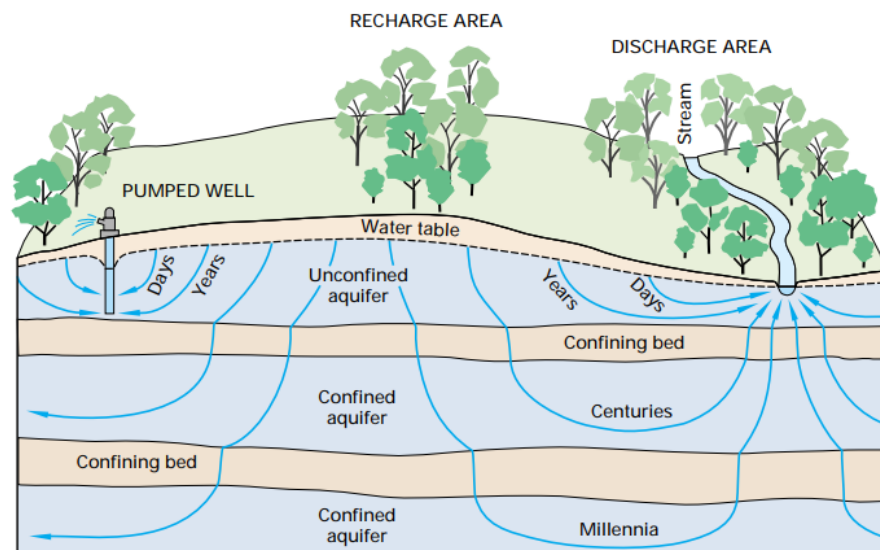


Figura 5. Zonas de recarga y descarga.

Fuente: Winter et al. (1998).

3.2.1. Hidrogeoquímica

Para el estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas, implica analizar y documentar su composición química, así como comprender los procesos. En el trayecto desde la infiltración hasta su retorno a la superficie, el agua interactúa químicamente con los componentes de las rocas que la contienen. De acuerdo con Doménico (1987) tomado en Suárez (2021), la capacidad del agua subterránea para disolver minerales presentes en las rocas y redistribuir cantidades

significativas de sustancias disueltas tiene aplicaciones importantes en la génesis química, la economía de la mineralización y el trabajo geológico en general.

El agua de lluvia contiene sustancias captadas de la atmósfera, las cuales experimentan diversas reacciones químicas, intercambios iónicos y procesos redox después de su infiltración. Estos procesos evolucionan mientras el agua se desplaza a través del acuífero. La etapa de infiltración es crucial para la composición química del agua, ya que con frecuencia adquiere componentes en los primeros metros de su trayectoria, aunque posteriormente se desplace varios kilómetros bajo tierra (Suárez, 2021).

A pesar de que las reacciones y procesos químicos que se desarrollan son muy variados, se observa que las aguas subterráneas con menor tiempo de permanencia en el subsuelo son, generalmente, bicarbonatadas. Luego predomina el sulfato, y las aguas más salinas son cloruradas. Esta evolución se denomina secuencia de Chebotarev (Suárez, 2021) (Figura 6).

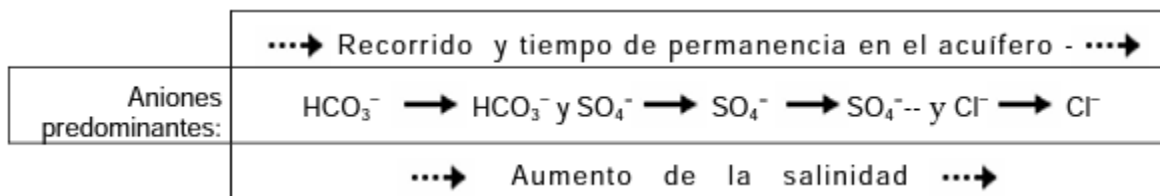


Figura 6. *Secuencia de Chebotarev.*

Fuente: Adaptado en Sánchez (2012).

El sistema de clasificación desarrollado por Piper (1944) ofrece una representación gráfica que facilita la identificación de los diversos tipos de agua presentes en un acuífero, así como la detección de procesos de mezcla entre distintos cuerpos de agua. El gráfico representa la naturaleza química fundamental de un agua en función de la concentración relativa de sus componentes, en lugar de basarse en sus concentraciones absolutas (Suárez, 2021).

En la región triangular inferior izquierda, los porcentajes de reacción de los tres grupos catiónicos se combinan en un solo punto según las coordenadas trilineales convencionales. Del mismo modo, los grupos de aniones se representan en el campo triangular de la esquina inferior derecha (Piper, 1944).

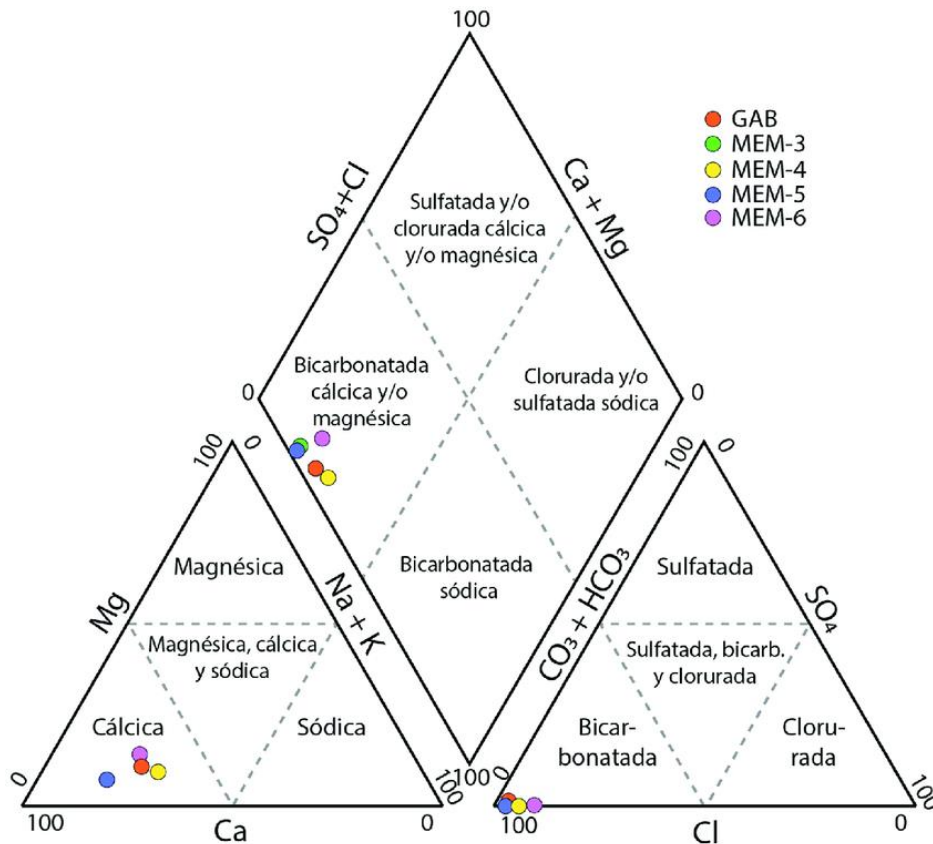


Figura 7. Diagrama Piper 1944.

Fuente: Ulloa et.al (2021).

3.2.2. Fundamentos para pozos de agua subterránea

La construcción de pozos de agua subterránea implica varios elementos clave. La perforación debe ser de mayor diámetro que el revestimiento y debe incluir un espacio al final para llenar con grava. El revestimiento puede ser de PVC o metal. La zona entre el acuífero y el revestimiento se llena con grava seleccionada para permitir el flujo de agua. La tubería de filtro se ubica estratégicamente para maximizar la captación de agua, mientras que los intervalos de menor

interés se sellan con tubería ciega para evitar contaminación de sedimentos finos. El pozo se sella con un relleno sanitario, generalmente cemento o arcilla (bentonita), para prevenir la contaminación superficial. Figura 8 muestra un pozo con sus componentes principales, adicionalmente, se debe escoger el equipo de bombeo que más se ajuste a las propiedades del pozo (WaterAid, s.f.).

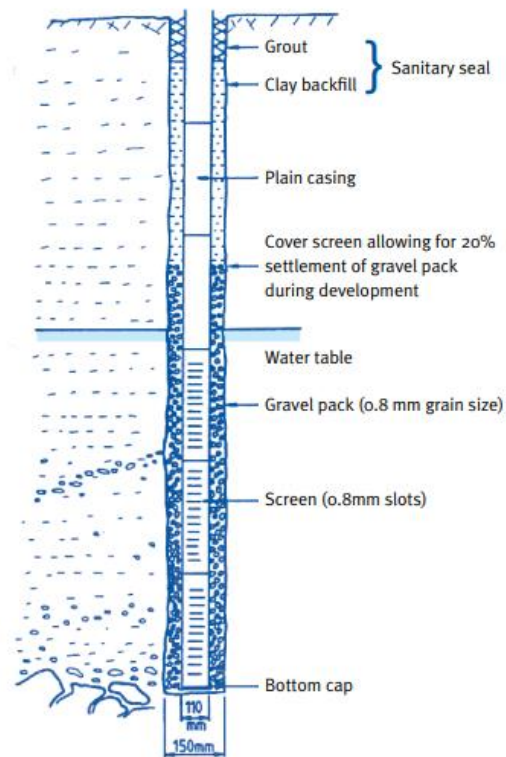


Figura 8. Pozo de agua subterránea.

Fuente: WaterAid (s.f.).

Para definir los últimos conceptos hidrogeológicos relacionados con los pozos de agua subterránea, se tomaron las definiciones proporcionadas por Sánchez (2022), que incluyen las siguientes:

Nivel estático: Se define como la profundidad en la que el agua se encuentra sin ningún tipo de movimiento. Esta medición está influenciada por factores como la presión atmosférica, la presión hidrostática generada por la gravedad y la presión ejercida por la densidad del agua en la capa

subterránea. Este nivel permanece constante a menos que la cantidad de agua en el pozo experimente algún cambio.

Nivel dinámico: Se refiere a la profundidad en la que el agua se encuentra cuando existe un flujo o circulación en el pozo. Esta medida está influenciada por la cantidad de agua que se extrae del pozo, así como por la cantidad de agua que se está recargando en él. El nivel dinámico es un indicador crucial para supervisar el uso y la administración sostenible de los recursos hídricos.

Estos términos son fundamentales en hidrogeología para comprender cómo el agua se almacena y fluye en el subsuelo, y cómo las diferentes formaciones geológicas pueden actuar como acuíferos o limitar el movimiento del agua subterránea.

3.3. FUNDAMENTOS DE LOS SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Para comprender el método geofísico utilizado, es esencial definir los conceptos y abordar las fórmulas teóricas que posibilitan la ejecución del método. Empezando por la ley de Ohm, que constituye el principio fundamental en las exploraciones geoelectricas.

Ley de Ohm

La ley de Ohm establece la relación entre el voltaje (V), la corriente eléctrica (I) y la resistencia (R) en un circuito eléctrico. Esta relación se expresa mediante la siguiente fórmula (HSA, s.f.):

$$V=I \cdot R$$

Donde:

V es el voltaje o diferencia de potencial medida en voltios (V).

I es la corriente eléctrica que fluye a través del circuito en amperios (A).

R es la resistencia del material al paso de la corriente en ohmios (Ω).

Esta ley es fundamental para comprender cómo la corriente eléctrica se comporta en un medio subsuperficial y cómo interactúa con las propiedades eléctricas de los materiales presentes.

En el contexto de las exploraciones geoelectricas, la ley de Ohm se aplica para entender cómo la inyección de corriente eléctrica en el subsuelo y la medición del potencial resultante permiten calcular la resistividad del terreno. La resistividad es una propiedad intrínseca del material que indica su capacidad para resistir el flujo de corriente eléctrica.

La resistividad es la medida de la capacidad de un material para resistir el flujo de corriente eléctrica, mientras que la conductividad indica su habilidad para conducirla. La resistencia eléctrica de un objeto está relacionada con su longitud y área transversal. La resistividad y conductividad están inversamente relacionadas: los materiales con alta resistividad tienen baja conductividad y viceversa (Sánchez, 2022).

Geoelectrica

La geoelectrica es uno de los métodos geofísicos más ampliamente utilizados y difundidos en las ciencias de la Tierra. Implica la introducción de corriente eléctrica (I) en el subsuelo y, a partir del potencial (ΔV) generado en respuesta, se puede determinar la resistencia (R) del suelo. Esta resistencia se convierte en un valor de resistividad aparente (ρ_a) mediante una constante geométrica (K), El valor final de K para cada medición, dependerá del dispositivo empleado y de la separación de los electrodos, tanto de inyección de corriente (A, B) como de medición del potencial (M, N) (Salguero, 2007), cuya relación se expresa en la siguiente ecuación:

$$K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1}$$

Con la constante calculada y la resistencia obtenida se calcula la resistividad aparente con la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)}$$

Sondeo Eléctrico Vertical (SEV)

El sondeo eléctrico vertical implica el uso de cuatro electrodos geofísicos (A, B, M, N), cuya disposición y distancia generan diferentes tipos de dispositivos. En estos sondeos, el centro de los electrodos, permanece fijo, y el espaciamiento entre ellos se incrementa para obtener información a mayores profundidades. La interpretación unidimensional (1D) de los datos de sondeo asume que el subsuelo consiste en capas horizontales, homogéneas e isotrópicas, lo que implica que la resistividad del suelo solo varía con la profundidad. Sin embargo, esta aproximación tiene limitaciones, ya que, en diversos contextos geológicos, las variaciones laterales ejercen una fuerte influencia y pueden distorsionar tanto los datos medidos con diferentes dispositivos como su interpretación (Salguero, 2007).

Arreglo Schlumberger

El método de Schlumberger (Figura 9) busca que la distancia $2a$ entre los electrodos M y N se reduzca al mínimo posible para medir el campo eléctrico. Se busca mantener la relación AB/MN lo más grande posible. En la práctica, se establece que $4 \leq AB/MN \leq 20$, y se procede a cambiar la posición de la línea MN cuando la medida de la diferencia de potencial es demasiado pequeña.

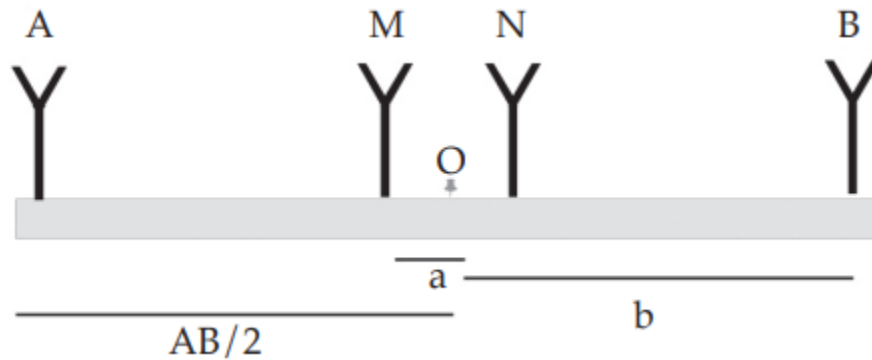


Figura 9. Dispositivos geoelectricos, Schlumberger.

Fuente Salguero (2007).

El coeficiente geométrico, en este caso se simplifica en la ecuación $K = 2 \pi (a^2 - b^2) / 2b$.

La finalidad del Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es determinar la distribución vertical de las resistividades aparentes en profundidad bajo un punto de sondeo, a partir de mediciones de la diferencia de potencial en la superficie. Este método se utiliza principalmente para identificar y delimitar las capas horizontales de suelos estratificados. Los sondeos eléctricos verticales exploran el subsuelo en una única dimensión, es decir, en profundidad.

Resistividad de los materiales naturales

La resistividad en los materiales naturales varía desde 10^{-8} en los hasta 10^{15} . Los valores de la resistividad en una roca están determinados principalmente, por el agua que contienen, por la porosidad y por la salinidad del agua (más salinidad implica mayor conductividad). Todo esto hace que la resistividad de cada tipo de roca presente una gran variabilidad. En general, en el campo encontraremos valores de este orden (Sánchez, 2022):

- Rocas ígneas y metamórficas inalteradas: $> 1000 \Omega \cdot m$
- Rocas ígneas y metamórficas alteradas, o fuertemente diaclasadas: 100 a $1000 \Omega \cdot m$
- Calizas y areniscas: 100 a más de $1000 \Omega \cdot m$
- Arcillas: 1 a $10 \Omega \cdot m$

- Limos: 10 a 100 Ω .m
- Arenas: 100 a 1000 Ω .m
- Gravas: 200 a más de 1000 Ω .m

Las condiciones inherentes a su composición y su exposición a factores climáticos hacen que sus resistividades aparentes varíen, incluso si el sustrato consiste en un único material, la resistividad varía con la profundidad. Esto se debe en gran medida a cambios en el nivel del agua subterránea y en la compactación del material (Briseño, 2015). La resistividad del suelo está condicionada por:

- Tipo de suelo
- Su composición química
- La temperatura
- La mezcla de diferentes tipos de materiales
- Composición química y concentración de las sales disueltas en la humedad del suelo.
- El porcentaje de humedad
- La compactación del material
- Estratificación del suelo

4. METODOLOGÍA

Las cuatro fases principales del análisis de exploración hidrogeológica son fundamentales para obtener una comprensión completa de la disponibilidad y distribución de las unidades litológicas y su relación con el agua subterránea (Figura 10). Estas fases se describen a continuación:

1) Adquisición de la información existente: En esta fase, se recopila y revisa toda la información geológica, geomorfológica, e hidrogeológica disponible. Esto incluye revisar estudios anteriores, informes técnicos, mapas geológicos, datos de pozos y cualquier otra información relevante elaborada por GEOSUB S.A.S.. La recopilación de esta información existente es esencial para entender el contexto geológico e hidrogeológico de la zona de estudio y para evitar duplicación de esfuerzos en la exploración.

2) Levantamiento de los datos geofísicos en campo: En esta etapa, se realizan mediciones y se recolectan datos geofísicos en el terreno. En particular, se llevan a cabo sondeos eléctricos verticales, para obtener información sobre las propiedades eléctricas del subsuelo, como la resistividad, que está relacionada con diferentes formaciones geológicas. Los SEVs se realizan mediante la aplicación de corriente eléctrica entre electrodos y la medición del potencial eléctrico en otros electrodos.

3) Procesamiento de la información recopilada: En esta fase, los datos obtenidos en campo y la información recopilada en la primera fase, son procesados utilizando métodos analíticos y software específicos. El procesamiento de los datos geofísicos incluye la corrección de errores y la transformación de las mediciones en valores de resistividad del subsuelo. Además, se utilizan técnicas de inversión, para generar modelos de capas y caracterizar los estratos.



4) Análisis y entrega de resultados: En la última fase, se lleva a cabo un análisis detallado de los resultados de las fases anteriores. Se interpretan los datos procesados y se generan mapas, secciones y modelos tridimensionales que muestran la distribución espacial de los acuíferos, acuíclados, acuitardos y acuífugos, además se incluirá un diseño preliminar del pozo de agua subterránea. Estos resultados se presentan de manera entendible y clara.

El análisis de exploración de agua subterránea siguiendo estas cuatro fases proporciona información valiosa sobre la disponibilidad y características de los comportamientos hidrogeológicos de las unidades geológicas.

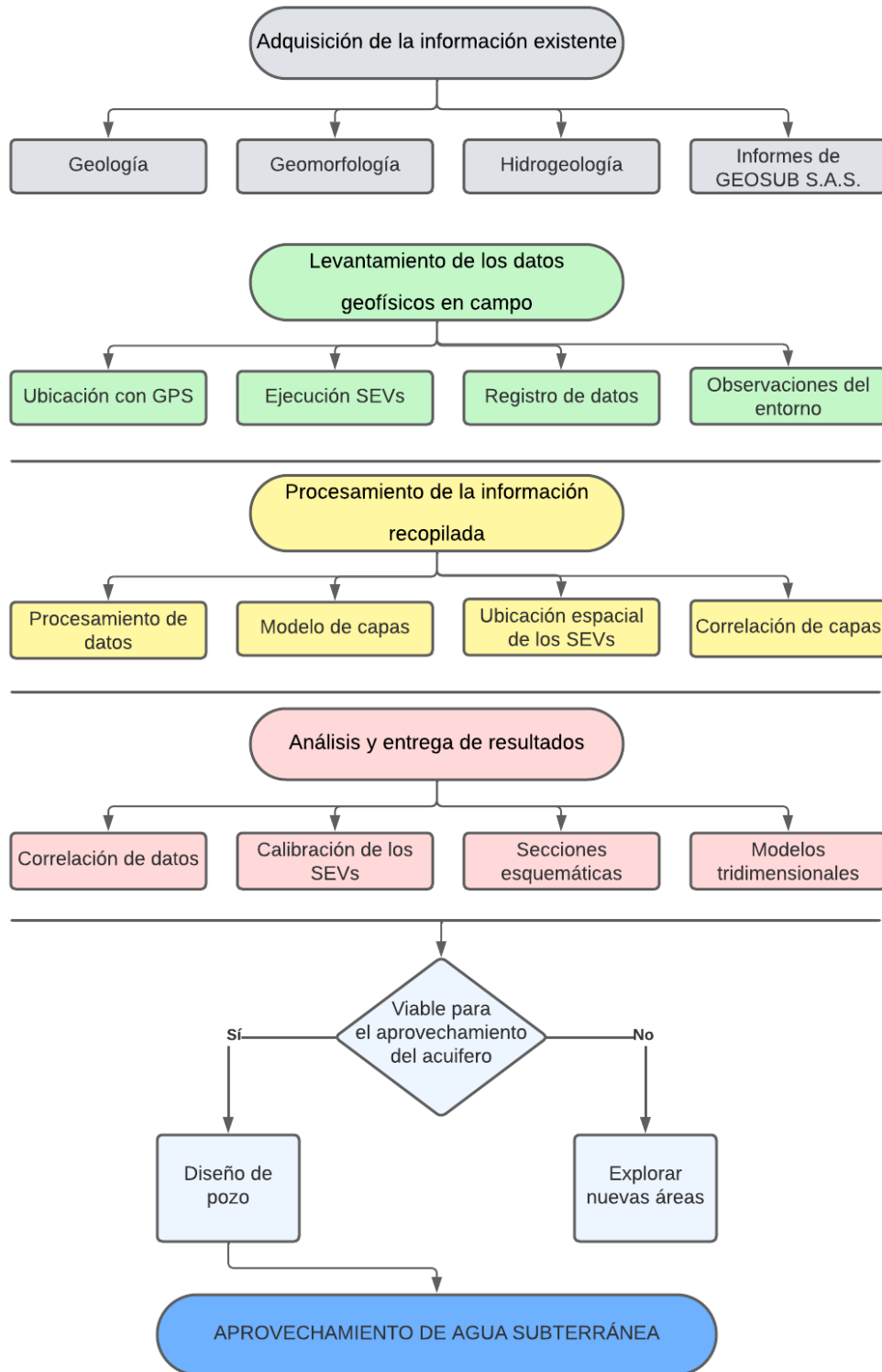


Figura 10. Metodología para estudio de agua subterránea.

Fuente: Elaboración propia.

4.1. ADQUISICIÓN DE LA INFORMACIÓN EXISTENTE

En la etapa de recopilación y análisis de la información, se llevaron a cabo las siguientes acciones:

Se obtuvo la cartografía básica y temática de las bases de datos del IGAC, CARDER y SGC, que incluye geología, geomorfología, hidrogeología, límite municipal, red vial y curvas de nivel. Además, se recopiló la distribución de los pozos de agua subterránea, aljibes y manantiales cercanos a la zona de estudio.

La compilación de información destinada al análisis de la exploración de agua subterránea, involucra la revisión de diversas fuentes, tales como tesis, artículos científicos, libros e informes. De entre estos textos, se dio prioridad a aquellos provenientes de las entidades colombianas especializadas en recursos hídricos y geológicos, entre las que se destacan la Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER), el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y el Instituto de Estudios Ambientales (IDEAM). Además, se incluyeron algunas tesis y artículos que contenían información relevante para el estudio en cuestión. En la Tabla 1, se presentan de manera destacada las principales entidades y los textos específicos que se eligieron como referencias fundamentales para la elaboración de este informe analítico.

Tabla 1. *Recopilación de principales fuentes bibliográficas.*

	(CARDER, 2007)	Plan de Manejo Integrado de Aguas Subterráneas en Pereira.
	(CARDER, 2008)	Plan de ordenación y manejo de la cuenca Hidrográfica del río Otún. Pereira.
	CARDER Y CVC, 2016)	Actualización del POMCA Río La Vieja. Consorcio POMCA Quindío.
	(CARDER, 2017)	Actualización del POMCA Río El Otún.
	(CARDER y UTP, 2020)	Actualización de Inventario de Puntos de Captación de Aguas Subterráneas - IPCAS (Pozos-Aljibes- Manantiales), en las 3 Unidades de Planificación POMCAS formulados.
	(Espinosa–Baquero, A., 2020)	A Model of the Quindío and Risaralda Quaternary Deposits.
	(SGC, 2016)	MODELO HIDROGEOLOGICO DE LA ZONA SUR DEL EJE CAFETERO DEPARTAMENTO DEL QUINDÍO.
	(SGC y Uptc, 2014)	MEMORIA EXPLICATIVA DE LA ZONIFICACIÓN DE LA SUSCEPTIBILIDAD Y LA AMENAZA RELATIVA POR PLANCHA 224 - PEREIRA MOVIMIENTOS EN MASA ESCALA 1:100.000.
	(SGC, 2016)	PLANCHA 224 - PEREIRA.
	(IDEAM, 2015)	Estudio Nacional del Agua 2014.
	(IDEAM, 2019)	Estudio Nacional del Agua 2018.
	(IDEAM, 2023)	Estudio Nacional del Agua 2022.

Fuente: Elaboración propia.

Nota: Esta tabla únicamente engloba los documentos principales emanados de las entidades más relevantes. Además, se ha recurrido a información proveniente de diversos textos y otras fuentes para enriquecer la investigación.

Adicionalmente, se llevó a cabo un análisis exhaustivo del estado de la cartografía geológica elaborada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC), la cual abarca planchas

geológicas y memorias explicativas. Asimismo, se incorporó información proveniente de tesis e informes que compartían el mismo propósito.

De los estudios realizados por GEOSUB S.A.S. se seleccionaron los informes con mayor relación al área de estudio, además se recolectaron datos de sondeos eléctricos verticales e información de pozos de agua subterránea, este último para correlacionar los registros eléctricos de los pozos y para calibrar los valores de resistividad de los SEVs.

4.2. LEVANTAMIENTO DE DATOS GEOFÍSICOS EN CAMPO

Para este informe se utilizó el método geoeléctrico, realizando Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) con arreglo tipo Schlumberger, para determinar las resistividades a diferentes profundidades y así obtener una interpretación litológica del subsuelo.

Para llevar a cabo los sondeos eléctricos verticales en el campo, se utilizó un TERRAMETER ABEM SAS 300-C (Figura 11), que es un equipo ideal para este tipo de estudios de prospección. El equipo de trabajo está conformado por un geólogo como director, un geólogo auxiliar y dos auxiliares de campo, con arreglo tipo Schlumberger (Figura 12).



Figura 11. *Equipo Terramer ABEM SAS 300 C.*

Fuente: Elaboración propia.



Figura 12. *Ejecución de SEV en campo.*

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

Además, se llevaron a cabo observaciones detalladas de posibles fuentes de interferencia con el método utilizado. Estas observaciones abarcan las condiciones del terreno y las estructuras presentes que podrían generar perturbaciones en los resultados obtenidos. Los datos de coordenadas y elevación de cada uno de los SEV's, fueron tomados directamente en campo mediante GPS Garmin Etrex 10 de acuerdo al sistema de coordenadas Magna Colombia Oeste.

En el Anexo 1 se presenta el formato utilizado para la toma de datos en campo, el cual consiste en tomar los datos de resistencia, para calcular la resistividad aparente, multiplicando la resistencia por la constante del arreglo usado, además se usó una hoja logarítmica para entender la tendencia de los registros de resistividad, para verificar que los datos no presenten anomalías y poder corregir los datos en campo.

En el sector de la vereda Huertas, se llevaron a cabo descripción de afloramientos geológicos, con el propósito de establecer una correlación entre los datos geofísicos y las descripciones de los afloramientos.

4.3. PROCESAMIENTO DE LA INFORMACIÓN RECOPIADA

Después de recolectar los datos en el campo utilizando el equipo TERRAMETER ABEM SAS 300-C en los puntos seleccionados, se representan gráficamente las curvas que muestran los valores de resistividad aparente en profundidad. Luego, se generan modelos de capas mediante un proceso de ajuste utilizando la técnica de inversión directa. Esto se realiza utilizando el software REXIS PLUS v.3 (IX1D), desarrollado por Koefoed, que se basa en las Standard Graphs for Resistivity Prospecting de la EAEG.

Se selecciona el modelo más adecuado mediante el análisis de la curva logarítmica (Figura 13). Este proceso permite obtener un modelo de capas que incluye las resistividades y espesores correspondientes para cada uno de los SEVs realizados.

Cabe anotar, que el estudio geoelectrico es un método indirecto, el cual, por medio de datos de resistividad, trata de inferir la geología del subsuelo, pero su precisión no es del 100%. Su buena interpretación está dada por la cantidad de información geológica e hidrogeológica que se tenga del área, además, se aclara que el último valor de resistividad obtenido del modelo de capas, no presenta un espesor definido y esta resistividad tiende a infinito en profundidad.

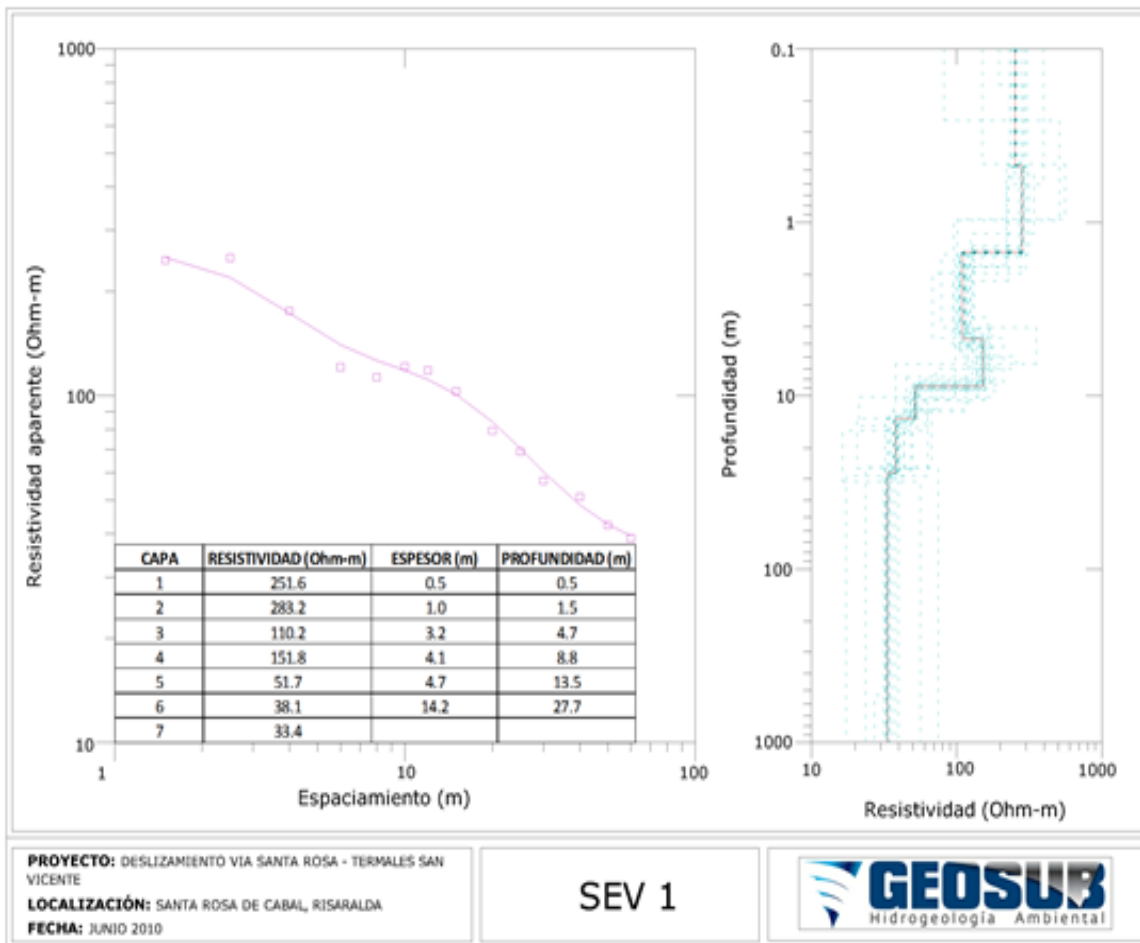


Figura 13. Esquema del modelo de capas obtenido de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs).

Fuente: GEOSUB S.A.S.

4.4. ANÁLISIS Y ENTREGA DE RESULTADOS

A partir de la información recolectada, específicamente para el corregimiento Tribunas-Córcega, se utilizó para correlacionar las distintas capas del subsuelo, con los datos de resistividad, esto para entender la distribución, espesor y profundidad de los estratos, con su interpretación hidrogeológica.

En las secciones geoelectricas elaboradas, es posible observar de manera clara las capas litológicas presentes en el subsuelo, así como su espesor y extensión lateral. La combinación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) y los pozos de agua subterránea en las secciones, contribuye a una comprensión más completa de la distribución y características de los acuíferos en la vereda Huertas.

Se presenta las secciones y modelos realizados en el sector, a partir de antiguos estudios, con el fin de interpretar la geología local, además se realiza una sección esquemática con los niveles bases del área y otra sección específicamente en el área de interés, con la información obtenida se complementa un modelo hidrogeológico propuesto por GEOSUB S.AS. Para el corregimiento Tribunas Córcega.

En caso de que las condiciones de los acuíferos resulten propicias para la captación de agua, se procederá a presentar un diseño preliminar. Este diseño se fundamentará en las dimensiones identificadas de los acuíferos, permitiendo al cliente visualizar y ajustar la estructura del pozo de acuerdo a sus necesidades.

5. MARCO GEOLÓGICO

5.1. GEOLOGÍA REGIONAL

La geología regional del abanico del Quindío y sus alrededores, principalmente en la cuenca del Río La Vieja, está compuesta por diversas formaciones geológicas y depósitos de diferentes edades, abarcando desde el Paleozoico hasta unidades Cuaternarias (Figura 14). Estas descripciones se basan en las memorias de la cartografía realizada por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) y se complementan con información del Plan de Ordenación y Manejo de la Cuenca (POMCA) del Río La Vieja (CARDER et al., 2016). A continuación, se presentan las descripciones de las unidades geológicas tomadas del SGC (2016) y se describen a continuación:

Neises y Anfibolitas de Tierradentro (PcAa): Estas rocas, que datan del Precámbrico, consisten principalmente en neises cuarzo-feldespáticos y anfibolitas. Se encuentran en la parte oriental de la cuenca, aproximadamente a 12 kilómetros al noreste de Calarcá. A menudo, estas rocas están cubiertas por capas de ceniza volcánica de hasta 2 metros de espesor. Además de los neises cuarzo-feldespáticos y anfibolitas, también se encuentran neises biotíticos. Se ha inferido la edad de esta unidad por analogía con rocas similares en otras áreas del país, como Tolima, que han sido datadas radiométricamente como Precámbricas (Barrero y Vesga, 1976).

Complejo Rosario (Pzr): Se encuentra en la parte sur de la Cuenca del río La Vieja, abarcando los municipios de Caicedonia, Pijao y Génova. Se encuentra entrelazado con las rocas del Grupo Bugalagrande, compartiendo límites tectónicos y contactos con las rocas vecinas. Esta unidad geológica está compuesta por una secuencia de anfibolitas y esquistos macizos, que localmente contienen granates y están parcialmente asociados con rocas ultrabásicas tectonizadas. Se estima que el Complejo Rosario tiene una edad del Silúrico (Mc Court, 1985).

Complejo Cajamarca (Pzc): Aflora en toda la margen oriental de la Cuenca del Río La Vieja. Predominantemente, está compuesto por esquistos cuarzo-sericíticos grafíticos (Pes), esquistos cloríticos (Pev) y cuarcitas (Pq). Esta secuencia muestra evidencias de un metamorfismo regional de tipo Barroviano, junto con varios eventos posteriores de metamorfismo dinamométrico (Mc Court ,1985). El límite estructural al oeste del Complejo Cajamarca está marcado por la Falla Campanario, que pone en contacto esta unidad con la secuencia volcano-sedimentaria de la Formación o Complejo Quebradagrande.

Complejo Quebradagrande: Aflora en una amplia área en el sector oriental de la Cuenca del Río La Vieja, adoptando una forma alargada en dirección noreste-suroeste. Está delimitado al este por la Falla Campanario, parte del sistema de Fallas de San Jerónimo, que lo pone en contacto con el complejo polimetamórfico de Cajamarca. Al oeste, está limitado por el sistema de Fallas de Silvia-Pijao, que lo pone en contacto con el complejo polimetamórfico de Rosario y Bugalagrande. Presenta dos componentes principales: uno de predominio sedimentario (Kqs) y otro de predominio volcánico (Kqv). En algunos sectores, la secuencia volcano-sedimentaria es indiferenciada (Kq) debido a la interdigitación de materiales volcánicos y sedimentarios. El componente sedimentario Kqs está compuesto por brechas, conglomerados y areniscas conglomeráticas que contienen cantos y gravas de rocas volcánicas, lodolitas y chert (Gómez et al., 1995), También se reportan rocas calcáreas en algunas áreas. Por otro lado, el componente volcánico Kqv contiene basaltos y andesitas alteradas, con textura ígnea porfirítica, donde se pueden observar fenocristales de plagioclasa en una matriz de minerales verdes oscuros. (González, 2001).

Stock Gabróico de Pereira (Kgp): Es un cuerpo intrusivo que aflora al norte de la Cuenca del Río La Vieja, ubicado a unos pocos kilómetros al este de la ciudad de Pereira. Se trata de una roca intrusiva fanerítica de grano grueso, compuesta principalmente de minerales ferromagnesianos, plagioclasa y cuarzo. Su composición varía desde diorítica hasta gabróica, con algunas variaciones locales hacia rocas ligeramente más ácidas. Se ha asignado una edad del Cretácico Tardío a las series de intrusivos básicos en la Cordillera Central, dentro de la cual se encuentra el Stock Gabróico de Pereira (Restrepo y Toussaint, 1974; Caballero y Zapata, 1985).

Rocas Ultrabásicas Serpentinizadas (Ku): Son cuerpos ultramáficos que han experimentado serpentinización y tectonización, y contienen presencia de eclogitas y anfibolitas. Se encuentran distribuidos a lo largo de la zona de fallamiento del Sistema Cauca-Romeral, en la parte centro sur de la Cuenca del Río La Vieja. Estos cuerpos se interpretan como fragmentos de corteza oceánica del Mesozoico Inferior que han sido tectónicamente emplazados hace aproximadamente 125 millones de años. Existen correlaciones con los complejos ofiolíticos presentes en el flanco occidental de la Cordillera Central, como el Complejo Ofiolítico de Cauca (Restrepo y Toussaint, 1974; Caballero y Zapata, 1985).

Cuarzodiorita (Kcd): Es un cuerpo plutónico de tamaño reducido ubicado en un sector central de la Cuenca del Río La Vieja, a aproximadamente 2.5 km al este del municipio de Buenavista. Este plutón forma parte de un grupo de intrusivos de composición intermedia que se han emplazado aprovechando las zonas de falla del sistema Cauca-Romeral y penetrando rocas metamórficas del Paleozoico. Aunque la edad exacta de la cuarzodiorita no se conoce con precisión, se ha establecido una correlación con el ciclo magmático del Cretáceo Superior (Caballero y Zapata, 1985).

Formación Amaime (Jka): Es una unidad geológica que aflora en la parte suroccidental del área de la Cuenca del Río La Vieja, ubicada a pocos kilómetros al sur del municipio de Caicedonia. Esta formación geológica es parte del Grupo Diabásico. Al este, está en contacto fallado por el sistema de Fallas de Romeral con los complejos polimetamórficos de Rosario y Bugalagrande; al norte, se encuentra en contacto estratigráfico con materiales Cuaternarios; y al oeste, está cubierta por las rocas sedimentarias de la Formación La Pobreza. La Formación Amaime está compuesta por lavas basálticas almohadilladas, las cuales son de origen oceánico y han experimentado procesos tectónicos. En campo, se observan lavas andesíticas de textura afanítica, con esporádicos fenocristales de plagioclasa. La edad mínima asignada a esta secuencia volcánica es del Cretáceo Inferior (Mc. Court, 1985).

Complejo del Río Navarro (Tkcd): Es un cuerpo intrusivo que aflora a unos 7 kilómetros al este de Calarcá. Está compuesto principalmente por cuarzodiorita de grano medio a fino y muestra evidencias de cataclasis, lo que sugiere que ha experimentado procesos de deformación tectónica.

Complejo de Córdoba (Kdi): Es un cuerpo ígneo intrusivo alargado en dirección noreste-suroeste, que aflora en las cercanías de Pijao. Se encuentra delimitado al este por la Falla de Córdoba, lo que lo pone en contacto con el Complejo Quebradagrande, y al oeste, está limitado por el sistema de Fallas Silvia-Pijao, que lo pone en contacto con los complejos metamórficos de Rosario y Bugalagrande.

Este complejo tiene una composición que varía entre básica e intermedia, ubicándose entre diorita y cuarzodiorita. En campo, se observa una diorita fanerítica de grano medio a fino, que contiene minerales como plagioclasa, cuarzo, biotita, anfíboles y piroxenos. La edad del Complejo de Córdoba data entre 83 ± 2 millones de años y 77 ± 3 millones de años (Mc. Court, 1985).

Formación Cinta de Piedra (Tocp): Es una secuencia sedimentaria continental que aflora en el sector oriental de la Cuenca del Río La Vieja, ubicada al este de los municipios de Sevilla, Zarzal y Obando. Esta formación geológica está limitada al oeste por las Fallas La Holanda y Potrerillos-Río La Vieja, lo que la pone en contacto fallado con la Formación La Paila. Al este, se encuentra en contacto con la Formación Amaime debido al sistema de Fallas de Romeral.

Formación La Paila (Tmp): Se encuentra aflorando en el sector noroccidental de la Cuenca del Río La Vieja, cerca de la ciudad de Cartago. Al este, se encuentra en contacto fallado con la Formación Cinta de Piedra, mientras que al oeste está cubierta por depósitos Cuaternarios. Esta formación geológica está compuesta por rocas que se acumularon a través de procesos sedimentario-volcánicos. Se presentan principalmente intercalaciones de conglomerados, areniscas gruesas a conglomeráticas y tobas dacíticas.

Formación La Pobreza (Tmpo): Es una secuencia sedimentaria continental que aflora en la región suroeste de la Cuenca del Río La Vieja, ubicada al occidente y noroccidente de Caicedonia. Al este, el sistema de Fallas de Romeral la pone en contacto con la Formación Amaime, mientras que al occidente se encuentra en contacto discordante, suprayaciendo a la Formación Cinta de Piedra. En la quebrada La Pobreza, un afluente ubicado en el margen occidental del Río La Vieja, fue descrito esta secuencia sedimentaria, la cual presenta un conglomerado basal que contiene cantos muy gruesos, principalmente de pórfidos (McCourt et al., 1985).

Formación Zarzal (Tplz): Comprende una secuencia de diatomitas, arcillas y tobas arenosas a arenas tobáceas que reposan discordantemente sobre los sedimentos de la Formación La Paila (Nivia, 2001). Se estima que tiene una edad del Plioceno (Van der Hammen, 1958).

Pórfidos Dacíticos y Andesíticos (Tplz): Son pequeños cuerpos intrusivos que afloran al este de los municipios de Calarcá y Circasia. Estos cuerpos consisten en diques y stocks de composición intermedia, principalmente dacítica y andesítica, que se han intruido en las rocas Paleozoicas y Mesozoicas.

Flujos Andesíticos (NgQa): Afloran al este de la cuenca, a pocos kilómetros al este de Salento. Estos flujos consisten en lavas andesíticas, dacíticas y localmente basálticas, que se presentan como masas de lavas voluminosas y generalmente están cubiertas por cenizas volcánicas de diversos espesores. Estos flujos andesíticos pertenecen a la actividad volcánica del Oligoceno del complejo volcánico Ruiz-Tolima, lo que sugiere que se formaron durante el período Mioceno-Plioceno (González, 2001).

Formación Armenia (Qta-TQa): Es la unidad geológica más abundante en el área de la Cuenca del Río La Vieja. Se encuentra en el centro y norte de la cuenca, ocupando aproximadamente entre el 40% y el 50% de la Cuenca. Esta formación está ampliamente presente en los alrededores de Armenia, así como en todos los municipios del centro del Quindío, Alcalá, Ulloa, Pereira, Cartago y algunos afloramientos cercanos a Caicedonia.

La Formación Armenia está compuesta por depósitos no deformados de materiales de caídas de cenizas volcánicas semiconsolidadas y flujos de lodos de origen volcánico. Su edad se asigna al Plio-Pleistoceno y representa el producto del ciclo magmático mio-plioceno del complejo volcánico Ruiz-Tolima (McCourt, 1984; Nivia, 2001).

El espesor de la Formación Armenia es variable y puede alcanzar más de 200 metros en sus sectores más profundos. Esta formación juega un papel importante en la geología regional, y su

estudio proporciona información relevante sobre la actividad volcánica y la sedimentación en la cuenca durante el Plio-Pleistoceno, además de su importancia hidrogeológica de la cuenca.

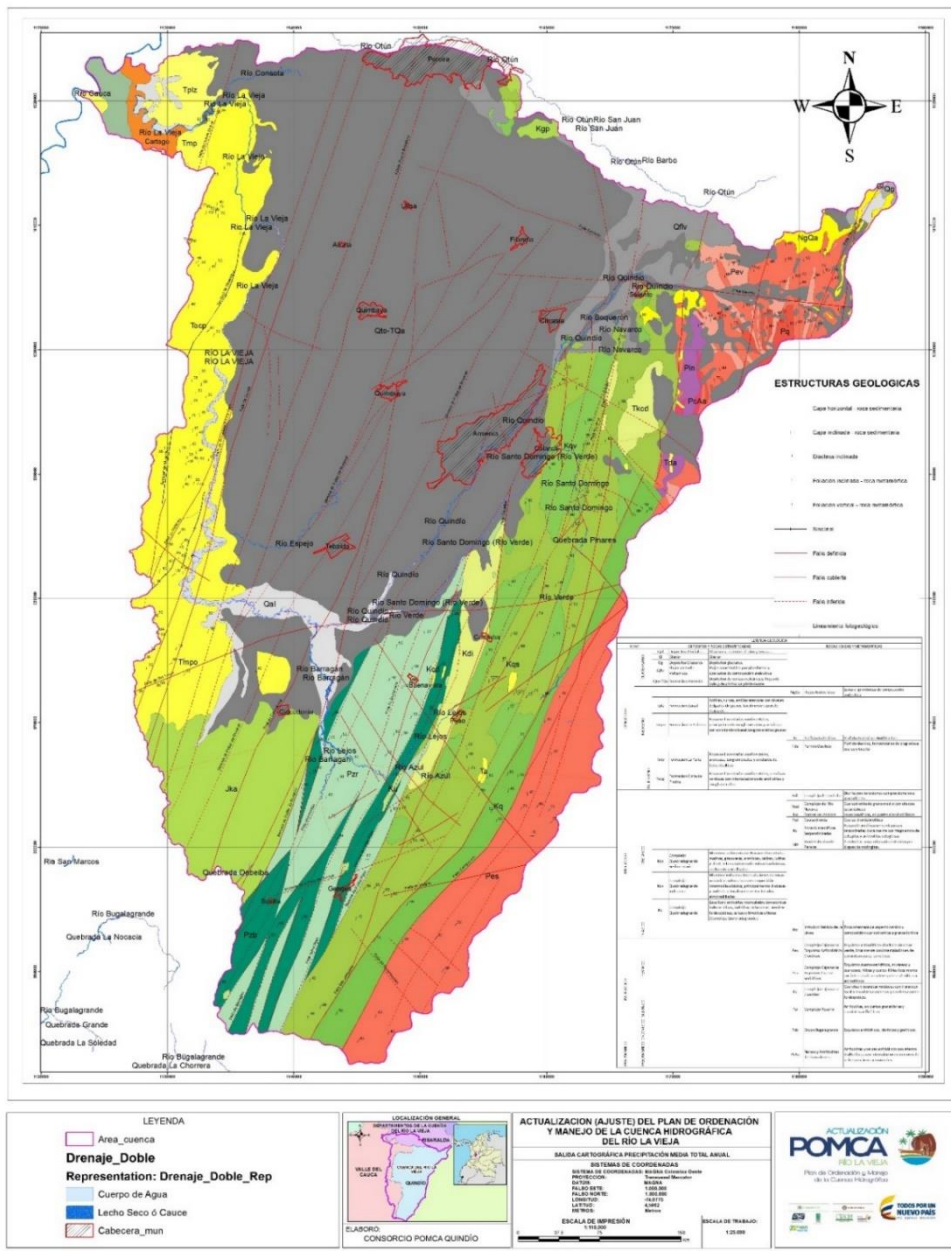
Flujos de Lodos Volcánicos (Q_{lv}): Afloran en el nororiente del área de la Cuenca del Río La Vieja, cerca de los municipios de Salento, Circasia y Pereira.

Estos flujos de lodo, también conocidos como lahares, tienen su origen en procesos fluvio-glaciares y se componen de materiales piroclásticos, lapilli, ceniza, fragmentos de rocas volcánicas y, ocasionalmente, rocas (Caballero; Zapata, 1984).

Depósitos Glaciares (Q_{g-Gl}): Afloran en el extremo nororiental del área de la cuenca y también pueden encontrarse en el sector suroriental de la misma.

Estos depósitos son el resultado de la acción glacial durante el Pleistoceno, una época caracterizada por glaciaciones que afectaron amplias áreas del planeta. Los materiales glaciares que se encuentran en esta región consisten en rocas angulosas, estriadas y acumulaciones de cantos de rocas volcánicas, cenizas, lapilli y pómez. Estos materiales se depositaron discordantemente en la cuenca, es decir, sobre rocas más antiguas, como resultado de la acción glacial y los movimientos de los glaciares en el pasado (González, 2001).

Depósitos Aluviales Recientes (Q_{al}): Están principalmente representados por los materiales transportados por el río La Vieja y sus principales afluentes. Estos depósitos incluyen materiales aluviales depositados en el cauce del río, terrazas recientes y llanuras de inundación, Están compuestos por fragmentos de diversos tipos de roca mal seleccionados y arenas, limos y arcillas generalmente sin estratificación. Mc. Court et al., 1985).



LEYENDA GEOLOGICA			
EDAD	DEPOSITOS Y ROCAS ESTEREOCORRELACIONES	ROCAS SIMILARES Y METAMORFICAS	
CUATERNARIO	Qa	Aluviones recientes de TET y aluvión	
	Qb	Aluvión	
	Qc	Aluvión	
	Qd	Aluvión	
CENIZADO	Ca	Aluvión	
	Cb	Aluvión	
MIOCENO	M1	Aluvión	
	M2	Aluvión	
PLEISTOCENO	P1	Aluvión	
	P2	Aluvión	
MIOCENO	M3	Aluvión	
	M4	Aluvión	
MIOCENO	M5	Aluvión	
	M6	Aluvión	
MIOCENO	M7	Aluvión	
	M8	Aluvión	
MIOCENO	M9	Aluvión	
	M10	Aluvión	
MIOCENO	M11	Aluvión	
	M12	Aluvión	
MIOCENO	M13	Aluvión	
	M14	Aluvión	
MIOCENO	M15	Aluvión	
	M16	Aluvión	
MIOCENO	M17	Aluvión	
	M18	Aluvión	
MIOCENO	M19	Aluvión	
	M20	Aluvión	
MIOCENO	M21	Aluvión	
	M22	Aluvión	
MIOCENO	M23	Aluvión	
	M24	Aluvión	
MIOCENO	M25	Aluvión	
	M26	Aluvión	
MIOCENO	M27	Aluvión	
	M28	Aluvión	
MIOCENO	M29	Aluvión	
	M30	Aluvión	
MIOCENO	M31	Aluvión	
	M32	Aluvión	
MIOCENO	M33	Aluvión	
	M34	Aluvión	
MIOCENO	M35	Aluvión	
	M36	Aluvión	
MIOCENO	M37	Aluvión	
	M38	Aluvión	
MIOCENO	M39	Aluvión	
	M40	Aluvión	
MIOCENO	M41	Aluvión	
	M42	Aluvión	
MIOCENO	M43	Aluvión	
	M44	Aluvión	
MIOCENO	M45	Aluvión	
	M46	Aluvión	
MIOCENO	M47	Aluvión	
	M48	Aluvión	
MIOCENO	M49	Aluvión	
	M50	Aluvión	
MIOCENO	M51	Aluvión	
	M52	Aluvión	
MIOCENO	M53	Aluvión	
	M54	Aluvión	
MIOCENO	M55	Aluvión	
	M56	Aluvión	
MIOCENO	M57	Aluvión	
	M58	Aluvión	
MIOCENO	M59	Aluvión	
	M60	Aluvión	
MIOCENO	M61	Aluvión	
	M62	Aluvión	
MIOCENO	M63	Aluvión	
	M64	Aluvión	
MIOCENO	M65	Aluvión	
	M66	Aluvión	
MIOCENO	M67	Aluvión	
	M68	Aluvión	
MIOCENO	M69	Aluvión	
	M70	Aluvión	
MIOCENO	M71	Aluvión	
	M72	Aluvión	
MIOCENO	M73	Aluvión	
	M74	Aluvión	
MIOCENO	M75	Aluvión	
	M76	Aluvión	
MIOCENO	M77	Aluvión	
	M78	Aluvión	
MIOCENO	M79	Aluvión	
	M80	Aluvión	
MIOCENO	M81	Aluvión	
	M82	Aluvión	
MIOCENO	M83	Aluvión	
	M84	Aluvión	
MIOCENO	M85	Aluvión	
	M86	Aluvión	
MIOCENO	M87	Aluvión	
	M88	Aluvión	
MIOCENO	M89	Aluvión	
	M90	Aluvión	
MIOCENO	M91	Aluvión	
	M92	Aluvión	
MIOCENO	M93	Aluvión	
	M94	Aluvión	
MIOCENO	M95	Aluvión	
	M96	Aluvión	
MIOCENO	M97	Aluvión	
	M98	Aluvión	
MIOCENO	M99	Aluvión	
	M100	Aluvión	

Figura 14. Mapa geología regional, Cuenca Río La Vieja. Fuente: CARDER et al. (2016).

5.2. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL

El área de estudio se ve afectado por varias fallas, algunas con evidencias de actividad reciente, esto es de gran relevancia debido a que las fallas en este sector están cubiertas por el abanico del Quindío, con lo cual es necesario analizar indicadores geomorfoneotectónicos como lo son escarpes de fallas, basculamientos, controles estructurales y demás rasgo que permita evidenciar la actividad de las fallas. Se ubican las fallas que afectan esta unidad (Figura 15), y se resaltan el sistema de fallas Romeral y el sistema de fallas Otún-Consota, los cuales tienen mayor influencia en la zona suroeste del municipio de Pereira. La siguiente información se obtiene a partir de Guarín (2018), la cual incluye los sentidos de las fallas y dimensiones de estas y él en Anexo 2, se presenta la tabla de las fallas con su respectivo autor.

Sistema de fallas Romeral

El sistema de fallas de Romeral tiene una dirección que varía entre N 5° W y N 20° E. La longitud total acumulada de los segmentos medidos de este sistema de fallas es de aproximadamente 843,3 kilómetros.

Algunas de las fallas principales de este sistema y que afectan el abanico del Quindío son:

- **Falla Armenia (F.ARM):** Esta estructura atraviesa la ciudad de Armenia y el abanico del Quindío-Risaralda en una distancia de 29.1 km. Tiene una dirección de N-S a N 5° E y presenta fuerte evidencia y signos de actividad tectónica.
- **Falla de Navarco (F.NV):** Esta falla de dirección N-S controla los valles de los ríos Navarco y Boquia para continuar hacia el río Otún cruzando el Quindío Fan- Risaralda en su parte proximal en un recorrido de 15,6 km.

- **Fallas de Matecaña (F.MTA):** Estas fallas se ubican entre las ciudades de Pereira y Montenegro. Son de dirección N-S y afectan los depósitos del Abanico Quindío-Risaralda en una distancia de 19,7 km. Al norte de la ciudad de Montenegro, una falla presenta un escarpe con compartimento occidental elevado, que desaparece gradualmente hacia al SE de la ciudad de Quimbaya.

Sistema de fallas Otún-Consota

Este sistema de fallas tiene una dirección variable que va desde N 5° W hasta N 65° W. Su longitud total de tramos medidos es de aproximadamente 98,3 kilómetros. Algunas de las fallas principales de este sistema son:

- **Falla de Otún (F.OTN):** Rumbo N 57° W y 34,8 km de longitud, controla caudal del río Otún y forma el límite norte del Abanico Quindío-Risaralda. Consta de seis segmentos que en dirección SE están desplazados por fallas dextrales de dirección NE-SW pertenecientes al sistema de fallas de Palestina.
- **Fallas de Consota (F.CON):** Este lineamiento de dirección N 50° W y una longitud de 32,5 km forma, junto con la falla de Otún, el límite norte del abanico del Quindío-Risaralda. El controla el curso del río Consota desde su nacimiento al oeste de la ciudad de Pereira. Luego esta falla continúa hacia el NW, casi paralela al río Otún que presenta un importante cambio de rumbo en el mismo sentido. Eventualmente, la falla controla el río Cauca hasta la localidad de La Virginia.

Otro sistema de falla con influencia en el abanico de Quindío es el sistema de fallas de Palestina, este sistema forma estructuras prominentes en el sistema volcánico Cerro Bravo-Cerro Machín y en el abanico Quindío-Risaralda, las fallas de este sistema tienen una dirección que varía entre N 20° E y N 65° E. Adicional, se tiene el sistema de fallas Salento-Río Verde, que también

afecta esta unidad, este sistema tiene una dirección entre N77°E a N103°E y una longitud de tramo de 211,3 km. Las fallas principales de estos sistemas se presentan él en Anexo 2.

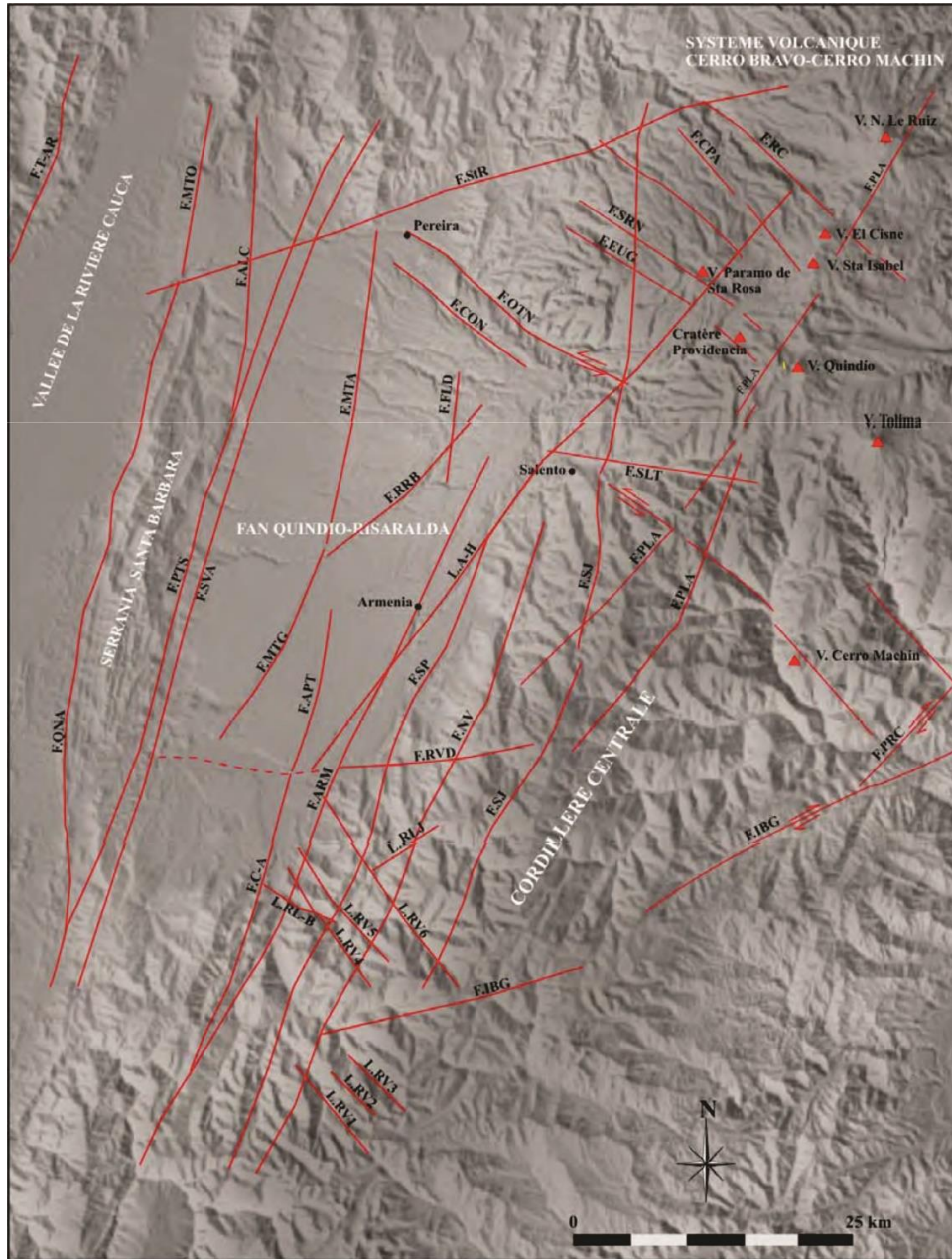


Figura 15. Principales fallas del área de estudio.

Fuente: Guarín (2008).

5.3. GEOLOGÍA LOCAL

La unidad principal en el área de estudio y que cubre gran parte de los departamentos del Quindío y Risaralda, es el abanico del Quindío, según el SGC (2016), el abanico del Quindío es un depósito volcánico – sedimentario de origen múltiple y edad Plioceno – Pleistoceno, que ha recibido los nombres de Glacis del Quindío (González, 1991), Flujo de lodo del Quindío (Mosquera, 1978) y Formación Armenia (McCourt et al, 1984b).

Esta unidad, según Espinoza (2005), puede subdividirse en 3 unidades principales, abanicos proximales, intermedios y distales, estos clasificados por sus expresiones geomorfológicas, deben pertenecer a diferentes fases de génesis.

Según la definición de Guarín (2008) tomado de SGC (2016), el Abanico del Quindío-Risaralda es una formación geológica compuesta principalmente por depósitos vulcanoclásticos. Estos depósitos se formaron debido a la acumulación de sedimentos depositados en la desembocadura de los valles fluviales de los ríos Otún, Quindío, Navarco y Santo Domingo. El Abanico del Quindío-Risaralda la divide en tres zonas o sectores: proximal, intermedia y distal, al igual que Espinoza (2005). Estos sectores representan diferentes áreas dentro del abanico y muestran características distintas en términos de sedimentación y acumulación de los materiales vulcanoclásticos.

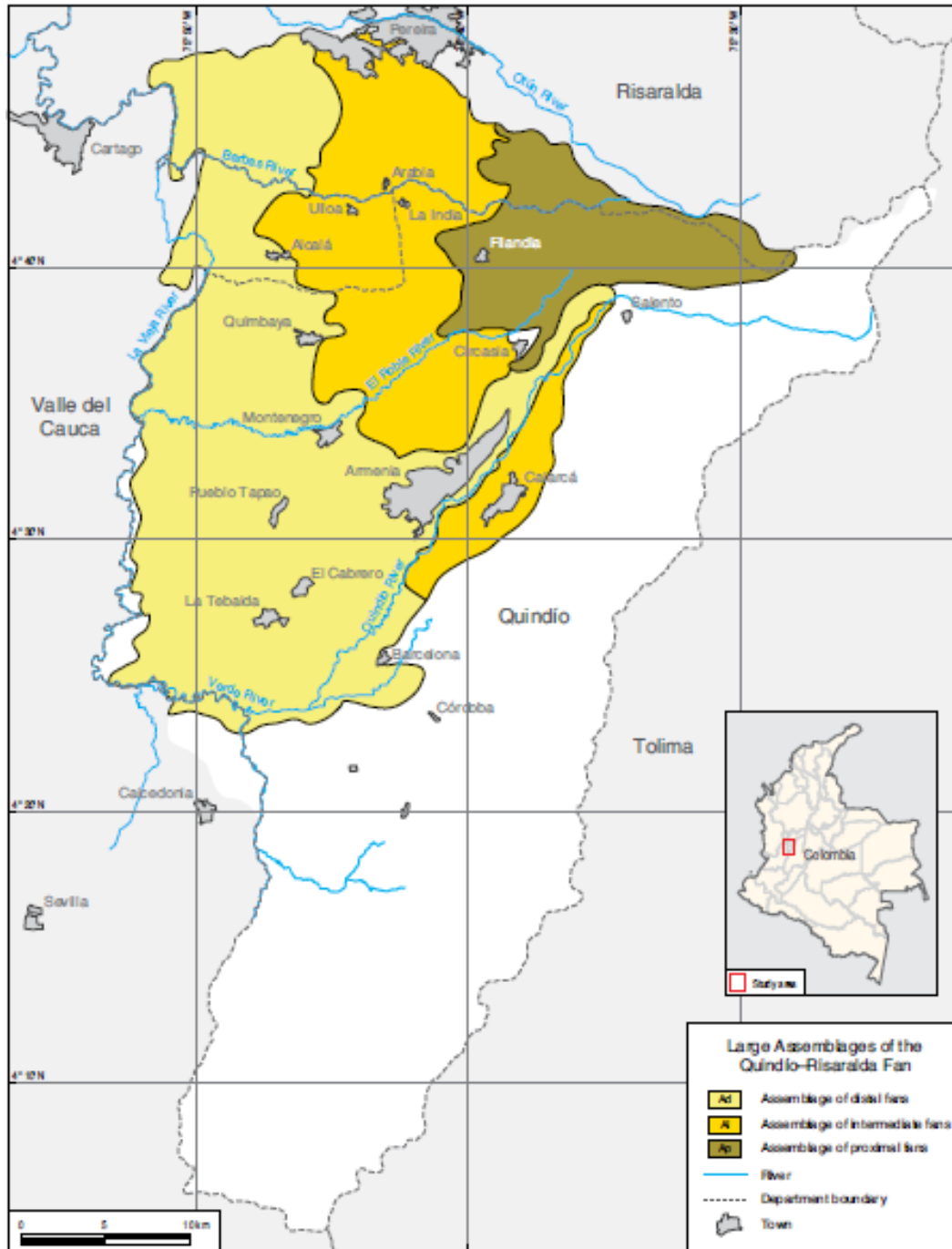


Figura 16. Abanico del Quindío.

Fuente: Espinoza (2020).

Abanico Proximal: En la parte superior, se observa una secuencia de intercalaciones de arenas y limos de color amarillo y ocre, cubiertas por una capa de arcilla de color amarillo ocre. Sobre esta capa, se encuentran cenizas y lapilli con espesores aproximados de 20 y 30 metros. En la parte media de la zona proximal, hay flujos de lodo monomícticos de color gris predominante con matriz areno limosa, a veces cementada, y algunos flujos de escombros del mismo color. Estos flujos de lodo se apoyan sobre un flujo de lodo polimíctico con tonalidades rojas, amarillas rojizas y violeta. Toda esta secuencia reposa discordante sobre rocas del basamento (Complejo Quebradagrande) con espesores variables desde su ápice hasta el contacto con el abanico intermedio. Se estima que la secuencia puede alcanzar un espesor de hasta 200 metros en el área de reserva forestal del río Barbas, aunque en lugares cercanos afloran las rocas del basamento (SGC, 2016).

Abanico Intermedio: La unidad se compone de acumulaciones de flujos de escombros masivos que contienen clastos angulares y subredondeados de diversos tamaños, desde arcillas hasta cantos. La selección de los clastos es regular a mala. En la matriz de esta unidad, se encuentran fragmentos de madera que, según Guarín (2008), se originaron a partir de un flujo piroclástico que se desarrolló dentro de un flujo de escombros.

En los abanicos intermedios, hacia la base, se observan flujos polimícticos heterométricos compactos de tonalidades rojizas, violeta y amarillo rojizo. Estos flujos pasan a arenas arcillosas y limosas. En algunos sectores, se encuentran arcillas plásticas con espesores de hasta 15 metros, así como limos rojizos. En general, la secuencia de la unidad, desde la base hasta el techo, muestra un depósito caótico de bloques de hasta 80 centímetros, guijos y guijarros de andesitas y basaltos, con forma subangular a subredondeada (SGC, 2016).

El área de estudio se encuentra en esta división del abanico, por lo tanto, se espera encontrar similar estratigrafía, en la que se presenta una columna estratigráfica generalizada (Figura 17), se escoge está por la cercanía a la zona de interés.

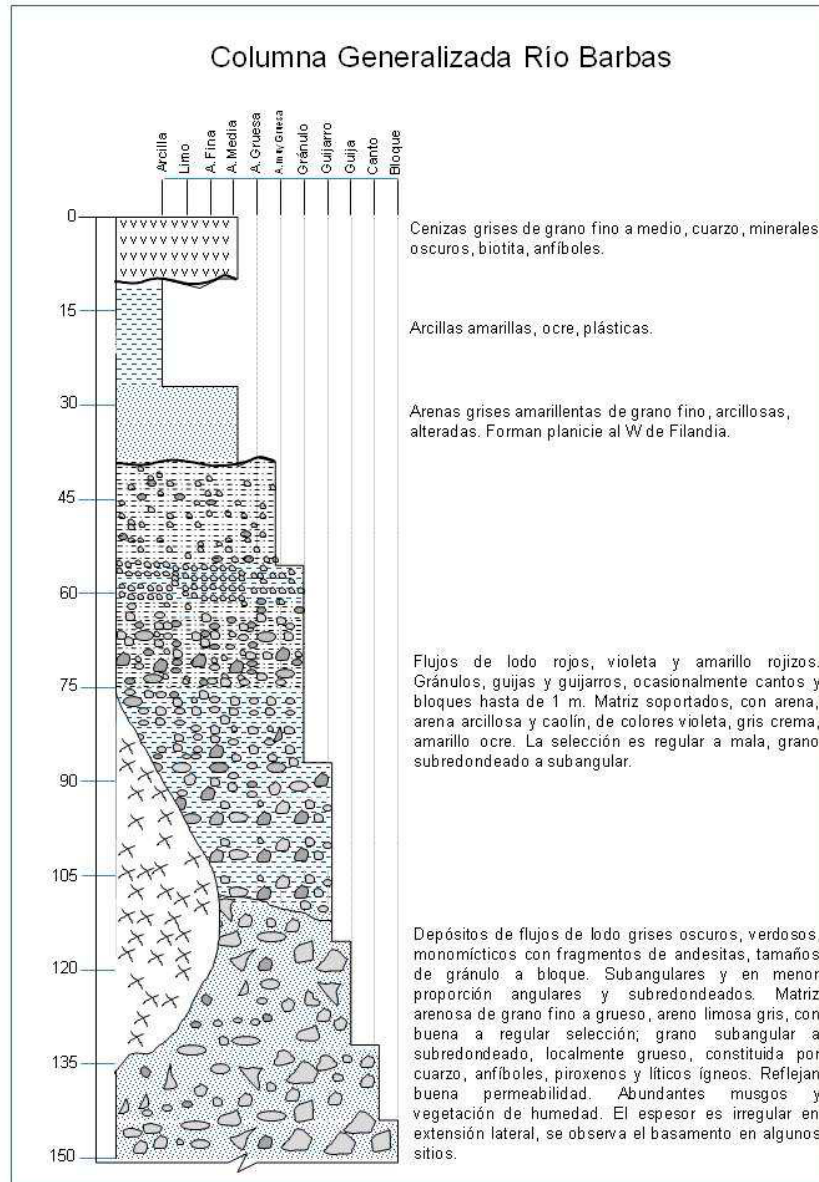


Figura 17. Columna generalizada Río Barbas, parte intermedia del abanico del Quindío.

Fuente: SGC (2016).

Nota: Esta columna es la más cercana al corregimiento de Tribunas-Córcega.

Abanico Distal: Esta unidad geológica está compuesta principalmente por flujos de escombros hiperconcentrados con una textura de arena gruesa, así como depósitos fluviales. Estos materiales, en su mayoría, han sido re TRABAJADOS y se encuentran en contacto discordante con la Formación Zarzal al suroeste de La Tebaida (SGC, 2016).

La secuencia litológica presenta similitudes con la del abanico intermedio. Hacia la base, se pueden encontrar algunas acumulaciones poco frecuentes de flujos de lodo mal seleccionados con una matriz compacta de color ocre a gris. Sobre este flujo, se observa otro depósito con una matriz de color rosado, también compacta, aparentemente producto de re TRABAJAMIENTO. Hacia el techo de la secuencia, se encuentran paquetes de lapilli y cenizas blancas de caída, los cuales rellenan antiguos valles o zonas bajas, y su espesor varía desde centímetros hasta 8 metros. En la mayoría de los afloramientos de esta unidad, predominan las variaciones de arenas, limos y arcillas, lo que indica una amplia variedad de texturas sedimentarias presentes en esta formación geológica (SGC, 2016).

5.4. GEOMORFOLOGÍA

El área de investigación está localizada al norte de la cadena montañosa de los Andes, en el flanco occidental de la Cordillera Central Colombiana, específicamente en la porción septentrional del abanico del Quindío. Este abanico exhibe una leve inclinación principalmente en dirección oeste. En el contexto de la plancha 224 de Pereira, se realizó una categorización de las unidades geomorfológicas, siguiendo la clasificación establecida por el Servicio Geológico Colombiano (SGC).

En la región sur de la ciudad de Pereira, se ha llevado a cabo una clasificación de los ambientes morfogenéticos en categorías de denudación, fluviales, estructurales, glaciares y volcánicos (Figura 18). Es importante resaltar que la zona de estudio se identifica como un ambiente volcánico. Esta región volcánica abarca una extensa área, ubicada en el centro y sureste de la plancha, comprendiendo el sector meridional del departamento de Risaralda y el sector septentrional del departamento de Quindío (SGC y Uptc, 2014).

Efectivamente, la presencia de este ambiente volcánico se erige como la característica preeminente en la plancha, ocupando extensiones significativas de los departamentos de Risaralda y Quindío. En este contexto, resalta con mayor prominencia la unidad correspondiente al flujo lahárico aterrazado (Vfla), seguida por el escarpe de flujo lahárico aterrazado (Vflae), cuya representación puede apreciarse en la Figura 19, en la cual se clasifica el área de estudio según estos ambientes.

Estas unidades descansan sobre depósitos generados por flujos de lodo, flujos de lava, cenizas y materiales piroclásticos, todos ellos consecuencia directa de la actividad volcánica proveniente de los volcanes Nevado del Ruiz y Nevado Santa Isabel (SGC y Uptc, 2014).

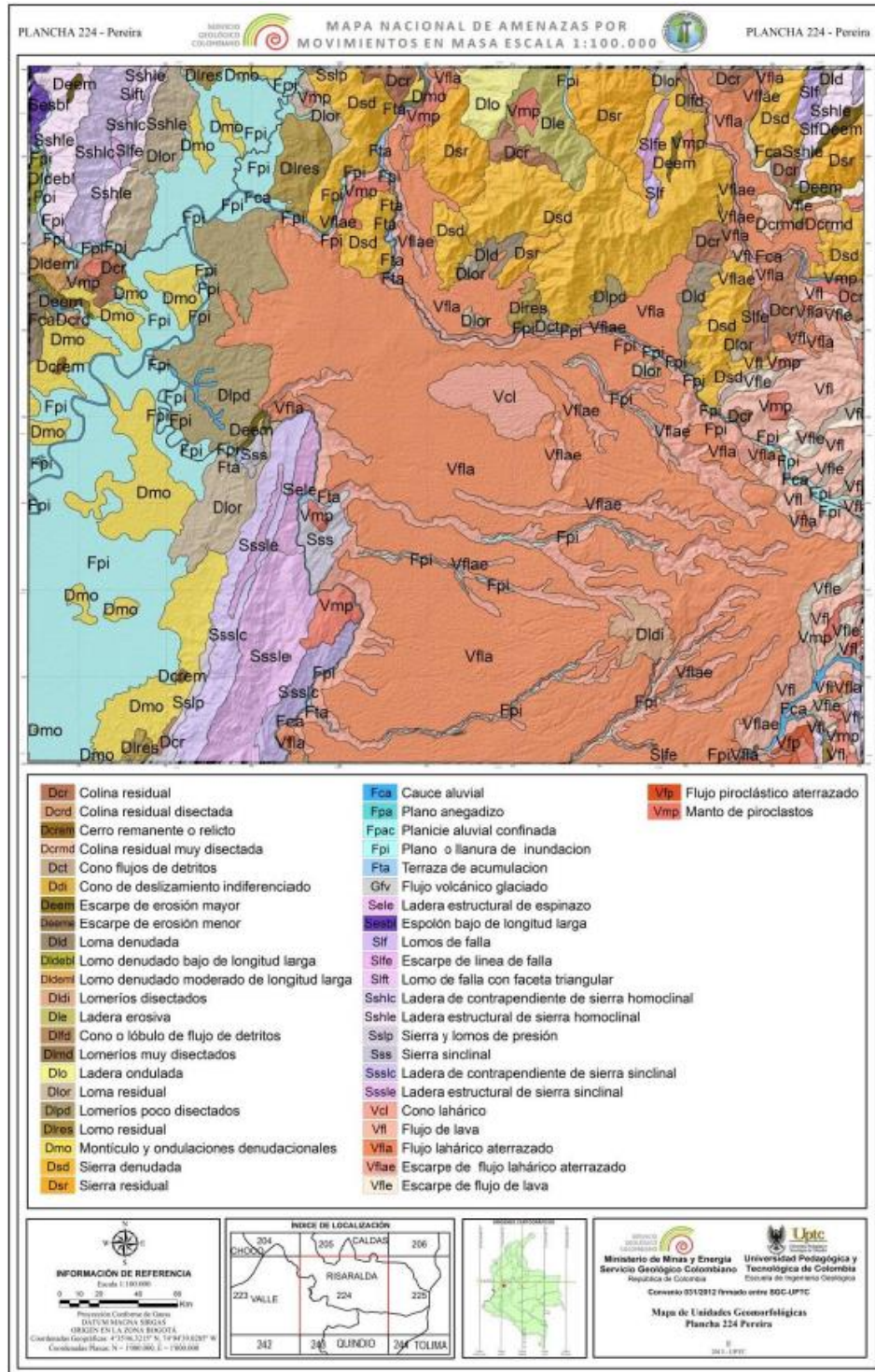


Figura 19. Mapa de Unidades Geomorfológicas (Plancha-224 Pereira).

Fuente: SGC y Uptc (2014).

Nota: La zona de estudio clasifica como lujo lahárico aterrazado (Vfla).

El área exhibe predominantemente un patrón de drenaje que varía desde subparalelo hasta subdendrítico, siguiendo la configuración geomorfológica del depósito del abanico. Este patrón de drenaje también se ve influenciado por ciertos factores de control estructural, que se reflejan en un nivel de disección moderado a alto en la topografía.

Los depósitos en la zona se distinguen por su topografía ondulada, la cual está intensamente disectada por pequeños cursos de agua que dan lugar a colinas con cimas suaves y redondeadas. Estas colinas exhiben laderas cóncavas, que pueden variar de moderadas a empinadas, y en algunas ocasiones, se presentan escarpes en los flujos principales de agua. La Figura 20 se puede observar la geomorfología del terreno, modelo elaborado a partir de las curvas de nivel, obtenidas de la CARDER.

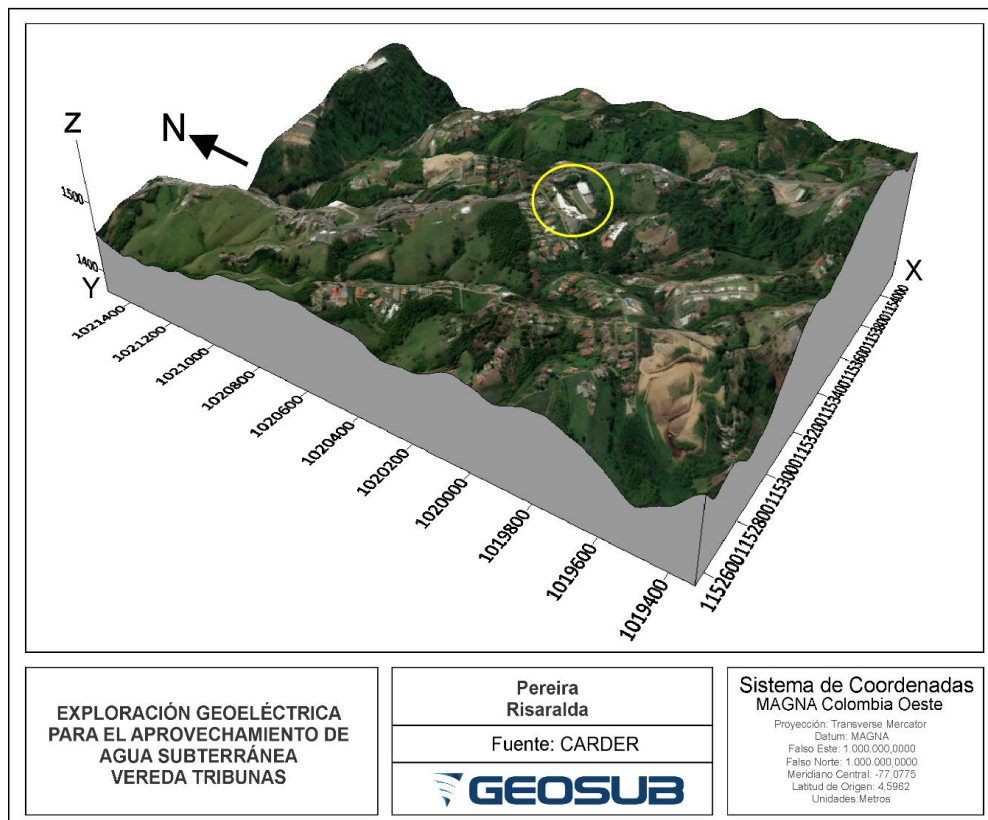


Figura 20. Modelo tridimensional de la geomorfología de la zona.

Fuente: GEOSUB S.A.S (2023).

6. RESULTADOS

6.1. HIDROGEOLOGÍA BIBLIOGRÁFICA

La zona de interés se encuentra dentro de la cuenca hidrográfica del Río La Vieja, la cual está parcialmente dentro de la provincia hidrogeológica del Cauca – Patía, ubicada en la parte suroccidental de Colombia. En esta se han identificado cuatro sistemas acuíferos: el Sistema acuífero del Patía, el Sistema acuífero de Popayán y Esmirnia, el Sistema acuífero del Valle del Cauca y el Sistema acuífero de Pereira – Armenia. Sin embargo, de estos sistemas acuíferos, solo el de Pereira – Armenia es relevante para la Cuenca del Río La Vieja (CARDER et al., 2016).

El IDEAM en ENA (2014) presenta una síntesis del sistema acuífero de Pereira – Armenia en un área de 89.000 hectáreas, que corresponde al abanico o glacis del Quindío. Según este estudio, se distinguen dos tipos de sedimentos y rocas en este sistema:

1. Sedimentos de abanico aluvial: Estos sedimentos son característicos de los abanicos formados por la acumulación de material aluvial transportado por los ríos. Son depósitos inconsolidados y heterogéneos, compuestos por materiales como gravas, arenas, limos y arcillas, que forman acuíferos porosos y permeables.

2. Rocas ígneas metamorizadas: Estas rocas se encuentran en la Cordillera Central y constituyen una parte de la geología del área. Aunque son menos permeables que los sedimentos de abanico aluvial, pueden contribuir a la recarga del acuífero a través de fracturas y fisuras presentes en ellas.

El sistema acuífero de Pereira – Armenia es de gran importancia para la Cuenca del Río La Vieja, ya que proporciona agua subterránea para el abastecimiento de las poblaciones y la actividad

agrícola en la zona. El conocimiento y gestión adecuada de este acuífero son fundamentales para garantizar un uso sostenible de los recursos hídricos en la región. (CARDER et al., 2016).

La Formación Armenia es la unidad geológica que ha sido ampliamente estudiada y analizada en términos hidrogeológicos. Está compuesta principalmente por materiales volcánicos poco o sin consolidar, lo que le confiere características de porosidad primaria y efectiva importantes, alta permeabilidad y capacidad para almacenar y transportar agua subterránea. Debido a estas características, la Formación Armenia se considera un acuífero de mediana productividad, tal y como se presenta en la Figura 21, con una capacidad específica de entre 2 y 5 litros por segundo por metro. Su extensión y continuidad en la región la convierten en una fuente estratégica de agua subterránea (CARDER et al., 2016). Hidrogeológicamente, esta formación presenta porosidades del 10 y 20%, constituyendo un acuífero confinado a semi-confinado por la capa suprayacente de cenizas. Tiene una porosidad primaria heterogénea como consecuencia de las variaciones en el grado de soldamiento y tamaño de grano (CARDER et al., 2016).

Para determinar la dirección de flujo de agua regional, se obtuvo la información de Restrepo (2014), la cual, resalta la red de monitoreo de pozos de agua subterránea y por sus niveles estáticos, determina que la dirección principal del flujo de agua subterránea en la zona, se mueve de este a oeste. Comienza con gradientes hidráulicos elevados en la altura del municipio de Dosquebradas y en el sector de Tribunales en el Municipio de Pereira. Luego, se observan gradientes hidráulicos más bajos en el centro de Pereira y en la zona de expansión de Cerritos. Finalmente, las aguas subterráneas fluyen hacia las zonas de descarga natural con dirección al noroeste, en el río Cauca y hacia el suroeste, en el río La Vieja, esta información se observa en la Figura 22.

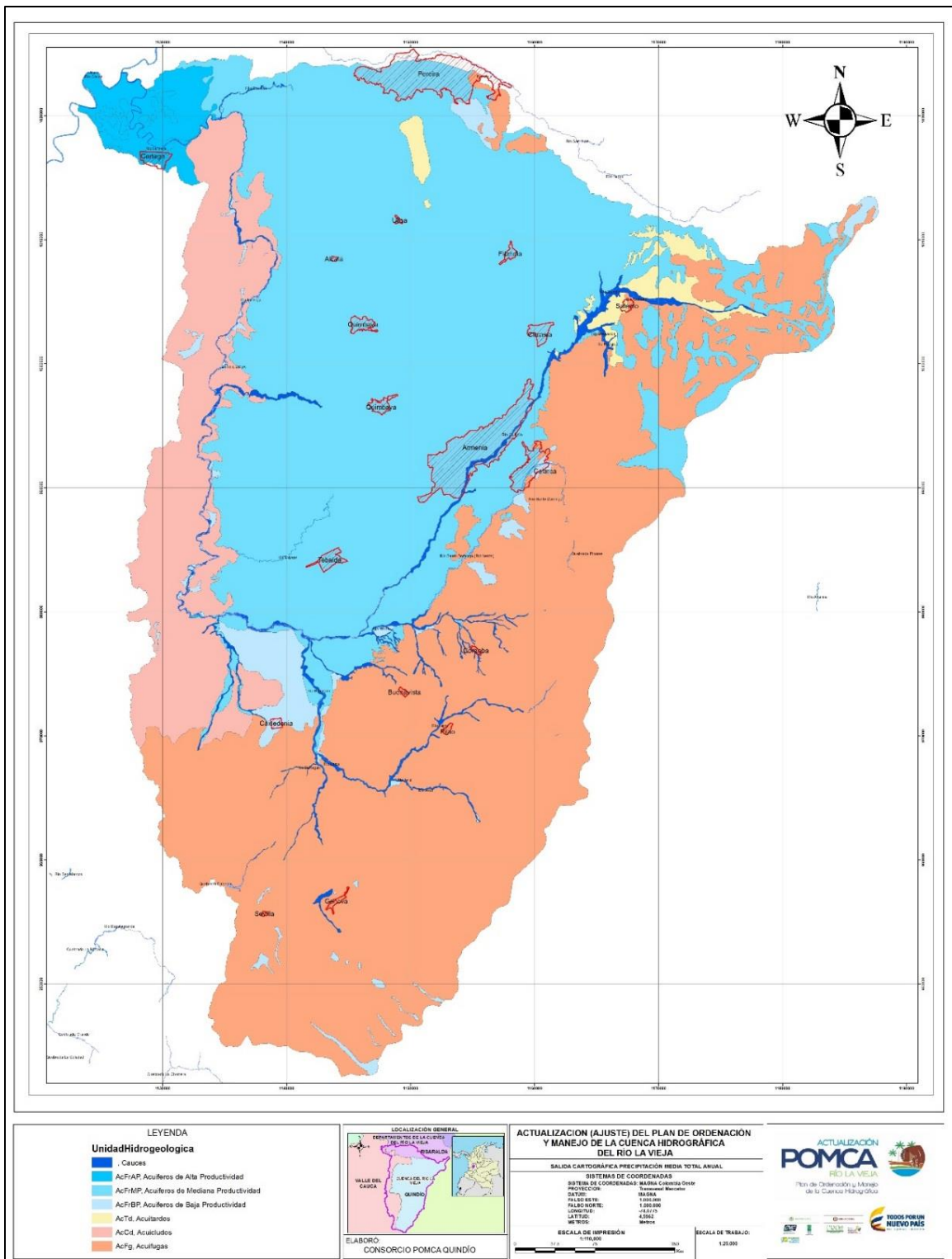


Figura 21. Unidades hidrogeológicas, cuenca Río La Vieja.

Fuente: CARDER et al. (2016).

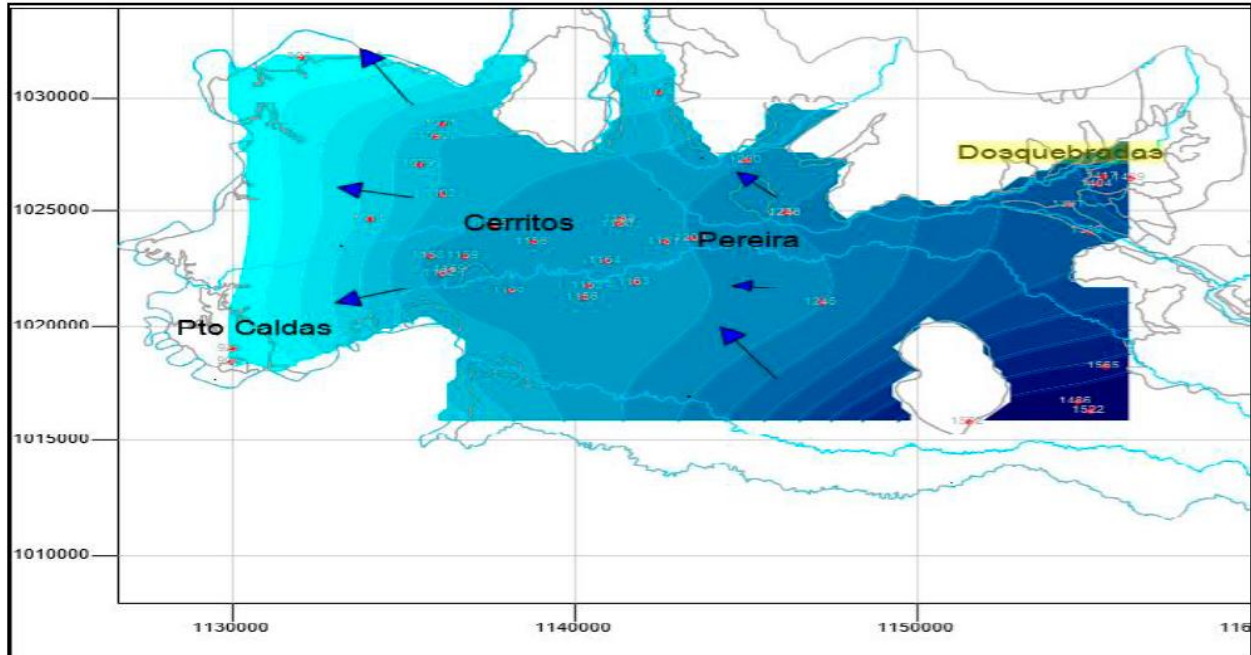


Figura 22. *Dirección Regional Acuífero Dosquebradas Pereira.*

Fuente: CARDER (2007) tomado de Restrepo (2014).

De la información de puntos de agua de la base de datos de la CARDER, se obtiene el shapefile del mapa de isopiezas para el acuífero en la cuenca Río La Vieja, esto para mostrar la dirección de flujo de agua en el corregimiento Tribunas Córcega, se puede apreciar los vectores en dirección predominantemente en sentido norte y otros en sentido oeste, se incluye la ubicación de los pozos, aljibes y manantiales usados para elaborar dicho mapa (Figura 23). Además, con los pozos cercanos para este informe, se utiliza la información de los niveles estáticos de los pozos construidos por GEOSUB S.A.S. se elabora un mapa de isofreáticas, los datos de los pozos usados se pueden observar en la Tabla 2 y en la Figura 24 se observa el mapa con las direcciones flujos de agua. Para la zona sureste del mapa presenta una dirección de flujo en sentido oeste, cercano a la zona de estudio, específicamente al pozo Cond. Jamaica, se observa que la tendencia de los vectores del flujo de agua está en sentido noroeste.

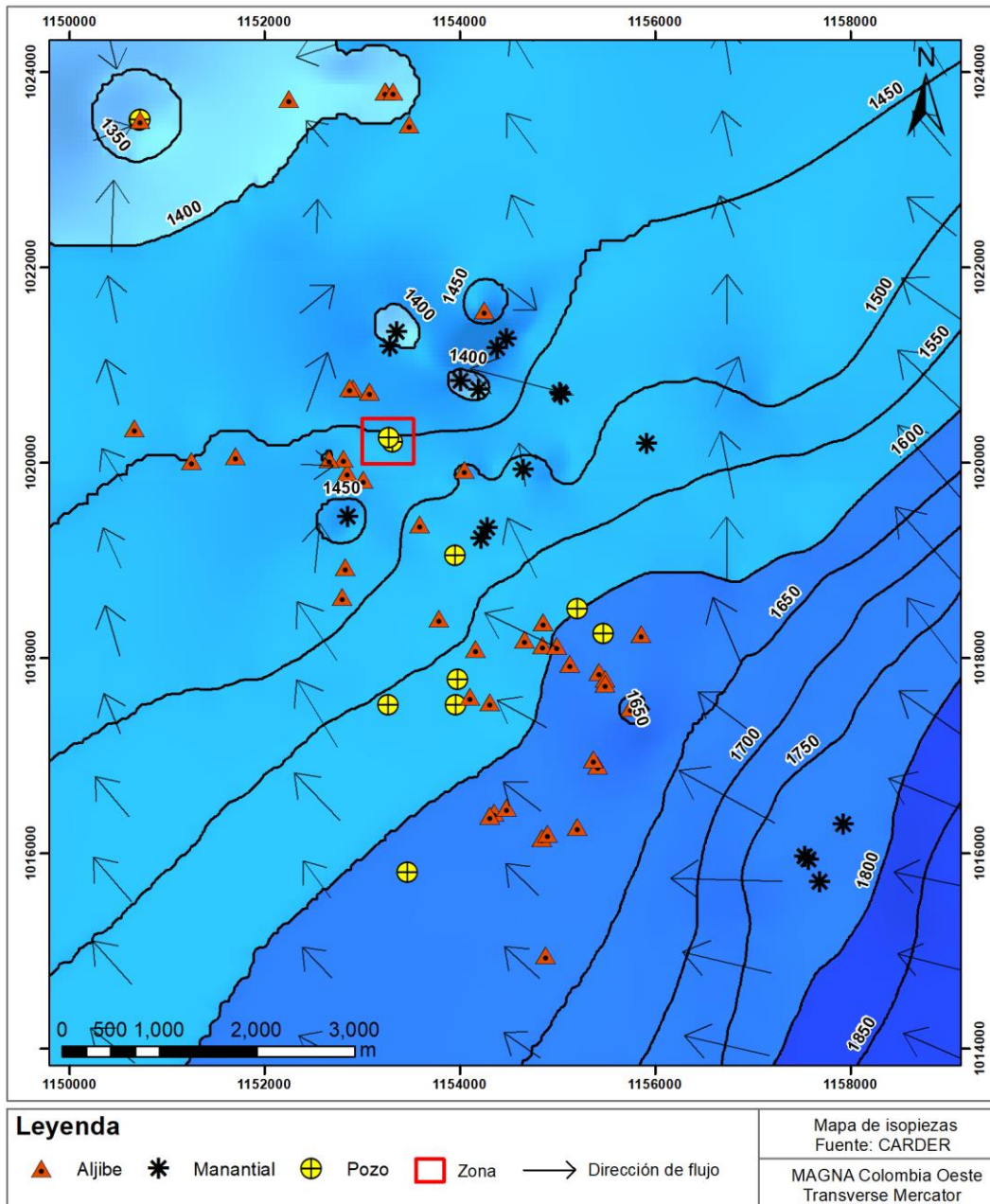


Figura 23. Mapa de isopiezas para la cuenca Río La Vieja.

Fuente: Elaboración Propia con datos de la CARDER.

Tabla 2. Pozos cercanos con nivel estático y dinámico.

Fuente: GEOSUB S.A.S.

Nombre del Pozo	Prof (m)	Caudal (l/s)	NE (m)	ND (m)	Coord. MCO		Z (m)	Z - NE
					X (m)	Y (m)		
Condominio Condina Campestre	196	3	59.93	72.89	1153280	1017700	1540.99	1481.06
Condominio Cipango	126	0.45	61.45	101.29	1154130	1017590	1574.02	1512.57
Condominio Jamaica	136	4.59	39.8	61.2	1153280	1020300	1507.8	1468
Condominio La Granja	100	0.7	33	47	1153600	1018350	1560.4	1527.4
Condominio Sierra Morena	86	1.3	25.18	57	1155740	1018200	1634.88	1609.7
Condominio Vallarta	158	0.9	33.75	46.65	1153890	1017780	1587.134	1553.38
Diario La Tarde – Florius Flowers	165	5	34	55	1152940	1020890	1448.02	1414.02
Motel Céfiro	100	0.45	35.75	79.03	1153950	1019050	1530.2	1494.45
Buenos Aires	216	10	27	54.3	1152690	1021300	1437.348	1410.35

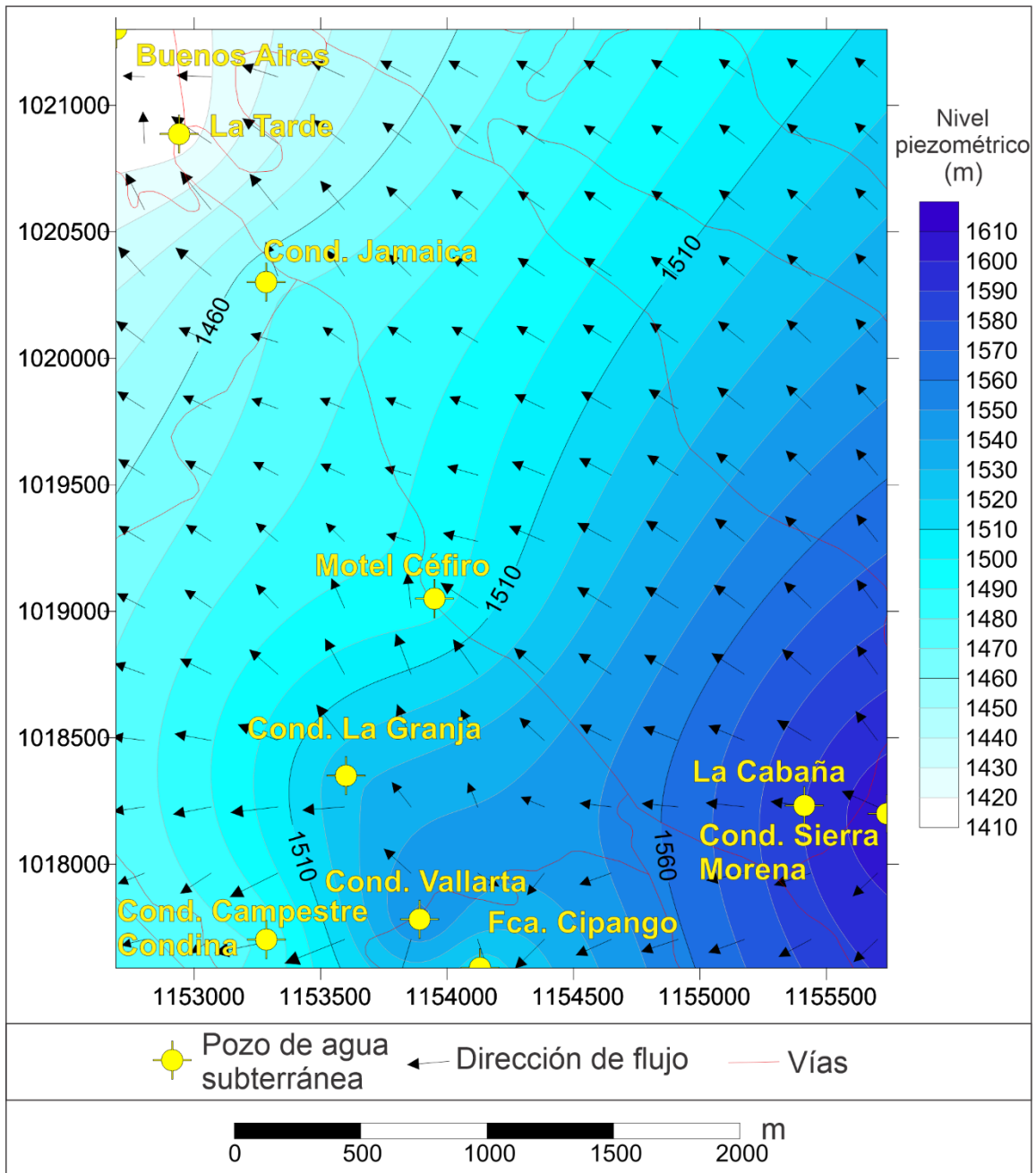


Figura 24. Mapa de dirección de flujo de agua subterránea, Tribunas-Córcega.

Fuente: Elaboración Propia.

6.2. QUÍMICA DEL AGUA SUBTERRÁNEA

Las características fisicoquímicas del agua subterránea se van adquiriendo desde el momento en que el agua lluvia se infiltra y se incorpora al flujo subterráneo, ya que gases y diversas sales presentes en la atmósfera reaccionan con el agua, marcando la composición del agua de infiltración. Una vez al agua entra en contacto con los sedimentos y las rocas, va adquiriendo y enriqueciéndose en sales; este proceso estará controlado por la composición mineralógica de los sedimentos, las rocas que atraviesa y por la solubilidad de las sales. Siendo por su solubilidad el carbonato de calcio, el carbonato de magnesio, el cloruro de sodio y el sulfato de magnesio, las que se encuentran generalmente en mayores proporciones en el agua subterránea. El grado de mineralización de las aguas subterráneas depende del tiempo de contacto con la roca o sedimento por la cual circula el agua. Generalmente, las aguas subterráneas cercanas a la zona de recarga o de infiltración (con cortos periodos de residencia) tendrán una mineralización más baja que las aguas subterráneas de circulación regional (las cuales han tenido largos periodos de residencia).

Omega & Asociados Ltda, en conjunto con GEOSUB S.A.S. en el año 2016 toman muestras de agua subterránea de ambos niveles acuíferos y recopila información de muestras de agua tomadas en años anteriores de pozos profundos del sector de Tribunus.

En cuanto a calidad de agua, los resultados de los análisis de las muestras de agua fueron comparados con la legislación colombiana para la destinación del recurso en función de su uso (Decreto 1594 de 1984) y con la Resolución 2115 de 2007, por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

Se tomaron muestras a ambos niveles acuíferos y se observa que la calidad de las aguas subterráneas del nivel acuífero superficial presenta altas concentraciones en hierro y valores de pH

entre 5.5 y 6.3 (La Resolución 2115 de 2007 establece el valor para el potencial de hidrógeno pH del agua para consumo humano, que deberá estar comprendido entre 6,5 y 9,0); sin embargo, los demás compuestos presentan concentraciones dentro del rango aceptado por la legislación colombiana para consumo humano. Para el nivel acuífero inferior, se observa que las concentraciones de todos los compuestos analizados se encuentran dentro del rango establecido por la legislación colombiana para agua de consumo humano.

Puede definirse una configuración química general del agua subterránea, siendo esta Bicarbonatada Cálculo Magnésica (Figura 25), que corresponderían a aguas jóvenes con un bajo tiempo de residencia y circulación rápida; Sin embargo, también aparecen facies Bicarbonatadas Sódicas que indicarían tiempos de residencia mayor.

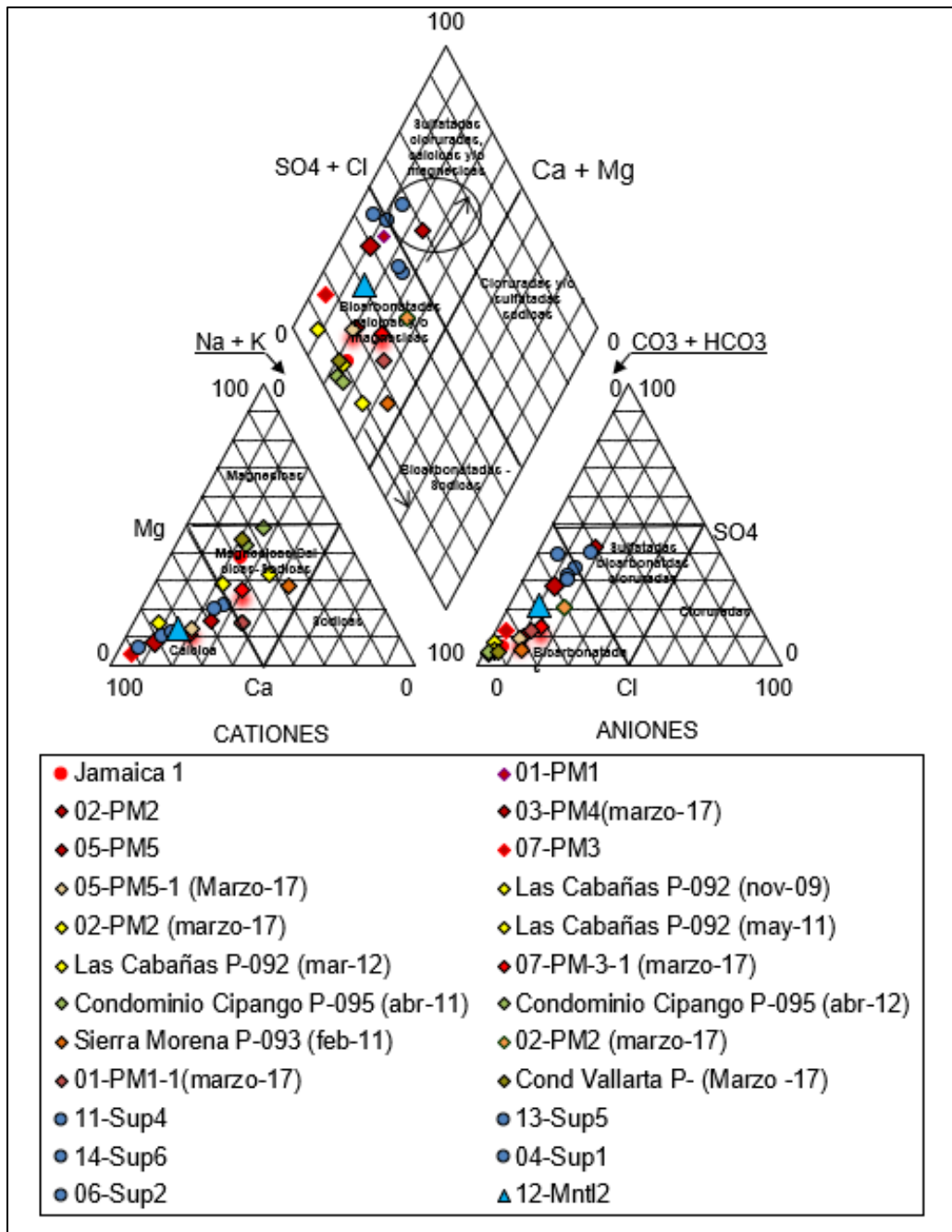


Figura 25. Diagrama de Piper que muestra la configuración química del agua subterránea de las unidades acuíferas del sector de Tribunas Córcega.

Fuente: Omega & Asociados Ltda (2017).

6.3. FUENTES DE AGUA SUBTERRÁNEA

En el área se presentan algunos pozos que captan agua para el abastecimiento doméstico de fincas, condominios y algunas comunidades, con profundidades que varían entre 100 y 200 metros y niveles estáticos también variables. También hay numerosos aljibes en la zona de uso doméstico, con profundidades entre 15 a 35 m. Además, existen manifestaciones de manantiales, los cuales están inventariados por la CARDER.

En la Tabla 3 se presenta los pozos de agua subterránea cercanos a la zona de interés, y en la Figura 26 Se ubica los pozos de agua subterránea, aljibes y manantiales, para los cuales se realiza una zonificación de 500 metros para los pozos de agua subterránea y 1000 metros para aljibes y manantiales, para analizar la posible interferencia hidráulica o eventuales contaminaciones del acuífero. Para el radio de 500 metros únicamente el pozo que puede ser afectado es el del condominio Jamaica. En la Tabla 4 se muestran los puntos de aguas que quedan dentro de los radios, con la distancia exacta al área de interés, su profundidad y uso.

Tabla 3. Pozos cercanos al Área de Estudio.

FUENTE	PREDIO	Profundidad	Caudal	Magna Colombia Oeste	
		(m)	(LPS)	X	Y
POZO	Condominio Jamaica	136	4,59	1'155.065	1'018.693
POZO	Motel Céfiro	100	0,45	1'153.950	1'019.050
POZO	Condominio La Granja	100	0,7	1'153.600	1'018.350
POZO	Condominio Sierra Morena	86	1,3	1'155.740	1'018.200
POZO	Fca. Cipango	126	0,45	1'154.130	1'017.590
POZO	Buenos Aires	216	10	1'152.691	1'021.302
POZO	Condominio Las Cabañas	131	0.82	1'155.413	1'018.232
POZO	Condominio Condina Campestre	196	3.00	1'153.280	1'017.700

FUENTE	PREDIO	Profundidad	Caudal	Magna Colombia Oeste	
		(m)	(LPS)	X	Y
POZO	Condominio Vallarta	158	0.90	1'153.890	1'017.780
POZO	Diario La Tarde – Florius Flowers	165	5.00	1'152.940	1'020.890

Fuente: GEOSUB S.A.S.

Tabla 4. Puntos de agua subterránea cercanos a la zona de estudio.

Tipo	Nombre	Consecutivo	Condición	Uso del pozo	Profundidad	Distancia lineal (m)
					(m)	
Pozo	Condominio Jamaica	302	Productivo	Consumo humano y doméstico	-	138.853
Pozo	Condominio Campestre Jamaica	303	Productivo	Consumo humano y doméstico	-	175.919
Aljibe	Condominio La Elvira	304	Inactivo	-	14.6	587.636
Aljibe	Finca Pomenia	306	Reserva	-	16.6	678.48
Aljibe	Parcelación La Ponderosa	307	Sellado	-	1.7	661.942
Aljibe	La Vaga	308	Inactivo	-	27.66	802.012
Aljibe	Motel Amasis	465	Productivo	Consumo humano y doméstico	30	629.46
Aljibe	Anteriormente Todelar	357	Abandonado	-	0	764.123
Aljibe	Motel Casa Blanca	436	Productivo	Doméstico	-	795.703
Aljibe	Hda La Gabriela	356	Reserva	-	-	667.015
Aljibe	Finca Buenavista	309	Inactivo	-	37.3	864.929
Manantial	Caserío	305	Inactivo	-	0	975.092
Manantial	Caracol La Curva	368	Inactivo	-	0	985.344
Manantial	Vía Entrando A As De Amor A Unos 400m	361	Inactivo	-	0	837.177
Manantial	Frente A Finca Venecia	365	Inactivo	-	0	915.038

Fuente: CARDER.

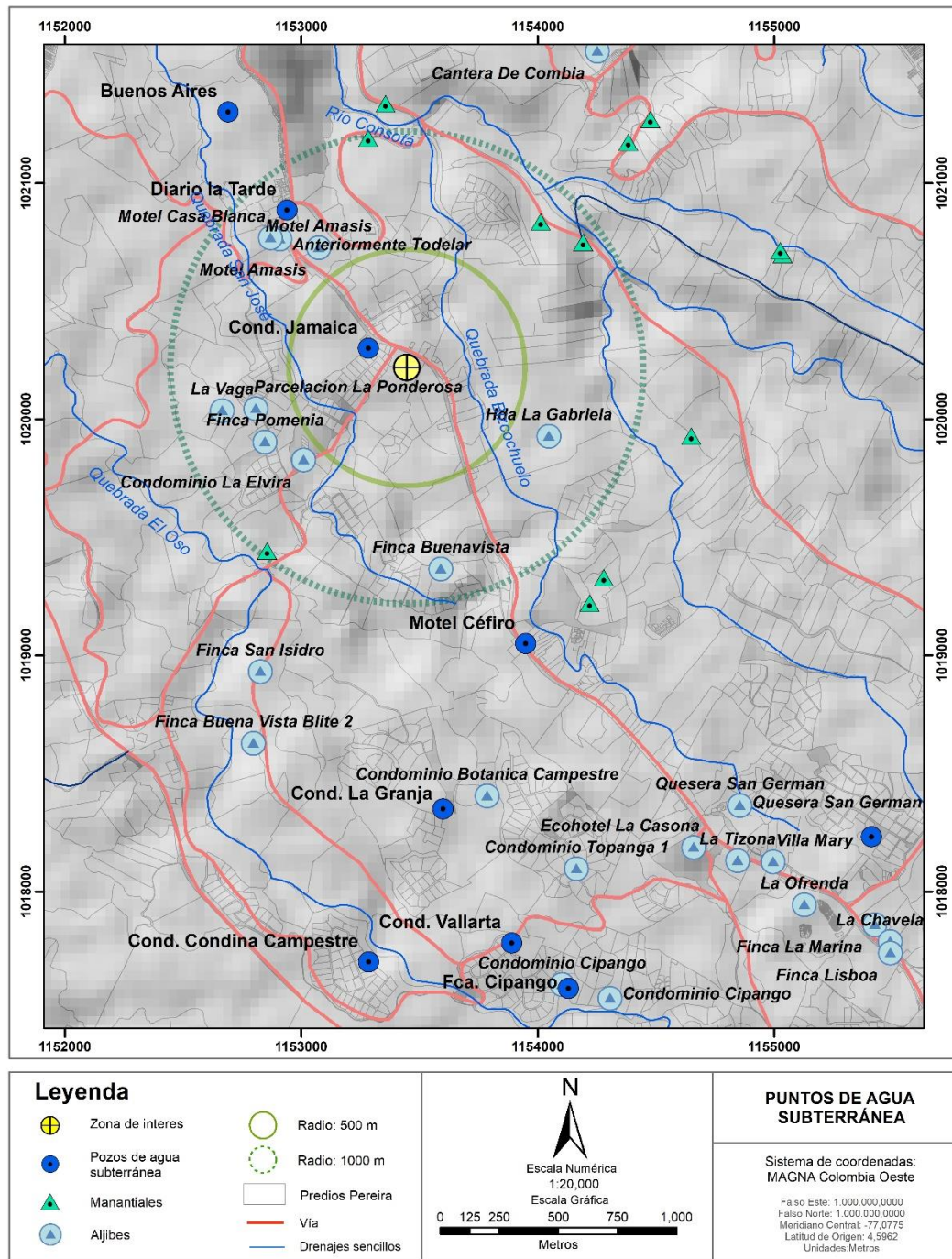


Figura 26. Localización Pozos cercanos al área de estudio.

Fuente: Propia, con datos obtenidos de IGAC y CARDER.

6.4. GEOLOGÍA DE CAMPO

Para tener información directa y poder calibrar los SEVs, se visitaron ciertos afloramientos cercanos a la zona de investigación, los cuales fueron descritos, fotografiados y referenciados.

Cerca de la vereda Huertas, en las proximidades del río Consota, que es considerado el nivel de referencia de la región, se presenta un afloramiento de depósitos compuestos por flujos de escombros y lodos. Estos depósitos se caracterizan por la presencia de bloques, guijos y guijarros mal seleccionados, los cuales se encuentran inmersos en una matriz limo-arenosa, la cual presenta ligera plasticidad. La forma de estos clastos es subredondeada y en esta área se observan manifestaciones de manantiales. La composición de los clastos en este afloramiento está mayoritariamente por líticos volcánicos correspondientes a tobas, basaltos y andesitas. Este sitio específico se encuentra localizado en las siguientes coordenadas geográficas: 4°47'15.11"N - 75°41'40.90"W, y se ubica a una altitud de 1383 metros sobre el nivel del mar (Figura 27).



Figura 27. Depósito de flujos de lodo y escombros (Base).

Fuente: Elaboración propia.

Continuando la secuencia se evidencia un cambio notable en la textura y granulometría de los sedimentos. En este nivel, se presentan arenas y gravas con mala selección, clastosoportados, correspondientes principalmente a flujos de lodos con niveles de flujos de escombros. Los tamaños de los clastos varían desde guijarros hasta arenas gruesas, los clastos son subredondeados y matriz principalmente limo-arenosa. En comparación con la base de la unidad, esta porción superior muestra menos vegetación y se encuentra ligeramente húmedo, se identificaron líticos volcánicos de balastos y andesitas.

Las coordenadas geográficas correspondientes a este sitio son $4^{\circ}46'33.53''N$ - $75^{\circ}41'48.10''W$, y la altitud es de 1463 metros sobre el nivel del mar. La identificación de estos cambios en la textura y composición de los sedimentos es importante para comprender la variabilidad del sustrato geológico y cómo puede afectar la hidrogeología local (Figura 28).



Figura 28. Depósito de flujos de lodo y escombros (Techo).

Fuente: Elaboración propia.

En la zona profunda del predio donde se realizaron los sondeos, cerca de la Quebrada San Jorge, se identifica un afloramiento de un depósito compuesto principalmente por limos y arenas de color ocre, posiblemente producto de depósitos de caída volcánica. Este sitio está ubicado en

las siguientes coordenadas geográficas: $4^{\circ}46'33.53''N$ - $75^{\circ}41'48.10''W$, y su altitud es de 1485 metros sobre el nivel del mar (Figura 29).



Figura 29. *Depósito de limos y arenas.*

Fuente: Elaboración propia.

En la zona más sur, se identifica un afloramiento de depósitos de ceniza volcánica, su color es ocre a gris claro. Este sitio está ubicado en las siguientes coordenadas geográficas: $4^{\circ}46'2.71''N$ - $75^{\circ}41'24.93''W$, y su altitud es de 1497 metros sobre el nivel del mar (Figura 30), esta unidad se deposita discordantemente en la Formación Armenia, según la información recolectada en los capítulos anteriores.



Figura 30. *Depósito de ceniza volcánica.*

Fuente: Elaboración propia.

En la zona donde se realizaron los SEVs, se observa la presencia de un suelo residual, de espesores métricos y tonalidad grises. El sitio en cuestión se encuentra en las coordenadas geográficas $4^{\circ}46'40.97''\text{N}$ - $75^{\circ}41'43.48''\text{W}$, y su altitud es de 1517 metros sobre el nivel del mar (Figura 31).



Figura 31. *Suelo residual.*

Fuente: Elaboración propia.

La descripción detallada de los afloramientos cercanos a las ubicaciones de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) es de suma importancia, ya que brinda información directa que se utiliza para calibrar y validar los datos indirectos obtenidos a través de la técnica de geoelectrica. Esta información directa es esencial para obtener una comprensión más precisa y completa de las características geológicas y estratigráficas en la zona de estudio.

A continuación, se presenta una columna estratigráfica ilustrativa (Figura 32), que refleja las unidades identificadas en el área de estudio. Esta columna estratigráfica tiene como objetivo visualizar los cambios y los espesores aparentes de las diferentes formaciones geológicas presentes, los cambios entre capas son transicionales.

Para complementar esta información, se incluye un mapa de geología local del área (Figura 33), que muestra la distribución espacial de las diferentes unidades geológicas. En particular, se identifica que los afloramientos de flujos de lodos y escombros (Qto) se encuentran cerca del río Consota, debido a la profunda incisión que este río ha generado en el terreno. Además, se observa que los depósitos de caída piroclástica (Qvb) recubren estas unidades y se ajustan a la topografía del sitio, siendo más prominentes en las partes más altas de la región. Los depósitos aluviales recientes (Qal) se presentan en áreas influenciadas por los drenajes principales.

La combinación de la columna estratigráfica y el mapa de geología local proporcionan una representación visual clara de las unidades geológicas y su distribución en el área de estudio, lo que ayuda a comprender mejor la evolución geológica y las interacciones hidrogeológicas en el sitio.

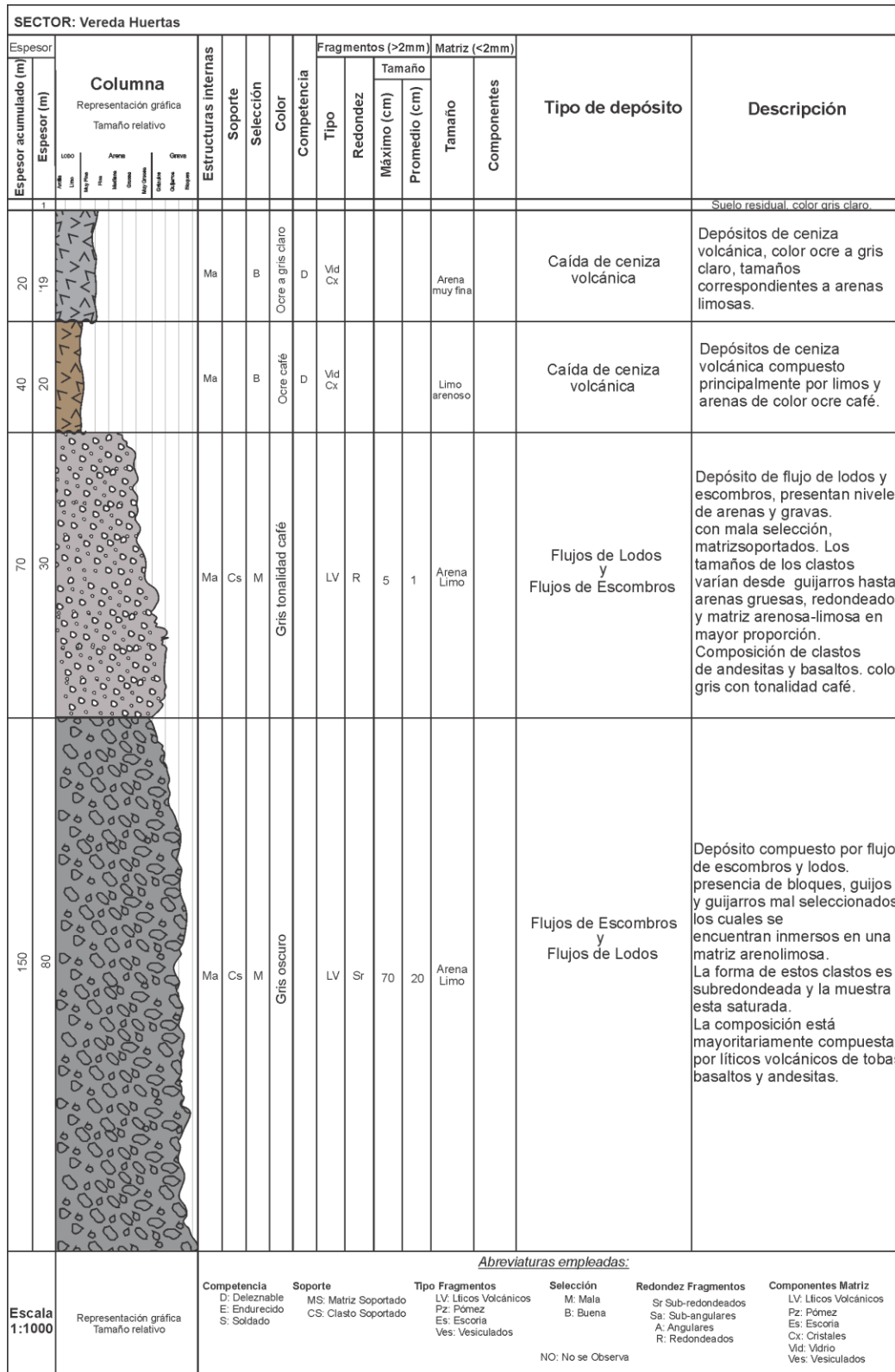


Figura 32. Columna estratigráfica ilustrativa.

Fuente: Elaboración propia.

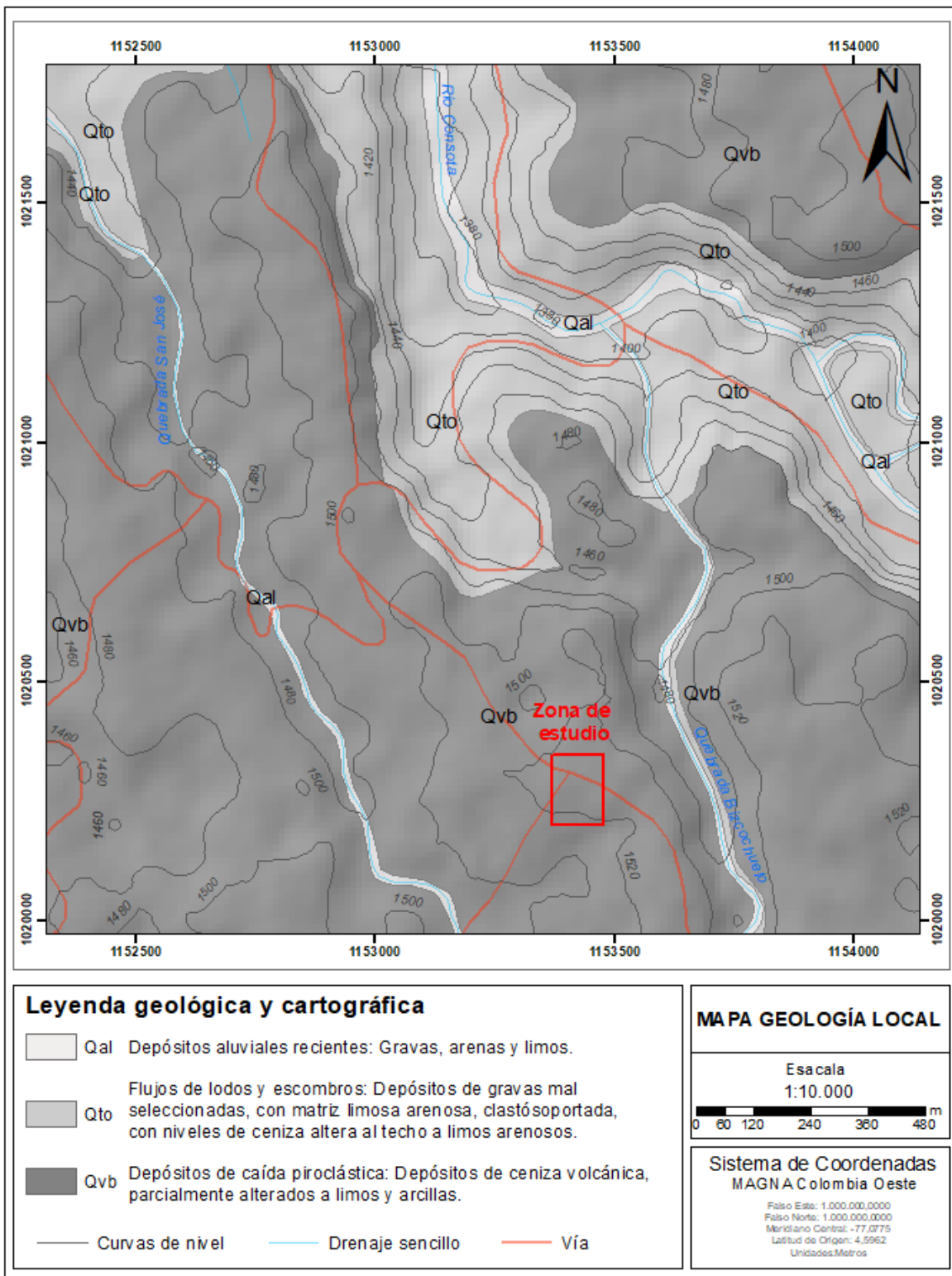


Figura 33. Mapa geología local, zona de estudio.

Fuente: Elaboración propia.

6.5. SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES

Se efectuaron tres (3) SEV's, consistentes en un arreglo lineal tipo Schlumberger de cuatro electrodos, con un AB/2 máximo de 150 m; distribuidos de tal manera que cubrieran toda el área de estudio, buscando optimización y calidad de información para llegar a la mejor interpretación geológica del subsuelo. Sus coordenadas se muestran en la Tabla 5 y en la Figura 34 se observa la ubicación de los SEVs.

La zona se encuentra con variaciones notables en la topografía y además en el área se encuentran muchas edificaciones, esto limita realizar los sondeos eléctricos verticales con mayor profundidad.

Tabla 5. *Coordenadas de los Sondeos Eléctricos Verticales.*

SEV	Coordenadas Geográficas WGS-84		Coordenadas Planas MAGNA-SIRGAS Origen Oeste	
	Longitud	Latitud	X	Y
1	75° 41' 40,848" W	4° 46' 37,294" N	1153419,322	1020150,2
2	75° 41' 44,676" W	4° 46' 38,326" N	1153301,267	1020181,698
3	75° 41' 40,646" W	4° 46' 42,472" N	1153425,248	1020309,318

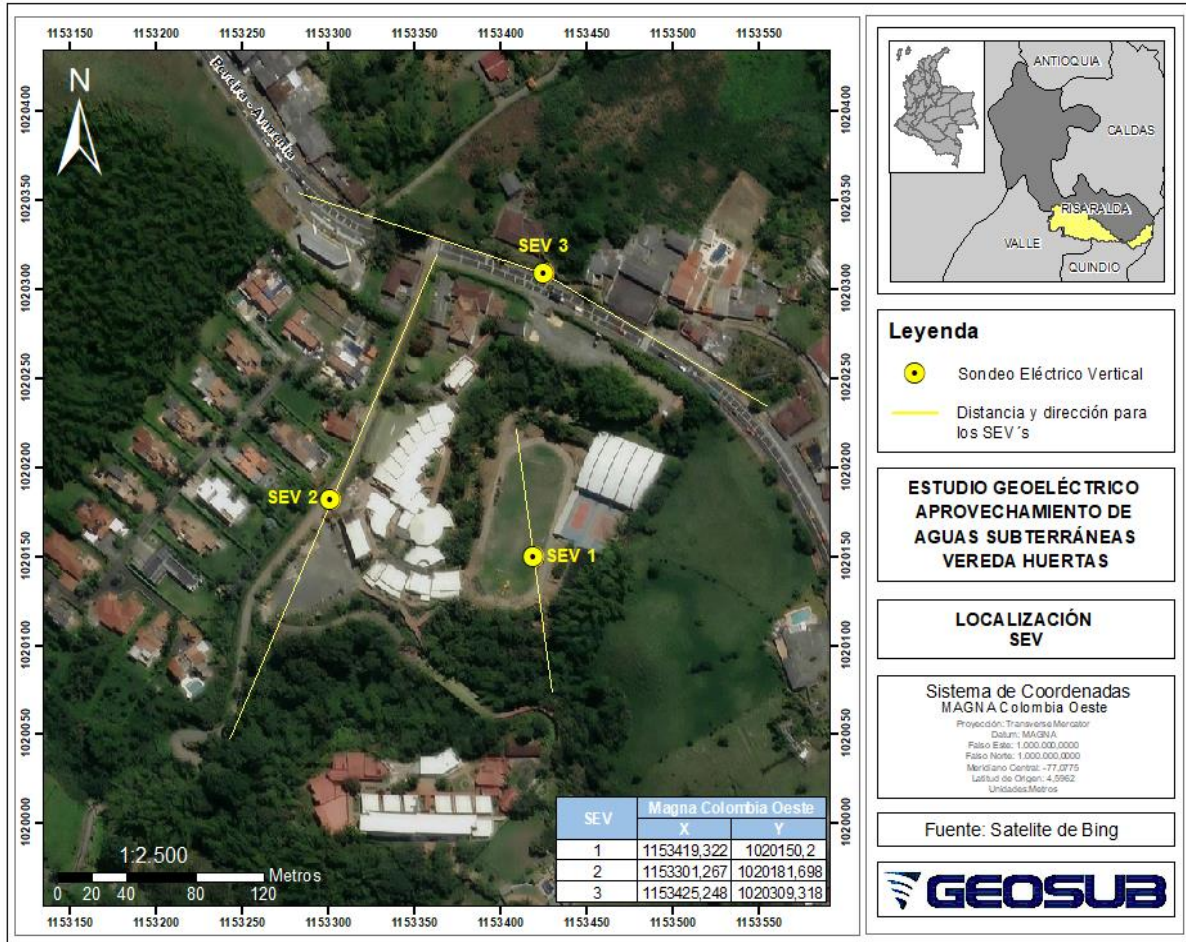


Figura 34. Localización Sondeos Eléctricos Verticales.

Fuente: GEOSUB.S.A.S. (2023).

Sondeo Eléctrico Vertical 1 (SEV 1)

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) número 1 fue llevado a cabo en una región de características predominantemente planas y con disposición lineal. Cabe señalar que durante el proceso de sondeo se identificaron estructuras metálicas, las cuales están relacionadas con edificaciones, sistemas eléctricos y objetos de naturaleza metálica. La presencia de estas estructuras podría dar lugar a interferencias en los resultados obtenidos.

Para llevar a cabo el sondeo, se implementó un arreglo de electrodos AB/2, en conformidad con el método Schlumberger, con una distancia de 75 metros (Figura 35).



Figura 35. Toma de datos para el SEV 1.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

Sondeo Eléctrico Vertical 2 (SEV 2)

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) número 2 fue llevado a cabo en un tramo adyacente a una carretera secundaria, adoptando una disposición lineal. En este caso, la topografía de la zona presenta una leve inclinación hacia el sur. Durante el proceso del sondeo, se lograron identificar estructuras metálicas, las cuales guardan relación con edificaciones y sistemas eléctricos cercanos a los electrodos.

Para llevar a cabo el sondeo SEV 2, se implementó un arreglo de electrodos AB/2, siguiendo el método Schlumberger, con una distancia de separación de 150 metros entre ellos. (Figura 36).



Figura 36. Toma de datos para el SEV 2.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

Sondeo Eléctrico Vertical 3 (SEV 3)

El Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) número 3 fue ubicado en la avenida principal que conecta Pereira con Armenia. Sin embargo, en este caso se requirió realizar un ajuste en la dirección del sondaje debido a restricciones en las condiciones del terreno. Asimismo, durante el proceso de sondeo se identificaron estructuras metálicas y se notaron ligeras variaciones en la topografía.

Para llevar a cabo el SEV 3, se implementó un arreglo de electrodos AB/2 siguiendo el método Schlumberger, con una separación de 150 metros entre los electrodos. (Figura 37).



Figura 37. Toma de datos para el SEV 3.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

En el Anexo 3, se proporciona el formato utilizado en el terreno para registrar los valores de resistividad, junto con la representación gráfica en forma de curva logarítmica dibujada manualmente. Esta práctica tiene como objetivo asegurar la precisión en la recopilación de datos durante el trabajo de campo.

6.6. MODELO DE CAPAS

Se realiza el proceso de modelado de capas, empleando técnicas de ajuste mediante inversión directa. Esto implica la generación de varios modelos alternativos mediante el uso del software IX1D v.3.

En el SEV 1 se logró identificar un total de 7 capas, con un último cambio en la resistividad registrado a una profundidad de 36.848 metros (Figura 38). Para el SEV 2, se distinguieron 8 capas, con el último cambio de resistividad documentado a los 103.35 metros (Figura 39). En cuanto al SEV 3, se registraron 8 capas, con el último cambio de resistividad detectado a una profundidad de 69.18 metros (Figura 40). Es importante resaltar que, debido a la naturaleza del método empleado, la última capa no posee un límite definido, lo que explica que el último valor de resistividad tienda hacia infinito a medida que se profundiza.

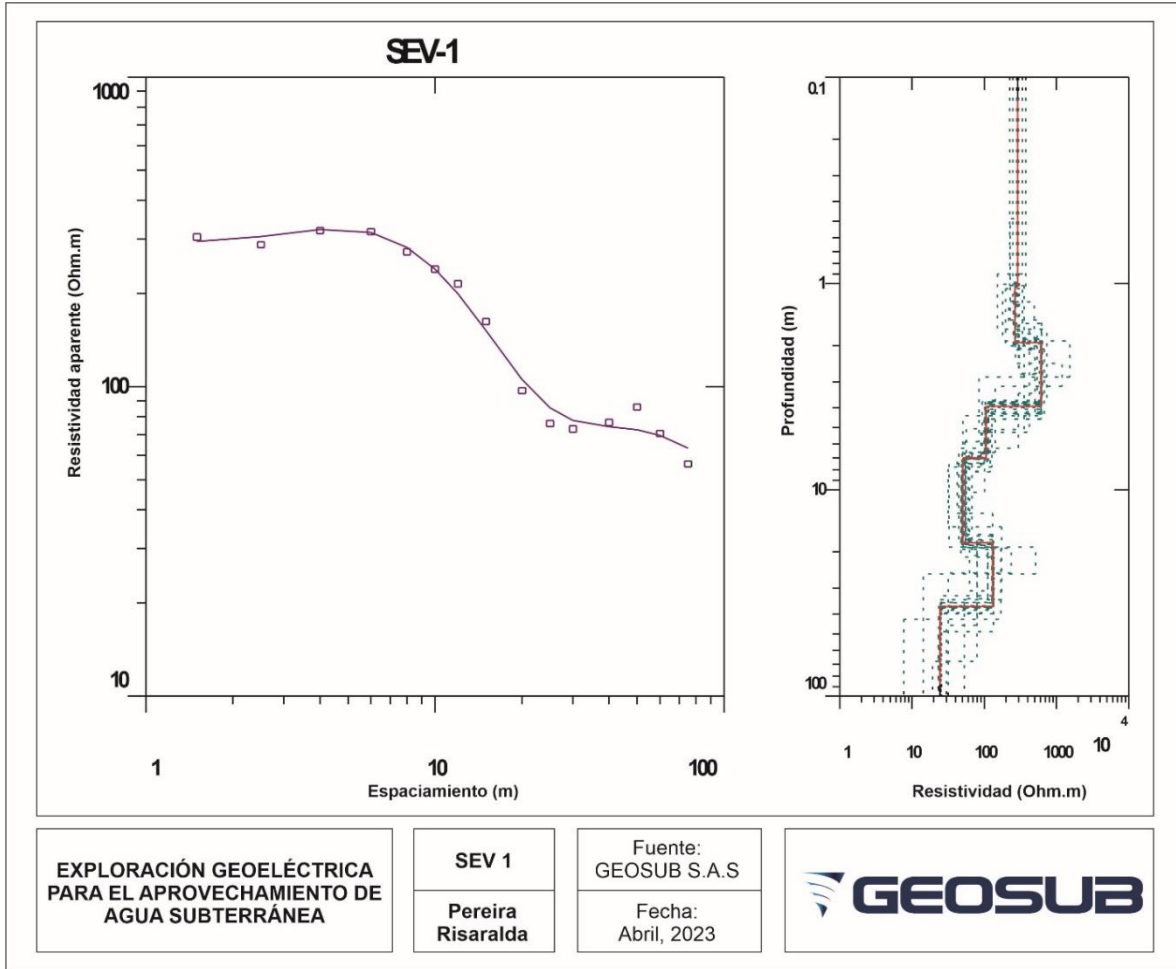


Figura 38. Modelo de capas para el SEV 1.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

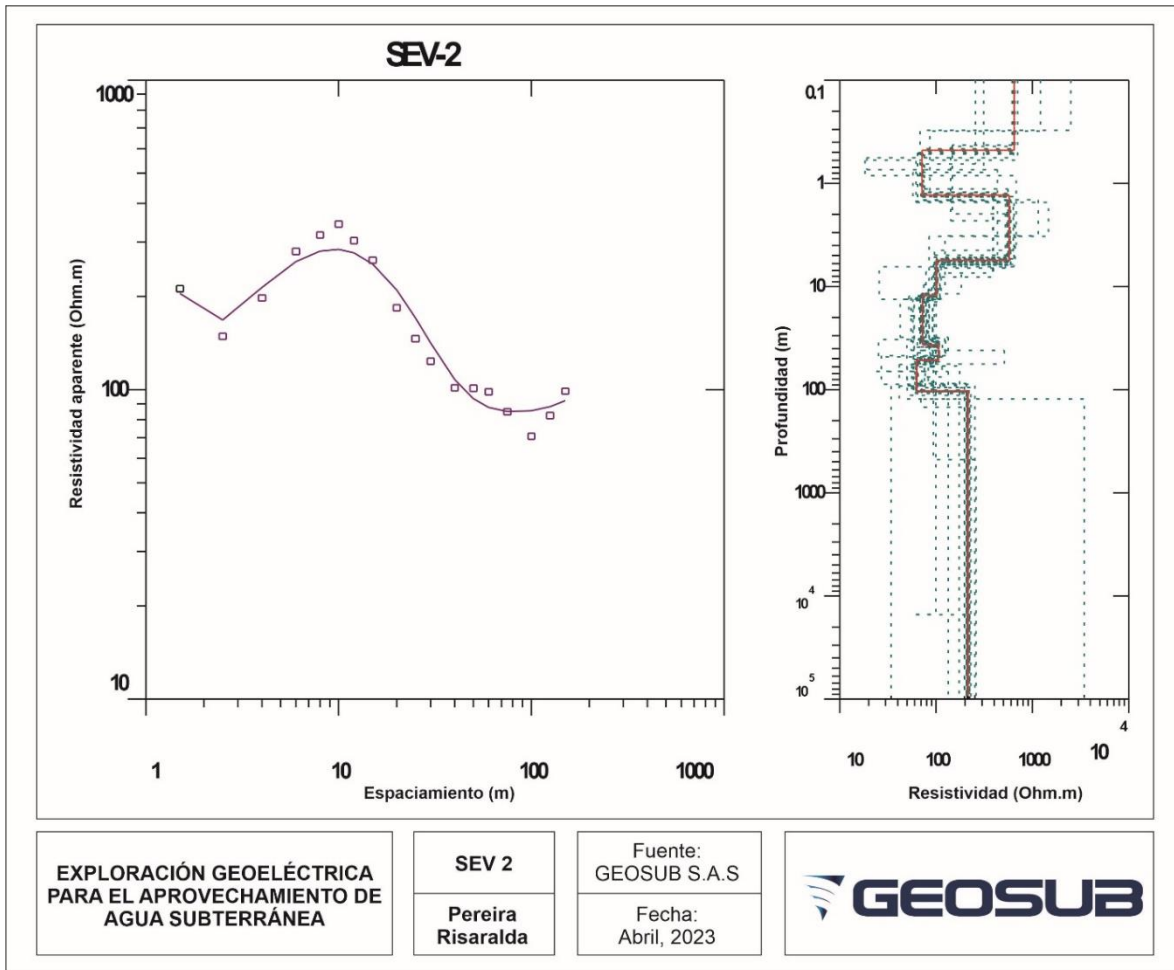


Figura 39. Modelo de capas para el SEV 2.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

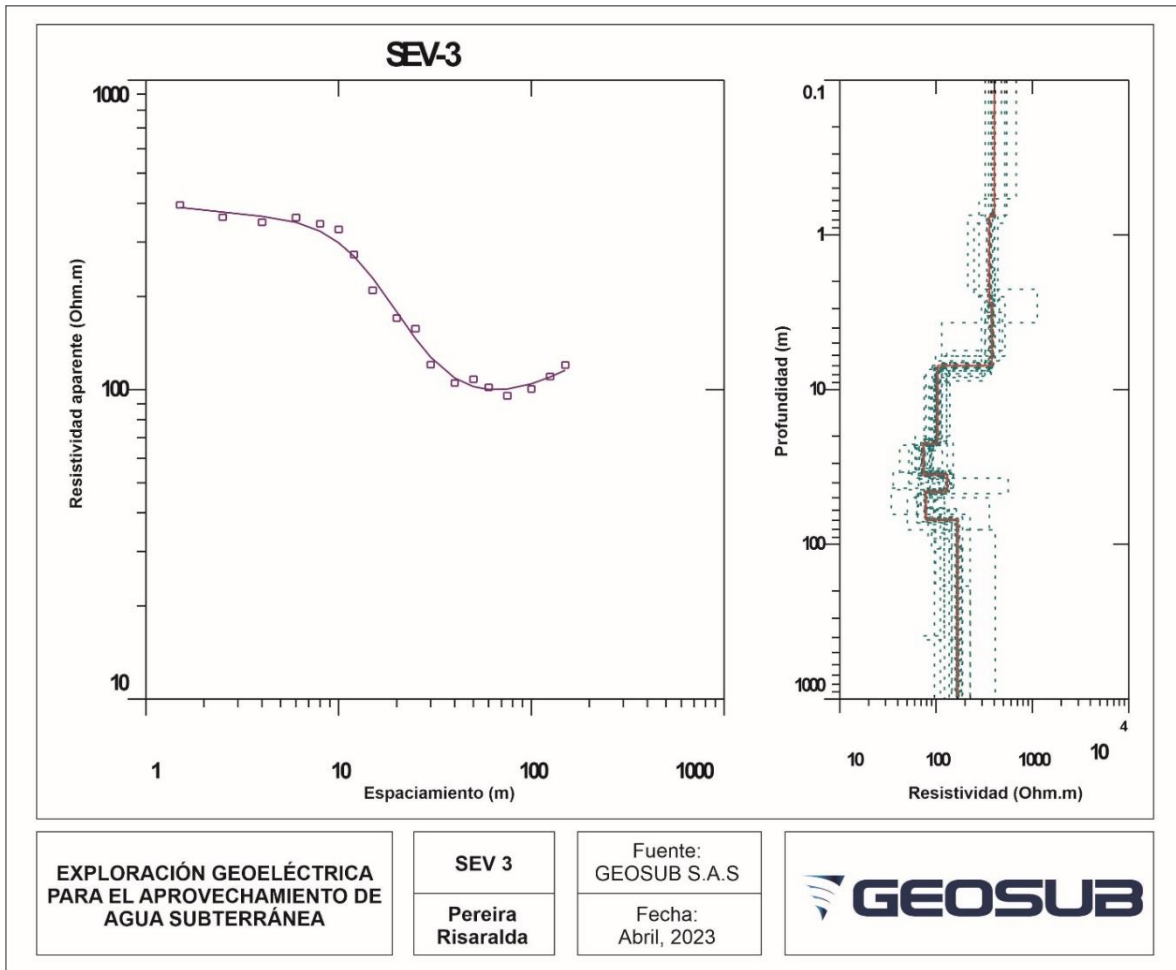


Figura 40. Modelo de capas para el SEV 3.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

6.6.1. Relación espacial de los Sondeos Eléctricos Verticales

Con el objetivo de visualizar la disposición espacial de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) realizados, se procedió a georreferenciar cada uno de ellos, proporcionando sus respectivas coordenadas planas y alturas. Además, se elaboró una representación gráfica en profundidad de los sondeos, exhibiendo los espesores y resistividades obtenidos. En la Figura 41, se exponen los intervalos de resistividad correspondientes a cada SEV, así como la correlación entre las capas que comparten valores de resistividad similares. Esta información se calibra y coteja con los datos recopilados para elaborar secciones estratigráficas.

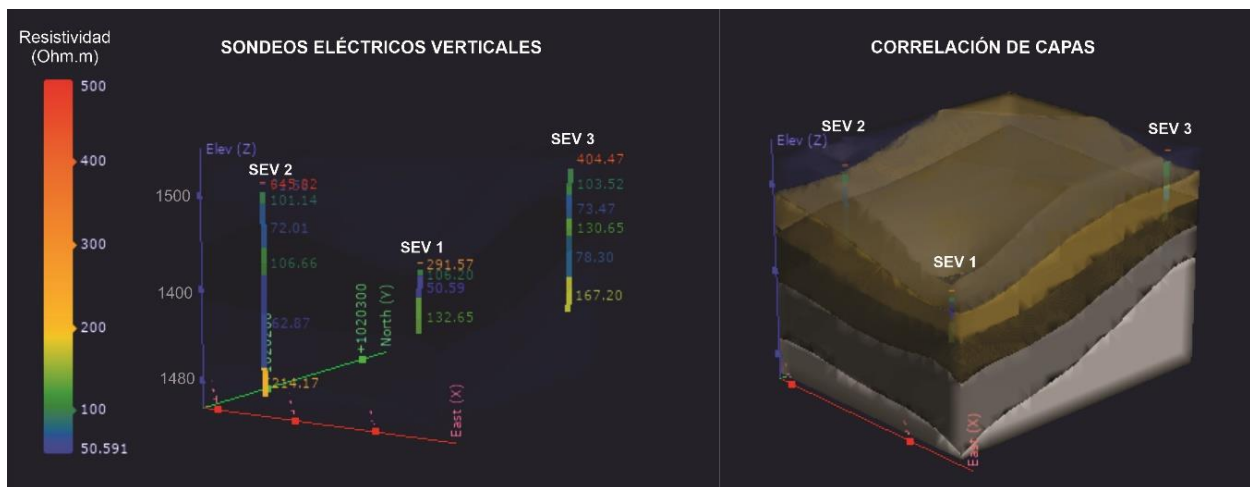


Figura 41. Ubicación tridimensional de los SEVs y correlación de capas.

Fuente: Elaboración propia.

6.7. SECCIONES GEOELÉCTRICAS

Información para calibrar los SEVs

Para la correlación de los datos se utilizó información previa de secciones ya elaboradas por la consultora GEOSUB S.A.S., para tener un concepto a escala del corregimiento, las secciones que se utilizaron se ubica en la Figura 42, que se encuentran al sureste de la ciudad de Pereira, además se agregó una sección local, correspondiente a la sección C-C', usando la información de pozos cercanos e información de los SEVs realizados para este informe.

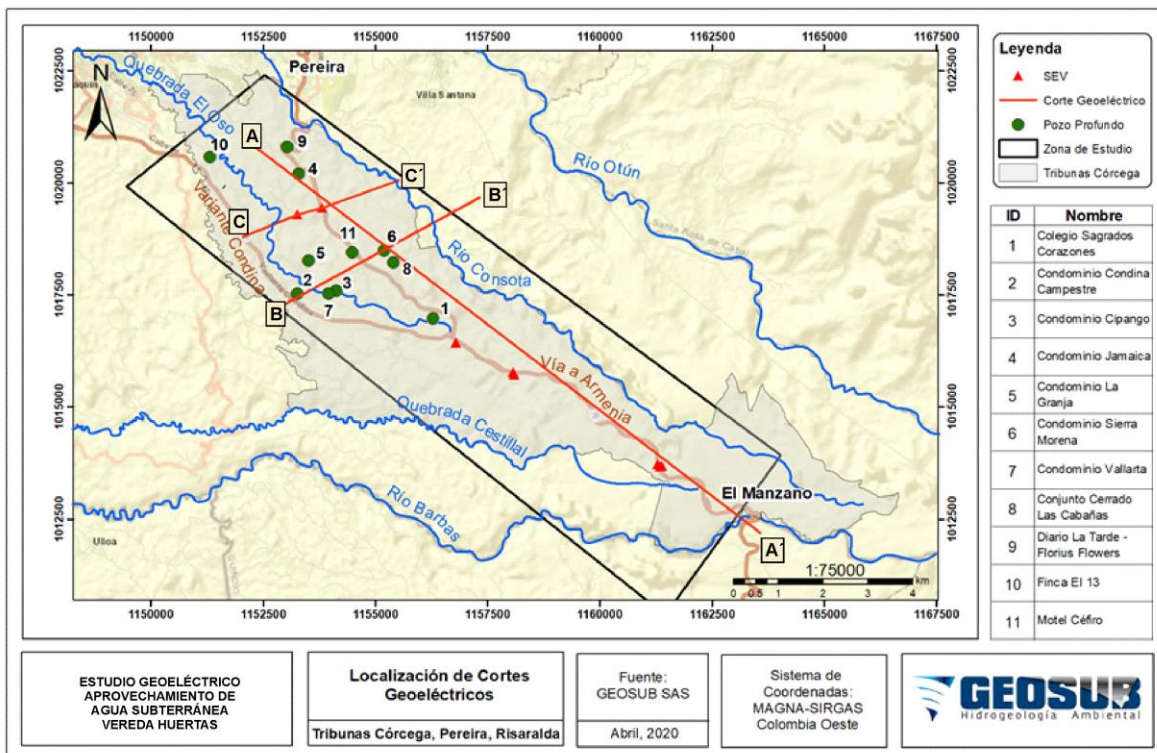


Figura 42. Localización de Cortes Geoelectrías.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2020).

6.7.1. Diagrama panel Tribunas Córcega

Se recuperó las secciones A-A' y B-B' de informes realizados por GEOSUB S.A.S para el corregimiento Tribunas-Córcega, y se presenta la relación de estas secciones en un diagrama panel tridimensional (Figura 43).

La sección geoelectrica A – A' correlaciona los SEV 2, 3, 5 y 6 (valores de resistividad de estos SEVs en el Anexo 4) y los pozos del Diario La Tarde – Florius Flowers, Condominio Jamaica, Conjunto Cerrado Las Cabañas y Sagrados Corazones, es un corte paralelo a la vía Pereira – Armenia, en sentido NW – SE, de 14.5 kilómetros de longitud, que va desde las antiguas instalaciones del Diario La Tarde (hoy Florius Flowers), hasta el límite departamental de Risaralda – Quindío que corresponde al valle del río Barbas.

Los estratos más superficiales presentan resistividades entre 290 y 782 Ohm.m que se relacionan a capas de cenizas volcánicas, de tamaño de arenas y limos principalmente, los cuales suprayacen estratos con resistividades entre 50 y 80 Ohm.m que corresponden a niveles de limos y limos arenosos asociados a ceniza volcánica de espesores variables, con profundidades máximas de 45 metros; estos espesores son confirmados por los registros de perforación y registros eléctricos de los pozos cercanos. Infrayaciendo esta capa se obtuvieron resistividades entre 130 y 725 Ohm.m que son indicativas de litologías como gravas y arenas relacionadas con flujos de lodo y flujos de escombros (depósitos de lahares) de la Formación Armenia, los cuales representarían el acuífero para el aprovechamiento de aguas subterráneas.

La sección geológica B – B' correlaciona registros litológicos, geofísicos y de perforación de los pozos Condominio Condina Campestre, Condominio Vallarta, Condominio Cipango, Motel Céfiro y Condominio Sierra Morena; además, atraviesa los valles de la quebrada El Oso y el río

Consota de manera transversal en sentido SW – NE, tiene una longitud de 4.5 kilómetros y va desde la Variante Condina hasta la carretera que conecta Mundo Nuevo con la Estrella.

El objetivo de representar las secciones A – A' y B – B', en diagrama panel, corresponde a integrar la información de ambos cortes para observar de la mejor manera la geometría de las unidades, el comportamiento de los niveles estáticos de los pozos, su relación con la topografía y los valles de ríos y quebradas. Las secciones se cruzan en un punto cercano a la entrada 6 vía Pereira-Armenia, cerca del cementerio La Ofrenda, la escala horizontal ha sido alterada para una mejor visualización y la escala vertical refleja la realidad en profundidad.

Los niveles estáticos promedio de los pozos son del orden de 40 metros, esta cota coincide con la profundidad de algunos valles encañonados de drenajes de la zona, como la quebrada El Oso, por lo que, en cercanías con estos valles, los niveles de agua subterránea del acuífero profundo tienden a profundizarse; esta situación también es aplicable al valle del río Consota, el cual se profundiza aún más.

La Figura 43 presenta las unidades geológicas interpretadas de manera esquemática, se puede entender que el basamento correspondiente a el Complejo Quebradagrande y el Stock Gabroico de Pereira, estas rocas se consideran acuífugos de la región.

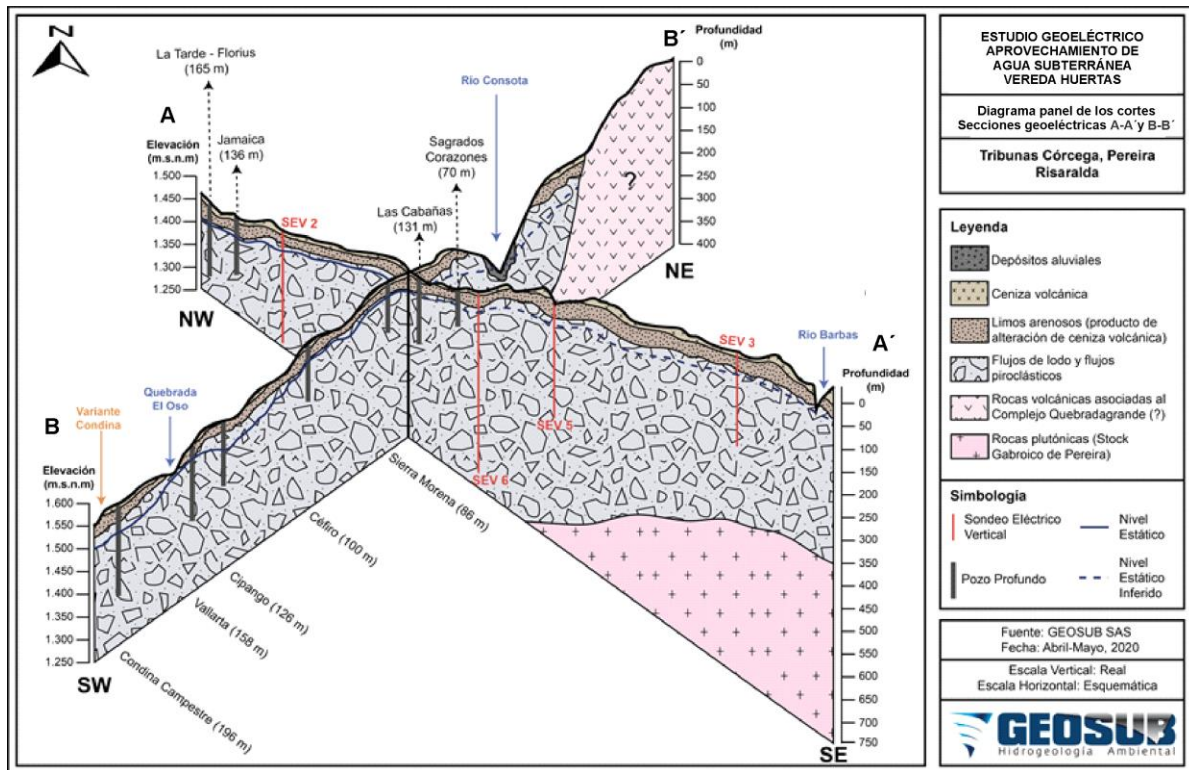


Figura 43. Diagrama panel de secciones geoelectricas para el corregimiento Tribunas Córcega.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2020).

Calibración de los Sondeos Eléctricos Verticales

Con la información geológica del abanico del Quindío y las secciones anteriormente descritas se procede a interpretar los valores de resistividad de cada capa geoelectrica para cada sondeo, en la Tabla 6 se presentan los datos del modelo de capas del SEV 1 con su respectiva interpretación, la Tabla 7 presenta los resultados del SEV 2 y la Tabla 8 los del SEV3. Se interpretaron litologías de interés hidrogeológico, correspondientes a los flujos de lodo y escombros, posiblemente asociados a la Formación Armenia.

Tabla 6. Información del modelo de capas SEV 1.

SEV 1				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	291.57	1.0421	1.0421	Suelo
2	265.61	0.89341	1.9356	Arenas y limos asociados a cenizas volcánicas
3	615.13	1.9992	3.9348	Arenas asociados a cenizas volcánicas
4	106.20	3.0710	7.0058	Arenas y limos asociados a cenizas volcánicas
5	50.591	11.072	18.078	Limos arenosos asociados a cenizas volcánicas
6	132.65	18.770	36.848	Flujos de lodo y escombros
7	24.461	---	---	Flujos de lodos (arcilloso)

Tabla 7. Información del modelo de capas SEV 2.

SEV 2				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	645.82	0.47894	0.47894	Suelo
2	71.580	0.82405	1.3030	Limos arenosos asociados a cenizas volcánicas
3	573.05	4.2754	5.5784	Arenas asociados a cenizas volcánicas
4	101.14	6.6393	12.218	Arenas y limos asociados a cenizas volcánicas
5	72.006	24.458	36.676	Limos arenosos asociados a cenizas volcánicas
6	106.66	15.086	51.762	Flujos de lodo y escombros
7	62.874	51.586	103.35	Flujos de lodo
8	214.17	---	---	Flujos de lodo y escombros

Tabla 8. Información del modelo de capas SEV 3.

SEV 3				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	404.47	0.75409	0.75409	Suelo
2	359.25	1.9925	2.7466	Arenas asociados a cenizas volcánicas
3	382.16	4.2451	6.9917	Arenas asociados a cenizas volcánicas
4	103.52	15.270	22.261	Arenas y limos asociados a cenizas volcánicas
5	73.470	13.294	35.556	Limos arenosos asociados a cenizas volcánicas
6	130.65	9.9325	45.488	Flujos de lodo y escombros
7	78.304	23.692	69.180	Flujos de lodo
8	167.20	---	---	Flujos de lodo y escombros

6.7.2. Sección C-C' esquemática con niveles base

Con la información interpretada se realiza la sección faltante (sección C-C'), la cual incluye el SEV 3 como información primaria y de información secundaria los pozos Jamaica, Cefiró y Diario La Tarde – Florius Flowers, para estos se presentan las profundidades reales, interpretaciones estratigráficas, los niveles estáticos, nivel dinámicos y caudales de cada pozo, además se ubican esquemáticamente el río Consota y la quebrada El Oso, siendo estos el nivel base de la zona.

En la Figura 44 se puede observar cómo los pozos con profundidades mayores a 150 metros superan en profundidad la cota de los drenajes presentes y tienen un caudal de aprovechamiento de agua subterránea mayor a los pozos que están por encima de los mismos, este factor de diferencia de nivel, es de suma importancia en el área, ya que las aguas subterráneas al estar cerca a estos drenajes se profundizan buscando su nivel base.

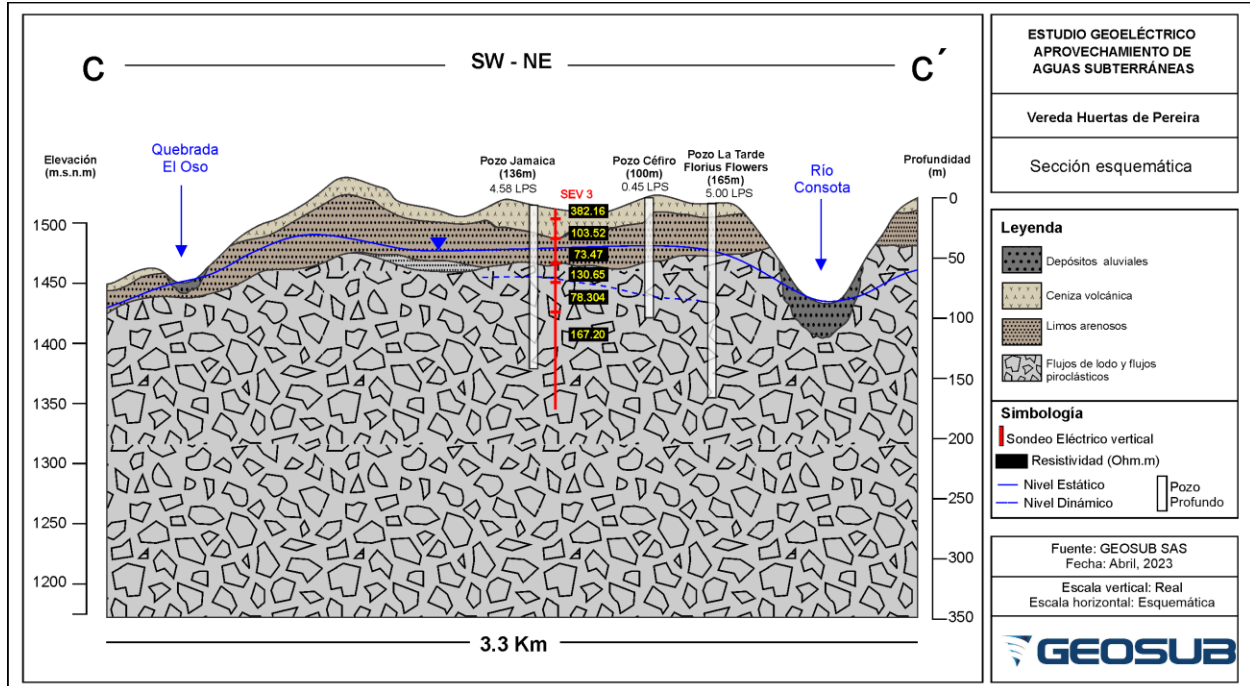


Figura 44. Sección esquemática C-C'.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

6.7.3. Sección A-A' - zona de estudio

En esta sección, elaborada a partir de los SEV 2 y SEV 3, los cuales poseen mayor información en profundidad, se relacionaron con los pozos Jamaica, La Tarde (Florius Flowers), se escogen estos pozos debido a su cercanía con los sondeos a interpretar, la información que se extrajo de estos pozos corresponde a registros eléctricos y se usó específicamente el registro de resistividad, el cual está medido el Ohm.m (ver Anexo 5). Este se digitalizó y se escaló, además se presenta la profundidad de los pozos y el caudal de cada uno, con el fin de esperar similares valores de caudal si se construye un pozo en el área de interés con similares dimensiones, a profundidades mayores a los niveles de la quebrada el Oso y el río Consota. La ubicación de la sección propuesta se presenta en la Figura 45 y la sección A-A' con sus diferentes capas estratigráficas se presenta en la Figura 46.

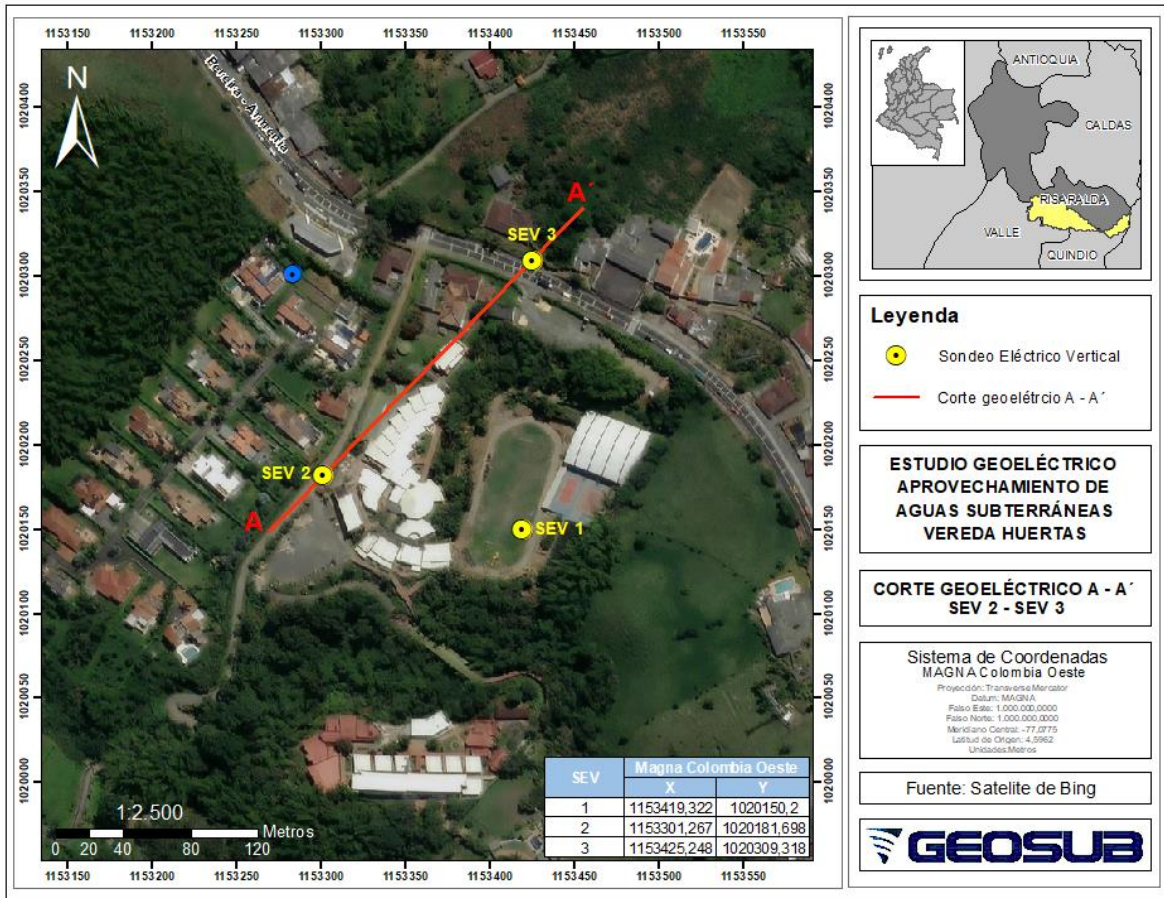


Figura 45. Localización de corte geoelectrico A – A’.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

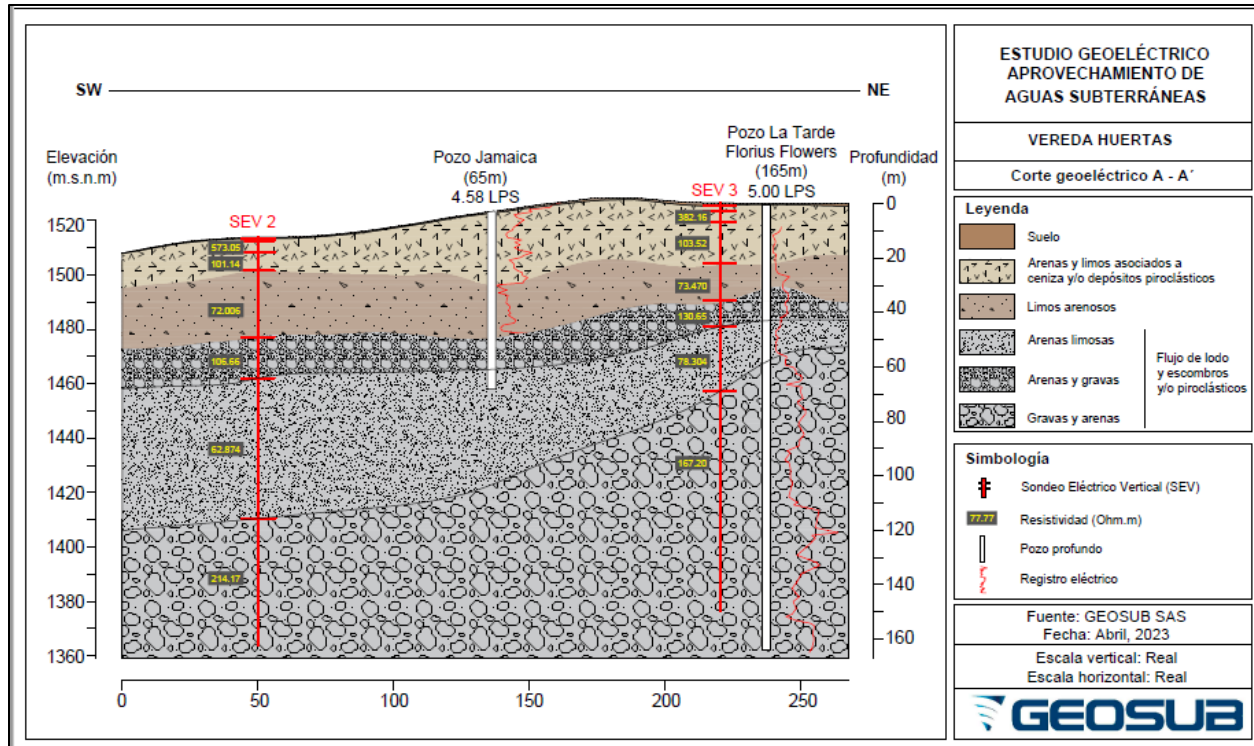


Figura 46. Corte geoelectrico A – A’.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

Interpretación

Superficialmente, se detectó una capa de suelo de altas resistividades, asociadas a cenizas volcánicas con alta porosidad (100 a 650 Ohm.m), ceniza de tamaños principalmente de arenas a limos, sin compactar, comportándose hidrogeológicamente como un acuífero libre en esta zona, seguida de resistividades moderadas entre 50 y 76 Ohm.m, que se relaciona con limos arenosos y arenas, asociados a cenizas volcánicas, capa que por sus propiedades se interpreta hidrogeológicamente como un acuitardo a acuífero libre, esta se correlaciona con la parte superior de la Formación Armenia, por su posición estratigráfica. Infrayaciendo los depósitos de ceniza se tienen resistividades entre 60 y 220 Ohm.m que representan depósitos fluvio volcánicos con alta porosidad, con intercalaciones de flujos de lodos y flujos de escombros, con diferentes grados de soldamiento y textura, los valores más bajos de resistividad se puede interpretar como niveles con

mayor contenido de sedimentos finos (arcillas y limos) y los más altos con sedimentos gruesos (arenas y gravas) . Dichos depósitos constituyen la unidad de interés hidrogeológico como potencial acuífero, por la capa de ceniza superior de esta unidad se considera un acuífero semiconfinado a libre. Esta interpretación corresponde a la descripción del abanico del Quindío en la parte intermedia, indicando cierta homogeneidad con las capas estratigráficas del área de estudio, sin embargo, se evidencia que las capas de ceniza volcánica, también varían granulométricamente y es de gran importancia analizar su comportamiento hidrogeológico.

GEOSUB S.A.S. para un cliente privado en otro estudio, propone un modelo hidrogeológico conceptual esquemático para el corregimiento Tribunas Córcega, en este se aprecia las unidades estratigráficas generales, las cuales coinciden con todos los SEVs y pozos realizados, además se observa que la dirección de flujo del agua subterránea está en sentido noroeste. Otra observación del modelo hidrogeológico conceptual es el lineamiento asociado a una posible falla, la cual pasa cerca al área de estudio y presenta indicadores de deflexiones de drenajes, pero se desconoce la influencia que esta tenga en este sector con los parámetros hidrogeológicos.

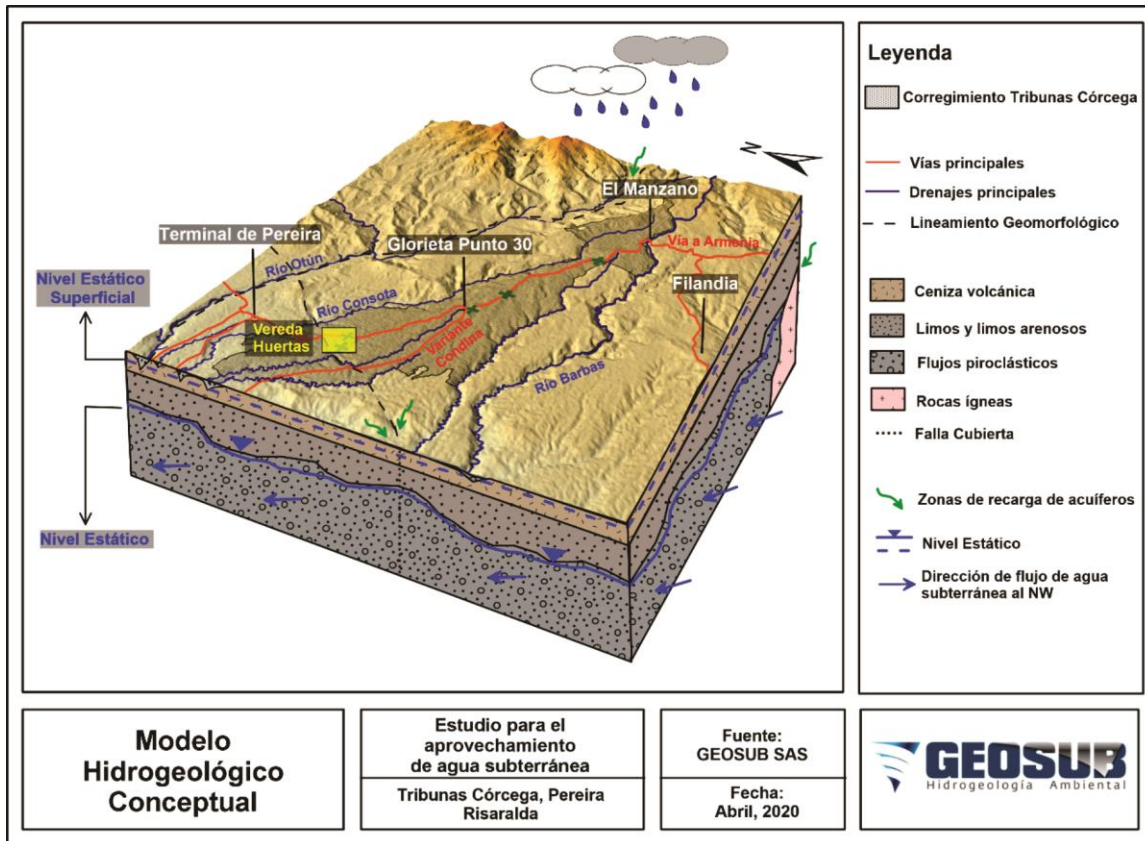


Figura 47. Modelo hidrogeológico conceptual-Tribunas-Córcega.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2020).

Con base en la información obtenida de las secciones y los modelos generados, se ha realizado la siguiente interpretación:

El acuífero de la Formación Armenia se caracteriza por poseer dos unidades acuíferas con porosidad primaria. La primera de estas unidades se encuentra en una posición más superficial y está compuesta principalmente por cenizas volcánicas. Los espesores máximos de esta unidad varían entre 30 y 40 metros. Su comportamiento hidrogeológico se describe como libre y se considera un acuífero de muy baja productividad.

La segunda unidad acuífera está formada por depósitos fluvio-volcánicos, incluyendo flujos de lodo y flujos de escombros. Esta unidad se comporta como libre a semiconfinada y

presenta mejores condiciones para aprovechamiento de agua subterráneas que el acuífero superior, evidenciado, en los caudales de los pozos cercanos que presentaban profundidades mayores.

Estas interpretaciones se basan en las características de porosidad, comportamiento hidrogeológico y la disposición de las unidades acuíferas identificadas en las secciones estratigráficas y modelos generados. Dado que la segunda unidad acuífera presenta un mayor interés hidrogeológico, es importante resaltar que los pozos de agua subterránea con caudales cercanos a los 5 LPS, se encuentran asociados principalmente a aquellos que atraviesan esta unidad específica.

6.8. DISEÑO PRELIMINAR DE POZO DE AGUA SUBTERRÁNEA

Basándonos en los resultados obtenidos y en la información recopilada, junto con la experiencia de GEOSUB S.A.S. en el ámbito hidrogeológico y de perforación de pozos en la zona de estudio, se llega a la conclusión de que la construcción de un pozo de agua subterránea es viable. En consecuencia, se procede a proponer un diseño preliminar del pozo profundo que se planea construir.

Este diseño preliminar se basará en los datos hidrogeológicos y geofísicos obtenidos, considerando las características de las unidades acuíferas identificadas, la profundidad y la potencial productividad del acuífero seleccionado. Asimismo, se tendrán en cuenta los caudales requeridos y la ubicación óptima del pozo en relación con las capas acuíferas de mayor interés.

Este diseño preliminar del pozo profundo será el punto de partida para el desarrollo de la planificación detallada y la ejecución de la construcción del pozo de agua subterránea, el diseño del pozo estará a cargo de un geólogo experto.

PERFORACIÓN: Se hará un sondeo exploratorio en 8 ½” con broca tricónica hasta una profundidad no inferior a 200 m, tomando muestras de zanja metro a metro y llevando la rata de perforación (metros/minutos). Posteriormente, se debe tomar un registro eléctrico (potencial espontáneo, resistividad y rayos gamma), de toda la profundidad del pozo, con el fin de evaluar y conocer los mejores espesores de los acuíferos.

A partir de los resultados obtenidos y teniendo el diseño final del pozo, se procede a ampliar con broca tricónica en 12 ¼” hasta los 200 m, que será el diámetro definitivo de la perforación.

TUBERÍA Y FILTROS: Luego de tener listo el pozo para su revestimiento, se procederá a entubarlo con los siguientes materiales recomendados:

- Tubería y filtros en 6" de diámetro en PVC RDE 21 hasta los 200 m de profundidad.

La cantidad de filtro es aproximadamente el 30 % de la profundidad total de la perforación, sin que este valor sea una regla, simplemente lo demuestra la experiencia, de acuerdo con el espesor y tipos de unidades acuíferas presentes en el área de estudio.

EMPAQUE DE GRAVA: El empaque de grava debe ser seleccionado (mallas 14-20), o grava No. 1, como se conoce en la región; la cual tiene características específicas de tamaño, esfericidad y redondez.

SELLO SANITARIO: Con el fin de preservar la calidad fisicoquímica y bacteriológica de los acuíferos inferiores, se hará un sello sanitario con cemento o bentonita de 18 a 20 m de profundidad, sellando los primeros niveles de agua que surten los aljibes y que son más propensos a algún tipo de contaminación.

EQUIPO DE BOMBEO: Es importante anotar que hasta la finalización del pozo no se podrá dar un caudal de producción exacto, ni tampoco los niveles hidráulicos del pozo (nivel estático y nivel dinámico), indispensables para diseñar y recomendar el equipo de bombeo.

En la Figura 48, se presenta el formato para la entrega del diseño del pozo, el cual incluye la rata de perforación, los registros eléctricos de potencial espontáneo, rayos gamma y resistividad, además de estos es necesario describir el ripio obtenido de la perforación y registrar los cambios de los niveles estratigráficos en profundidad, con todo esto se establecen los intervalos de la tubería con filtro para captar de manera eficiente el agua del acuífero.

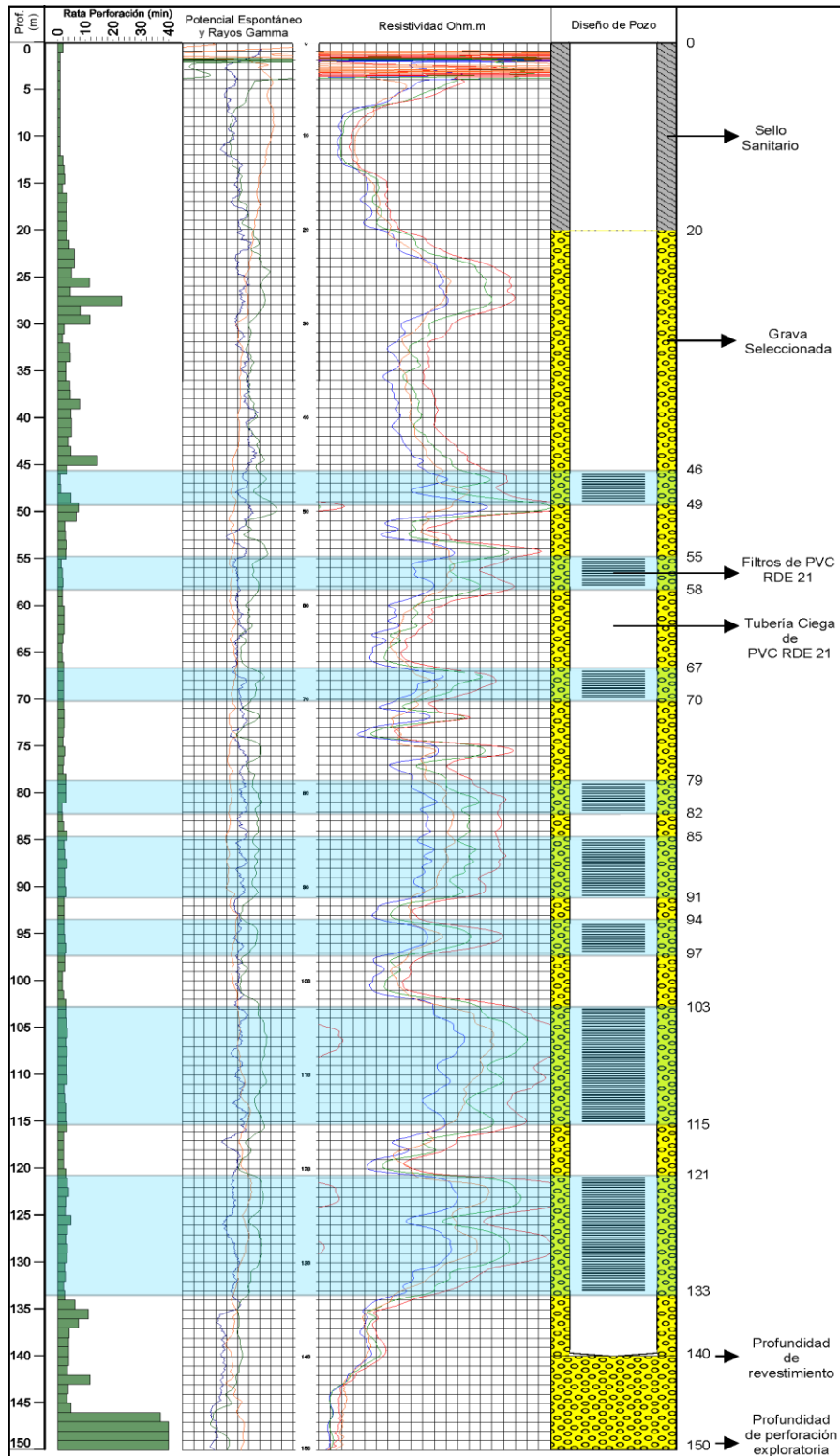


Figura 48. Formato para el diseño de pozo.

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2023).

7. DISCUSIONES

La geoelectrica desempeña un papel clave en la exploración inicial de agua subterránea. Propiedades como la porosidad, composición, calidad y cantidad del agua, junto con la granulometría de los estratos, permiten estimar los cambios en la profundidad de la secuencia estratigráfica. Sin embargo, para una interpretación precisa, es crucial contar con datos de correlación, ya sean directos o indirectos. La exploración de agua subterránea se beneficia enormemente al complementarse con una amplia gama de información disponible. Sin esta información, esta herramienta tendría un alto grado de incertidumbre. El papel del geólogo en la elaboración de estos estudios es de vital importancia. Sin los conceptos estratigráficos y geofísicos, la interpretación de las resistividades de las capas podría estar equivocada y llevar a la construcción de pozos que no capturen de manera eficiente el agua subterránea.

La Formación Armenia, una importante unidad, almacena gran parte del agua subterránea del Quindío y Risaralda. Posee propiedades geológicas favorables, principalmente debido a su composición de materiales gruesos como arenas y gravas, lo que le confiere alta porosidad y buena permeabilidad. Además, esta unidad en sus diferentes divisiones del abanico presenta cierta homogeneidad, lo que aumenta la certeza de la unidad acuífera en toda la región. Sin embargo, se debe analizar a escala local, ya que, en ciertas partes pueden presentarse lentes de material más fino y cambiar los espesores y profundidades de la unidad. Por lo tanto, para proponer un diseño de pozo preliminar que capte la unidad, se debe llevar a cabo un estudio completo de exploración de agua subterránea.

El abanico del Quindío, situado en el flanco occidental de la Cordillera Central, se beneficia de una mayor recarga de agua debido a su cercanía. Esta unidad acuífera recibe agua relativamente joven y con buenas condiciones para el uso humano, como se evidenció en la química del agua

subterránea. Si estas aguas no fueran aptas para su aprovechamiento, requerirían un cierto tratamiento, lo cual generaría más gastos y problemas en el uso de este recurso. Por esta razón, es necesario monitorear las propiedades hidrológicas del agua subterránea, para que la construcción de aljibes y pozos no altere la naturaleza del flujo de agua subterránea. Por otra parte, se debe prevenir el uso de esta agua en caso de contaminación por algún motivo, evitando problemas de salud y económicos debido a su aprovechamiento en mal estado.

Se motiva, con este texto, a valorar la importancia del geólogo en la realización de estos estudios. Además, se motiva a las entidades ambientales y gubernamentales, para prestar más atención al uso del recurso de aguas subterráneas y monitorear las propiedades del acuífero periódicamente, con el fin de garantizar un aprovechamiento de agua sostenible y responsable.

8. CONCLUSIONES

- La Formación Armenia se considera un acuífero con alto interés para el aprovechamiento de agua subterránea, debido a la capacidad de almacenamiento y la composición química del agua subterránea.
- El acuífero de la Formación Armenia presenta dos unidades con porosidad primaria; una unidad más superficial, compuesta de cenizas volcánicas y una segunda unidad compuesta por depósitos fluvio-volcánicos.
- Con base en la información de niveles estáticos, niveles dinámicos y caudales de aprovechamiento de los pozos cercanos, se estima que la construcción de un pozo con profundidades mayores a los 130 metros, tendrá un caudal cercano a 5 LPS.
- Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) desempeñan un papel crucial en la exploración del agua subterránea. Los cambios en la resistividad eléctrica, detectados a lo largo de los SEVs, se alinean de manera coherente con los niveles estratigráficos que han sido interpretados y caracterizados en la región.

9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda perforar un pozo de carácter exploratorio a una profundidad no inferior a 200 metros cerca del SEV 3. Pudiendo captar la mayor cantidad de capas acuíferas por debajo de los niveles base (río Consota y quebrada El Oso).
- Debido a la cercanía en distancia horizontal con el pozo Jamaica, lo cual puede generar interferencias con el bombeo, se recomienda instalar filtros a partir de los 120 metros de profundidad y en el momento de perforar el pozo recomendado, se puede realizar una prueba de bombeo midiendo niveles en el pozo Jamaica (pozo de observación), con el ánimo de calcular el radio de influencia.
- Al momento de la perforación, se deben tomar muestras metro a metro, llevar una rata de perforación (metros/minutos) y posteriormente tomar un registro eléctrico (potencial espontáneo y resistividad), de toda la profundidad del pozo, para evaluar y conocer el espesor de las zonas acuíferas a mayor detalle y así ubicar los filtros de pozo en profundidad con menor incertidumbre.
- Se recomienda estudiar la relación entre las fallas activas y los sistemas acuíferos permitirá comprender cómo estas estructuras geológicas afectan la permeabilidad, la conexión entre diferentes unidades acuíferas y la recarga de agua subterránea.

10. REFERENCIAS

- Aristizabal Restrepo, J., & Gómez Calle, D. (1990). Evaluación Hidrogeológica del Área de Cerritos Departamento de Risaralda. Manizales: Tesis de Grado, Universidad de Caldas.
- Barrero, D.; Vesga, C. J. (1976). Mapa geológico del Cuadrángulo K-9 Armero y mitad sur del Cuadrángulo J-9 La Dorada. Escala 1:100.000. Ingeominas. Bogotá.
- Bohórquez, O., Monsalve, M. L., Velandia, F., & Gil-Cruz. (2005). *Determinación del Marco Tectónico Regional para la Cadena Volcánica más Septentrional de la Cordillera Central de Colombia*. Boletín de Geología,.
- Briceño, J. (2015). Manual para la medición de resistividad del suelo. Universidad de Los Andes, 1(1).
- Caballero H., Zapata G., ET AL (1985). Mapa geológico de la Plancha 224, escala 1:100.000; INGEOMINAS, Bogotá.
- CARDER (2007). Plan de Manejo Integrado de Aguas Subterráneas en Pereira. Abril de 2007.
- CARDER. (2008). Plan de ordenación y manejo de la cuenca Hidrográfica del río Otún. Pereira.
- CARDER (2017). Actualización del POMCA Río El Otún.
- CARDER, CVC y CORPOQUÍNDIO (2016). Actualización del POMCA Rio La Vieja. Consorcio POMCA Quindío.
- CARDER y UTP (2020). Actualización de Inventario de Puntos de Captación de Aguas Subterráneas -IPCAS (Pozos-Aljibes- Manantiales), en las 3 Unidades de Planificación POMCAS formulados.
- Doménico, P.A., & Schwartz, F.W. (1998). Physical and chemical hydrogeology, Volume 1. Ed 2, illustrated. The University of Michigan. ISBN 0471597627, 9780471597629. p.506.
- Espinosa, A. (2005). Un modelo del Cuaternario del Quindío y Risaralda. Journal of the Colombian academy of physical, natural, and exact sciences, Bogotá.
- Espinosa, A. (2010). Un Modelo del Cuaternario del Quindío. Universidad del Quindío, Armenia.

- Espinosa–Baquero, A. (2020). A model of the Quindío and Risaralda Quaternary deposits. In: Gómez, J. & Pinilla–Pachon, A.O. (editors), *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*. Servicio Geológico Colombiano, Publicaciones Geológicas Especiales 38, p. 333–352. Bogotá. <https://doi.org/10.32685/pub.esp.38.2019.09>
- Guarín, F. (2008). *Etude sédimentologique du fan volcanoclastique du Quindío–Risaralda (Colombie) et sa relation avec la morphonéotectonique* (Doctoral dissertation, Doctoral thesis, Université de Genève. 146 p. Genève, Switzerland. <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:3960>
- González, H. (1991). *Mapa Geológico Generalizado del Departamento del Quindío*.
- Humane Slaughter Association (HSA) (s.f.). *Corriente, voltaje y resistencia*. <https://www.hsa.org.uk/electricidad/corriente-voltaje-y-resistencia>
- Memoria explicativa. INGEOMINAS. 38p. Bogotá.
- Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial y Ministerio de Protección Social (2007), Resolución No. del 2115 de 22 de Junio de 2007.
- González, Humberto. (2001). *Mapa geológico de las planchas 206 y 225, escala 1:100.000; INGEOMINAS, Bogotá*.
- IDEAM (2015). *Estudio Nacional del Agua 2014*. Bogotá, D. C., 2015. 496 páginas
- IDEAM (2019). *Estudio Nacional del Agua 2018*. Bogotá: Ideam: 452 pp.
- IDEAM (2023). *Estudio Nacional del Agua 2022*. Ideam. 464 pp.
- McCourt W. (1984). *Mapa geológico de la plancha 262, escala 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá*.
- McCourt W. ET AL. (1985). *Mapa geológico de la plancha 2243, escala 1:100.000, INGEOMINAS, Bogotá*.
- McCourt et al. (1984b). *The geology of the Central Cordillera, departments of Valle del Cauca, Quindío and NW Tolima (Sheets 243, 261, 262, 280 and 300)*. INGEOMINAS – Misión Británica (British Geological Survey). Report 8. Cali.

- Mosquera, D. et al., (1973). Mapa geológico del área entre los municipios de Salento – Quindío y Cajamarca – Tolima. Escala 1:100.000. INGEOMINAS. Ibagué.
- Nivia G. Álvaro. (2001). Mapa geológico del departamento del Valle del Cauca. Escala 1:250.000. INGEOMINAS. Bogotá.
- Omega & Asociados Ltda. (2017). Evaluación Hidrogeológica de la Quebrada El Oso con Énfasis en Recarga de Acuíferos. Proyecto Gerenciar, Marceliano Ossa. Pereira: Proyecto Marceliano Ossa.
- Piper, AM (1944). Un procedimiento gráfico en la interpretación geoquímica de los análisis de agua. Eos, Transacciones Unión Geofísica Estadounidense , 25 (6), 914-928.
- Presidencia de la República de Colombia. (1984). Decreto 1594 de 26 de Junio de 1984.
- Salguero, M. E. A. (2007). Modelización directa y comparación de los principales dispositivos Geoeléctricos. Revista de Ciencia y Tecnología, 25 (1 y 2).
- Sánchez, J. (2012). Evolución geoquímica de las aguas subterráneas. Salamanca, España: Departamento de Geología-Universidad de Salamanca.
- Sánchez, F. (2022). Hidrología Superficial y Subterránea. España: 2ª ed. Kindle Direct Publishing. 440 pp.
- Sarria Molina, A. (2004). Capítulo III: corriente eléctrica continua aplicada a la prospección de suelos. Investigación no destructiva y cargas extremas en estructuras.
- Servicio Geológico Colombiano y Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (SGC y Uptc). (2014). Memoria explicativa de la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza relativa por plancha 224 - pereiramovimientos en masa escala 1:100.000.
- Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). Modelo Hidrogeológico de la zona sur del eje cafetero, departamento del Quindío. Escala 1: 100000. Bogotá: SGC.
- Suárez Guerrero, N. I. (2021). Construcción de modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero bajo el casco urbano del municipio de Málaga, Santander (Doctoral dissertation, Univesidad Nacional de Colombia).

- Restrepo, J.J.: Toussaint, J.F (1974). Algunas consideraciones sobre la evolución de los Andes Colombianos. Medellín.
- Restrepo Gesamá, Y. A. (2014). Lineamientos estratégicos para la gestión ambiental del recurso hídrico subterráneo en el municipio de Dosquebradas (Risaralda), con base en el concepto de vulnerabilidad global y gestión del riesgo.
- Ruiz J, Elvira C. Et Al. (2012). Geoquímica y petrografía de las metabasitas del Complejo Arquía, Implicaciones Geo-dinámicas. Medellín.
- Ulloa, A., Argüello, A., Obando, A., & Vargas, M. (2021). Geomorfología y espeleogénesis del sistema kárstico de cuevas de Venado, Costa Rica. *Revista Geológica de América Central*, (64), 58-89.
- Van der Hammen, T. (1995). El Plioceno y Cuaternario del altiplano de Bogota y alrededores. Bogotá.
- WATERAID (s.f.): Technology Notes – Section 7. Tubewells and Boreholes. London (UK):WaterAid,pp.15-20.
<https://washmatters.wateraid.org/sites/g/files/jkxoof256/files/Technology%20notes.pdf>
- Winter, T. C. (1998). Ground Water and Surface Water A single resource. Denver, Colorado.

ANEXOS

ANEXO 1. FORMATO PARA TOMA DE DATOS SEVS

Tabla 9. Formato para toma de datos de los SEVs.

PROYECTO:				SEV:		
LOCALIZACIÓN:				COTA:		
COOR:	N:	W:	FECHA:			
RUMBO:				OBSERVACIONES:		
PUNTO	MN/2 (m)	AB/2 (m)	K	RESISTENCIA (Ohm)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	CORRECCION
1	0.5	1.5	6.28			
2		2.5	18.85			
3		4	49.48			
4		6	112.31			
5		8	200.28			
6		10	313.37			
7		12	451.61			
8		15	706.07			
8	5	15	62.83			
9		20	117.81			
10		25	188.5			
11		30	274.89			
11	10	30	125.66			
12		40	235.62			
13		50	376.99			
14		60	549.78			
15		75	867.87			
15	25	75	314.16			
16		100	589.05			
17		125	942.48			
18		150	1374.45			
18	45	150	714.71			
19		175	998.33			
20		200	1325.58			
21		250	2110.98			
22		300	3070.91			
23		400	5514.38			
24		500	8655.88			

Fuente: GEOSUB S.A.S.

ANEXO 2. FALLAS EN EL ABANICO DEL QUINDÍO

Tabla 10. *Sistemas de fallas en el abanico del Quindío.*

Faille	Auteur	Cinématique	Direction	Plongement	Observation
SYSTEME DE FAILLES ROMERAL (N-S à NNE-SSW)					
San Jeronimo (F.SJ)	James (1986)	Inverse Senestre ?	N 15 E	Verticale à 80°	
	González et Nuñez (1991)	Inverse Dextre		Sub-verticale vers l'est	
	INGEOMINAS (1999)	Inverse Senestre	N 5 W	75° vers l'est	
	Paris (1997)	Dextre			
	Montes y Sandoval (2001)	Inverse Senestre	NE	75° vers l'est	
	Vergara et al. (2001)	Senestre Normale	N 15 E	Sub-verticale vers l'est	
	Bohórquez et al. 2005)	Inverse	NNE	65° vers l'est	
Silvia-Pijao (F.SP)	Paris (1997)	Inverse Dextre		Sub-verticale vers l'est	
	Mc Court et al. (1984)	Inverse Dextre	N 20 E	Sub-verticale	
	Mc Court et al. (1985)	Inverse Dextre			
	González et Nuñez (1991)	Inverse Dextre		Sub-verticale vers l'est	
	Guzman et al. (1998)		N à NNE		
	INGEOMINAS (1999)	Inverse Dextre	N à NE	Vers l'est	
	Montes y Sandoval (2001)	Inverse Dextre	N à NE	Vers l'est	
	Vergara et al. (2001)	Senestre Normale	N 15 E		
	Botero et al. (2004)	Dextre	N 15 à 25 E		Entre Calarca et Pijao W de CC
	Ospina (2005)	Senestre Normale	N à NNE	Sub-verticale vers l'ouest	N Calarca, W ce CC
	Bohórquez et al. (2005)	Inverse	NNE	60° vers l'est	
Navarco (F.NV)	James (1986)		N 15 E	Verticale	Bloc est soulevé
	Paris et al. (2000)	Senestre	N 18,5 E	Verticale	
Armenia (F.ARM)	James (1986)		N 35 E	Verticale ?	
	Paris (1997)	Senestre	N 20 E	Nord-ouest	
	Guzman et al. (1998)	Inverse Senestre	NS et NNE	60° vers l'ouest 60° vers l'nord- ouest	
	INGEOMINAS (1999)	Dextre Inverse	N 10 E	Ouest	
	Paris et al. (2000)	Senestre Normale	N 23 E	Sub-verticale vers l'ouest	
	Montes y Sandoval (2001)	Senestre	N 10 E	Ouest à verticale	
	Vergara et al. (2001)	Senestre Normale	NE	Sub-verticale vers le sud- ouest	
	Lalinde (2004)	Inverse	N 50 E	Verticale	Roble supérieure

	Bohórquez et al. (2005)	Inverse	NNE	60° vers le nord-ouest	
Faille	Auteur	Cinématique	Direction	Plongement	
Filandia (F.FLD)	James (1986)				Graben à l'est de Filandia, prolongation faille Armenia.
	Cardona y Ortiz (1994)		N 20° E à N 7° E		
Aeropuerto (F.APT)	Gillam (1979) in Page (1986)		N-S		
	Guzman et al. (1998)	Inverse Senestre	N-S	60° vers l'ouest	
Cauca-Almaguer (F.C-A)	Guzman et al. (1998)	Inverse Senestre	NS	50° E	
	INGEOMINAS (1999)	Inverse	N 25 E	Verticale	
	Montes y Sandoval (2001)	Inverse	N 25 E	Verticale	
	Bohórquez et al. (2005)	Inverse Senestre	N	50° vers l'est	
	INGEOMINAS y Comunidad Economica Europea (1992)	Dextre Inverse		Verticale	
Montenegro (F.MTG)	Paris (1997)	Senestre Inverse	N 20 E	Nord-ouest	
	Guzman et al. (1998)	Senestre Inverse			
	INGEOMINAS (1999)	Inverse Dextre	N 10 E	Est	
	Paris et al. (2000)	Senestre Normal	N 25 E	Sub-verticale vers l'ouest	
	Montes y Sandoval (2001)	Dextre Inverse	N 10 E	Est	
	Vergara et al. (2001)	Senestre Normale	N 20 E	Sub-verticale vers le sud-est	
Sevilla (F.SVA)	Cardona y Ortiz (1994)		N-S à N 15 E		
Matecaña (F.MTA)	James (1986)	Lineament			Bloc orientale soulevé
	Woodward (1979)		N-S	Verticale à 80° vers l'est	
	Cardona y Ortiz (1994)				Faille Montenegro
	Guzman et al. (1998)				Segment de la faille Cauca-Almaguer
Potrerillos (F.PTS)	Guzman et al. (1998)	Inverse		Ouest, back-thrust de Quebradanueva	
	Lalinde (2004) Alcalá 1 Alcalá 2	Bloc W abaisse Normale	N 10 E NS	Verticale 74° vers l'est	

Faille	Auteur	Cinématique	Direction	Plongement	
	Cardona y Ortiz (1994)		N 15 E		
Alcala (F.ALC)	James (1986)		N 5° E		
	Cardona y Ortiz (1994)		N 18° E à N 5° E		3 segments Bloc est soulevé
Marmato (F.MTO)	INGEOMINAS (1990)		N-S		
Quebradanueva (F.QNA)	Caballero and Zapata (1983)	Inverse		Sub-verticale vers l'est	
	James (1986)	Inverse Senestre	N 15° à 25° E	60 à 70 vers l'est	
	Guzman et al. (1998)	Inverse Senestre	N 15°-20° E	Est avec back-thrust vers l'ouest	
	Pardo et al. (1994)	Inverse Dextre	N 15-20 E		
	Bohórquez et al. (2005)	Inverse	NNE	60° vers l'est	
Toro-Arsemanuevo (F.T-AR)	Caballero and Zapata (1983)	Inverse	N 20 E	vers l'ouest	
	James (1986)	Senestre	N 20 E	75° vers l'ouest	
	Pardo et al. (1994)	Dextre	N 15-20 E		
	Guzman et al. (1998)	Senestre Normale	NNE à N	Vers l'est	
	Paris et al. (2000)	Senestre	N 6.6 E	Vers l'est	
	Bohórquez et al. (2005)	Inverse	NNE	60° vers l'ouest	
SYSTEME DE FAILLES OTUN (NW-SE)					
Otún (F.OTN)	James (1986)	Linéament	N 40 W	Vertical ?	
	Cardona y Ortiz (1994)	Linéament	N 56 W		
	Guzman et al. (1998)	Linéament			
	Thouret (1988) faille Otún-Pereira		N 110 à 135		Accident cassant transverse
	Ujueta (2001)	Linéament	NW-SE		
Consota (F.CON)	James (1986)	Linéament	N 40 W	Vertical	
	Guzman et al. (1998)	Normale Dextre	NW	65° vers le sud-ouest	
	INGEOMINAS (1998)		NW		
	Bohorques et al. (2005)	Normale Dextre	NW	65° vers le sud-ouest	
San Eugenio (F.EUG)	Thouret (1988)		N 110 à 135		Accidents cassants transverses
San Ramón (F.SRN)	Thouret (1988)		N 110 à 135		
Río Claro (F.RCL)	Thouret (1988)		N 110 à 135		
Campoalegre (F.CPA)	Thouret (1988)		N 110 à 135		
Río Lejos Barragan (L.RL-B)	González et Nuñez (1991)	Dextre	N-W		Linéament



Quebradanegra (F. QBN)	Botero et al. (2004)	N 45° E			
Faille	Auteur	Cinématique	Direction	Plongement	
Roncesvalles 1 (L.RV1)	INGEOMINAS (1999)		NW		
Roncesvalles 2 (L.RV2)	INGEOMINAS (1999)		NW		
Roncesvalles 3 (L.RV3)	INGEOMINAS (1999)		NW		
Roncesvalles 4 (L.RV4)	INGEOMINAS (1999)		NW		
Roncesvalles 5 (L.RV5)	INGEOMINAS (1999)		NW		
Roncesvalles 6 (L.RV6)	INGEOMINAS (1999)		NW		

Fuente: Guarín (2008).

ANEXO 3. REGISTRO DE DATOS

GEOSUB SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES GEO- Versión 2
 HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL 08-010 01/12/2007

GPS-1344

PROYECTO:				SEV: 7		
LOCALIZACIÓN: Cancun				COTA: 1473		
COORD: N: 4°46'33.3"		W: 75°41'40.5"		FECHA: 03/01/2023		
RUMBO: N-5				OBSERVACIONES:		
PUNTO	MN/2 (m)	AB/2 (m)	K	RESISTENCIA (Ohm)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	CORRECCION
1	0.5	1.5	6.28	48.5	304.58	lleno ✓
2		2.5	18.85	15.25	287.463	lleno ✓
3		4	49.48	6.45	319.146	lleno ✓
4		6	112.31	2.82	316.714	✓
5		8	200.28	1.361	272.581	✓
6		10	313.37	0.765	239.728	✓
7		12	451.61	0.476	214.966	✓
8		15	706.07	0.230	162.396	✓
8	5	15	62.83	2.05	128.802	✓
9		20	117.81	0.824	97.07	✓
10		25	188.5	0.363	68.426	96.
11		30	274.89	0.201	55.257	} 93.
11	10	30	125.66	0.476	52.274	
12		40	235.62	0.325	76.577	✓
13		50	376.99	0.228	85.95	✓
14		60	549.78	0.1283	70.54	✓
15		75	867.87	0.0648	56.238	✓
15	25	75	314.16	0.128	40.212	✓
16		100	589.05			
17		125	942.48			
18		150	1374.45			
18	45	150	714.71			
19		175	998.33			
20		200	1325.58			
21		250	2110.98			
22		300	3070.91			
23		400	5514.38			
24		500	8655.88			

Figura 49. Registro de datos en campo para el SEV 1.

Fuente: GEOSUB S.A.S.

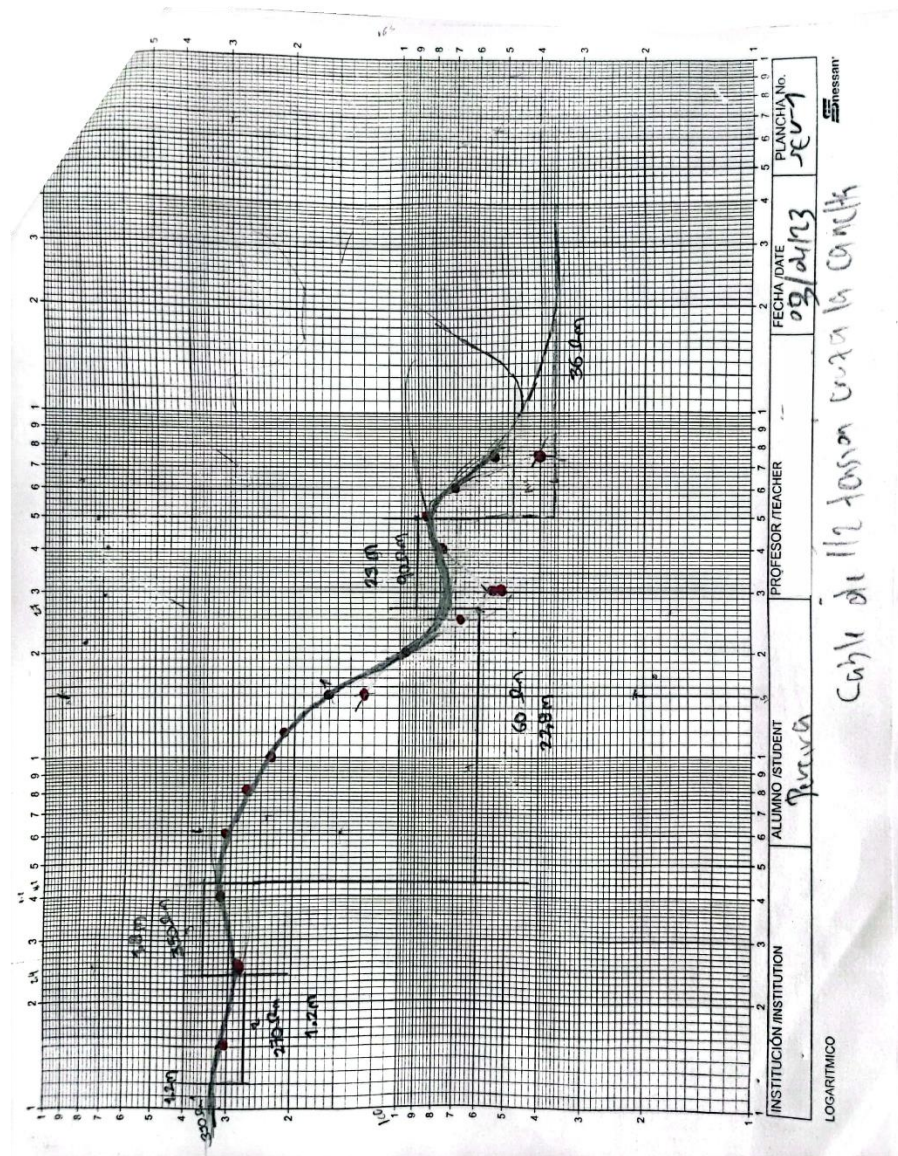


Figura 50. Curva de resistividad en función de la profundidad en escala logarítmica para el SEV 1, registrada en campo.

GEOSUB <small>HIDROGEOLOGÍA AMBIENTAL</small>		SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES GEO- 08-010		Versión 2 01/12/2007		
GPS 1345						
PROYECTO:			SEV: 2			
LOCALIZACIÓN: Enfiada Coleado			COTA: 1505			
COORD: N: 46° 38.5'		W: 75° 41' 44.4"		FECHA: 03/04/2023		
RUMBO:			OBSERVACIONES: Pendiente al 1a			
PUNTO	MN/2 (m)	AB/2 (m)	K	RESISTENCIA (Ohm)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	CORRECCION
1	0.5	1.5	6.28	55.2	346.656	✓
2		2.5	18.85	12.9	243.165	✓
3		4	49.48	6.54	323.599	✓
4		6	112.31	4.07	457.102	✓
5		8	200.28	2.58	516.722	✓
6		10	313.37	1.788	560.305	✓
7		12	451.61	1.098	495.867	✓
8		15	706.07	0.607	428.584	✓
8	5	15	62.83	4.17	267.001	✓
9		20	117.81	1.56	183.784	✓
10		25	188.5	0.776	146.088	✓
11		30	274.89	0.449	123.425	✓
11	10	30	125.66	1.054	132.445	✓
12		40	235.62	0.43	101.316	✓
13		50	376.99	0.268	101.033	✓
14		60	549.78	0.179	98.41	✓
15		75	867.87	0.071	61.62	✓
15	25	75	314.16	0.27	84.823	✓
16		100	589.05	0.12	79.686	✓
17		125	942.48	0.0875	82.467	✓
18		150	1374.45	0.0719	98.823	✓
18	45	150	714.71	0.1554	111.066	✓
19		175	998.33			
20		200	1325.58			
21		250	2110.98			
22		300	3070.91			
23		400	5514.38			
24		500	8655.88			

Figura 51. Registro de datos en campo para el SEV 2.

Fuente: GEOSUB S.A.S.

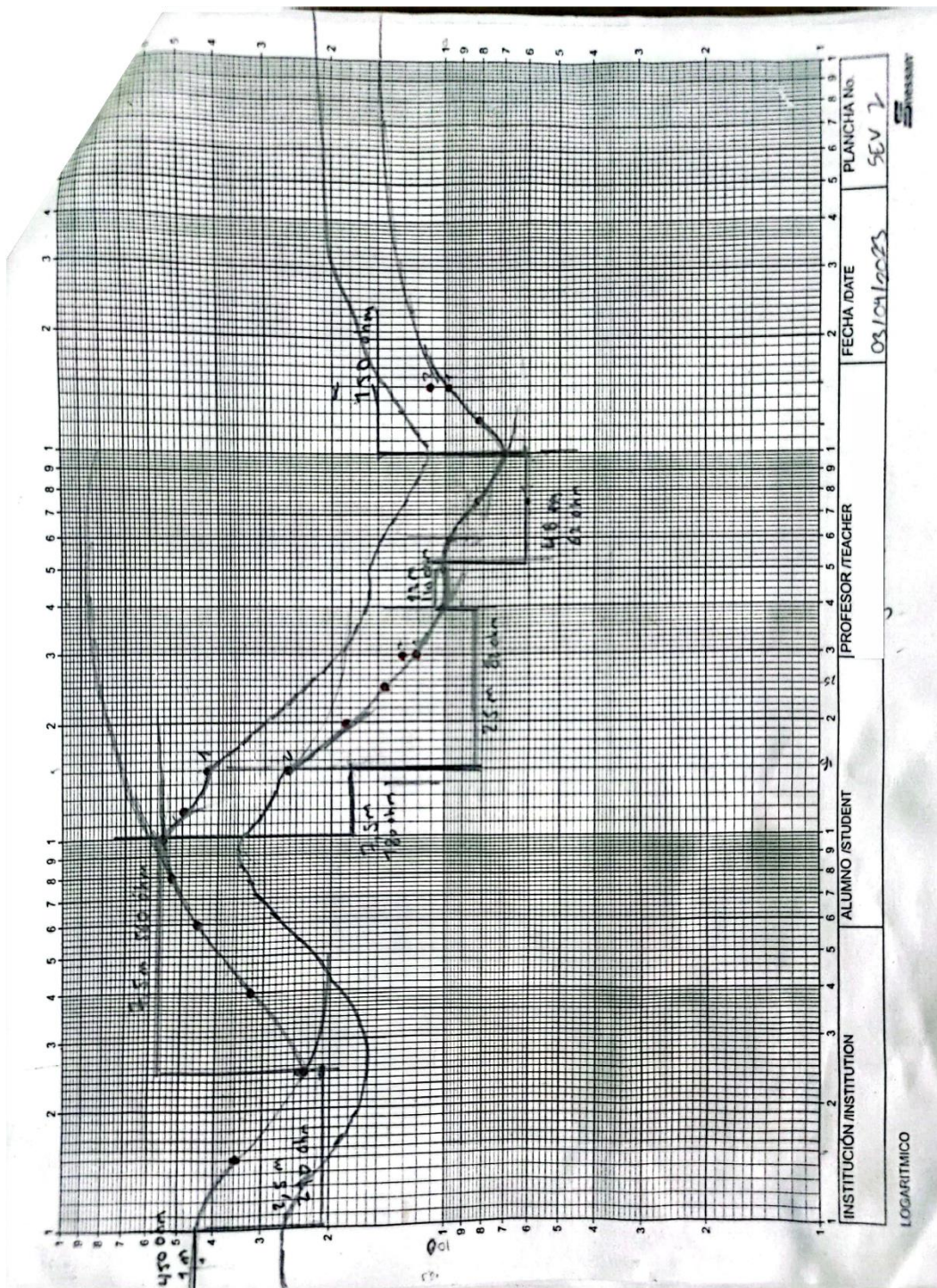


Figura 52. Curva de resistividad en función de la profundidad en escala logarítmica para el SEV 2, registrada en campo.

1348

PROYECTO:				SEV: 3		
LOCALIZACIÓN:				COTA: 1515m		
COORD:		N: 4° 46' 42.4"		W: 75° 41' 40.3"		FECHA: 02/04/2007
RUMBO:				OBSERVACIONES:		
PUNTO	MN/2 (m)	AB/2 (m)	K	RESISTENCIA (Ohm)	RESISTIVIDAD (Ohm-m)	CORRECCION
1	0.5	1.5	6.28	62.9	395.01	✓
2		2.5	18.85	19.12	360.412	✓
3		4	49.48	7.02	347.35	✓
4		6	112.31	3.20	359.392	✓
5		8	200.28	1.715	343.48	✓
6		10	313.37	1.051	329.351	✓
7		12	451.61	0.605	273.224	✓
8		15	706.07	0.341	240.77	✗
8	5	15	62.83	3.33	209.223	✓
9		20	117.81	1.446	170.353	✓
10		25	188.5	0.836	157.397	✓
11		30	274.89	0.438	120.401	✓
11	10	30	125.66	0.871	109.449	✗
12		40	235.62	0.447	105.322	✓
13		50	376.99	0.3	113.097	108.
14		60	549.78	0.185	101.709	✓
15		75	867.87	0.11	95.465	✓
15	25	75	314.16	0.289	90.792	✗
16		100	589.05	0.1706	100.491	✓
17		125	942.48	0.117	110.270	✓
18		150	1374.45	0.1105	152.014	✗
18	45	150	714.71	0.168	120.071	✓
19		175	998.33			
20		200	1325.58			
21		250	2110.98			
22		300	3070.91			
23		400	5514.38			
24		500	8655.88			

Figura 53. Registro de datos en campo para el SEV 3.

Fuente: GEOSUB S.A.S.

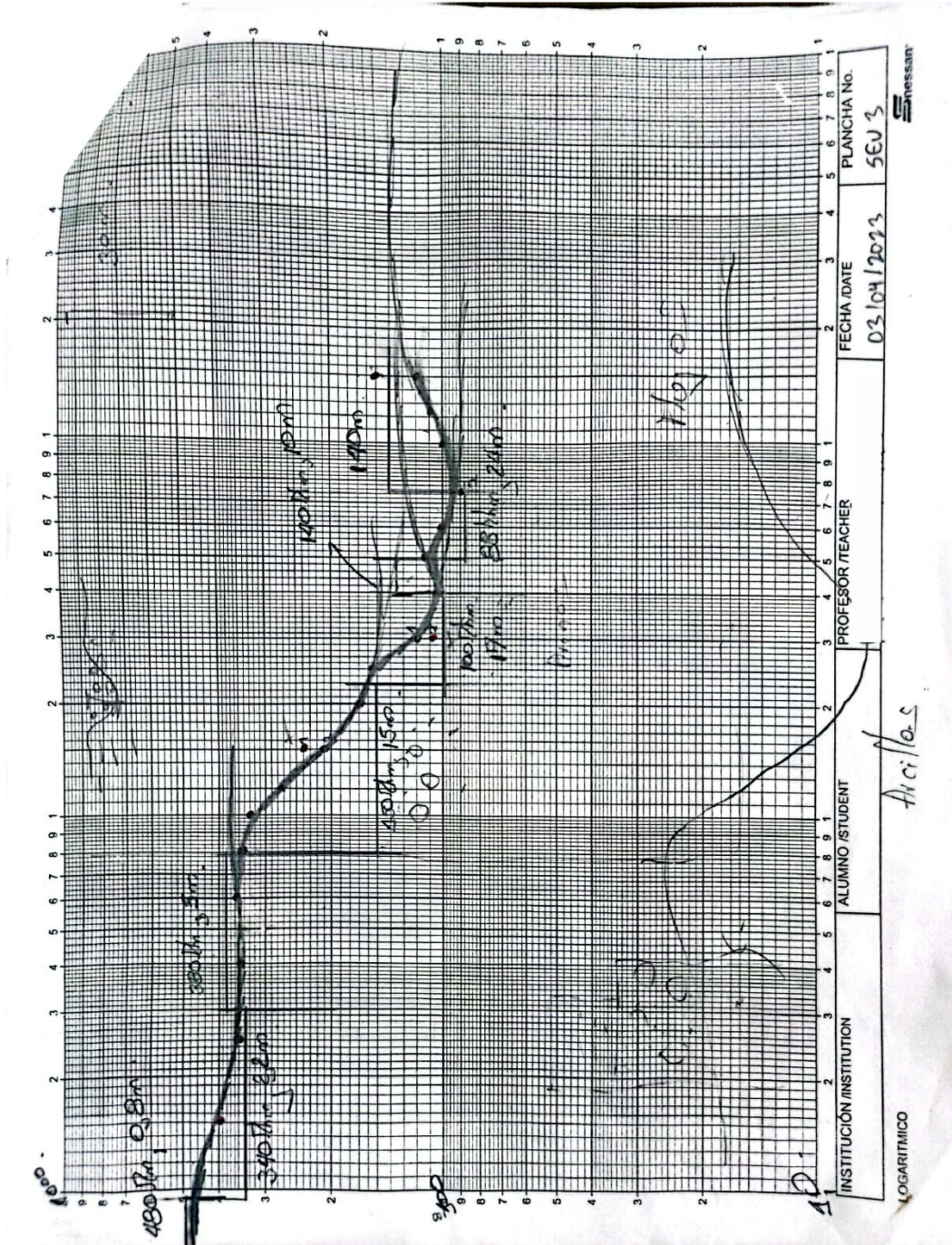


Figura 54. Curva de resistividad en función de la profundidad en escala logarítmica para el SEV 3, registrada en campo.

ANEXO 4. SEVs DE CORREGIMIENTO TRIBUNAS CÓRCEGA

Tabla 11. *Coordenadas de los Sondeos Eléctricos Verticales Estudio Tribunas Córcega.*

ID	Coordenadas Geográficas		Coordenadas MAGNA-SIRGAS Origen Oeste	
	Longitud	Latitud	X	Y
SEV 1	75°41'46.1" W	4°46'9.2" N	1153259.1694	1019286.66954
SEV 2	75°41'27.9" W	4°46'13.9" N	1153819.88753	1019432.20924
SEV 3	75°37'24.1" W	4°43'5.8" N	1161347.17663	1013667.95431
SEV 4	75°37'25.6" W	4°43'7.4" N	1161300.83223	1013717.02094
SEV 5	75°39'9.2" W	4°44'12.8" N	1158102.96964	1015719.93958
SEV 6	75°39'51.4" W	4°44'35.8" N	1156800.64822	1016423.98696
SEV 7	75°39'9.9" W	4°44'14.6" N	1158081.27739	1015775.20316
SEV 8	75°37'22.8" W	4°43'6.2" N	1161387.22717	1013680.3288

Tabla 12. *Información del modelo de capas SEV 1 Estudio Tribunas Córcega.*

SEV 1				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	55.1	1.0	1.0	Suelo
2	375.3	8.4	9.4	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	65.0	26.4	35.8	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
4	360.0	75.9	111.8	Flujos de lodo y piroclásticos
5	199.4	59.2	171.0	Flujos de lodo y piroclásticos
6	129.1			Flujos de lodo y piroclásticos

Tabla 13. *Información del modelo de capas SEV 2 Estudio Tribunas Córcega.*

SEV 2				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	23.6	1.4	1.4	Suelo
2	95.8	2.5	3.9	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	294.5	9.2	13.1	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
4	54.9	40.0	53.1	Limos Arenosos y/o flujos piroclásticos alterados
5	206.9	51.1	104.2	Flujos de lodo y piroclásticos
6	725.8			Flujos de lodo o Basamento Resistivo

Tabla 14. Información del modelo de capas SEV 3 Estudio Tribunas Córcega.

SEV 3				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	169.8	0.8	0.8	Suelo
2	367.7	1.6	2.3	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	782.3	3.8	6.1	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
4	170.1	5.9	12.0	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
5	75.1	32.8	44.8	Limos Arenosos y/o flujos piroclásticos alterados)
6	95.4	34.2	79.0	Flujos piroclásticos alterados
7	234.6	99.9	178.9	Flujos de lodo y piroclásticos
8	183.6			Flujos de lodo y piroclásticos

Tabla 15. Información del modelo de capas SEV 4 Estudio Tribunas Córcega.

SEV 4				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	195.8	1.2	1.2	Suelo
2	85.6	2.3	3.5	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	107.6	2.3	5.8	Arenas
4	61.5	13.1	18.9	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
5	83.0	11.3	30.2	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
6	74.0	22.6	52.8	Flujos piroclásticos alterados
7	264.6	79.9	132.7	Flujos de lodo y piroclásticos
8	283.9			Flujos de lodo y piroclásticos

Tabla 16. Información del modelo de capas SEV 5 Estudio Tribunas Córcega.

SEV 5				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	1171.7	2.7	2.7	Suelo
2	642.4	12.1	14.9	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	49.6	23.5	38.4	Limos (asociados a cenizas volcánicas)
4	145.7	95.6	134.0	Flujos de lodo y piroclásticos
5	159.0	58.7	192.7	Flujos de lodo y piroclásticos
6	92.4			Flujos piroclásticos alterados

Tabla 17. Información del modelo de capas SEV 6 Estudio Tribunas Córcega.

SEV 6				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	114.5	1.5	1.5	Suelo
2	568.4	3.5	5.0	Limos Arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	83.2	44.2	49.2	Limos arenosos y/o Flujos piroclásticos alterados
4	157.5	48.9	98.0	Flujos de lodo y piroclásticos
5	174.5	100.1	198.1	Flujos de lodo y piroclásticos
6	127.0	45.0	243.1	Flujos de lodo y piroclásticos
7	227.5			Flujos de lodo y piroclásticos

Tabla 18. Información del modelo de capas SEV 7 Estudio Tribunas Córcega.

SEV 7				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	474.8	0.8	0.8	Suelo
2	743.7	1.3	2.1	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	254.2	2.1	4.3	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
4	84.0	10.1	14.4	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
5	54.3	17.4	31.8	Limos (asociados a cenizas volcánicas)
6	142.4	37.0	68.8	Flujos de lodo y piroclásticos
7	326.2	68.7	137.5	Flujos de lodo y piroclásticos
8	78.7			Flujos piroclásticos alterados

Tabla 19. Información del modelo de capas SEV 8 Estudio Tribunas Córcega.

SEV 8				
Capa	Resistividad (ohm-m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Interpretación
1	375.9	0.6	0.6	Suelo
2	467.6	1.4	2.1	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
3	671.9	2.9	5.0	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
4	51.1	22.7	27.7	Limos arenosos (asociados a cenizas volcánicas)
5	114.6	42.3	70.0	Flujos de lodo y piroclásticos
6	102.0	56.9	126.9	Flujos de lodo y piroclásticos
7	276.6			Flujos de lodo y piroclásticos

Fuente: GEOSUB S.A.S. (2020).

ANEXO 5. REGISTROS ELÉCTRICOS DE POZOS

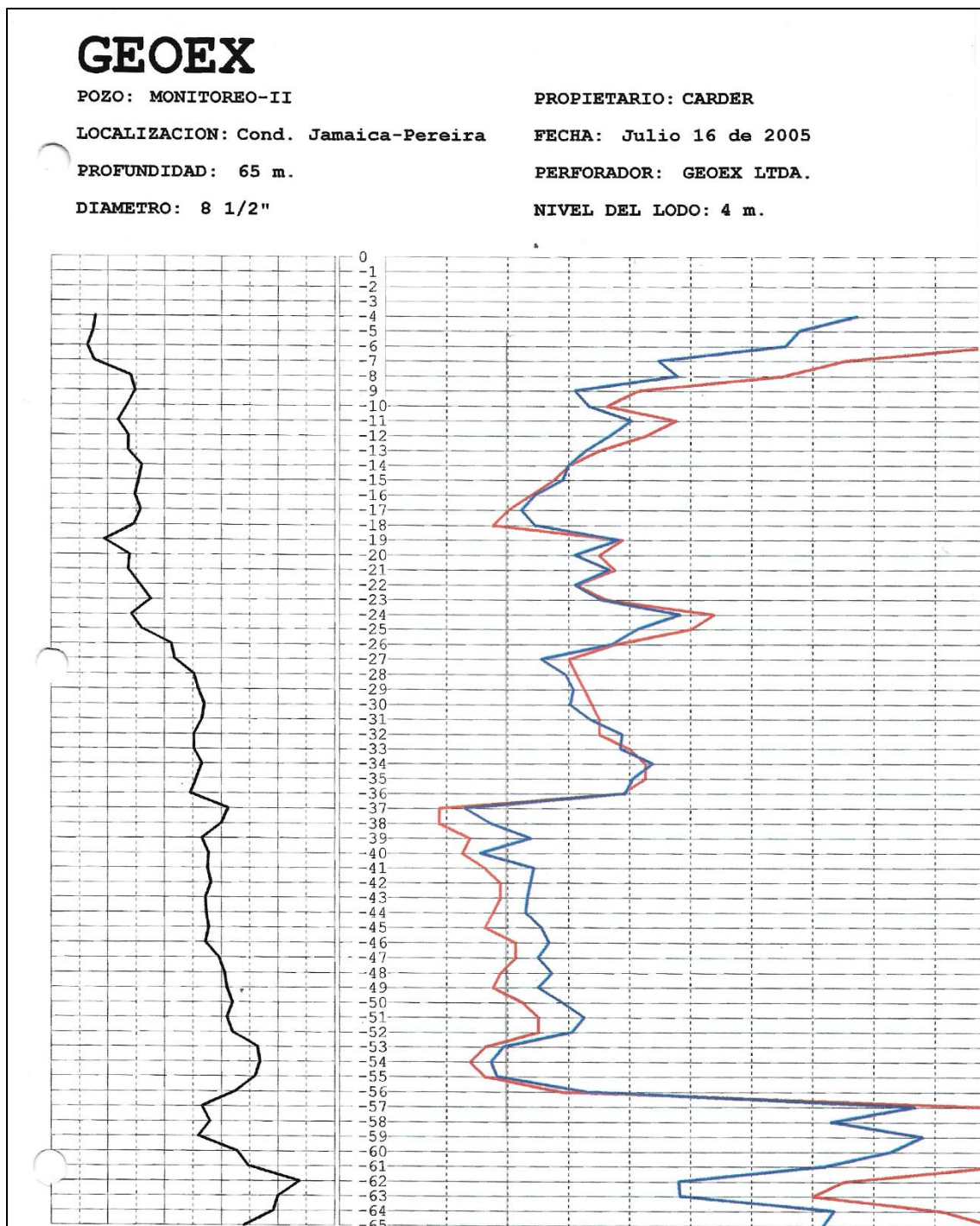


Figura 55. Registro eléctrico pozo Jamaica.

Fuente: GEOSUB S.A.S.

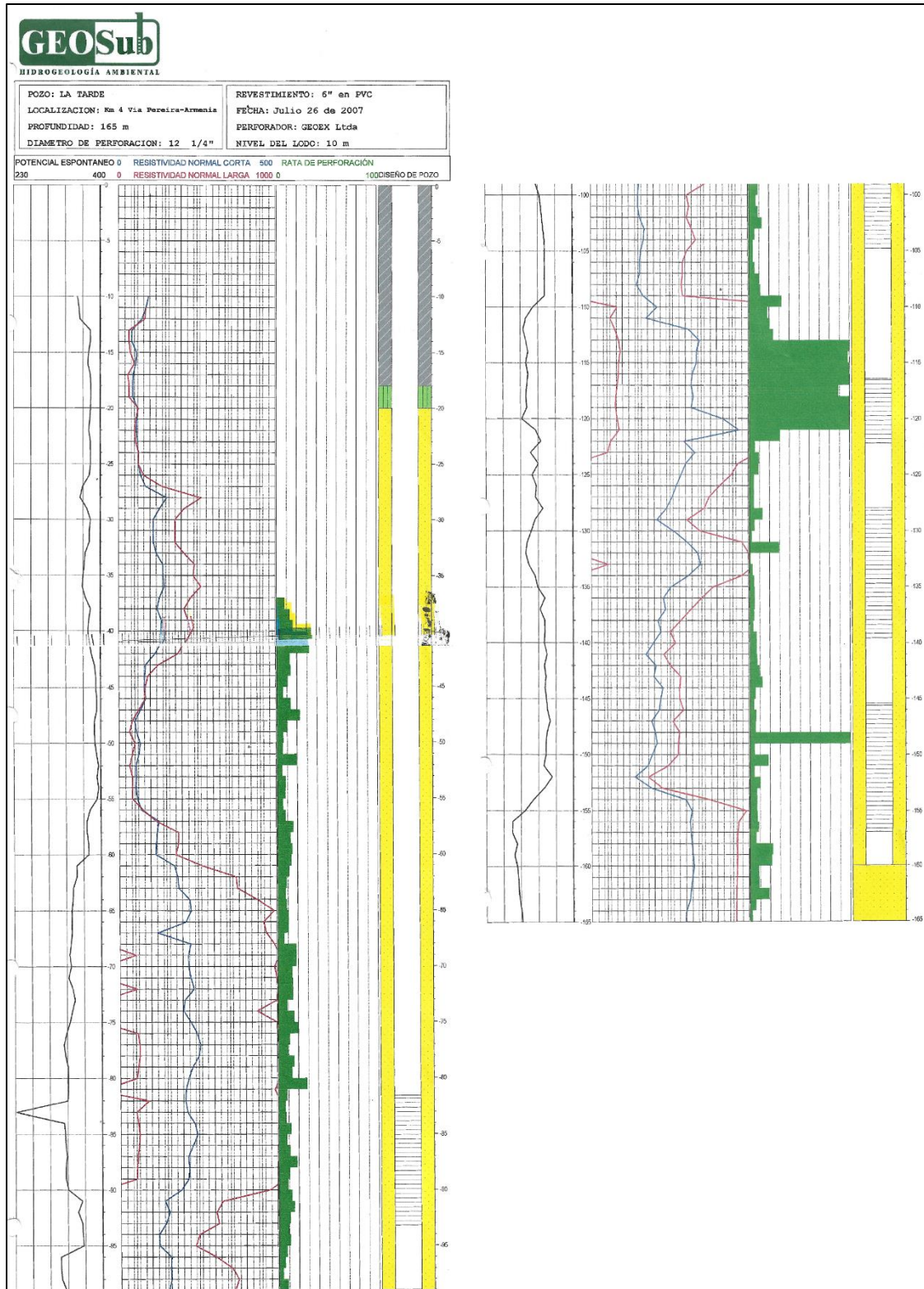


Figura 56. Registro eléctrico pozo La Tarde.

Fuente: GEOSUB S.A.S.