



Modelación hidrogeológica tridimensional estática basada en unidades hidroestratigráficas con Leapfrog Geo en la subcuenca de Dosquebradas, Risaralda

Yerson Andrey Velásquez González

Trabajo de grado presentado para optar al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

Director: Msc. Carlos Marcelo Jaramillo Echeverry, Magíster (MSc) en Ciencias de La Tierra

Universidad de Manizales
Facultad de Ciencias e Ingeniería
Especialización en Sistemas de Información Geográfica
Manizales, Caldas, Colombia

2025

Cita	(Velasquez Gonzalez, 2025)
Referencia	Velasquez Gonzalez Y.A. (2025). <i>Modelación hidrogeológica tridimensional estática basada en unidades hidroestratigráficas con Leapfrog Geo en la subcuenca de Dosquebradas, Risaralda</i> [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
Estilo APA 7 (2020)	



Especialización en Sistemas de Información Geográfica , XXX

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo

Línea de Investigación Análisis y Modelamiento Espacial.

Centro de Investigaciones en Medio Ambiente y Desarrollo - CIMAD.

Declaración de inteligencia artificial: el autor de este trabajo de grado declara que ha utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como ChatGPT, Turnitin, Copilot, Gemini y Deepseek, de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

Biblioteca y Centro de Recursos: <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

Repositorio Institucional: <http://ridum.umanizales.edu.co/>

Universidad de Manizales: www.umanizales.edu.co

Revistas: <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

Fondo Editorial: <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

Dedicatoria

A mis padres y a mi 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, y por iluminar 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.

Agradecimientos

Agradezco a mi asesor de tesis, Marcelo Jaramillo, por su orientación experta y constante apoyo; y a la consultora GEOSUB S.A.S., por su valioso conocimiento, respaldo y por proporcionar información clave para la elaboración de este documento.

Tabla de contenido

Resumen.....	11
Abstract.....	12
Introducción	13
1 Planteamiento del problema.....	14
1.1 Descripción del área problemática.....	14
1.2 Formulación del problema	17
1.3 Antecedentes	19
2 Justificación	24
3 Objetivos.....	26
4 Marco teórico.....	27
4.1 Marco técnico.....	27
4.1.1 Características y propiedades físicas de suelos y rocas.....	27
4.1.2 Hidrogeología.....	29
4.1.3 Geofísica.....	33
4.1.4 Modelación tridimensional	37
4.2 Marco geológico	38
4.3 Marco estructural	43
4.4 Marco hidrogeológico.....	46
5 Metodología.....	51
5.1 Enfoque metodológico	53
5.2 Tipo de estudio.....	54
5.3 Procedimiento	55
6 Resultados	61

6.1 Recopilación de información	61
6.2 Generación de DEM con Sentinel 1.....	63
6.3 Interpretación y elaboración de secciones geoelectrica	66
6.3.1 Ubicación de secciones geoelectricas.....	75
6.3.2 Sección A-A´	76
6.3.3 Sección B-B´	80
6.3.4 Panel tridimensional.....	82
6.4 Modelación tridimensional	84
6.5 Caracterización hidrogeológica	87
7 Discusión.....	94
8 Conclusiones	95
9 Recomendaciones	97
10 Referencias.....	99

Lista de tablas

Tabla 1. Intervalos de porosidad total y eficaz según la granulometría.....	28
Tabla 2. Valores estimados de permeabilidad intrínseca (%).	29
Tabla 3. Rangos de isoresistividad usados para el modelo del abanico de Quindío.....	35
Tabla 4. Localización de SEVs utilizados para la modelación.	61
Tabla 5. Pozos profundos con registro de pozo o litológico.	62
Tabla 6. Interpretación litológica de los pozos profundos con registro de pozo.	67
Tabla 7. Interpretación geológica de los SEVs basado en resistividad y correlación geológica. .	70
Tabla 8. Parámetros geométricos de las unidades litológicas modeladas con el software SIG....	86
Tabla 9. Propiedades hidráulicas de pozos profundos.	88
Tabla 10. Caracterización hidrogeológica.	91

Lista de figuras

Figura 1. Mapa de localización de zona de estudio.	17
Figura 2. Clasificación granulométrica.	27
Figura 3. Acuífero libre.....	30
Figura 4. Acuífero confinado.	31
Figura 5. Acuífero semiconfinado.	32
Figura 6. Zonas de recarga y descarga.	33
Figura 7. Ejemplo de registro de pozo para la interpretación.	37
Figura 8. Ejemplo de un modelo geológico usado con código Modflow en Leapfrog Geo.	38
Figura 9. Abanico del Quindío dividido en abanicos proximales (Ap), abanicos intermedios (Ai) y abanicos distales (Ad).	39

Figura 10. Afloramientos de la Formación Barroso.	41
Figura 11. Mapa geológico de Dosquebradas, Risaralda.....	43
Figura 12. Mapa de principales fallas de área de estudio.	45
Figura 13. Mapa de recarga de la subcuenca de Dosquebradas.....	47
Figura 14. Modelo Hidrogeológico Conceptual Preliminar propuesto para el sistema acuífero de Pereira-Dosquebradas.	50
Figura 15. Resumen del procedimiento para la elaboración del modelo hidrogeológico tridimensional con Leapfrog Geo.	55
Figura 16. Localización de pozos, aljibes y SEVs en la subcuenca de Dosquebradas.	63
Figura 17. Resultado del procesamiento del DEM con SNAP.	64
Figura 18. Comparación entre DEM generado con Sentinel 1 y DEM de la NASA.....	66
Figura 19. Interpretación y correlación de registros de pozos profundos.	67
Figura 20. Ubicación pozos profundos y SEVs interpretados.	75
Figura 21. Localización secciones geoelectricas.	76
Figura 22. Sección geológica A-A´.	79
Figura 23. Sección geológica B-B´.....	81
Figura 24. Panel tridimensional con Sección A-A´ y Sección B-B´.....	83
Figura 25. Basamento Cretácico y espacio de almacenamiento de los depósitos Cuaternarios. ..	84
Figura 26. Modelación de unidades litológicas sobre el basamento Cretácico.	85
Figura 27. Modelación de unidades litológicas Cuaternarias no consolidadas.	86
Figura 28. Sistemas de fallas en la cuenca de Dosquebradas, con evidencia de controles estructurales en los drenajes.....	87
Figura 29. Mapa piezométrico con pozos profundo.	89
Figura 30. Nivel piezométrico la modelación hidrogeológica.....	90
Figura 31. Modelo hidrogeológico conceptual convertido a código MODFLOW.....	93

Siglas, acrónimos y abreviaturas

Símbolo	Término	Unidad SI	Formula
<i>A</i>	Área	m ²	$\iint dx dy$
<i>K</i>	Conductividad Hidráulica	m/s	$K = \frac{Q * L}{A * \Delta h}$
<i>T</i>	Transmisividad	m ² /s	$T = K * b$
<i>Ss</i>	Almacenamiento específico	1/m	$Ss = \rho * g * \alpha + \theta * \beta$
<i>S</i>	Coficiente de almacenamiento	-	$S = Ss * b$
<i>n</i>	Porosidad	-	$n = Vn/Vt$
<i>h</i>	Carga hidráulica	m	$h = z + \psi$

Abreviaturas

Abreviatura	Término
<i>SGC</i>	Servicio Geológico Colombiano
<i>IDEAM</i>	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales
<i>DEM</i>	Digital Elevation Model
<i>CARDER</i>	Corporación Autónoma Regional de Risaralda
<i>POMCA</i>	Plan de Ordenación y Manejo de Cuencas Hidrográficas
<i>SEV</i>	Sondeo Eléctrico Vertical
<i>SRTM</i>	Shuttle Radar Topography Mission
<i>SAR</i>	Synthetic Aperture Radar
<i>ASF</i>	Alaska Satellite Facility
<i>MHC</i>	Modelo hidrogeológico Conceptual
<i>CAR</i>	Corporación Autónoma Regional

Glosario

Coefficiente de almacenamiento: El volumen de agua que un acuífero libera o almacena por unidad de superficie del acuífero por unidad de cambio de altura (prácticamente igual al rendimiento específico en un acuífero no confinado) (Lohman, 1972). En los acuíferos libres el coeficiente de almacenamiento equivale en la práctica a la porosidad eficaz.

Conductividad hidráulica: Parámetro que expresa cuantitativamente la permeabilidad de un material frente a la circulación de un fluido de densidad y viscosidad determinadas. Puede definirse como el volumen de dicho fluido que atraviesa, por unidad de tiempo y bajo el efecto de un gradiente hidráulico unitario, una unidad de superficie perpendicular a la dirección del flujo, en condiciones tales que sea aplicable la ley de Darcy (Instituto Geológico y Minero de España, 2023).

Transmisividad: Parámetro hidrogeológico que representa el producto del coeficiente de permeabilidad por el espesor saturado de acuífero (en un medio isótropo). Puede ser interpretado como el caudal del agua que atraviesa una franja de acuífero, orientada perpendicularmente al flujo, de ancho unitario y bajo un gradiente hidráulico unitario (Instituto Geológico y Minero de España, 2023).

Línea equipotencial: Línea que une puntos con igual potencial o carga hidráulica, en un medio acuífero con flujo bidimensional (considerado en un plano vertical u horizontal). En tres dimensiones se puede definir, de igual manera, una superficie potenciométrica (Instituto Geológico y Minero de España, 2023).

Nivel dinámico: Es la profundidad a la que se encuentra el agua en un pozo mientras está siendo bombeado o explotado. Cuando un pozo se pone en funcionamiento y se extrae agua del acuífero, la presión del agua disminuye en el pozo (Equipozo, 2023).

Nivel estático: Se refiere a la profundidad a la que se encuentra el agua en un pozo cuando no está siendo bombeada y el pozo está en equilibrio hidráulico con el acuífero circundante. En esta situación, la presión del agua en el pozo es igual a la presión hidrostática del acuífero, lo que hace que el nivel del agua se estabilice (Equipozo, 2023).

Nivel freático: Nivel del agua subterránea en un acuífero no confinado, es decir, aquel que está en contacto con la presión atmosférica. Profundidad de la superficie de un acuífero libre con

respecto a la superficie del terreno. Superficie en la zona de saturación de un acuífero libre sometido a la presión atmosférica (IDEAM, 2023).

Nivel piezométrico: Es el nivel al que asciende el agua de un determinado acuífero cuando se mide con un piezómetro o pozo. Es la suma de los términos de energía potencial y de presión, expresados en unidades de longitud (IDEAM, 2023).

Superficie piezométrica: Es una superficie que se proyecta en dos dimensiones (X, Y), y representa la geometría que une los puntos que indican la altura de la tabla de agua en un acuífero a una determinada profundidad en el mismo. Este tipo de superficies son representadas mediante isopiezas (líneas que unen puntos de igual valor del nivel piezométrico), donde el valor de las isopiezas debe ser expresada siempre junto a las mismas y se debe procurar que la separación entre ellas sea equidistante (IDEAM, 2023).

Modelo conceptual hidrogeológico: Comprensión del régimen de flujo de agua subterránea y su interacción con los cuerpos de agua superficial en base del análisis de los datos de campo. Generalmente se construye el modelo numérico en base del modelo conceptual (Gidahatari, 2014). Los modelos hidrogeológicos conceptuales son representaciones en dos o tres dimensiones de las condiciones estáticas y dinámicas de sistemas hidrogeológicos. Esta representación incluye la geometría de los acuíferos, delimitación de unidades hidrogeológicas de acuerdo con sus posibilidades de almacenar y transmitir agua, características hidráulicas de los acuíferos, posición de los niveles piezométricos, condiciones del flujo de las aguas subterráneas y su relación con los componentes del ciclo hidrológico, características hidroquímicas y eventualmente isotópicas y delimitación de zonas de recarga, tránsito y descarga.

Resumen

Esta investigación se centra en la elaboración de un modelo hidrogeológico tridimensional de la subcuenca de Dosquebradas, Risaralda, empleando el software Leapfrog Geo. El estudio surge ante la necesidad de superar las limitaciones de los modelos tradicionales bidimensionales, los cuales han llevado a subestimar la capacidad y comportamiento de los acuíferos. Para ello, se integraron datos geológicos, geofísicos (como los registros de pozos y sondeos eléctricos verticales) y teledetección (a través de DEM generado con Sentinel 1), permitiendo una interpretación detallada de las unidades litológicas y estructurales del subsuelo, a través de la generación de secciones geológicas, panel tridimensional y la modelación tridimensional de las unidades litológicas.

Además, la modelación tridimensional permitió determinar precisión los parámetros geométricos y estimaciones volumétricas de las unidades modeladas, lo que facilitó la interpretación detallada de las estructuras geológicas y mejoró el conocimiento geoespacial del subsuelo de la subcuenca.

Asimismo, las unidades litológicas, fueron caracterizadas con las propiedades hidráulicas de las diferentes formaciones y se establece correlaciones entre los datos obtenidos, lo que resulta fundamental para comprender la dinámica en el sistema acuífero. Los resultados del modelo tridimensional no solo facilitan una mejor visualización y análisis de la distribución espacial del recurso hídrico, sino que también sirven de base para futuros modelos numéricos (como MODFLOW) que permitan simular escenarios de explotación y recarga.

Palabras clave: (Acuífero, Modelo hidrogeológico, Leapfrog Geo , Cuenca hidrográfica, Geoeléctrica, Registro de pozos).

Abstract

This research focuses on developing a three-dimensional hydrogeological model of the Dosquebradas sub-basin in Risaralda using Leapfrog Geo software. The study arises from the need to overcome the limitations of traditional two-dimensional models, which have led to an underestimation of aquifer capacity and behavior. To address this, geological, geophysical (such as well logs and vertical electrical soundings), and remote sensing data (via a DEM generated with Sentinel 1) were integrated, allowing for a detailed interpretation of the lithological and structural units of the subsurface through the creation of geological sections, a three-dimensional panel, and the three-dimensional modeling of the lithological units.

Additionally, the three-dimensional modeling enabled the accurate determination of the geometric parameters and volumetric estimates of the modeled units, which facilitated the detailed interpretation of geological structures and improved the geospatial understanding of the sub-basin's subsurface.

Furthermore, the lithological units were characterized by the hydraulic properties of the different formations, and correlations among the obtained data were established, which is essential for understanding the dynamics within the aquifer system. The results of the three-dimensional model not only provide improved visualization and analysis of the spatial distribution of the water resource but also serve as the basis for future numerical models (such as MODFLOW) to simulate exploitation and recharge scenarios.

Keywords: (Aquifer, Hydrogeological model, Leapfrog Geo, Watershed, Geoelectric, Well logging).

Introducción

La gestión sostenible de los recursos hídricos es un desafío crítico en el mundo contemporáneo, especialmente en regiones que dependen en gran medida del agua subterránea para satisfacer sus necesidades agrícolas, industriales y de consumo humano. La subcuenca de Dosquebradas, ubicada en el departamento de Risaralda, Colombia, no es una excepción. A medida que la demanda de agua crece, también lo hacen las preocupaciones sobre la sobreexplotación, la contaminación y la variabilidad en la recarga de los acuíferos. Una gestión efectiva de este recurso vital exige un conocimiento profundo y detallado de la hidrogeología de la región.

A pesar de la importancia de los acuíferos en la subcuenca de Dosquebradas, la información disponible sobre su estructura y comportamiento es escasa, limitando la capacidad de las autoridades ambientales para realizar una gestión adecuada. Estudios previos han utilizado principalmente modelos hidrogeológicos bidimensionales, que simplifican la complejidad geológica de la región y, como resultado, pueden subestimar las reservas de agua subterránea. Esta situación es particularmente apremiante en los países en desarrollo, donde las herramientas geoespaciales y modelos avanzados, como los proporcionados por Leapfrog Geo y MODFLOW, aún no se han implementado de manera amplia.

La necesidad de un modelo tridimensional (3D) que represente adecuadamente las unidades hidrogeológicas de la subcuenca es, por lo tanto, evidente. La modelación 3D no solo mejora la visualización de la disposición estratigráfica y la interconexión de las unidades, sino que también permite realizar simulaciones numéricas que pueden predecir el comportamiento del acuífero bajo diferentes escenarios de explotación y recarga.

1 Planteamiento del problema

La gestión adecuada de los recursos hídricos subterráneos es un desafío crítico en muchas regiones del mundo, en especial en áreas que dependen en gran medida del agua subterránea para satisfacer sus necesidades de consumo humano, agrícola e industrial y a su vez evitar problemas como la sobreexplotación, la contaminación y la variabilidad en la recarga de los acuíferos.

La falta de un conocimiento detallado sobre la estructura hidrogeológica subterránea y el comportamiento del acuífero, limita la capacidad de las autoridades ambientales para gestionar estos recursos de manera efectiva. A pesar de la importancia de los acuíferos, la información disponible sobre el sistema acuífero de la subcuenca de Dosquebradas es insuficiente para cuantificar y monitorear el recurso. Por lo tanto, se debe construir un modelo tridimensional (3D) detallado, que permita visualizar y comprender la disposición de las unidades hidrogeológicas, su interconexión, y cómo las características geológicas, como fallas y fracturas, influyen en la porosidad y permeabilidad de los acuíferos. El uso de modelos tridimensionales permite estimar la cantidad de agua subterránea disponible y determinar los acuíferos que puedan tener mayor capacidad de almacenamiento.

Adicionalmente, esta modelación tridimensional permitirá realizar modelos numéricos, los cuales son usados para monitorear el comportamiento del acuífero bajo diferentes escenarios de explotación y recarga, estimando la cantidad y variabilidad del recurso hídrico subterráneo.

1.1 Descripción del área problemática

El modelamiento hidrogeológico tridimensional de aguas subterráneas es un pilar para la gestión sostenible de recursos hídricos a nivel global y local, impulsado por avances en software geoespacial (Leapfrog Geo, MODFLOW) y técnicas geofísicas, como la geoeléctrica. No obstante, la mayoría de los países en desarrollo, aún utiliza modelos bidimensionales, que simplifican capas estratigráficas, subestimando reservas de agua subterránea (UNESCO, 2022). Un ejemplo, fue el desarrolló un modelo hidrogeológico en Suecia en la mina Aitik usando el software Leapfrog Geo,

donde finalmente la modelación tridimensional con Leapfrog Geo mejoró significativamente la capacidad para entender y gestionar las condiciones hidrogeológicas en la mina, optimizando las decisiones relacionadas con la operación y el manejo del agua (Río, 2015).

En Colombia, los sistemas acuíferos enfrentan serias problemáticas debido, en gran parte, a la falta de modelación hidrogeológica adecuada. La mayoría de los estudios existentes se basan principalmente en modelos bidimensionales y en modelos tridimensionales esquemáticos, lo que limita la comprensión detallada de la dinámica de estos acuíferos y su interacción con otros componentes del ciclo hidrológico. Esta insuficiencia de modelos apropiados impide la identificación precisa de zonas de recarga y el entendimiento de los mecanismos de flujo en acuíferos confinados y no confinados. Además, la posible sobre explotación de los acuíferos combinado con la escasa disponibilidad de información sobre los acuíferos, se convierte en un reto significativo para la gestión del recurso hídrico. La respuesta de las autoridades ambientales, apenas del 55% ante solicitudes de información, subraya la necesidad urgente de mejorar la caracterización y modelación de estos sistemas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

El Servicio Geológico Colombiano (SGC) ha desarrollado Modelos Hidrogeológicos Conceptuales (MHC) que integran aspectos geológicos, hidrológicos, hidráulicos, hidroquímicos e isotópicos. Sin embargo, el avance en el número de acuíferos caracterizados y las escalas de estudio siguen siendo regionales. Aumentar la aplicación de modelos hidrogeológicos más detallados y robustos es esencial para garantizar una gestión sostenible y efectiva de los recursos de agua subterránea en el país, promoviendo así una mejor toma de decisiones en su uso y conservación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023).

Para la subcuenca de Dosquebradas (Figura 1), la cual se ubica en el flanco occidental de la Cordillera Central colombiana y abarca un área de 148 km² entre los municipios de Dosquebradas y Pereira, es considerada parte del sistema acuífero del abanico del Quindío, siendo un lugar estratégico para el abastecimiento hídrico del área Metropolitana de Centro Occidente. No obstante, el 32% de su superficie del municipio está urbanizada, con una tasa de crecimiento

del 4.3% anual (Alcaldía de Dosquebradas, 2023), lo cual podría interferir en la recarga natural del acuífero.

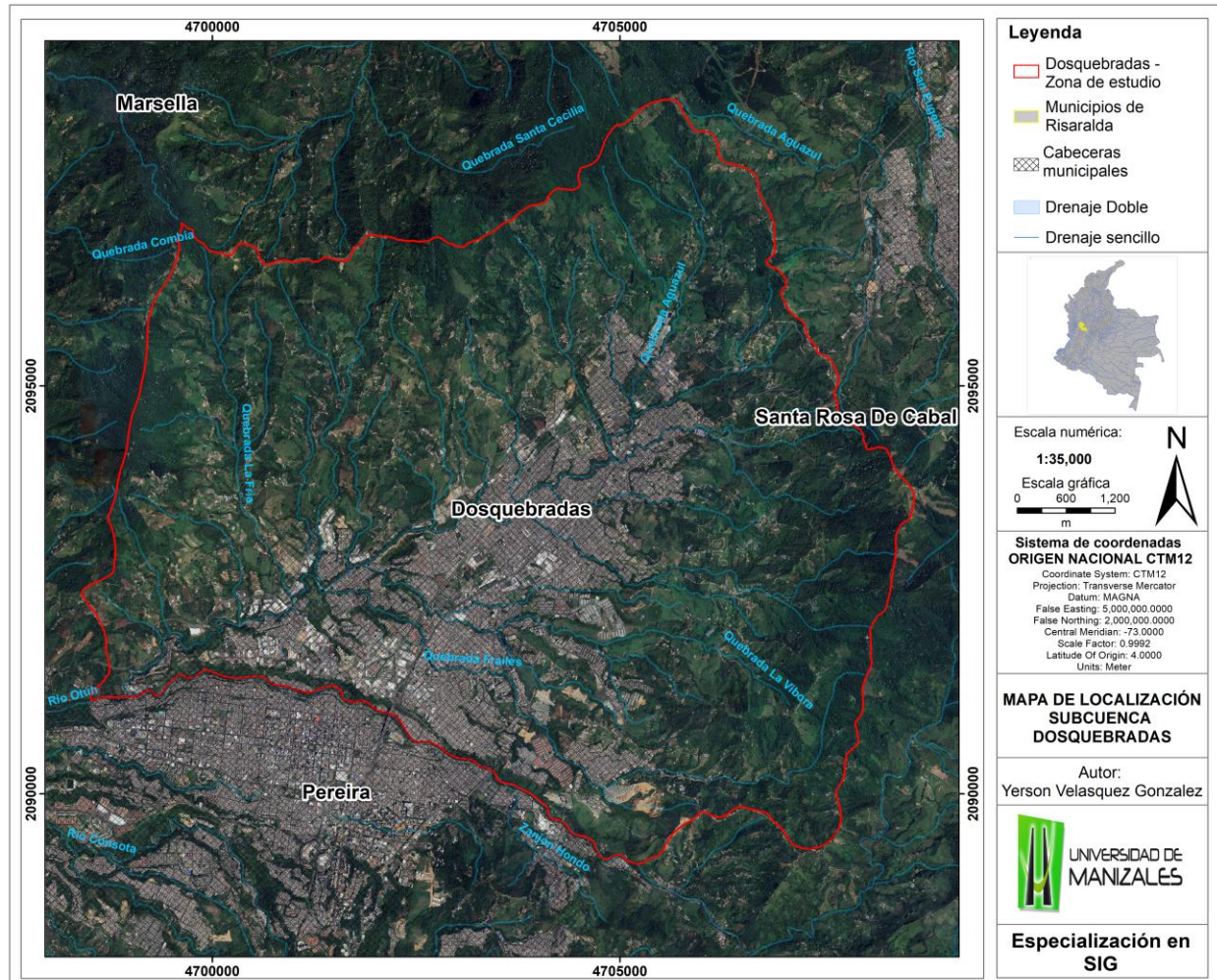
Geológicamente, la subcuenca de Dosquebradas se encuentra en formaciones de origen volcánico, sedimentario y metamórfico que configuran un sistema hidrogeológico diverso. Las fallas geológicas y fracturas presentes en la zona pueden influir en la dirección y velocidad del flujo subterráneo, así como en la capacidad de almacenamiento de los acuíferos. Además, la variabilidad en la conductividad hidráulica y porosidad de las distintas unidades estratigráficas añade un nivel de complejidad que debe ser considerado para el análisis hidrogeológico y poder unificar unidades para la modelación.

La condición actual del modelo hidrogeológico para la subcuenca de Dosquebradas, se basa en los estudios de la caracterización de la hidrogeología en la actualización del POMCA río Otún, donde caracterizó la cuenca en una escala regional y poco detallada para Dosquebradas.

En primer lugar, en este estudio se identificaron varios tipos de acuíferos, incluyendo acuíferos de la Formación Armenia y depósitos aluviales, que presentan variaciones en su capacidad para almacenar y transmitir agua. En segundo lugar, el sistema hidrogeológico muestra zonas de recarga donde el agua superficial se infiltra hacia los acuíferos, así como zonas de descarga donde el agua subterránea emerge en forma de manantiales o alimenta cuerpos hídricos como ríos. Se observa que la dirección del flujo subterráneo es generalmente de oriente a occidente, siguiendo la topografía de la región. Respecto a la calidad del agua, esta ha sido evaluada y se han reportado parámetros fisicoquímicos disponibles para determinar la distribución y condiciones de los acuíferos (CARDER, 2017). A pesar del avance de investigación, la caracterización hidrogeológica se basa en modelos bidimensionales y modelos tridimensionales esquemáticos, sin integrar de manera precisa la ubicación y geometría de las unidades litológicas, que permita caracterizar el modelo hidrogeológico detalladamente.

Figura 1. Mapa de localización de zona de estudio.

Fuente: Autor.



1.2 Formulación del problema

El estrés hídrico mundial es un problema creciente que afecta a casi la mitad de la población, con una cuarta parte de ella enfrentando niveles extremadamente altos de escasez, utilizando más del 80% de su suministro renovable anual de agua dulce. Este fenómeno se ve exacerbado por el crecimiento demográfico y la urbanización, que aumentan la demanda de agua, especialmente en la agricultura, que representa el 70% de las extracciones de agua dulce (UNESCO, 2024).

Las problemáticas del recurso hídrico en Colombia son diversas y complejas, destacándose el desabastecimiento hídrico en muchas regiones, especialmente durante épocas de sequía, debido a la alta demanda, el crecimiento poblacional y la contaminación del agua, provocada por actividades industriales, agrícolas y urbanas. La falta de información y monitoreo sobre la disponibilidad y calidad del agua dificulta la toma de decisiones informadas, mientras que el cambio climático altera los patrones de precipitación y aumenta la frecuencia de eventos extremos (IDEAM, 2022).

Para el departamento de Risaralda, en épocas de fuertes sequías como la más reciente ocurrida en Colombia en los primeros meses de 2024, se reportaron algunos razonamientos preventivos en algunos municipios puntuales (Gobernación de Risaralda, 2024), esto debido a que el recurso hídrico superficial en estas zonas del país son relativamente abundantes. No obstante, en posibles eventos de sequías más fuertes, no sería suficiente el recurso superficial para satisfacer la necesidad de población.

Actualmente, existen varios estudios de las cuencas, registrados en los POMCA del departamento, realizados por la corporación autónoma regional de Risaralda (CARDER). Sin embargo, se deben realizar estudios más detallados, con especial énfasis para el recurso subterráneo, ya que dichos estudios son a escalas regionales y generalizados, con lo cual no es posible cuantificar y monitorear el recurso hídrico disponible.

El acuífero de la subcuenca de Dosquebradas, el cual fue estudiada en el POMCA del río Otún, no considera los espesores reales del acuífero y la geometría de las unidades hidrogeológicas. Por ende, se debe crear un modelo hidrogeológico tridimensional que permita solventar esta necesidad y que permita actualizarse con estudios futuros.

1.3 Antecedentes

A nivel global, Condon et al. (2021) proponen un modelo hidrogeológico global para representar la complejidad y heterogeneidad del agua subterránea a diferentes escalas, capturando la variabilidad en propiedades hidráulicas y la geometría de acuíferos. Este modelo debe contar con un atlas global que ofrezca descripciones en 3D de estratos hidrogeológicos y propiedades asociadas, organizado para ser utilizado en diversos modelos. Además, es crucial implementar estándares coherentes de metadatos para facilitar la integración y actualización de información, apoyados por un sistema de gobernanza comunitaria. También se requiere desarrollar ciberinfraestructura y herramientas computacionales para manejar grandes volúmenes de datos y mejorar la precisión de simulaciones mediante técnicas de asimilación de datos. Esto permitirá ayudar en la gestión sostenible del agua, prever la disponibilidad de recursos y evaluar impactos del cambio climático, apoyando decisiones en la planificación hídrica.

En un acercamiento de obtener información global para el monitoreo del agua subterránea, De Graaf et al. (2015) desarrolló un modelo global de aguas subterráneas para simular la profundidad de las tablas de agua de un acuífero no confinado. Para esto, utilizó el código MODFLOW usando un software SIG a una resolución espacial de aproximadamente 11 km y realizó un análisis de sensibilidad con un marco de Monte Carlo, validando los resultados contra datos de piezómetros. El modelo se parametrizó utilizando datos globales de litología y permeabilidad, así como información de recarga y niveles de agua superficial obtenida del modelo PCRaster Global Water Balance. Esto permitió generar un mapa global de la profundidad de las tablas de agua en un estado natural sin extracción, utilizando herramientas SIG se concluyó que, aunque el modelo brinda una representación útil de la variabilidad espacial de las tablas de agua, tiende a sobreestimar las profundidades en áreas elevadas y no captura bien las zonas con aguas superficiales.

La tecnología de los sistemas de información geográfica (SIG) con métodos estadísticos y geoestadísticos avanzados en la modelación hidrogeológica, destacan por su importancia para evaluar y proteger la calidad del agua subterránea a nivel global. Este enfoque ha mejorado

notablemente la visualización, interpretación y presentación de datos sobre la calidad del agua en grandes escalas espaciales. Las diversas técnicas geoespaciales han sido utilizadas en varios estudios alrededor del mundo, resaltando tanto los logros como las limitaciones que aún persisten en la aplicación de estos métodos integrados en distintas regiones (De Graaf et al., 2015).

En un contexto internacional, Pathak et al. (2018) subrayan la importancia de la incorporación de los sistemas de información geográfica (SIG) en la modelación hidrogeológica. Estos sistemas permiten una gestión eficiente de los datos espaciales y su transferencia entre los modelos geológicos e hidrogeológicos. La utilización de SIG facilita la interpretación espacial de las características del subsuelo, mejorando la precisión de los modelos hidrogeológicos y permitiendo la evaluación detallada de los recursos hídricos subterráneos.

Velasco et al. (2013) desarrollo una plataforma de software que integra herramientas geológicas en 3D y un sistema de información geográfica (SIG) para mejorar la modelación hidrogeológica de medios sedimentarios, especialmente en entornos urbanos. Este enfoque busca facilitar la gestión de datos geológicos e hidrogeológicos complejos, permitiendo una mejor visualización e interpretación de la información.

En el ámbito de la modelación hidrogeológica tridimensional, Åberg et al. (2021) destacan la importancia de definir los contactos de las unidades geológicas a partir del análisis de registros de perforaciones de pozos y datos geofísicos. Utilizando software especializado como Leapfrog Geo, se pueden crear superficies de contacto que delimitan las unidades geológicas, considerando los contactos depositacionales y erosivos.

En investigaciones adicionales, han explorado la integración de métodos geofísicos y la modelación hidrogeológica. Anderson & Woessner (2002) enfatizan en la relevancia de combinar estudios de resistividad, registros de pozos y datos de caudal para construir modelos precisos que reflejan el comportamiento del flujo subterráneo. Asimismo, Fitts (2012) destaca que la validación de los modelos hidrogeológicos requiere la calibración con datos observados, como niveles piezométricos y caudales, asegurando así la fiabilidad de las predicciones.

En estudios realizados en regiones con características hidrogeológicas similares, Gao (2011) implemento modelos hidrogeológicos tridimensionales para evaluar la interacción entre aguas subterráneas y superficiales, utilizando técnicas avanzadas de interpolación y análisis espacial.

En Colombia, estudios previos como los de Suárez (2021), donde se construyó un modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero bajo el casco urbano del municipio de Málaga, Santander, se resalta la metodología, donde se estableció principalmente la geología (la estratigrafía y la geología estructural, utilizando observaciones de campo y estudios geofísicos), hidrología, (incluye el análisis del balance hídrico), hidrogeología (se enfoca en las propiedades hidráulicas de los estratos acuíferos y la identificación de isopiezas) y hidrogeoquímica (examina la composición química e isotópica de las aguas). A través de estos componentes, se identifica un acuífero libre constituido por depósitos coluviales o aluviales, que están siendo alimentados por un inter flujo medio de 434.5 mm/año y cuentan con espesores que oscilan entre 10 y 40 m, compuestos de materiales no consolidados y finos.

En la región Cafetera de Colombia se resalta el estudio del modelo hidrológico realizado por SGC (2016) para el Abanico del Quindío, el cual se centra en la evaluación de las características y dinámicas de los acuíferos en esta región. El análisis abarca tres unidades hidrogeológicas principales; el Abanico Proximal, el Abanico Intermedio y el Abanico Distal, las cuales están compuestas por sedimentos no consolidados a semiconsolidados de origen glacifluvial y volcanoclástico superficiales y profundos, y se analizó la química del agua en diferentes puntos de muestreo, estableciendo un diagnóstico sobre la disponibilidad y calidad del recurso hídrico en la región.

En comparación con el MHC del Abanico del Quindío, el cual se centra principalmente el departamento del Quindío, la actualización del POMCA del río Otún detalla aún más las propiedades hidrogeológicas del departamento de Risaralda, resaltando los municipios de Pereira, Dosquebradas y Santa Rosa de Cabal, en áreas donde se encuentra la cuenca del río Otún. En términos hidrogeológicos, en esta cuenta, se identifican diversos acuíferos, especialmente en las áreas media y baja, que presentan buena potencialidad hidrogeológica. En este estudio se realizó

un inventario de puntos de agua subterránea, que incluye 451 aljibes, 98 pozos y 54 manantiales, resaltando la necesidad de considerar los manantiales en la gestión del recurso hídrico y se proponen modelos bidimensionales para la caracterización de las unidades hidrogeológicas en diferentes zonas de la cuenca (CARDER, 2017). Adicionalmente, con los estudios realizados y recopilados, también han permitido la elaboración de un mapa hidrogeológico que detalla la distribución y comportamiento de los acuíferos, así como un análisis de las características fisicoquímicas del agua en la región y proponen un modelo hidrogeológico conceptual esquemático, resaltando la Formación Armenia como principal unidad acuífera (CARDER, 2023), sin detallar la litología y comportamientos hidráulicos de las unidades.

Continuando con la investigación, CARDER (2023) presentó un estudio sobre el sistema acuífero de Pereira-Dosquebradas, en el departamento de Risaralda. Se centra en la caracterización geológica, hidrogeológica, geomorfológica y de recursos hídricos, ofreciendo un análisis de las unidades hidrogeológicas presentes en la región. A través de la evaluación de datos geofísicos, hidroquímicos y de inventarios, se clasifica el sistema acuífero en diferentes tipos, destacando acuíferos granulares y fisurados. El documento incluye un modelo hidrogeológico conceptual preliminar que ilustra la dinámica del flujo de agua subterránea, las direcciones de flujo, y la relación con características geológicas particulares. críticas como zonas de recarga y sectores vulnerables a la contaminación.

En los municipios de Dosquebradas y Pereira, se han desarrollado diversos estudios hidrogeológicos que han permitido comprender las características del subsuelo y los acuíferos presentes en la región. Serna et al. (2008) y Otálvaro et al. (2009) realizaron un análisis mediante modelos magneto-gravimétricos con el objetivo de caracterizar las formaciones geológicas del subsuelo, identificando las diferentes capas geológicas y su espesor. Estos estudios permiten determinar la distribución de materiales como cenizas volcánicas y depósitos fluviovolcánicos, principalmente para el acuífero de Pereira.

En estudios más locales en Dosquebradas, mediante métodos geoelectrónicos, se han determinado unidades acuíferas potenciales, demostrando las existencias de diferentes unides

acuíferas en la subcuenca de Dosquebradas, siendo de gran interés para el aprovechamiento del agua subterránea (GEOSUB S.A.S., 2015; GEOSUB S.A.S., 2024; Palacios, 1997; GEOEX, 1993; GEOEX, 2002; GEOSUB S.A.S., 2007; GEOSUB S.A.S., 2022; GEOSUB S.A.S., 2016a; GEOSUB S.A.S., 2016b).

Estos antecedentes proporcionan una base para la elaboración de un modelo hidrogeológico tridimensional en la cuenca de Dosquebradas, integrando datos geofísicos, registros de pozos y análisis hidroquímicos, junto con las investigaciones que se han realizado en el área de investigación.

2 Justificación

El desarrollo de un modelo hidrogeológico tridimensional (3D) con Leapfrog Geo para la subcuenca de Dosquebradas es fundamental para comprender la dinámica del agua subterránea, identificar zonas de recarga y descarga, y establecer un marco de referencia para la gestión sostenible de los recursos hídricos, para ello es primordial modelar la disposición y caracterización de las unidades litológicas. Esta investigación es relevante en el contexto actual debido a la creciente demanda de agua para consumo humano, actividades industriales y agrícolas, así como la necesidad de proteger los acuíferos frente a la sobreexplotación y la contaminación.

La modelación permite visualizar y caracterizar la geometría de los acuíferos, identificando las unidades hidrogeológicas, sus límites y conectividad; además, integra datos heterogéneos como registros de pozos, descripciones litológicas y sondeos eléctricos verticales, proporcionando una visión más completa del sistema hidrogeológico. El software Leapfrog Geo se destaca por su capacidad de integrar datos geospaciales y geofísicos de forma dinámica, optimizando la interpretación de las características del subsuelo y facilitando la construcción de modelos complejos, que podrían ser una base científica sólida para la planificación y toma de decisiones por parte de las autoridades ambientales, la construcción de modelos numéricos predictivos usando códigos de MODFLOW o FEFLOW.

En un contexto de cambio climático, los modelos hidrológicos, en combinación con modelaciones numéricas, son herramientas fundamentales para evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos. Estos modelos permiten estimar la sensibilidad del caudal anual medio a variaciones en variables climáticas, como la precipitación y la evaporación potencial (Jones et al., 2006); por ejemplo, Jones et al. (2006), ha encontrado que el caudal medio puede variar aproximadamente un 2.4% por cada 1% de cambio en la precipitación anual. Además, los diferentes modelos, responden de manera distinta a las mismas condiciones climáticas, lo que subraya la importancia de elegir el modelo adecuado para obtener estimaciones precisas en la gestión del agua.

La motivación principal de esta investigación radica en la necesidad de generar un modelo hidrogeológico tridimensional detallado que permita una comprensión más precisa de la estructura hidrogeológica y aumentar el conocimiento del sistema acuífero para la cuantificación y monitoreo del recurso hídrico subterráneo. Adicionalmente, aportar conocimiento sostenible para instituciones gubernamentales y ambientales responsables de la toma de decisiones.

Desde una perspectiva teórica, este proyecto permitirá profundizar en los métodos de interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEV), la integración de registros de pozos y la modelación hidrogeológica mediante el uso de Leapfrog Geo. En el ámbito práctico, se busca proporcionar un modelo base que pueda ser actualizado y empleado en futuras investigaciones, facilitando la planificación del aprovechamiento racional del agua subterránea.

Los resultados de este proyecto beneficiarán a diversos sectores e instituciones, para las autoridades ambientales, proporcionará un modelo que facilite la evaluación y monitoreo de los recursos hídricos, en el ámbito académico, contribuirá al avance del conocimiento sobre la aplicación de metodologías innovadoras en hidrogeología y para las empresas dedicadas a la exploración de recursos naturales, el modelo servirá como una herramienta de apoyo para la planificación de proyectos y la mitigación de impactos ambientales. Siendo este novedoso por la integración de diversas fuentes de información (registros de pozos, SEV, secciones geológicas) en un modelo 3D utilizando Leapfrog Geo, lo cual representa un enfoque innovador para la representación y análisis de los sistemas hidrogeológicos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Construir un modelo hidrogeológico tridimensional de carácter estático para la subcuenca de Dosquebradas, Risaralda, utilizando el software Leapfrog Geo como herramienta SIG especializada en modelación hidrogeológica.

3.2 Objetivos específicos

- Recopilar la información geológica, geofísica e hidrogeológica de la zona de estudio, con el fin de identificar la disposición espacial y continuidad de las unidades acuíferas.
- Generar un modelo de elevación digital (DEM) mediante el procesamiento de imágenes satelitales Sentinel-1, con el propósito de representar y analizar la topografía de la zona de estudio.
- Interpretar la información geoeléctrica y elaborar secciones geológicas, así como un panel tridimensional que permita visualizar la distribución y geometría de las unidades hidrogeológicas.
- Modelar tridimensionalmente las unidades geológicas y los datos estructurales en Leapfrog Geo, que represente el marco hidrogeológico de la subcuenca.
- Definir las propiedades hidráulicas de las unidades hidrogeológicas mediante los diversos estudios realizados, para convertir el modelo a código MODFLOW.

4 Marco teórico

4.1 Marco técnico

4.1.1 Características y propiedades físicas de suelos y rocas

Tamaño de grano:

Las dimensiones de los granos individuales en una roca o depósito, que pueden incluir fragmentos o cristales, se miden generalmente en milímetros o centímetros. Los granos pueden ser isométricos, es decir, con dimensiones iguales en todas las direcciones, o anisométricos, cuando sus dimensiones varían en diferentes direcciones. En algunas rocas, los granos tienen un tamaño uniforme, mientras que en otras se presenta una mezcla de tamaños (Espinoza & Procel, 2022). En la Figura 2 se presenta la clasificación granulométrica para clastos sedimentarios y fragmentos volcanoclásticos, los cuales dependen del tamaño del mineral o clasto en función de milímetros.

Figura 2. Clasificación granulométrica.

Fuente: (Geoxnet, 2016).

Tamaño del clasto o cristal en mm.	Clastos sedimentarios		Fragmentos volcanoclásticos	Rocas cristalinas, ígneas, metamórficas o sedimentarias.
256	Bloques	G R A V A	Bloques y bombas	Grano muy grueso
64	Grava			
16	Gujarro		Lapilli	Grano grueso
4	Granos			
2	Arena muy gruesa	A R E N A	Ceniza gruesa	Grano medio
1	Arena gruesa			
0.5	Arena media			
0.25	Arena fina			Grano fino
0.125	Arena muy fina			
0.032	Limo	L O D O	Ceniza fina	Grano muy fino
0.004	Arcilla			Criptocristalino

FUENTE: INGEMMET

La porosidad total: se refiere al volumen total de espacios vacíos o poros presentes en un material geológico, expresado como un porcentaje del volumen total del material. Representa el espacio disponible dentro del material para albergar agua, aire u otros fluidos.

- Porosidad primaria: Esta porosidad se refiere a los espacios vacíos originalmente presentes en un material durante su formación.
- Porosidad secundaria: También conocida como porosidad inducida, esta porosidad se forma después de la formación inicial del material debido a procesos como la fracturación, la disolución de minerales o la compactación adicional.

Porosidad efectiva (m): La porosidad efectiva se define como la relación entre el volumen de agua que se drena gravitacionalmente de una muestra de material permeable inicialmente saturado y el volumen total de la muestra. En otras palabras, es la fracción del volumen total del material que está formado por espacios vacíos o poros que pueden contener agua. La porosidad efectiva es un parámetro importante para entender cuánta agua puede almacenar y transmitir un material geológico.

En la Tabla 1 se muestra los rangos de valores de porosidad total y efectiva para diferentes tipos de suelos y rocas.

Tabla 1. Intervalos de porosidad total y eficaz según la granulometría.

Fuente: (Bosch, 2014).

Material	Porosidad Total (%)	Porosidad efectiva (%)
Gravas	25 a 40	15 a 35
Arenas	25 a 50	10 a 40
Arenas limosas	20 a 45	3 a 6
Arcillas arenosas	30 a 55	0 a 2
Arcillas	40 a 70	0 a 2
Turba	40 a 75	0 a 1
Caliza micrítica	0 a 6	0 a 1
Caliza carstificadas	1 a 30	0,5 a 25
Rocas cristalinas sanas	0 a 4	0 a 1
Rocas cristalinas sanas fracturadas	1 a 12	1 a 5
Granitos alterados	20 a 45	10 a 30

Permeabilidad o conductividad hidráulica (k): La permeabilidad se refiere a la facilidad con que un material permite el paso del agua a través de él. Se expresa en unidades de velocidad, generalmente en metros por día (m/día). Los materiales con alta permeabilidad, como ciertos tipos de suelos y rocas porosas, permiten un flujo de agua rápido, mientras que los materiales con baja permeabilidad, como arcillas compactas, restringen el flujo de agua y hacen que se acumule en la zona de saturación.

La Tabla 2 presenta los rangos de permeabilidad de acuerdo al tipo de granulometría del suelo.

Tabla 2. Valores estimados de permeabilidad intrínseca (%).

Fuente: (Sanders, 1998).

Permeabilidad Intrínseca	Valores de K	Suelo Tipo
cm/seg		
Muy permeable	>10E-1	Grava gruesa
Moderadamente permeable	10E-1 a 10E-3	Arena, arena fina
Poco permeable	10E-3 a 10E-5	Arena limosa, arena sucia
Muy poco permeable	10E-5 a 10E-7	Limo y arenisca fina
Impermeable	<10E-7	Arcilla

4.1.2 Hidrogeología

Para las definiciones de hidrogeología, geología y algunas referentes a términos geofísicos, se usaron los conceptos fundamentales obtenidos de Sánchez (2022). Las cuales se presentan a continuación:

Acuífugo: Es una formación geológica que no contiene agua, ya que no permite que el agua circule a través de ella. Un ejemplo puede ser rocas graníticas o esquistos inalterados que no se encuentren fracturados.

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.

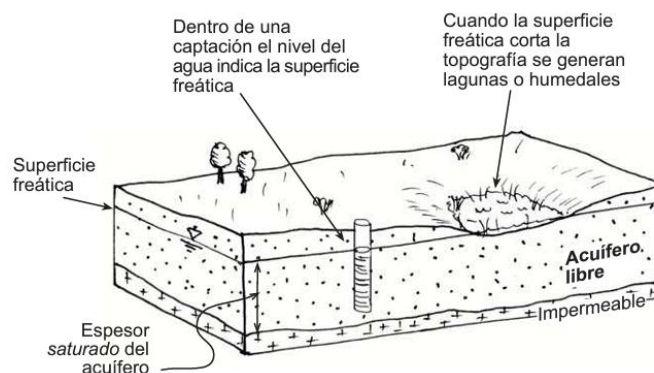
Acuífero: Se refiere a una formación geológica que contiene una cantidad apreciable de agua y permite que esta circule a través de ella con facilidad. Ejemplos de acuíferos son las arenas y gravas, así como ciertas rocas permeables con porosidad secundaria.

Los dos tipos principales de acuíferos son los acuíferos libres y los acuíferos confinados. A continuación, se describen cada uno de ellos:

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 (Figura 3).

Figura 3. Acuífero libre.

Fuente: (Sánchez, 2022).

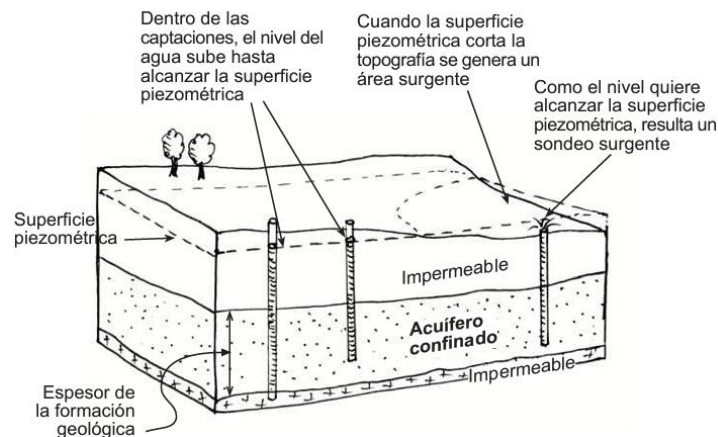


Acuíferos confinados: Los acuíferos confinados, son aquellos en los que el agua se encuentra atrapada entre dos capas de roca o suelo impermeable, una encima y otra debajo del acuífero. Estas

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 4).

Figura 4. Acuífero confinado.

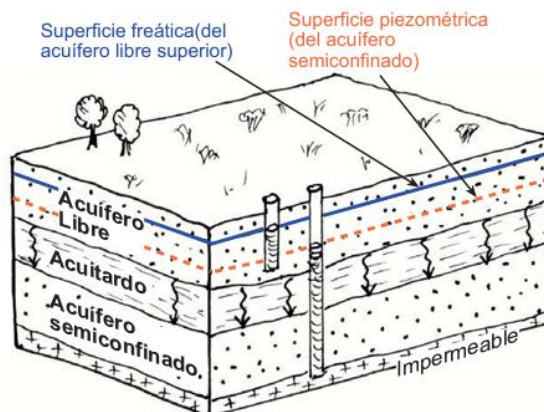
Fuente: (Sánchez, 2022).



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 5).

Figura 5. Acuífero semiconfinado.

Fuente: (Sánchez, 2022).



Nivel piezométrico: Es una medida que indica la profundidad a la que se encuentra el agua subterránea en un pozo, sondeo o en una formación geológica en particular. Se refiere a la altura del agua en relación con un punto de referencia establecido, generalmente el nivel del suelo o algún otro punto de referencia conocido.

El nivel piezométrico se expresa en unidades de longitud, como metros o pies, y puede variar con el tiempo debido a diferentes factores, como las variaciones estacionales de las precipitaciones, la extracción de agua subterránea, la recarga de acuíferos y la geología local.

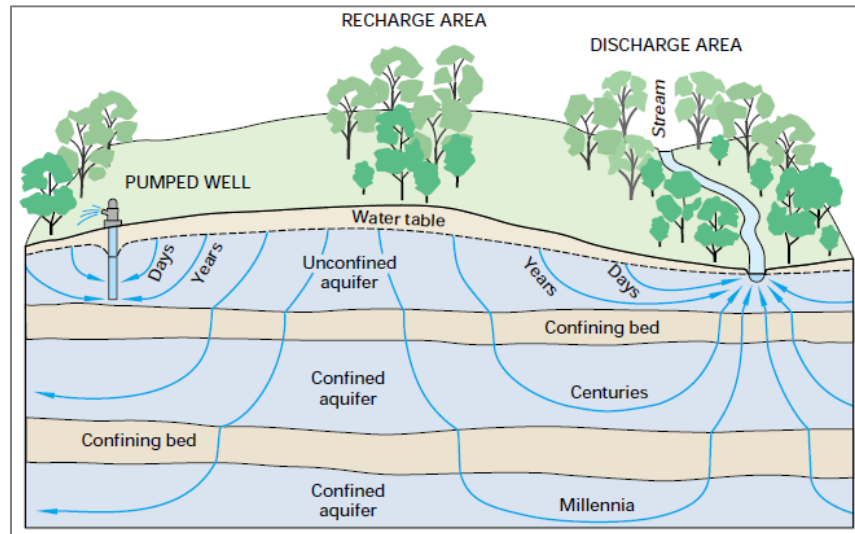
Zonas de recarga: Las zonas de recarga son áreas donde la porosidad primaria o secundaria de suelos, sedimentos y/o rocas permite la infiltración y percolación del agua proveniente de la precipitación atmosférica o de corrientes superficiales hacia los niveles acuíferos.

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.

En la Figura 6 se presenta la ilustración de las zonas de recarga en las partes altas y las zonas de descarga cercanas principalmente a los cuerpos de agua superficial, generalmente corresponden a los niveles base de la región.

Figura 6. Zonas de recarga y descarga.

Fuente: (Winter et al., 1998).



4.1.3 Geofísica

Para los estudios geofísicos, los métodos geoeléctricos como los sondeos eléctricos verticales (SEV) y los registros eléctricos de pozos, son determinantes en la caracterización de las propiedades subterráneas del suelo y las formaciones rocosas, A continuación, se describen los utilizados en esta investigación:

Los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV) son una técnica de prospección geofísica que se utiliza para investigar la estructura del subsuelo mediante la medición de la resistividad eléctrica de los materiales geológicos. La resistividad eléctrica es una propiedad física que mide la oposición de un material al paso de una corriente eléctrica. Los materiales geológicos presentan diferentes valores de resistividad, que dependen de su composición, humedad, temperatura y estructura. La técnica de SEV se basa en el principio de que, al aplicar una corriente eléctrica a través de electrodos en la superficie del terreno, se puede medir el voltaje resultante, lo que permite calcular la resistividad aparente (ρ_a) del subsuelo. A medida que se varía la distancia entre los electrodos, se obtiene información sobre diferentes profundidades del terreno (Sánchez, 2022).

En la Tabla 2 se presentan los rangos de resistividad para diferentes materiales usados en la interpretación del modelo hidrogeológico del abanico del Quindío, realizado por el SGC. Cabe resaltar que estos rangos de isoresistividad no pueden asociarse exclusivamente a un tipo de material debido a la complejidad inherente de las formaciones geológicas. Aunque ciertas litologías presentan valores característicos de resistividad, es importante considerar que las propiedades eléctricas de las rocas y suelos están influenciadas por una variedad de factores. Entre estos, destacan las mezclas granulométricas, el contenido de minerales conductores o no conductores, la salinidad y saturación del agua presente en los poros, y la compactación del material.

Además, una misma unidad litológica puede presentar heterogeneidad interna, como cambios en el tamaño de grano, presencia de fracturas, o variaciones en la distribución del agua subterránea. Por ejemplo, una arenisca puede mostrar rangos de resistividad diferentes según su contenido de arcilla, su porosidad efectiva, o si el agua contenida es dulce o salina.

Por otro lado, unidades geológicas distintas pueden llegar a presentar valores de resistividad similares si sus características físicas y químicas se asemejan, complicando aún más la correlación directa entre los rangos de resistividad y un tipo específico de material. Por estas razones, la interpretación de los datos de isoresistividad debe realizarse en conjunto con información geológica, hidrogeológica y, de ser posible, datos directos de pozos o sondeos.

Tabla 3. Rangos de iso-resistividad usados para el modelo del abanico de Quindío.

Fuente: (SGC, 2016).

Resistividad ($\Omega.m$)	Material	Saturación
1 A 10	Arcillas	
10 A 30	Limos	
30 A 90	Arenas finas	
90 A 180	Arenas medias	
180 A 270	Arenas gruesas	
270 A 540	Arenas muy gruesas	
540 A 1080	Gravas o roca	
MAYOR A 1080	Roca o grava seca	

Sobre los registros de pozos, en hidrogeología se centra en la interpretación principalmente de los registros de resistividad, gamma ray (rayos gamma) y potencial espontáneo (P.E.), que son fundamentales para caracterizar las formaciones geológicas y acuíferas.

La resistividad es una medida de la oposición que presenta un material al paso de una corriente eléctrica, el cual se utiliza para inferir la porosidad y la permeabilidad de las rocas, así como la salinidad del agua subterránea. Los registros de resistividad se obtienen mediante sondas que miden la resistividad de las formaciones a diferentes profundidades (Marín, 2006).

El registro de gamma ray mide la radiación natural emitida por los materiales radiactivos presentes en las rocas, principalmente el potasio, uranio y torio. Este registro es útil para identificar la litología de las formaciones y la proporción de arcillas en comparación con los materiales arenosos o calcáreos. En hidrogeología, un alto conteo de gamma ray generalmente indica la presencia de arcillas, que son menos permeables, mientras que un bajo conteo sugiere la presencia de arenas o gravas, que son más permeables y pueden actuar como acuíferos. La interpretación de los registros de gamma ray permite delinear las unidades litológicas y entender la distribución de los acuíferos en el subsuelo (Marín, 2006).

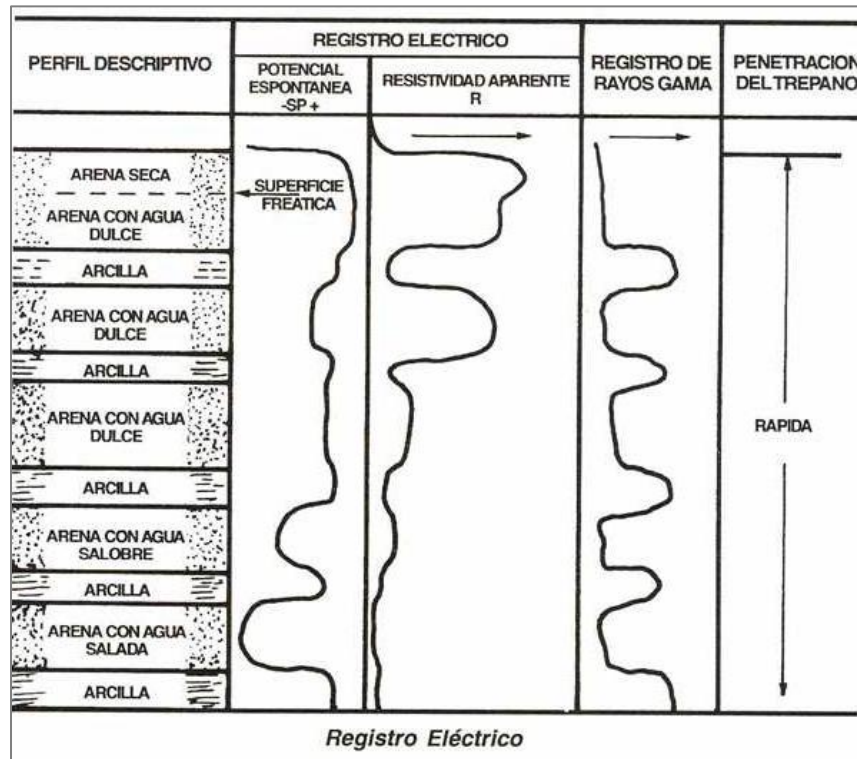
El registro de potencial espontáneo (P.E.) mide las diferencias de potencial eléctrico que se generan en el subsuelo debido a la interacción entre el agua y los minerales de las rocas. Este registro es sensible a la salinidad del agua y a la naturaleza de los sedimentos. En hidrogeología, el P.E. se utiliza para identificar la presencia de agua subterránea y para determinar la salinidad del fluido. Un desplazamiento en la línea base del P.E. puede indicar cambios en la salinidad o en la viscosidad del lodo de perforación, lo que es crucial para la interpretación cuantitativa. La anomalía del P.E. se calcula como la diferencia entre el valor medido y la línea base, lo que permite identificar zonas con características hidrogeológicas específicas (Marín, 2006).

En conjunto, estos registros proporcionan información valiosa para la caracterización de acuíferos, la identificación de facies litológicas y la evaluación de la calidad del agua subterránea, lo que es esencial para la gestión sostenible de los recursos hídricos en una cuenca.

La Figura 7 muestra un ejemplo de interpretación de registros de pozos para agua subterránea, donde se representan las capas litológicas (arena seca, arena con agua dulce, arcilla, arena con agua salobre y arena con agua salada) junto con los registros eléctricos y de rayos gamma. El registro de Potencial Espontáneo (SP) indica diferencias en salinidad y permeabilidad; valores negativos suelen asociarse con arenas permeables y agua dulce. El registro de Resistividad Aparente (R) refleja la conductividad eléctrica, con valores altos en arenas secas y bajos en arcillas o agua salobre/salada. El registro de rayos gamma mide la radiación natural, diferenciando materiales más arcillosos (alta radiación) de arenosos (baja radiación). Esta información combinada permite identificar acuíferos, evaluar su calidad y caracterizar el subsuelo para la explotación sostenible del agua subterránea.

Figura 7. Ejemplo de registro de pozo para la interpretación.

Fuente: (Ingpetol, 2016).



4.1.4 Modelación tridimensional

El modelamiento 3D en hidrogeología es una herramienta integral que permite una comprensión profunda de los sistemas de agua subterránea. La integración de grandes volúmenes de datos geospaciales y temporales permite mejorar la precisión en los modelos. Las herramientas de análisis de datos avanzadas, como el aprendizaje automático, están comenzando a ser utilizadas para identificar patrones y hacer predicciones más precisas sobre el comportamiento de los acuíferos (Cao et al., 2024).

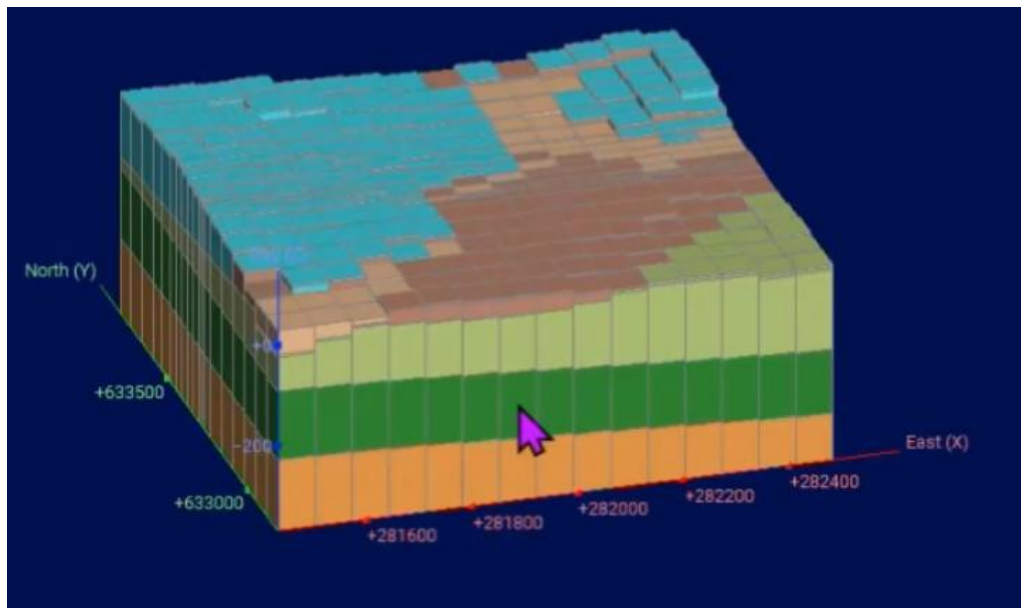
Estos modelos son esenciales para entender cómo se distribuyen y comportan los acuíferos y cómo interactúan las aguas subterráneas con las aguas superficiales. Leapfrog Geo es un software que facilita la creación de estos modelos 3D de manera rápida y precisa, usando datos de campo como registros de pozos y sondeos eléctricos verticales (SEV). Este software es útil en diversas

disciplinas geocientíficas. Además, aunque Leapfrog Geo no simula directamente el flujo de agua, los modelos que genera pueden usarse utilizados con códigos de modelación numérica como MODFLOW, para realizar esas simulaciones y estudiar cómo se comporta el agua a través del subsuelo.

En la Figura 8 se presenta un ejemplo de la conversión de un modelo geológico elaborado en Leapfrog Geo, el cual fue convertido a código MODFLOW como base para un modelo hidrogeológico numérico. Es importante resaltar que este software no realiza modelaciones numéricas, no obstante, permite generar la división de grillas para ser procesado con otro software de modelamiento numérico hidrogeológico.

Figura 8. Ejemplo de un modelo geológico usado con código Modflow en Leapfrog Geo.

Fuente: (SEEQUENT, 2023).



4.2 Marco geológico

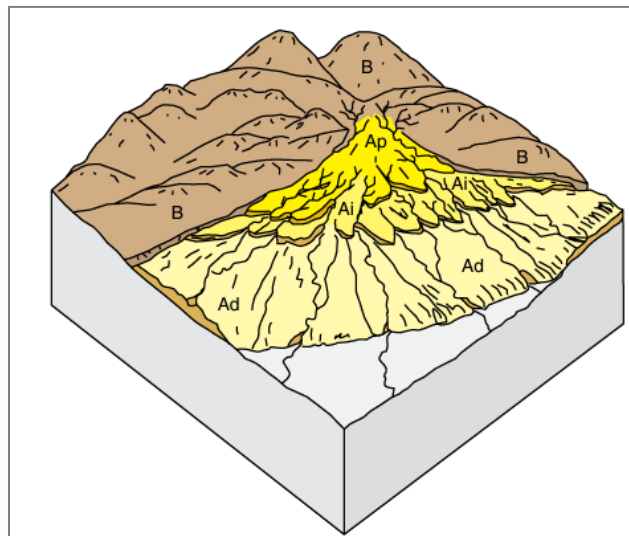
El marco geológico regional del departamento de Risaralda, Colombia, se caracteriza por una compleja interacción tectónica resultante de la convergencia de varias placas tectónicas,

incluyendo la Placa Nazca y la Placa Sudamericana. Esta región forma parte de los Andes colombianos y presenta una variedad de estructuras geológicas que han sido influenciadas por procesos de subducción, colisión y deformación (Suter et al., 2008).

La geología regional del Abanico del Quindío, también conocido como la Formación Armenia, se caracteriza por una serie de sedimento Cuaternarios que son no consolidados a semiconsolidados, y que se han depositado en ambientes fluviales, glacifluviales y volcanoclásticos. Esta unidad geológica se divide en tres conjuntos: abanicos proximales, intermedios y distales, que están relacionados con ciclos de depositación y eventos de tectonismo, volcanismo y cambios climáticos (Espinosa, 2020) (Figura 9).

Figura 9. Abanico del Quindío dividido en abanicos proximales (Ap), abanicos intermedios (Ai) y abanicos distales (Ad).

Fuente: (Espinosa, 2020).



Para el caso específico de la geología del municipio de Dosquebradas se utilizó la memoria explicativa de la cartografía geológica a escala 1:200.000 de la plancha de Pereira (Caballero A. & Zapata G., 1984), la cual incluye al municipio de Dosquebradas. Esta información permitió identificar y describir las principales unidades geológicas que afloran en el territorio. A

continuación, se describen las unidades geológicas aflorantes del municipio y en la Figura 11 el mapa geológico:

Complejo Quebradagrande (Kvc, Ksc)

Este complejo incluye secuencias volcánicas (Kvc) y sedimentarias (Ksc) localizadas en el flanco occidental de la Cordillera Central, al occidente de la falla de San Jerónimo. Las rocas volcánicas, principalmente de composición basáltica, exhiben tonos verdosos y se encuentran hacia el sureste de Dosquebradas, limitando con Pereira. En contraste, las secuencias sedimentarias incluyen limolitas, arcillolitas, lodolitas y grauvacas, frecuentemente afectadas por metamorfismo dinámico. Estas rocas afloran hacia el noroeste del municipio, en áreas cercanas a la vereda Miracampo (Marsella). Estudios previos han identificado estas unidades bajo las denominaciones de Formación Quebradagrande (Botero, 1963) y Complejo Metasedimentario-volcánico de Aránzazu-Manizales (Lozano, 1975).

Rocas Máficas de Pereira (Kgp)

Asociadas a la Falla de Romeral, estas rocas tienen composición variable entre gabro y diorita. Presentan un grado de meteorización avanzada y afloran principalmente en el corregimiento de Las Marcadas y quebradas como Esmeraldas, Manizales, y Sabanitas. Su textura masiva y composición diorítica-gabroide son características notables.

Complejo Arquía (Kiea, Kies)

Este complejo litodémico, de naturaleza metamórfica, aflora al oeste de la Falla Silvia-Pijao. Incluye esquistos cloríticos y anfibolíticos (Kiea), además de esquistos sericíticos (Kies), con alto contenido de grafito que les confiere su color negro. Estas unidades son comunes en sectores como Aguazul y Boquerón, aunque los afloramientos son limitados debido a la cobertura de cenizas volcánicas.

Formación Barroso (Kvb)

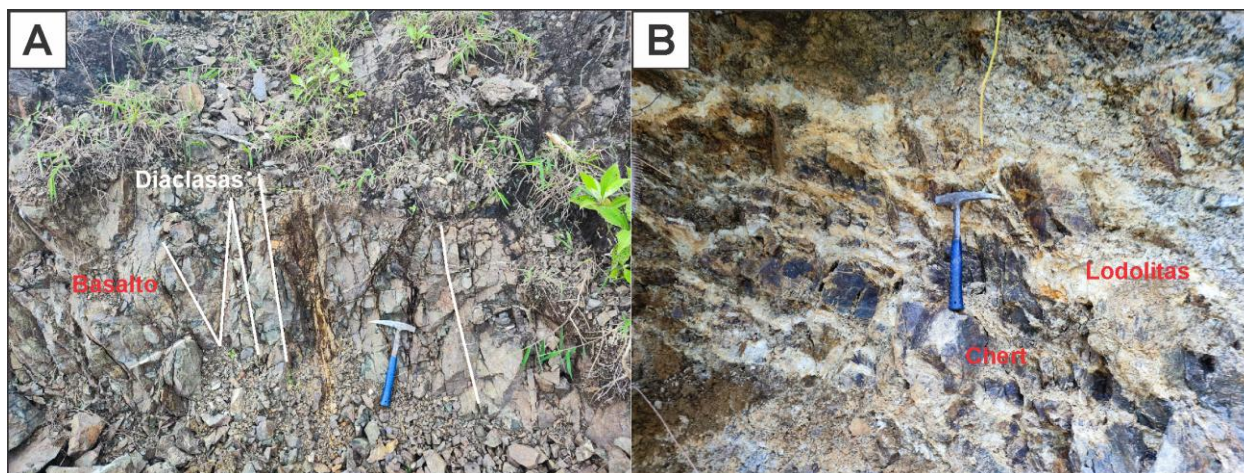
Corresponde a un complejo volcánico lávico y volcano-clástico del Grupo Cañasgordas, localizado hacia el oeste del municipio y extendiéndose hasta Pereira y Marsella. Incluye basaltos,

espilitas y diabasas, acompañadas de lavas almohadilladas y brechas volcánicas. Estas características reflejan su origen en procesos volcánicos de composición básica.

En la Figura 10 se presenta dos afloramientos de la Formación Barroso, la Figura A corresponde a la secuencia volcánica, en la cual se presentan basaltos altamente fracturados, en las cuales se puede analizar alteración entre las mismas y la evidencia de porosidad secundaria debido al posible desplazamiento de fluidos hidrotermales y en la Figura B se presenta un afloramiento de una secuencia sedimentaria de chert y lodolitas alteradas, se resalta en las rocas la capacidad de resistencia a la alteración. Los dos afloramientos se localizan en la reserva natural del Alto del Nudo, ubicados en el municipio de Dosquebradas.

Figura 10. Afloramientos de la Formación Barroso.

Fuente: Autor.



Nota: La Figura A corresponde a un afloramiento de basaltos altamente fracturados y la Figura B corresponde a una intercalación de lodolitas y chert con alteración superficial.

Rocas Hipoabisales Porfídicas

De composición andesítica, estas rocas intrusivas subvolcánicas del Mioceno afloran en áreas reducidas, principalmente al noroeste del municipio, en contacto con la Formación Barroso.

Formación Armenia (TQgp)

La Formación Armenia es una unidad geológica que se caracteriza principalmente por su composición de rocas sedimentarias y volcánicas. Esta formación incluye una variedad de materiales, como arenas, limos y arcillas, que se han depositado en un ambiente fluvial y volcánico. La Formación Armenia es conocida por su heterogeneidad, presentando capas de sedimentos que varían en tamaño y composición, lo que refleja un proceso de sedimentación complejo influenciado por la actividad volcánica en la región. Además, se asocia con acuíferos que pueden ser de mediana productividad, lo que la convierte en una unidad importante para el abastecimiento de agua en el área.

Velasquez (2023) presenta una columna estratigráfica ilustrativa de la Formación Armenia, levantada en la vía que conduce de Pereira a Armenia en el sector de la vereda Huertas, donde la litología se caracteriza por depósitos de flujos de escombros y lodos, compuestos por bloques, guijos y guijarros mal seleccionados, inmersos en una matriz limo-arenosa con ligera plasticidad, con clastos son subredondeados. La composición de los clastos es predominantemente lítica volcánica, incluyendo tobas, basaltos y andesitas.

Flujos de Lodo Volcánicos (Qfl)

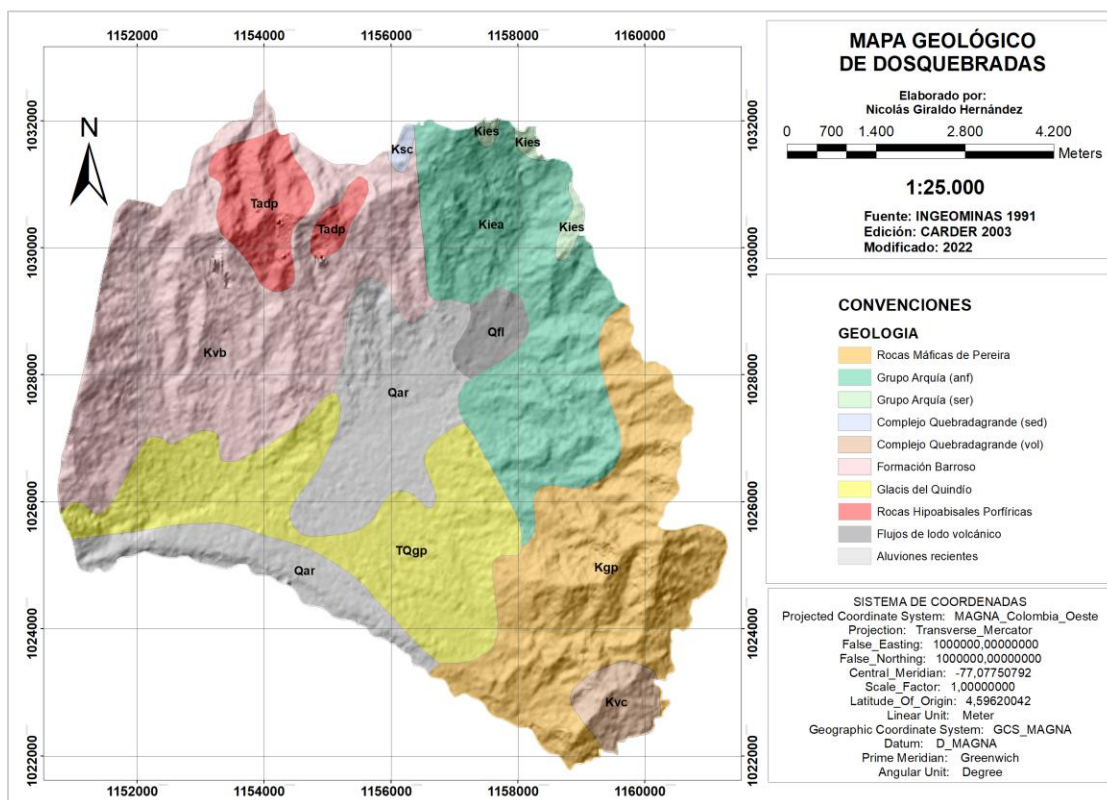
Constituidos por material piroclástico, cenizas y fragmentos de rocas volcánicas, estos flujos (lahares) son prominentes en áreas como el río Otún y sus alrededores. Forman pendientes pronunciadas, lo que los hace especialmente relevantes en el análisis de riesgos geológicos.

Aluviones Recientes (Qar)

Estos depósitos Cuaternarios se encuentran en los valles de las quebradas, constituidos por bloques, gravas, arenas y limos, cuya composición depende de las rocas madre presentes en la cuenca hidrográfica.

Figura 11. Mapa geológico de Dosquebradas, Risaralda.

Fuente: (Giraldo, 2022).



4.3 Marco estructural

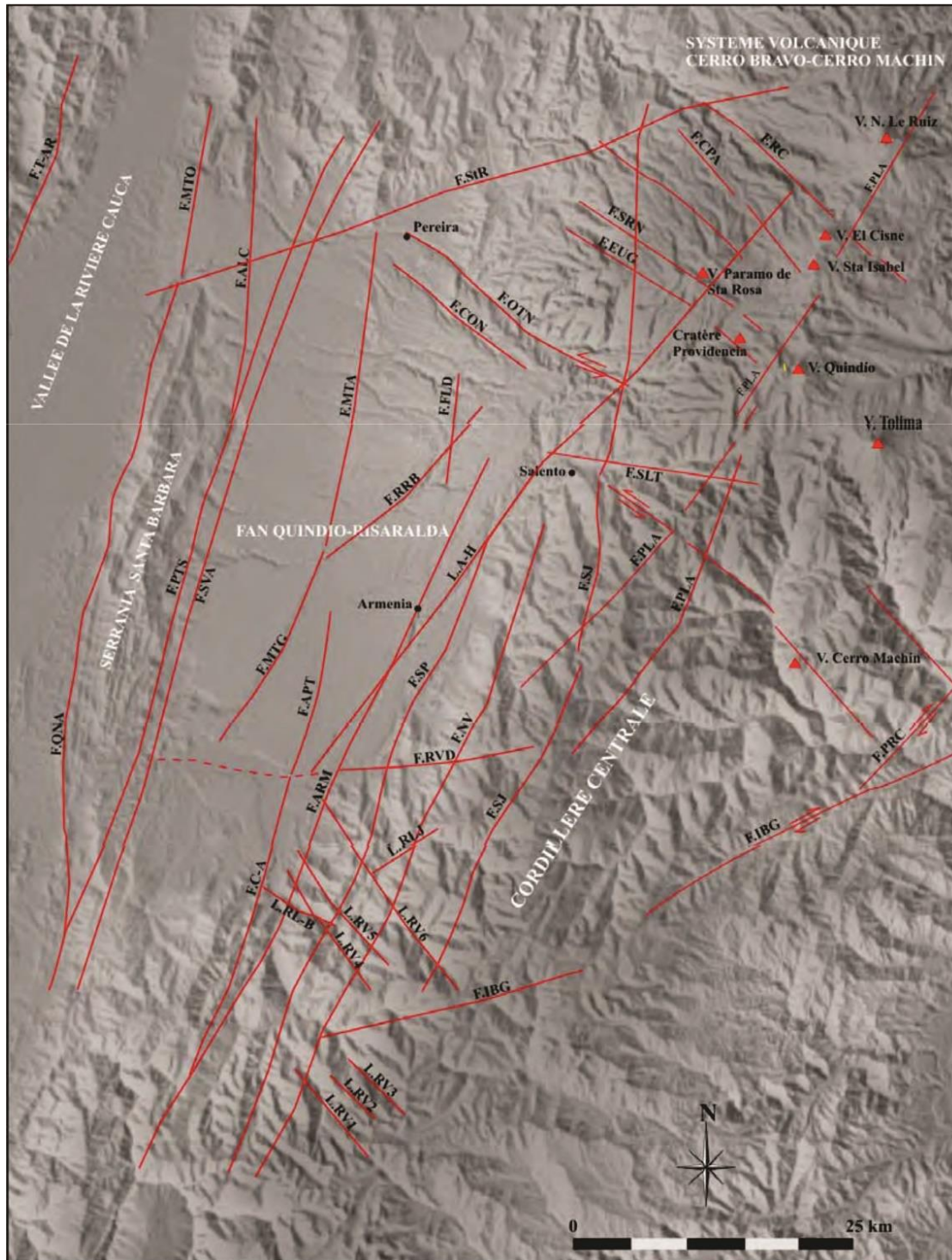
Las principales fallas que afectan la geología del municipio de Dosquebradas corresponden a la Falla Otún (F.OTN) y la Falla Santa Rosa (F.StR), donde la Falla Otún tiene una dirección de N57°W y se extiende a lo largo de aproximadamente 34.8 km, controlando el curso del río Otún, lo que implica que su dinámica influye en la geomorfología y en el comportamiento hidrológico de la región. La Falla Otún está compuesta por seis segmentos que, en dirección al sureste, están desplazados por fallas dextrales de dirección NE-SW, pertenecientes al sistema de fallas Palestina (Guarín, 2008). Se ha documentado que el bloque norte de la falla se ha elevado aproximadamente 5 cm en un periodo de 20 años, lo que indica actividad tectónica reciente y potencialmente activa en la zona (James, 1985).

La falla Santa Rosa es de tipo normal, lo que significa que se ha formado principalmente por tensiones que han provocado el desplazamiento de bloques de roca, siendo común en áreas donde se experimentan fuerzas extensionales (Guarín, 2008). La actividad de la Falla Santa Rosa ha influido en la geomorfología de la zona, afectando el drenaje y la formación de valles, contribuyendo a la creación de características topográficas distintivas en el paisaje de Dosquebradas (Guarín, 2008).

En la Figura 12 se presentan las principales fallas en el abanico del Quindío, donde las principales fallas para el municipio de Dosquebradas son la falla Otún (F.OTN) y falla Santa Rosa (F.StR).

Figura 12. Mapa de principales fallas de área de estudio.

Fuente: (Guarín, 2008).



4.4 Marco hidrogeológico

La hidrogeología de la cuenca del río Otún, en la cual hace parte de la subcuenca de Dosquebradas, se localiza en la vertiente occidental de la Cordillera Central, comenzando en el caño Alsacia a una altitud de 3980 m.s.n.m. y desembocando en el río Cauca a 875 m.s.n.m., tras un recorrido de 60.8 km en dirección ESE-WNW. La cuenca incluye importantes afluentes como el río Azul, río Barbo, río San José, quebrada Combia y quebrada Dosquebradas. Desde el punto de vista hidrogeológico, se han identificado dos categorías principales de acuíferos; aquellos con flujo intergranular, que presentan una buena potencialidad hidrogeológica, y aquellos considerados como impermeables o con recursos limitados de aguas subterráneas. Los acuíferos en la cuenca del río Otún son principalmente de tipo libre, con espesores que varían entre 60 y 300 m, y capacidades específicas que pueden alcanzar hasta 7 l/s/m (CARDER, 2017).

La recarga de estos acuíferos se produce principalmente a través de la infiltración de aguas superficiales, mientras que la descarga se manifiesta en manantiales y en el flujo hacia el río Otún. La dinámica del agua subterránea en la cuenca muestra una tendencia de flujo en sentido oriente-occidente, que es concordante con el flujo superficial (CARDER, 2017). En la Figura 13 se presenta el mapa de recarga elaborado por la CARDER para el POMCA del río El Otún para una escala regional, con una resolución espacial de 1 : 25.000, para el procesamiento del estudio de la cuenca, donde se observa que, para el municipio de Dosquebradas, se presenta en general una recarga baja a moderada teniendo como referencia la cuenca del río El Otún.

incluyen flujos de lodo volcánico (Qfl), depósitos piroclásticos (Qpr) y aluviones recientes (Qar) (Bustamante Porras & Reyes López, 2013).

Según Otálvaro et al. (2009), el acuífero de Dosquebradas se clasifica como un acuífero con moderada productividad, correspondiente a los depósitos de fluvioiacustres de la zona (Qdq). La presencia de acuíferos de carácter local interdigitados con el acuífero principal sugiere que puede haber conexiones hidráulicas entre ellos, lo que es relevante para entender la dinámica del flujo de agua y la recarga del acuífero. Por último, la heterogeneidad litológica de los depósitos de fluvioiacustres también influye en la productividad del acuífero, ya que la variabilidad en la composición y estructura de los sedimentos puede afectar la capacidad de almacenamiento y el flujo de agua subterránea.

El comportamiento hidráulico del Sistema Acuífero de Pereira-Dosquebradas muestra una capacidad específica promedio de 0,13 l/s/m, lo que lo posiciona como un sistema acuífero de baja capacidad específica. Este valor permite clasificarlo como un sistema en el que el flujo es predominantemente granular o intergranular, característico de acuíferos discontinuos de extensión local y baja productividad. No obstante, este rango también podría incluirlo dentro de la clasificación de acuíferos discontinuos de extensión regional y local, igualmente de baja productividad. Adicionalmente, el acuífero presenta un caudal promedio de 5,81 L/s, con una conductividad hidráulica (K) global que varía entre $2,63 \times 10^{-1}$ m/d y $5,39 \times 10^{-4}$ m/d, y una transmisividad (T) que oscila entre $8,41 \times 10^{-2}$ m²/d y $2,98 \times 10^1$ m²/d (CARDER, 2023).

En términos de infraestructura hídrica, se han identificado un total de 21 pozos en Dosquebradas, que forman parte de un sistema más amplio de captación de aguas subterráneas. Estos pozos son utilizados para el abastecimiento de agua en zonas rurales y urbanas, y se complementan con aljibes y manantiales que también contribuyen a la disponibilidad de agua en la subcuenca. De un total de 331 puntos de captación analizados en la cuenca del río Otún, 254 han sido considerados productivos, lo que resalta la importancia de las aguas subterráneas en la región (CARDER, 2017).

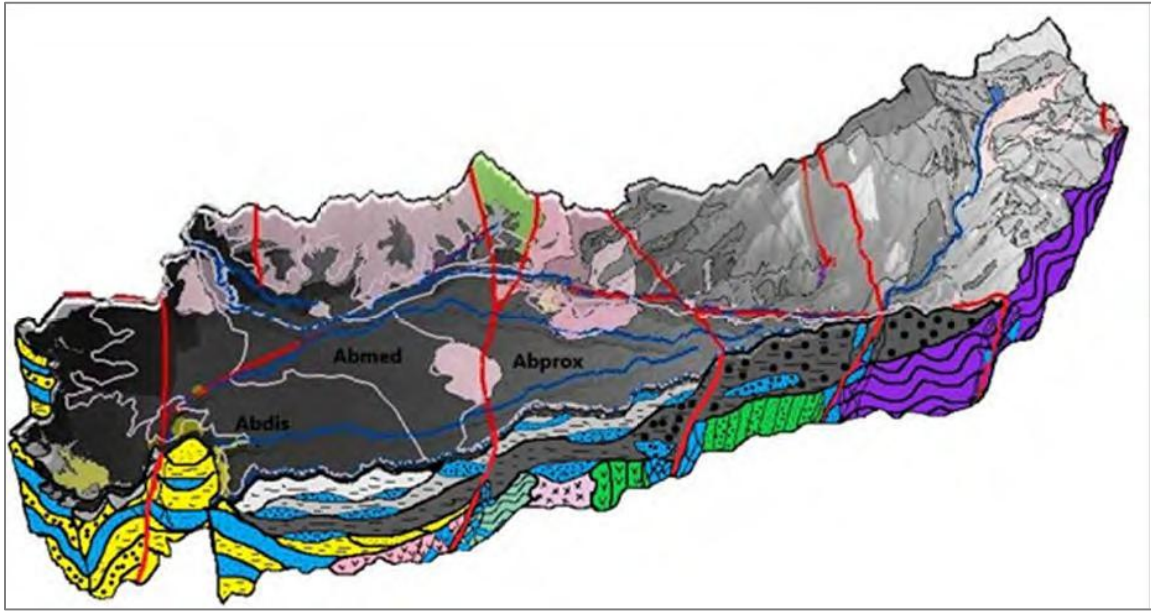
CARDER (2023), determino la dirección de flujo de agua subterránea, con unas tendencias regionales hacia el noroeste (NW), dirigiéndose hacia el acuífero del río Cauca. Este flujo se desarrolla a lo largo de una equipotencial que varía desde altitudes de 1770 m hasta 1100 m. Además, se observan flujos locales que contribuyen a los ríos Consotá y La Vieja.

Además, la generación del modelo hidrogeológico conceptual preliminar que propone CARDER (2023), para el sistema acuífero de Pereira-Dosquebradas se fundamenta en una evaluación de datos geológicos, geomorfológicos, geofísicos, hidrológicos, hidroquímicos e hidráulicos. En la región de Risaralda identificaron cinco unidades hidrogeológicas, siendo la Formación Pereira-Armenia la más relevante desde el punto de vista hidrogeológico. Esta formación se caracteriza por su capacidad de almacenamiento y transmisión de agua, lo que la convierte en un recurso vital para el abastecimiento de agua en la zona. Otras unidades significativas incluyen UL Cedral-Ceila y UL La Romelia-El Pollo, que también desempeñan un papel importante en la dinámica del acuífero (CARDER, 2023) (Figura 14).

El modelo describe contactos entre las unidades hidrogeológicas que están marcados por inconformidades estratigráficas, resultado de procesos erosivos y deposicionales. Estas inconformidades influyen en la distribución y características de los acuíferos, afectando la recarga y descarga de agua subterránea. La formación presenta un comportamiento hidráulico caracterizado por una capacidad específica promedio baja, con valores de 0,13 l/s/m. La conductividad hidráulica global varía entre $2,63 \times 10^{-1}$ m/d y $5,39 \times 10^{-4}$ m/d, mientras que la transmisividad se encuentra en un rango de $8,41 \times 10^{-2}$ m²/d a $2,98 \times 10^1$ m²/d (CARDER, 2023).

Figura 14. Modelo Hidrogeológico Conceptual Preliminar propuesto para el sistema acuífero de Pereira-Dosquebradas.

Fuente: (CARDER, 2023).



5 Metodología

La metodología utilizada para la construcción del modelo hidrogeológico tridimensional en la subcuenca de Dosquebradas se desarrolló siguiendo un enfoque cuantitativo y descriptivo, basado en la integración de información geológica, geofísica e hidrogeológica. Este proceso se estructuró en varias etapas que permitieron alcanzar de manera secuencial y coherente cada uno de los objetivos específicos planteados.

En primer lugar, se llevó a cabo la recolección y compilación de información preexistente para la construcción del modelo, esta etapa incluyó la obtención de información hidrogeológica propia de la subcuenca de Dosquebradas, estudios geológicos, geofísicos y cualquier reporte o informe que contenga datos hidráulicos que se puedan correlacionar (Araujo, 2017). Se priorizó los registros geológicos obtenidos mediante perforaciones, registros eléctricos y sondeos eléctricos verticales (SEV), los cuales permitieron delinear las diferentes unidades hidrogeológicas del subsuelo.

Para la interpretación de los registros de pozos profundos, se analizó los registros de resistividad, potencial espontáneo y *gamma ray*, junto con la descripción de la columna estratigráfica. El resultado de la interpretación se compiló en tablas con intervalos de profundidad y las unidades litológicas identificadas. Posteriormente, con la interpretación de los registros de los pozos profundos, se interpretó las resistividades de los SEVs, los cuales se basaron en la interpretación litológica del pozo profundo más cercano, correlacionando el rango de resistividad junto con la interpretación litológica en el rango de profundidad similar, siendo estos compilados también en tablas y ubicados espacialmente.

Por otra parte, se integró y analizó información geoespacial para la interpretación de los diferentes componentes superficiales, para ello se utilizó el sistema de proyección cartográfica oficial para Colombia, decretado en la Resolución N0. 370 de 2021, en la cual se establece la proyección "Transverse Mercator" como el sistema oficial de coordenadas planas, con un único origen denominado "Origen Nacional" (IGAC, 2021). Por tal motivo, todos los mapas, tablas y

modelos utilizaron este sistema de coordenadas. De la información geoespacial utilizada se destaca el uso de un modelo de elevación digital para analizar el terreno, drenajes de la cuenca que pueden estar influenciados por controles estructurales, cartografía geológica y ubicación de los elementos hidrogeológicos y geofísicos como los pozos profundos y los SEVs.

Adicionalmente, para mayor precisión y correlación de la información, se generó un modelo de elevación digital (DEM) con datos de Sentinel-1, el cual comienza con la selección de pares de imágenes que tengan un corto temporal baseline, idealmente entre 6 y 12 días, y un perpendicular baseline entre 150 y 300 metros. Sumando a esto, se realizó un preprocesamiento que incluye la corrección radiométrica y geométrica de las imágenes y luego se genera un interferograma utilizando software de procesamiento SAR, como SNAP, a partir de las dos imágenes seleccionadas. Finalmente, se llevó a cabo un postprocesamiento para corregir errores sistemáticos y mejorar la calidad del DEM.

Se utilizó un DEM generado con datos de Sentinel-1 debido a que ofrece varias ventajas sobre los DEMs descargables, como los de SRTM. En primer lugar, puede proporcionar una resolución espacial más alta, capturando detalles topográficos finos que otros DEMs pueden pasar por alto. Además, al utilizar radar de apertura sintética (SAR), permite la generación de DEMs en condiciones de nubosidad y durante la noche, lo que es útil en climas adversos.

También, los DEMs de Sentinel-1 pueden ser más actualizados, reflejando cambios recientes en el terreno, como deslizamientos o alteraciones por actividades humanas. Sin embargo, es importante considerar que la calidad del DEM puede verse afectada por la de correlación de fase en áreas vegetadas (Braun, 2021).

Por otra parte, con la información interpretada se elaboraron dos secciones geológicas transversales, utilizando la información de los pozos profundos, los SEVs, alturas extraídas del DEM y criterio técnico, que representen la disposición de las diferentes unidades geológicas en la subcuenca. Para ello, se utilizó el software AutoCAD, el cual está enfocado para elaborar diseños de medidas exactas, posibilitando la integración de la información en un modelo bidimensional

con medidas exacta, partiendo de un enfoque cuantitativo en zonas con información de los espesores reales y cualitativa en áreas de mayor incertidumbre, que fueron interpretadas a partir de criterio geológico. Estas secciones fueron fundamentales para visualizar la estructura del subsuelo, identificando posibles discontinuidades, como fallas geológicas. Además, se realizó un panel tridimensional con las secciones generadas, que representen la geología del área de estudio en el software Leapfrog Geo.

Con la información definida, se construyó el modelo hidrogeológico tridimensional (3D) utilizando el software Leapfrog Geo, integrando de manera dinámica la información de los pozos profundos, los SEVs y las secciones geológicas. Durante esta etapa, se crearon superficies de las capas interpretadas y se realizaron correcciones con trazos tridimensionales para tener un modelo coherente con la interpretación realizada a partir de las secciones geológicas, mostrando los volúmenes de las unidades litológicas.

Para definir el modelo con información hidrogeológica, se integraron los datos de los parámetros hidráulicos obtenidos, caracterizando el sistema. Se estableció la porosidad, conductividad hidráulica, transmisividad y niveles piezométricos, de acuerdo a la litología y las pruebas hidráulicas de los pozos profundos (Garzón, 2002).

Finalmente, el modelo hidrogeológico en tres dimensiones resultante, se convirtió a código MODFLOW mediante el mismo software (Leapfrog Geo), con el fin de dejar la discretización de las unidades hidrogeológicas y realizar modelaciones numéricas en estudios futuros. Este proceso, se ejecutó para mostrar la importancia del modelamiento hidrogeológico y las posibilidades para predecir, monitorear y cuantificar el recurso hídrico subterránea a partir de un modelo estático y actualizable.

5.1 Enfoque metodológico

El enfoque de metodológico para la investigación se basó en una metodología mixta, que combino tanto métodos cuantitativos como cualitativos.

Cuantitativo: El estudio se basó en la recolección y análisis de datos numéricos, como los registros geofísicos de resistividad, la información hidrogeológica de los pozos (por ejemplo, niveles freáticos, conductividad hidráulica y niveles altimétricos) y los resultados de los sondeos eléctricos verticales (SEV). Estos datos cuantitativos son esenciales para la creación de un modelo que refleje las condiciones del acuífero y las características hidráulicas del subsuelo.

Cualitativo: Paralelamente, el estudio incluyó la interpretación de información geológica y la construcción de secciones geológicas, procesos que requieren un enfoque cualitativo para comprender y representar la disposición de estratos, características de las diferentes unidades hidrogeológicas y demás condiciones propias del mismo sistema. Este análisis cualitativo fue fundamental para identificar zonas de interés, como fallas geológicas, que pueden no estar completamente definidas por los datos cuantitativos.

El enfoque mixto es adecuado porque permite combinar la precisión de los datos numéricos con la interpretación detallada de las características geológicas, resultando en un modelo hidrogeológico en tres dimensiones más completo y específico.

5.2 Tipo de estudio

El tipo de estudio para la realización del modelo hidrogeológico tridimensional emplea los siguientes enfoques cuantitativos:

Estudio Descriptivo:

En el análisis de variables hidrológicas e hidrogeológicas, se procedería a recopilar datos actuales de diversas variables relevantes, como la geología, características hidrogeológicas y las condiciones topográficas.

Simultáneamente, se llevó a cabo una caracterización hidrogeológica de la zona de estudio, evaluando la geología y las condiciones geofísicas. El propósito fue identificar las unidades

litológicas e interpretar su relación con el agua subterránea, con el fin de realizar estimaciones de volúmenes y/o condicionantes para el flujo del agua subterránea.

5.3 Procedimiento

A continuación, se detalla el procedimiento para elaborar el modelo hidrogeológico conceptual, integrando información de estudios hidrogeológicos, geológicos y geofísicos, en la Figura 15 se presenta el resumen de las actividades principales a realizar.

Figura 15. Resumen del procedimiento para la elaboración del modelo hidrogeológico tridimensional con Leapfrog Geo.

Fuente: Autor.



1. Recolección de información

El primer paso fue recolectar y compilar todos los datos relevantes que serán utilizados para construir el modelo. Estos datos incluyen:

Datos geológicos: Información sobre la litología, estructura geológica, descripciones de núcleos de perforación, mapas geológicos y perfiles estratigráficos, cabe resaltar que únicamente se utilizó aquella información que presenta espesores reales y se encuentra dentro del área de estudio.

Datos geofísicos: Resultados de sondeos eléctricos verticales (SEVs), tomografía de resistividad eléctrica, registros eléctricos de pozos y otros métodos geofísicos que proporcionen información sobre las propiedades físicas del subsuelo.

Datos hidrogeológicos: Información sobre los niveles freáticos, niveles piezométricos, pruebas de bombeo, caudales de pozos que permitan caracterizar los acuíferos.

2. Generación de DEM con Sentinel 1

Selección de Imágenes: Se utilizó la herramienta de el ASF Baseline Tool para identificar pares de imágenes con un corto temporal baseline (idealmente 6-12 días) y un perpendicular baseline entre 150 y 300 metros.

Preprocesamiento de Imágenes: Se realizó el preprocesamiento de las imágenes, que incluye la corrección radiométrica y geométrica, así como la calibración de las imágenes SAR.

Generación del Interferograma: Se utilizó el software de procesamiento de imágenes SAR (SNAP) para crear un interferograma a partir de las dos imágenes seleccionadas. Este interferograma contiene información sobre las diferencias de fase entre las imágenes.

Filtrado y Desenfoque: Se aplicó filtros para reducir el ruido en el interferograma y mejorar la calidad de la señal. Esto puede incluir técnicas como el filtrado de Goldstein o el filtrado de Lee (Braun, 2021).

Extracción de Elevación: Se utilizó el interferograma filtrado para extraer la información de elevación. Esto implica convertir las diferencias de fase en información de altura utilizando la geometría del radar y el modelo de terreno.

Postprocesamiento: Se realizó un postprocesamiento para corregir errores sistemáticos y mejorar la calidad del DEM final.

3. Interpretación y elaboración de secciones geoelectricas

Interpretación y correlación de información: Se realizó la interpretación de los registros de pozo disponibles, priorizando el análisis del registro de resistividad, ya que este se presentaba en todos los registros utilizados. Los demás registros complementarios (potencial espontáneo, *gamma ray*) y las columnas litológicas documentadas se utilizaron para calibrar y validar los resultados, asegurando coherencia entre las mediciones eléctricas, radiactivas y las observaciones geológicas directas.

Posteriormente, en AutoCAD, los registros de todos los pozos fueron escalados vertical y horizontalmente para homogenizar sus escalas de profundidad y magnitud, ajustándolos a un mismo nivel de referencia, que permitiera comparaciones precisas. Una vez escalados, los pozos se agruparon según su cercanía geográfica y similitudes estratigráficas, facilitando la correlación de capas entre zonas adyacentes. Con esta base, se procedió a interpretar las capas litológicas; mediante la integración de los datos de resistividad, *gamma ray* y potencial espontáneo, se definieron unidades geológicas coherentes. Esta interpretación transversal, respaldada por las columnas litológicas observadas, permitió generar un modelo estratigráfico simplificado.

Finalmente, se realizó la correlación entre las resistividades obtenidas de los SEVs y la interpretación de los registros de pozo, con el objetivo de ajustar las capas resistivas identificadas en los SEVs a las capas definidas en los registros de pozo, los cuales proporcionaban información más detallada y confiable. Para los SEVs ubicados a mayor distancia de un pozo profundo, la

interpretación se basó en el rango de resistividad de cada capa y su correspondencia con las unidades geológicas presentes en la zona.

Construcción de secciones geológicas: Para el desarrollo de las secciones geológicas, se realizaron dos transectos transversales en la subcuenca de Dosquebradas, con el propósito de representar la disposición espacial de las unidades hidrogeológicas. El proceso inició con la digitalización de los registros de resistividad de los pozos profundos y los rangos de las capas resistivas obtenidas de los sondeos eléctricos verticales (SEVs), utilizando el software AutoCAD. Esta etapa permitió integrar y organizar la información de forma precisa, facilitando la correlación entre los datos geofísicos y los registros directos de perforación.

Para garantizar una adecuada representación del relieve y la ubicación de las unidades geológicas, se utilizó el perfil topográfico obtenido a partir del Modelo de Elevación Digital (DEM), lo que permitió ajustar las secciones geológicas a las variaciones del terreno. La interpretación de las capas se basó en la correlación de las resistividades de los SEVs con los registros de pozo, priorizando aquellos pozos con mayor información y confiabilidad. En los sectores donde no existían pozos cercanos, la interpretación se fundamentó en los rangos de resistividad característicos de cada unidad geológica, considerando su posición relativa en el subsuelo.

Las secciones geológicas obtenidas permitieron identificar la continuidad y variabilidad lateral de las unidades hidroestratigráficas, así como reconocer posibles discontinuidades, como fallas o cambios litológicos. Además, la integración de los datos en AutoCAD facilitó la visualización detallada de las relaciones espaciales entre las diferentes unidades geológicas, asegurando un control preciso en la correlación de la información.

Importación de datos y generación de panel tridimensional en Leapfrog Geo

Una vez interpretados los datos, el siguiente paso es prepararlos para su importación en Leapfrog Geo:

Importación de datos topográficos y superficiales: Se importó el DEM como la topografía del terreno del modelo y los elementos superficiales como los drenajes y contactos superficiales, para ser considerados en los trazos del modelamiento.

Importación de interpretaciones litológicas: Las capas litológicas interpretadas de los registros de los pozos profundos y SEVs, fueron importados en Leapfrog Geo. Esto incluye la información de las profundidades de las formaciones litológicas identificadas y los niveles estáticos de los pozos profundos.

Importación de secciones geológicas: Las secciones geológicas generadas fueron importadas al software de modelado tridimensional utilizando las coordenadas de inicio y final, junto con su respectiva profundidad. Al tratarse de transectos transversales, se modificó un panel tridimensional que permitió visualizar de manera más clara la distribución de las unidades litológicas. Este panel facilitó el trazado de líneas sobre las secciones y la calibración de las superficies que delimitan los volúmenes de las litologías representadas.

Este proceso fue fundamental para ajustar el modelo geoespacial en áreas con menor densidad de información, permitiendo una interpretación más coherente y continua de la geología del sitio. La integración de las secciones en el entorno tridimensional mejoró la precisión del modelo al correlacionar las unidades geológicas a partir de los datos disponibles y asegurar una representación más realista de la disposición del subsuelo.

4. Modelación tridimensional con Leapfrog Geo

Utilizando la herramienta de modelado implícito de Leapfrog Geo, se generaron superficies geológicas a partir de los datos importados. Este proceso consistió en crear superficies de contacto litológico mediante la integración de las interpretaciones de los pozos profundos, los sondeos eléctricos verticales (SEVs) y los trazos de las secciones geológicas. Para mejorar la precisión del modelo en áreas con menor cantidad de información, se incorporaron trazos tridimensionales que permitieron ajustar con mayor detalle la ubicación y continuidad de las unidades geológicas.

En la modelación, se definió el basamento Cretácico como la unidad más antigua, caracterizada por un contacto erosivo que sirvió como límite inferior del modelo. Además, se estableció una secuencia estratigráfica para representar de manera coherente las unidades litológicas Cuaternarias, permitiendo una adecuada diferenciación y continuidad de los materiales más recientes en el subsuelo. En adición, se importaron los trazos de las fallas geológicas para ser interpretadas con los trazos de los drenajes y las unidades modeladas.

5. Caracterización hidrogeológica

A cada unidad litológica modelada se le asignaron parámetros hidráulicos, como la conductividad hidráulica, la transmisividad y la porosidad, con base en los resultados de los ensayos de bombeo de informes y las características propias de cada litología.

Asimismo, se modeló el nivel piezométrico en las áreas con mayor concentración de pozos, utilizando los datos disponibles para representar de manera más detallada la superficie piezométrica, lo que permitió visualizar la relación del nivel con las unidades hidrogeológicas presentes en el sistema acuífero.

Conversión para código Modflow: El modelo tridimensional generado en Leapfrog Geo fue convertido a código MODFLOW utilizando las herramientas integradas en el mismo software. Este proceso permitió trasladar la geometría y las propiedades hidrogeológicas de las unidades modeladas a un formato compatible con simulaciones numéricas de flujo de agua subterránea. El modelo convertido se dejó como base para futuras modelaciones numéricas, proporcionando una estructura detallada y coherente que puede ser utilizada para analizar el comportamiento del sistema acuífero bajo diferentes condiciones hidráulicas y escenarios de gestión.

6 Resultados

6.1 Recopilación de información

Se obtuvieron datos de 36 pozos profundos y de monitoreo del POMCA del río El Otún, así como la ubicación de 70 aljibes distribuidos en la subcuenca de Dosquebradas. Adicionalmente, se recopiló un total de 33 sondeos eléctricos verticales (SEVs) con información de resistividad respecto a la profundidad, los cuales permiten modelar las unidades hidrogeológicas.

Cabe resaltar que, de los pozos profundos identificados, solo en 8 casos se tuvo acceso a los registros de perforación, lo que limitó el nivel de detalle en ciertas áreas, también se descartaron SEVs identificados en otros estudios debido a que no presentaban información de los valores de resistividad en profundidad, lo que limitaba su uso para la elaboración del modelo. A pesar de esta restricción, la combinación de estas fuentes de información permitió establecer un marco confiable para la interpretación de la distribución de las unidades hidroestratigráficas en la región.

En la Tabla 4 se presenta los sondeos utilizados para la modelación hidrogeológica con su respectiva fuente y en la Tabla 5 se presenta la ubicación de los 8 pozos profundos, de los cuales se tuvo acceso a la información de registro eléctrico y/o litológico.

Tabla 4. Localización de SEVs utilizados para la modelación.

Fuente: Autor.

Ubicación	ID	X (m)	Y (m)	Altura (m)	Fuente
La Badea	SEV 1	4699913.4	2091678.75	1439	(GEOEX, 1993)
La Badea	SEV 2	4700344.25	2091888.93	1444.85	(GEOEX, 1993)
La Badea	SEV 3	4699988.08	2091922.28	1422.71	(GEOEX, 1993)
Barrio Libertadores	SEV 4	4705596.44	2094389.03	1450.53	(Palacios, 1997)
Barrio Los Pinos	SEV 5	4704923.86	2095754.05	1416.18	(Palacios, 1997)
Barrio Girasol	SEV 6	4704718.59	2092678.86	1536.82	(Palacios, 1997)
Barrio Frailes	SEV 7	4705112.84	2090415.31	1570.96	(Palacios, 1997)
Planta Nicole	SEV 8	4702315.62	2091500.02	1513	(GEOEX, 2002)
Planta Nicole	SEV 9	4702107.92	2091529.07	1548.23	(GEOEX, 2002)
Planta Nicole	SEV 10	4702225.01	2091356.35	1460.26	(GEOEX, 2002)

Ubicación	ID	X (m)	Y (m)	Altura (m)	Fuente
La Semilla	SEV 11	4705053.36	2090052.76	1462.19	(GEOSUB S.A.S., 2015)
La Semilla	SEV 12	4704977.96	2090041.37	1459.21	(GEOSUB S.A.S., 2015)
La Semilla	SEV 13	4704848.6	2090054.13	1538.81	(GEOSUB S.A.S., 2015)
Planta Zarpollo	SEV 14	4699046.35	2091242.01	1535.55	(GEOSUB S.A.S., 2016b)
Planta Zarpollo	SEV 15	4698807.78	2091261.17	1535.45	(GEOSUB S.A.S., 2016b)
Planta Zarpollo	SEV 16	4698986.31	2091329.57	1335.11	(GEOSUB S.A.S., 2016b)
Planta Zarpollo	SEV 17	4698991.43	2091248.6	1325.68	(GEOSUB S.A.S., 2016b)
Planta Zarpollo	SEV 18	4698654.1	2091240.54	1328.78	(GEOSUB S.A.S., 2016b)
Planta Zarpollo	SEV 19	4698544.64	2091194.06	1331.96	(GEOSUB S.A.S., 2016b)
La Badea	SEV 20	4700979.32	2091693.73	1322.12	(GEOSUB S.A.S., 2016a)
La Badea	SEV 21	4700796.7	2091642.68	1317.53	(GEOSUB S.A.S., 2016a)
La Badea	SEV 22	4701203.67	2091465.52	1452.9	(GEOSUB S.A.S., 2016a)
Planta Cartón y papel	SEV 23	4703810.33	2093608.76	1446.35	(GEOSUB S.A.S., 2022)
Planta Cartón y papel	SEV 24	4703744.65	2093483.26	1414.25	(GEOSUB S.A.S., 2022)
Planta Cartón y papel	SEV 25	4703917.23	2093594.35	1465.74	(GEOSUB S.A.S., 2022)
Planta Austin Reed	SEV 26	4702726.26	2091395.66	1465.08	(GEOSUB S.A.S., 2007)
Planta Austin Reed	SEV 27	4702732.64	2091449.69	1467.68	(GEOSUB S.A.S., 2007)
Planta Austin Reed	SEV 28	4702509.81	2091339.97	1458.77	(GEOSUB S.A.S., 2007)
Alto Nudo	SEV 29	4699944.74	2096683.18	1457.53	(GEOSUB S.A.S., 2024)
Alto Nudo	SEV 30	4699929.42	2096706.25	1460.21	(GEOSUB S.A.S., 2024)
OMNES	SEV 31	4704020.56	2092459.58	1971.85	(CARDER)
POSTOBON 2	SEV 32	4702736.572	2092367.633	1936.13	(CARDER)
POSTOBON 3	SEV 33	4703040.651	2092452.763	1477.78	(CARDER)

Tabla 5. Pozos profundos con registro de pozo o litológico.

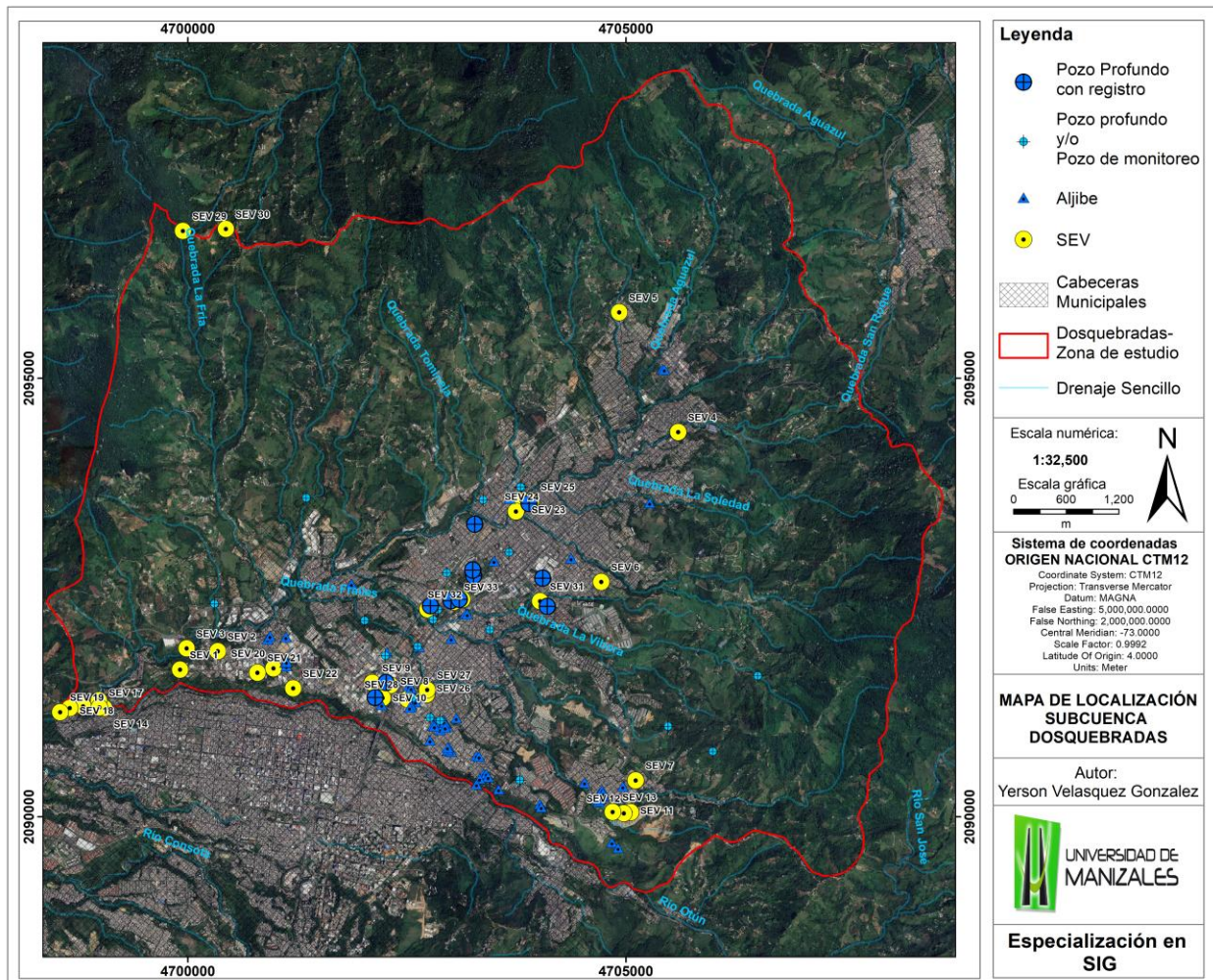
Fuente: Autor

Pozo Profundo	X (m)	Y (m)	Altura (m)	Max_Prof (m)	Fuente
Nicole S.A.	4702140.67	2091360.96	1460.44	180	(Arias, 1993)
La Rosa	4703262.76	2092748.49	1460.98	230	(Arias, 1993)
Omnes P #1	4704103.67	2092398.45	1482.58	86	(Arias, 1993)
Omnes P #2	4704050.61	2092721.77	1482.81	220	(Arias, 1993)
Cartones y Papeles	4703895.72	2093572.7	1467.32	225	(Arias, 1993)
Postobón P #2	4702770.71	2092406.44	1452.47	130	(Arias, 1993)
Postobón P #3	4703006.06	2092465.03	1454.99	130	(Arias, 1993)
Papeles Regionales	4703276.7	2093336.9	1453.17	100	(Arias, 1993)

En la Figura 16 se presenta el mapa de localización de los datos de pozos profundos y de monitoreo, aljibes y SEVs, resaltando los pozos de los cuales se obtuvieron registro eléctrico para su interpretación.

Figura 16. Localización de pozos, aljibes y SEVs en la subcuenca de Dosquebradas.

Fuente: Autor.



6.2 Generación de DEM con Sentinel 1

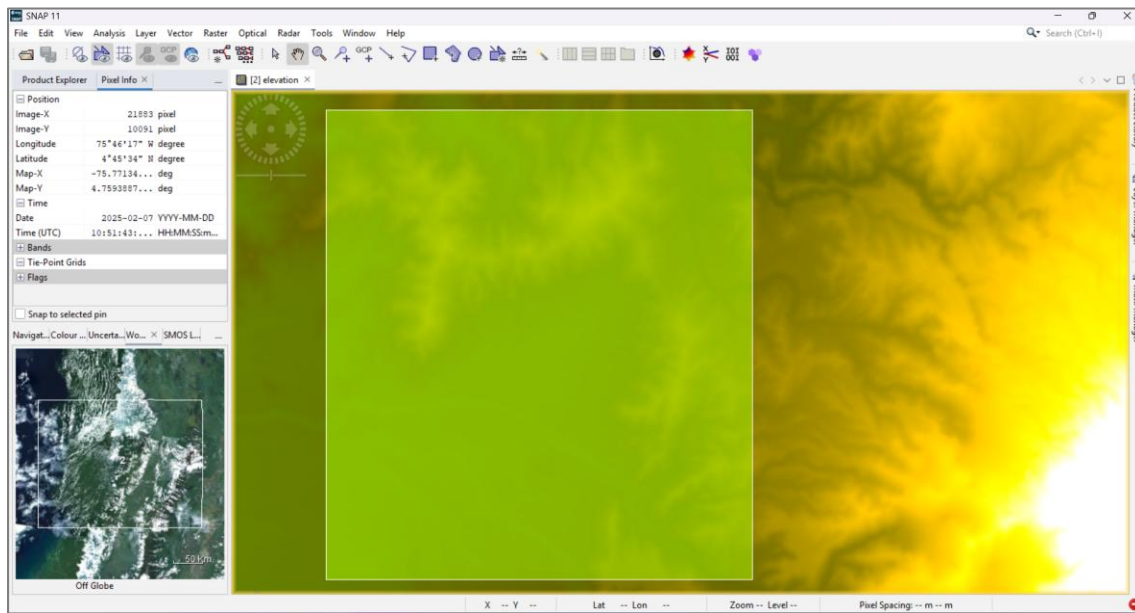
Para la generación del DEM mediante interferometría con imágenes Sentinel-1, se utilizaron los productos:

S1A_IW_SLC__1SDV_20240120T105137_20240120T105204_052189_064F08_B3AA
 S1A_IW_SLC__1SDV_20240108T105138_20240108T105205_052014_06491C_BE25

Seleccionados por su geometría similar y condiciones atmosféricas adecuadas. Estas imágenes corresponden a enero de 2024, un periodo caracterizado por menores precipitaciones en la región de Dosquebradas, Risaralda, lo que reduce la presencia de nubosidad y humedad, favoreciendo la calidad de los datos radar. En el preprocesamiento, las imágenes fueron corregidas radiométrica y geoméricamente en SNAP para garantizar la precisión en la alineación. Posteriormente, se generó el interferograma a partir de ambas imágenes preprocesadas, evaluando la coherencia para asegurar la calidad de los datos. El interferograma obtenido fue exportado a Snaphu para el desenvuelto de fase, configurando correctamente los parámetros del proceso. Una vez obtenida la fase sin envolver, se calcularon las diferencias de altitud y se convirtieron en valores de elevación, utilizando un modelo de referencia del terreno. Para mejorar la calidad del DEM, se aplicaron filtros y técnicas de suavizado, minimizando el ruido y garantizando una mejor representación topográfica (Figura 17).

Figura 17. Resultado del procesamiento del DEM con SNAP.

Fuente: Autor.

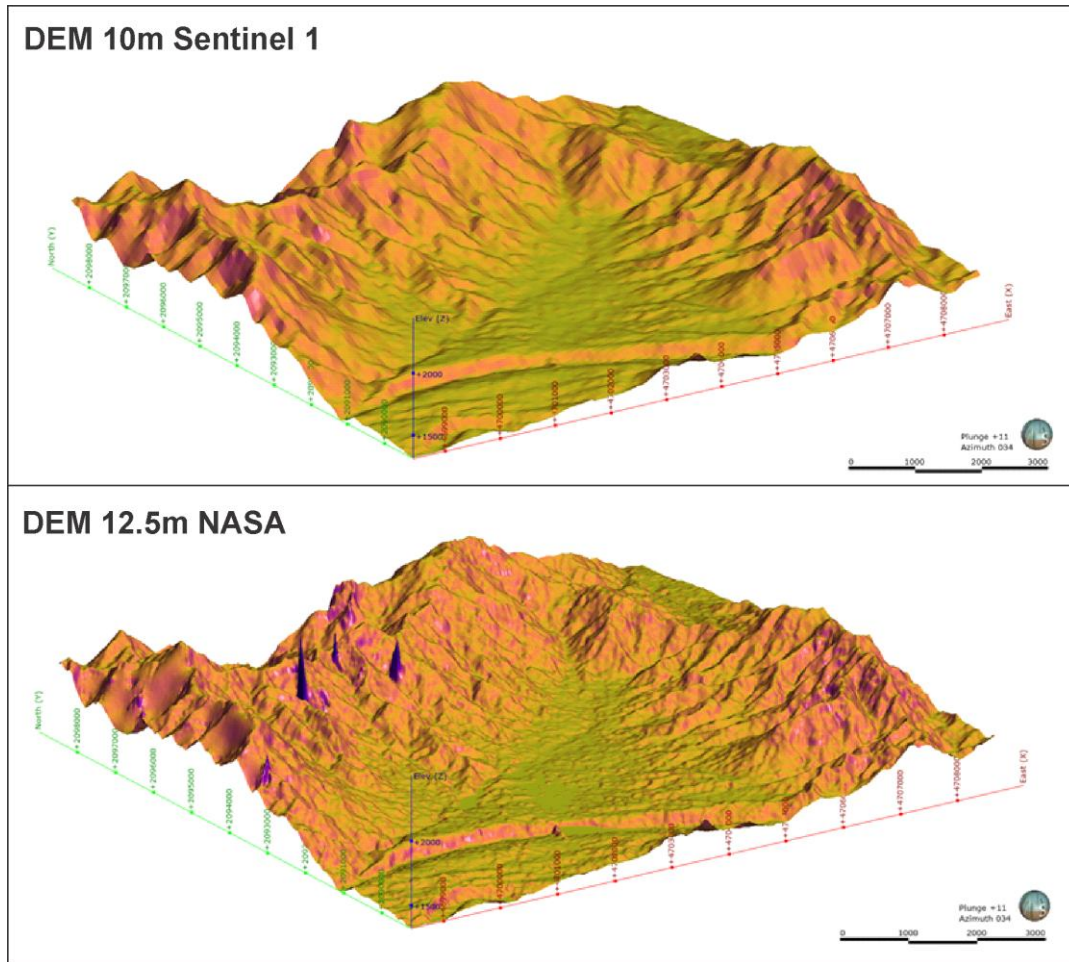


Finalmente, se comparó entre el DEM generado mediante interferometría con imágenes Sentinel-1 y el DEM de resolución espacial de 12.5 m proporcionado por la NASA, revelando diferencias significativas en la calidad y precisión de los datos. Mientras que el DEM de la NASA, basado en técnicas de interpolación y datos recopilados en distintos periodos de tiempo, presenta errores de píxeles y discontinuidades en ciertas áreas debido a limitaciones en la resolución y procesos de fusión de datos, el DEM generado con Sentinel-1 muestra una superficie más suavizada y con menor ruido, lo que permite una mejor representación del relieve. Además, la principal ventaja del DEM obtenido a partir de imágenes Sentinel-1 es su capacidad para reflejar las condiciones topográficas en un momento específico, ya que se deriva de adquisiciones radar de fechas concretas, en este caso, enero de 2024, especialmente útil en estudios de dinámica del paisaje, erosión y procesos geomorfológicos.

En la Figura 18 el DEM generado a partir de imágenes Sentinel-1 presenta una resolución espacial de 10 metros y una superficie más suavizada, ya que incorpora correcciones para la deformación causada por la vegetación, lo que mejora la precisión en la representación del relieve. En contraste, el DEM de la NASA, con una resolución de 12.5 metros, exhibe píxeles con valores de altura anómalos que sobresalen de la topografía general, generando discrepancias con la morfología real del terreno. Además, en este último modelo se evidencia la influencia de la vegetación en la deformación de los valores de elevación, lo que puede afectar su precisión en áreas con cobertura boscosa densa.

Figura 18. Comparación entre DEM generado con Sentinel 1 y DEM de la NASA.

Fuente: Autor.



6.3 Interpretación y elaboración de secciones geoelectrica

A partir de la integración de datos geofísicos y litológicos, que incluyen 33 sondeos eléctricos verticales (SEVs) y 8 registros de pozos, se realizó la interpretación estratigráfica basada en el análisis de resistividades, potencial espontaneo, *gamma ray* y su relación con las características granulométricas de los materiales. Este enfoque permitió identificar y clasificar unidades litológicas diferenciadas según su tamaño de grano (arcillas, limos, arenas y gravas), vinculando estas propiedades a su potencial comportamiento hidrogeológico (por ejemplo, permeabilidad, porosidad y capacidad de almacenamiento).

En la Figura 19 se presenta la digitalización de los registros de resistividad para cada pozo profundo y a su vez se observa la correlación realizada para la identificación de las capas litológicas. Estas interpretaciones fueron usadas en las interpretaciones de cada SEV, ya que estos pozos presentan mayor información detallada que permite identificar las unidades litológicas. En la Tabla 6 se presenta la interpretación litológica de cada registro de pozo profundo con su respectivo intervalo de profundidad, resaltando siete (7) unidades litológicas no consolidadas y la unidad correspondiente al basamento, que para esta área corresponde al Complejo Arquía y la Formación Barroso.

Figura 19. Interpretación y correlación de registros de pozos profundos.

Fuente: Autor.

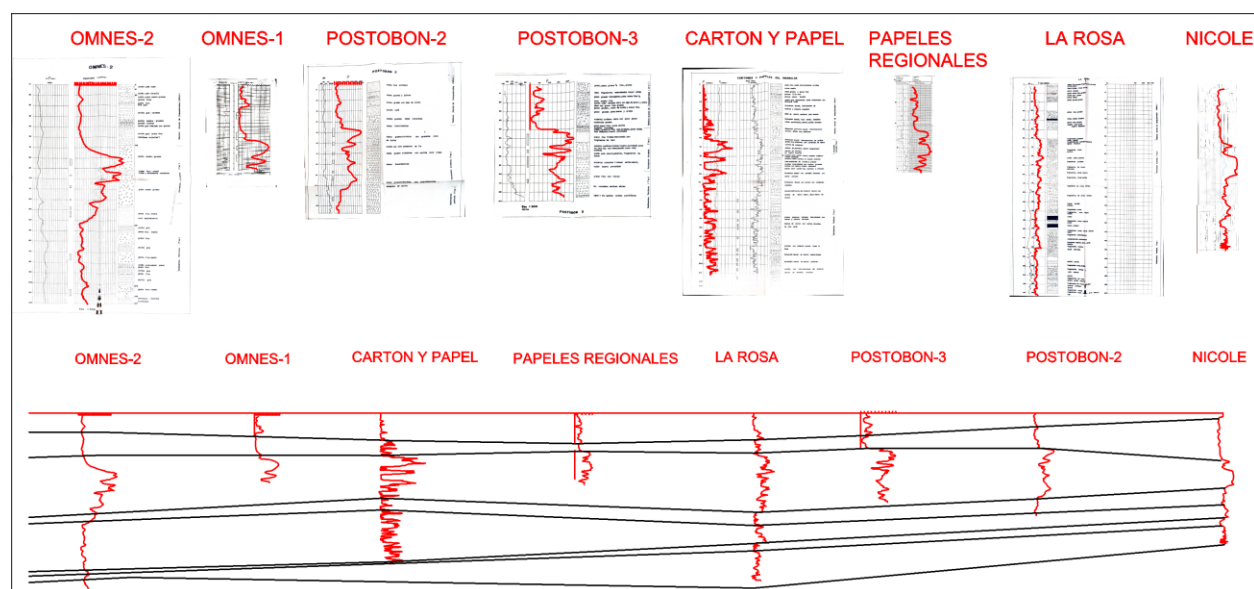


Tabla 6. Interpretación litológica de los pozos profundos con registro de pozo.

Fuente: Autor.

ID Pozo	Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Capa
Nicole S.A.	0	8	Limos, arenas y arcillas	1
Nicole S.A.	8	69	Arcillas y limos 1	2
Nicole S.A.	69	106	Gravas y arenas	3
Nicole S.A.	106	129	Arcillas y limos 2	4
Nicole S.A.	129	148	Arenas	5

ID Pozo	Desde (m)	Hasta (m)	Litología	Capa
Nicole S.A.	148	155	Arcillas y limos 3	6
Nicole S.A.	155	180	Arenas y limos	7
La Rosa	0	37	Limos, arenas y arcillas	1
La Rosa	37	60	Arcillas y limos 1	2
La Rosa	60	140	Gravas y arenas	3
La Rosa	140	156	Arcillas y limos 2	4
La Rosa	156	180	Arenas	5
La Rosa	180	190	Arcillas y limos 3	6
La Rosa	190	230	Arenas y limos	7
Papeles Regionales	0	41	Limos, arenas y arcillas	1
Papeles Regionales	41	48	Arcillas y limos 1	2
Papeles Regionales	48	100	Gravas y arenas	3
Cartones y Papeles	0	30	Limos, arenas y arcillas	1
Cartones y Papeles	30	39	Arcillas y limos 1	2
Cartones y Papeles	39	119	Gravas y arenas	3
Cartones y Papeles	119	136	Arcillas y limos 2	4
Cartones y Papeles	136	176	Arenas	5
Cartones y Papeles	176	182	Arcillas y limos 3	6
Cartones y Papeles	182	225	Arenas y limos	7
Postobón P #3	0	33	Limos, arenas y arcillas	1
Postobón P #3	33	50	Arcillas y limos 1	2
Postobón P #3	50	129	Gravas y arenas	3
Postobón P #3	129	130	Arcillas y limos 2	4
Postobón P #2	0	24	Limos, arenas y arcillas	1
Postobón P #2	24	56	Arcillas y limos 1	2
Postobón P #2	56	104	Gravas y arenas	3
Postobón P #2	104	130	Arcillas y limos 2	4
Omnes P #1	0	26	Limos, arenas y arcillas	1
Omnes P #1	26	47	Arcillas y limos 1	2
Omnes P #1	47	86	Gravas y arenas	3
Omnes P #2	0	50	Limos, arenas y arcillas	1
Omnes P #2	50	70	Arcillas y limos 1	2
Omnes P #2	70	145	Gravas y arenas	3
Omnes P #2	145	148	Arcillas y limos 2	4
Omnes P #2	148	168	Arenas	5
Omnes P #2	168	180	Arcillas y limos 3	6
Omnes P #2	180	203	Arenas y limos	7
Omnes P #2	203	220	Complejo Arquía	8

La secuencia estratigráfica identificada en la subcuenca de Dosquebradas se compone de siete capas con características litológicas diferenciadas. La Capa 1, formada principalmente por limos, arenas y arcillas, presenta espesores variables entre 8 y 50 metros, asociada a depósitos aluviales mezclados con materiales volcánicos finos. Esta unidad puede presentar una permeabilidad moderada debido a su heterogeneidad. La Capa 2, con espesores de 2 a 61 metros, está dominada principalmente por arcillas y limos derivados de cenizas volcánicas alteradas, siendo un estrato de baja permeabilidad que posiblemente pueda restringe el flujo vertical de agua. La Capa 3, la más destacada, alcanza espesores entre 37 y 80 metros y está compuesta principalmente por gravas y arenas gruesas. Su alta resistividad asociada a una alta permeabilidad la define como el principal acuífero de la zona, asociado a depósitos de flujos de escombros volcánicos con clastos de gran tamaño de los diferentes pulsos asociados al origen de la Formación Armenia. La Capa 4, con espesores de 1 a 16 metros, repite la litología arcillosa de la Capa 2, aunque con menor continuidad lateral, manteniendo una baja permeabilidad que favorece el confinamiento del acuífero inferior.

La Capa 5, constituida por principalmente por arenas, presentando espesores entre 12 y 40 metros y una buena permeabilidad, vinculada a depósitos de flujos de lodos, flujos de escombros o canales fluviales. La Capa 6, con espesores de 7 a 10 metros, consiste principalmente en arcillas y limos compactos de origen volcánico, con permeabilidad baja. La Capa 7, de arenas y limos intercalados, muestra espesores entre 25 y 50 metros y permeabilidad baja a media, actuando como un acuitardo debido a su heterogeneidad.

La Capa 8 corresponde al basamento metamórfico del Complejo Arquía, con permeabilidad prácticamente nula en ausencia de fracturas, dado a que no se tiene información del fracturamiento de esta unidad se considera una unidad acuícluda. La Capa 9, no observada en los pozos, pero reportada regionalmente, se asocia a la Formación Barroso (intercalación de lodolitas, chert y basaltos Cretácicos), considerada impermeable en el área de estudio. Cabe resaltar que estas unidades en áreas cercanas a fallas activas, pueden presentar mayor porosidad secundaria, por lo cual se podrá tener en cuenta para una modelación numérica del flujo de agua subterránea.

Además, estas unidades en áreas aflorantes, pueden presentar alteración parcial, que puede generar mayor porosidad y permeabilidad.

Por lo anterior, el modelo refleja un sistema acuífero multicapa, donde las unidades permeables (Capas 3, 5 y 7) están intercaladas con capas impermeables (Capas 2, 4, 6). Las capas basales (8 y 9) representan el límite impermeable del sistema, mientras que la alternancia de materiales gruesos y finos sugiere un origen ligado a ciclos volcanosedimentarios, con episodios de alta energía (flujos de escombros) y periodos de sedimentación fina (cenizas volcánicas). La Tabla 7 resume la interpretación de las resistividades obtenidas mediante SEVs, basada en la correlación con registros de pozos y su distribución espacial y en la Figura 20 se presenta la ubicación geoespacial de dichas interpretaciones.

Cabe destacar que este enfoque revela que valores de resistividad similares pueden corresponder a diferentes litologías o ambientes deposicionales, dependiendo del contexto geológico local.

Tabla 7. Interpretación geológica de los SEVs basado en resistividad y correlación geológica.

Fuente: Autor.

ID SEV	Desde (m)	Hasta (m)	Resistividad (Ohm.m)	Litología	Capa
SEV 1	0	0.8	700	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 1	0.8	3.4	90	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 1	3.4	11	320	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 1	11	40	38	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 1	40	64	170	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 1	64	100	80	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 2	0	0.5	85	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 2	0.5	6.8	270	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 2	6.8	13.5	100	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 2	13.5	18	40	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 2	18	24	110	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 2	24	35	84	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 2	35	75	320	FM Barroso	9
SEV 3	0	0.5	170	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 3	0.5	5.6	680	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 3	5.6	21	28	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 3	21	26	120	Limos, arenas y arcillas	1

ID SEV	Desde (m)	Hasta (m)	Resistividad (Ohm.m)	Litología	Capa
SEV 3	26	86	40	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 3	86	150	320	FM Barroso	9
SEV 4	0	0.4	19.5	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 4	0.4	2.7	483	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 4	2.7	6.6	20	Arcillas y limos 1	2
SEV 4	6.6	135	64.2	Gravas y arenas	3
SEV 4	135	150	19	Arcillas y limos 2	4
SEV 5	0	0.5	9.9	Complejo Arquía	8
SEV 5	0.5	0.9	82	Complejo Arquía	8
SEV 5	0.9	22.2	18.5	Complejo Arquía	8
SEV 5	22.2	50	72.5	Complejo Arquía	8
SEV 6	0	0.5	125	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 6	0.5	1.9	1450	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 6	1.9	50	59.54	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 7	0	0.4	22.4	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 7	0.4	2.9	800	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 7	2.9	57	81	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 7	57	100	466	Complejo Arquía	8
SEV 8	0	0.67	40.98	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 8	0.67	5.76	150	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 8	5.76	13.78	23.44	Arcillas y limos 1	2
SEV 8	13.78	50	22.26	Arcillas y limos 1	2
SEV 9	0	0.7	153.99	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 9	0.7	2.1	381.56	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 9	2.1	9.1	72.23	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 9	9.1	59.84	34.48	Arcillas y limos 1	2
SEV 9	59.84	100	81.323	Gravas y arenas	3
SEV 10	0	0.91	407.76	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 10	0.91	1.98	284.53	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 10	1.98	2.48	339.06	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 10	2.48	6.11	311.439	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 10	6.11	11.079	117.347	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 10	11.079	48.44	26.687	Arcillas y limos 1	2
SEV 10	48.44	85.71	65.69	Gravas y arenas	3
SEV 10	85.71	150	408.62	Gravas y arenas	3
SEV 11	0	0.57	1397.3	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 11	0.57	2.53	1261.4	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 11	2.53	5.09	511.75	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 11	5.09	19.472	73.793	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 11	19.472	51.114	37.71	Arcillas y limos 1	2
SEV 11	51.114	99.221	84.067	Complejo Arquía	8
SEV 11	99.221	150	142.79	Complejo Arquía	8
SEV 12	0	0.47	174.16	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 12	0.47	1.813	191.66	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 12	1.813	7.74	139.56	Limos, arenas y arcillas	1

ID SEV	Desde (m)	Hasta (m)	Resistividad (Ohm.m)	Litología	Capa
SEV 12	7.74	35.12	38.823	Arcillas y limos 1	2
SEV 12	35.12	57.05	34.26	Arcillas y limos 1	2
SEV 12	57.05	100	166.55	Complejo Arquía	8
SEV 13	0	0.54	164.59	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 13	0.54	3.72	222.18	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 13	3.72	7.296	68.557	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 13	7.296	21.42	49.695	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 13	21.42	43.43	27.85	Arcillas y limos 1	2
SEV 13	43.43	100	149.46	Complejo Arquía	8
SEV 14	0	1.6	86.4	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 14	1.6	5	134.2	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 14	5	11.5	71.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 14	11.5	26.3	125.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 15	0	2	33.7	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 15	2	5.7	177.7	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 15	5.7	14.7	196.6	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 15	14.7	26.5	47.3	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 15	26.5	75	20.7	Arcillas y limos 1	2
SEV 16	0	0.7	379.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 16	0.7	2.9	497.3	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 16	2.9	9.7	73.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 16	9.7	37.1	149.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 16	37.1	50	87.7	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 17	0	1.2	282.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 17	1.2	2.2	317.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 17	2.2	11	82.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 17	11	18.9	58.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 17	18.9	47.8	18.9	Arcillas y limos 1	2
SEV 17	47.8	75	40.6	Gravas y arenas	3
SEV 18	0	0.7	87.7	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 18	0.7	2.4	37	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 18	2.4	11.4	139.9	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 18	11.4	23.2	228.4	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 18	23.2	35.6	46.5	Arcillas y limos 1	2
SEV 18	35.6	50	0.9	Arcillas y limos 1	2
SEV 19	0	0.4	420.2	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 19	0.4	3.3	173.2	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 19	3.3	7.3	169	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 19	7.3	16.3	157.4	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 19	16.3	24.7	174.3	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 19	24.7	40.8	72.5	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 19	40.8	100	2.5	Arcillas y limos 1	2
SEV 20	0	0.7	65.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 20	0.7	3.1	167.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 20	3.1	18.2	30.6	Arcillas y limos 1	2

Modelación hidrogeológica tridimensional estática basada en unidades hidroestratigráficas con Leapfrog Geo en la subcuenca de Dosquebradas, Risaralda

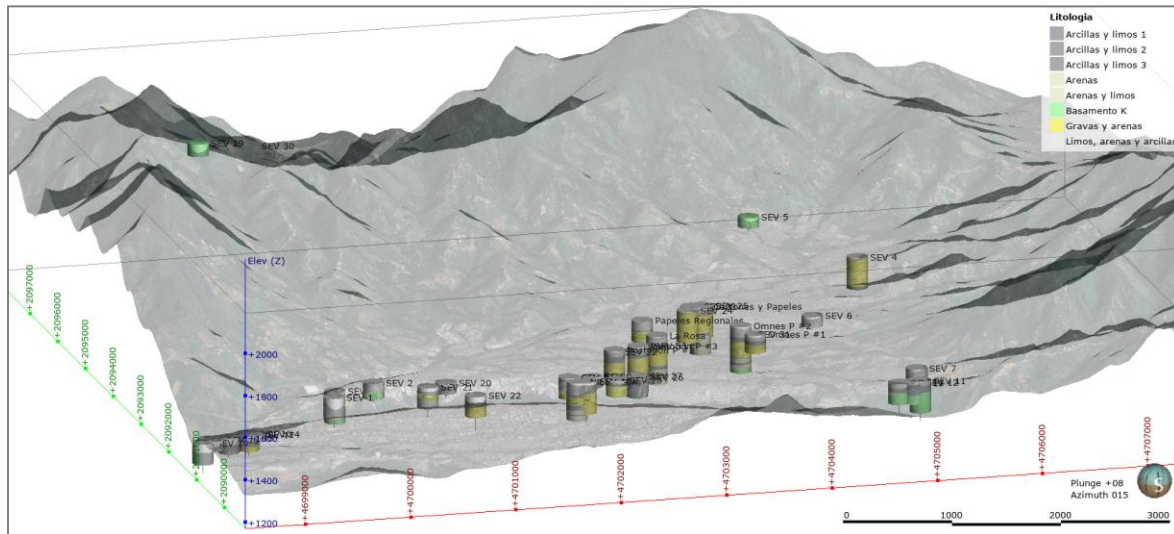
ID SEV	Desde (m)	Hasta (m)	Resistividad (Ohm.m)	Litología	Capa
SEV 20	18.2	50	14.4	Arcillas y limos 1	2
SEV 21	0	0.4	67.6	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 21	0.4	5.7	244.3	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 21	5.7	16.2	86.7	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 21	16.2	34.9	18.1	Arcillas y limos 1	2
SEV 21	34.9	59.1	63.6	Gravas y arenas	3
SEV 21	59.1	100	177.7	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 22	0	0.7	569.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 22	0.7	2.4	831.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 22	2.4	11.4	165.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 22	11.4	24.7	62.6	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 22	24.7	42.2	26.3	Arcillas y limos 1	2
SEV 22	42.2	100	255.3	Gravas y arenas	3
SEV 23	0	0.7	54.1	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 23	0.7	3.58	30.96	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 23	3.58	6.67	40.931	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 23	6.67	28.42	52.172	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 23	28.42	46.84	59.334	Arcillas y limos 1	2
SEV 23	46.84	75.71	47.578	Gravas y arenas	3
SEV 23	75.71	150	110.86	Gravas y arenas	3
SEV 24	0			Limos, arenas y arcillas	1
SEV 24	0.921	2.93	25.835	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 24	2.93	5.52	31.077	Arcillas y limos 1	2
SEV 24	5.52	22.8	70.047	Gravas y arenas	3
SEV 24	22.8	96.9	82.185	Gravas y arenas	3
SEV 24	96.9	150	97.166	Gravas y arenas	3
SEV 25	0			Limos, arenas y arcillas	1
SEV 25	1.23	2.06	19.39	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 25	2.06	4.9	28.482	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 25	4.9	32.18	35.134	Arcillas y limos 1	2
SEV 25	32.18	93.5	51.462	Gravas y arenas	3
SEV 25	93.5	150	89.1	Gravas y arenas	3
SEV 26	0	1	180.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 26	1	3.1	108.5	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 26	3.1	9.8	81.2	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 26	9.8	23.6	33.2	Arcillas y limos 1	2
SEV 26	23.6	75	25.8	Arcillas y limos 1	2
SEV 27	0	1.5	47.4	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 27	1.5	2.7	73.3	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 27	2.7	4.9	131.8	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 27	4.9	7.3	49.2	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 27	7.3	25.4	20.7	Arcillas y limos 1	2
SEV 27	25.4	50.1	36.8	Arcillas y limos 1	2
SEV 27	50.1	100	47.8	Arcillas y limos 1	2
SEV 28	0	0.8	366	Limos, arenas y arcillas	1

Modelación hidrogeológica tridimensional estática basada en unidades hidroestratigráficas con Leapfrog Geo en la subcuenca de Dosquebradas, Risaralda

ID SEV	Desde (m)	Hasta (m)	Resistividad (Ohm.m)	Litología	Capa
SEV 28	0.8	3	267.4	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 28	3	6.1	38.3	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 28	6.1	11	58.7	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 28	11	26.6	19.4	Arcillas y limos 1	2
SEV 28	26.6	75	87.1	Gravas y arenas	3
SEV 29	0	0.7	1220.6	FM Barroso	9
SEV 29	0.7	5.2	498.9	FM Barroso	9
SEV 29	5.2	10.2	665.8	FM Barroso	9
SEV 29	10.2	31.4	46.5	FM Barroso	9
SEV 29	31.4	50.6	378.3	FM Barroso	9
SEV 29	50.6	60	1739.2	FM Barroso	9
SEV 30	0	0.95	1233.6	FM Barroso	9
SEV 30	0.95	3.788	350.5	FM Barroso	9
SEV 30	3.788	9.496	454.86	FM Barroso	9
SEV 30	9.496	32.159	37.541	FM Barroso	9
SEV 30	32.159	100	3524	FM Barroso	9
SEV 31	0	18	60	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 31	18	26	150	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 31	26	49	45	Arcillas y limos 1	2
SEV 31	49	58	115	Gravas y arenas	3
SEV 31	58	71	380	Gravas y arenas	3
SEV 31	71	150	270	Gravas y arenas	3
SEV 32	0	25	60	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 32	25	35	20	Arcillas y limos 1	2
SEV 32	35	45	110	Gravas y arenas	3
SEV 32	45	64	320	Gravas y arenas	3
SEV 32	64	75	100	Gravas y arenas	3
SEV 32	75	103	275	Gravas y arenas	3
SEV 32	103	117	100	Gravas y arenas	3
SEV 32	117	150	60	Gravas y arenas	3
SEV 33	0	15	15	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 33	15	35	20	Limos, arenas y arcillas	1
SEV 33	35	52	15	Arcillas y limos 1	2
SEV 33	52	67	65	Gravas y arenas	3
SEV 33	67	80	30	Gravas y arenas	3
SEV 33	80	150	45	Gravas y arenas	3

Figura 20. Ubicación pozos profundos y SEVs interpretados.

Fuente: Autor.

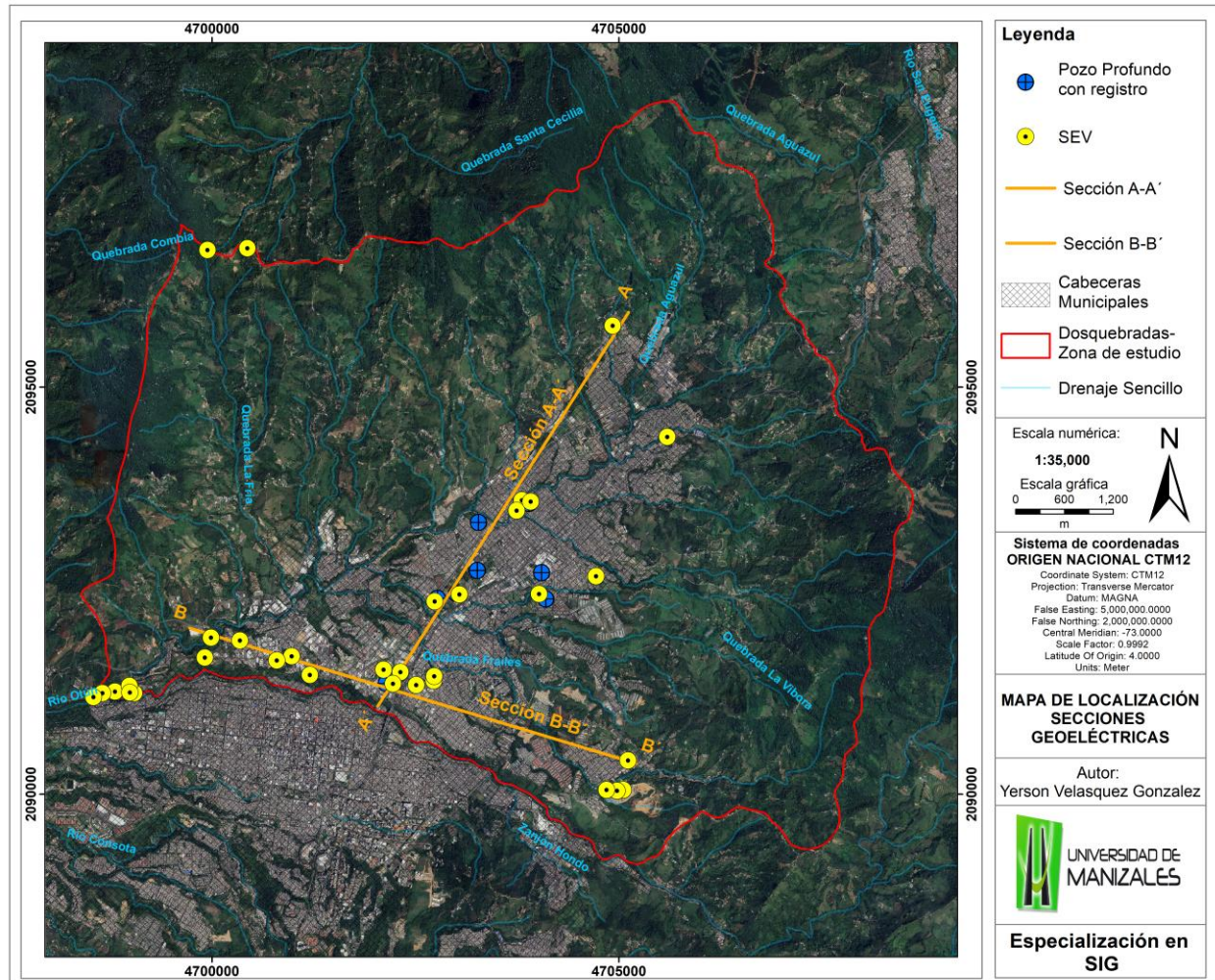


6.3.1 Ubicación de secciones geoelectricas

En la Figura 21 se presenta la ubicación de las secciones geoelectricas A-A' y B-B' en la zona de estudio de Dosquebradas. La sección A-A', de orientación longitudinal, se alinea paralelamente a la elongación estructural de la subcuenca de Dosquebradas, siguiendo el eje principal de la cuenca y permitiendo caracterizar variaciones estratigráficas, continuidades litológicas y propiedades geoelectricas (resistividad) a lo largo de su desarrollo. Por otra parte, la sección B-B', de orientación transversal, cruza perpendicularmente la subcuenca, proporcionando un perfil complementario que revela la geometría, espesores y heterogeneidades laterales de las unidades subsuperficiales, tales como fracturas, cambios abruptos en la composición del suelo, esencial para validar modelos 3D del subsuelo.

Figura 21. Localización secciones geoelectricas.

Fuente: Autor.



6.3.2 Sección A-A'

La Figura 22 presenta una sección geológica A-A' del subsuelo de la subcuenca de Dosquebradas, elaborada a partir de la interpretación de sondeos eléctricos verticales (SEVs) y registros de pozos, utilizando como referencia el trazo del registro de resistividad. La sección muestra la distribución de diferentes unidades geológicas y depósitos sedimentarios a lo largo del perfil, permitiendo visualizar la disposición y variabilidad de los materiales del subsuelo.

Las unidades identificadas incluyen depósitos compuestos principalmente por arenas (Are), arenas y limos (Are-L), gravas y arenas (G-Are), así como depósitos más heterogéneos de limos, arenas y arcillas (L-Are-Arc). También se destacan unidades de mayor cohesión, como los depósitos de arcillas y limos (Arc-L) y los depósitos de vertiente (Qtl). En la base del perfil, se observa la presencia del Complejo Arquía y la Formación Barroso, unidades geológicas consideradas el basamento del área de estudio.

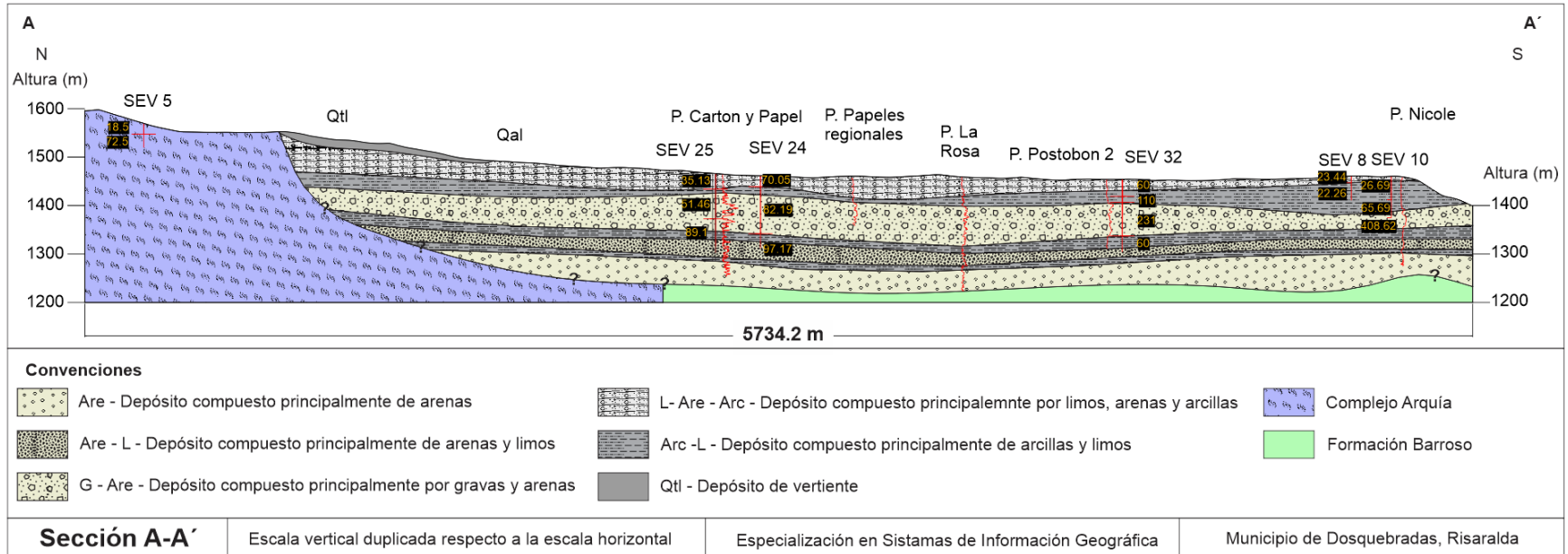
De techo a base, la secuencia hidrogeológica inicia con los depósitos de vertiente (Qtl) y aluviales (Qal), conformados principalmente por arenas, limos y gravas. Estas unidades presentan buena porosidad y permeabilidad, favoreciendo la infiltración y el almacenamiento de agua subterránea. Sin embargo, su heterogeneidad influye en la variabilidad del flujo, con zonas más permeables intercaladas con capas de menor conductividad hidráulica.

En la parte intermedia del perfil se identifican depósitos compuestos por arenas, limos y arcillas (Are-L-Arc), así como depósitos de arcillas y limos (Arc-L), los cuales funcionan como unidades semi-confinantes que pueden generar condiciones de confinamiento local para los niveles acuíferos subyacentes, reduciendo la transmisión vertical del flujo subterráneo. No obstante, la presencia de capas más arenosas indica posibles niveles acuíferos confinados o semiconfinados con potencial de almacenamiento y transmisión de agua. La unidad acuífera principal se encuentra en los depósitos compuestos por gravas y arenas (G-Are) y en las unidades con predominio de arenas (Are), que presentan alta conductividad hidráulica y actúan como los principales reservorios de agua subterránea. Entre las unidades arenosas, se presentan capas de menor espesor de arcillas. En la base del perfil se encuentran el Complejo Arquía y la Formación Barroso, los cuales representan el basamento hidrogeológico de la región y están constituidos por materiales metamórficos y sedimentarios consolidados de muy baja permeabilidad, actuando como un acuicludo que restringe la infiltración profunda del agua. No obstante, la presencia de fracturas en estas rocas podría generar permeabilidad secundaria, permitiendo cierto flujo en zonas localizadas. Se destaca que el contacto lateral entre las unidades se infiere a partir del contexto geológico, de manera similar al límite entre la Formación Barroso y el Complejo Arquía, el cual se interpreta como un contacto fallado. Es importante señalar que, en las zonas sin información, existe una

mayor incertidumbre respecto a la continuidad de las capas identificadas. Asimismo, en estas mismas capas podrían presentarse variaciones granulométricas que deriven en cambios laterales de facies. Dichas variaciones no serán incorporadas en esta modelación, con el objetivo de generar un modelo hidrogeológico simplificado, buscando facilitar una futura modelación numérica orientada a determinar el comportamiento del flujo de agua subterránea.

Figura 22. Sección geológica A-A´.

Fuente: Autor.



6.3.3 Sección B-B´

La sección geológica B-B´ presenta una secuencia estratigráfica compuesta por unidades litológicas no consolidadas y formaciones consolidadas al igual que las Sección A-A´, dichas unidades identificadas incluyen: (1) depósitos de limos, arenas y arcillas (L-Are-Arc), con mediana a baja permeabilidad; (2) mezclas de arcillas y limos (Arc-L) de baja permeabilidad; (3) estratos de gravas y arenas (G-Are), de alta porosidad y conductividad hidráulica, constituyendo el acuífero principal; y (4) capas de arcillas y limos (Are-L), interpretadas con baja permeabilidad, (5) un estrato con predominancia de arenas (Are) y infrayacido por otra capa (6) de arcillas y limos (Arc-L) y finalizando con una capa de mezcla de (7) arenas y limos (Are-L) de mediana permeabilidad. Adicionalmente, se destacan el Complejo Arquía y la Formación Barroso, unidades consolidadas metamórficas o sedimentarias, cuyo comportamiento hidrogeológico depende de su grado de fracturación y meteorización.

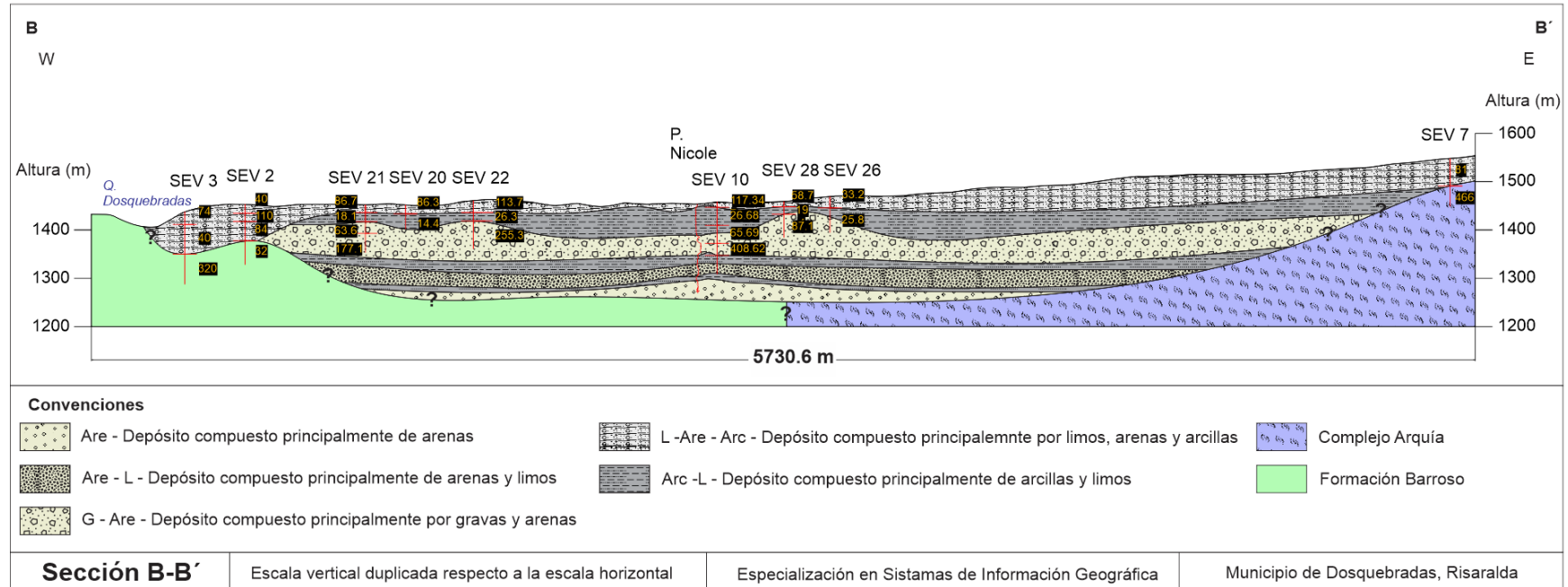
La geometría de los estratos sugiere un origen de varios eventos vulcanosedimentarios, asociados a depósitos de caída volcánica, flujos de lodo y escombros, combinados con posibles procesos fluviales. La sección B-B' utiliza una escala vertical duplicada respecto a la horizontal, una técnica común para exagerar variaciones estratigráficas en zonas de bajo relieve.

Los contactos entre unidades incluyen dos tipos principales, un contacto fallado, como el límite interpretado entre la Formación Barroso y el Complejo Arquía, asociado a discontinuidades tectónicas que alteran la continuidad estratigráfica y contactos estratigráficos concordantes entre depósitos no consolidados, con transiciones graduales o abruptas según cambios ambientales.

Hidrogeológicamente, al igual que se presentó en la interpretación geoelectrica y la sección A-A´ y , el sistema se estructura en acuíferos (G-Are y Are), acuitardos (Are-L) y acuícludos (Are-L). Las gravas y arenas (G-Are) representan el mayor reservorio, mientras que las arcillas y limos (Are-L) restringen el movimiento vertical del agua. Las variaciones granulométricas internas en las unidades, como cambios laterales de facies, no se incorporan en el modelo actual, priorizando una simplificación que facilite futuras simulaciones numéricas del flujo subterráneo.

Figura 23. Sección geológica B-B'.

Fuente: Autor.



6.3.4 Panel tridimensional

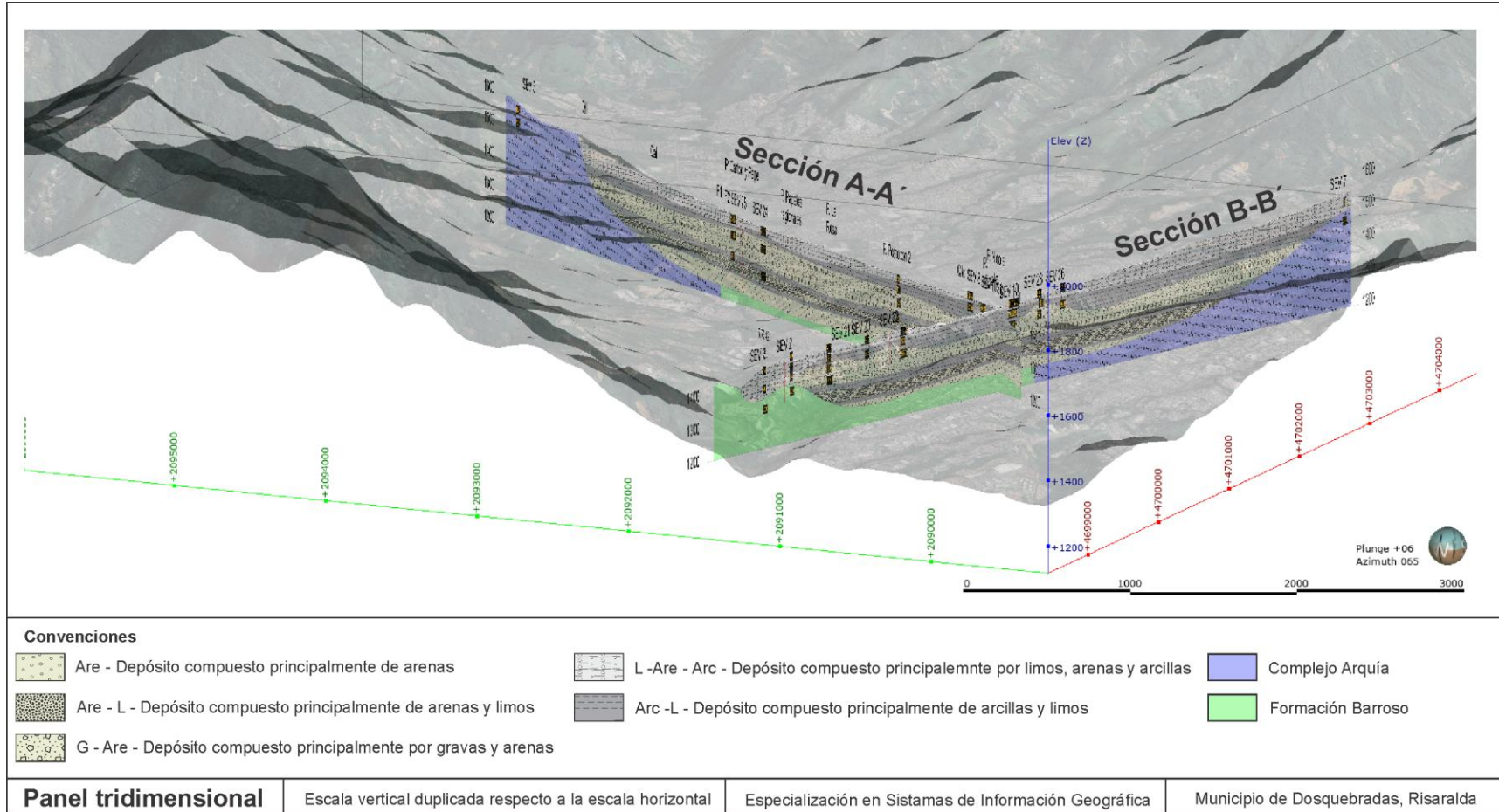
La Sección A-A' y la Sección B.B', representadas en un panel tridimensional con escala vertical duplicada respecto a la horizontal (Figura 24), ilustra la disposición estratigráfica de depósitos no consolidados asociados a la Formación Armenia y depósitos aluviales, sobre el basamento Cretácico. Las unidades no consolidadas que se encuentra infrayacidas por los depósitos aluviales se correlacionan estratigráficamente con la Formación Armenia.

La exageración vertical en el panel (escala 2:1) permite resaltar variaciones sutiles en la geometría de los estratos. Esta técnica revela una alternancia de capas horizontales, donde las arenas (Are) predominan en la base, mientras que las facies mixtas (Are-L y G-Are) se distribuyen en la porción media-superior, sugiriendo diferentes pulsos o erupciones asociados a la sedimentación.

Desde una perspectiva hidrogeológica, las gravas y arenas (G-Are) constituyen acuíferos, mientras que las capas de arcillas y limos (Arc-L) actúan como acuitardos o acuitardas que moderan el flujo vertical. Cabe destacar que esta representación prioriza la claridad visual sobre la precisión métrica, un enfoque válido en etapas exploratorias de caracterización hidrogeológica.

Figura 24. Panel tridimensional con Sección A-A' y Sección B-B'

Fuente: Autor.



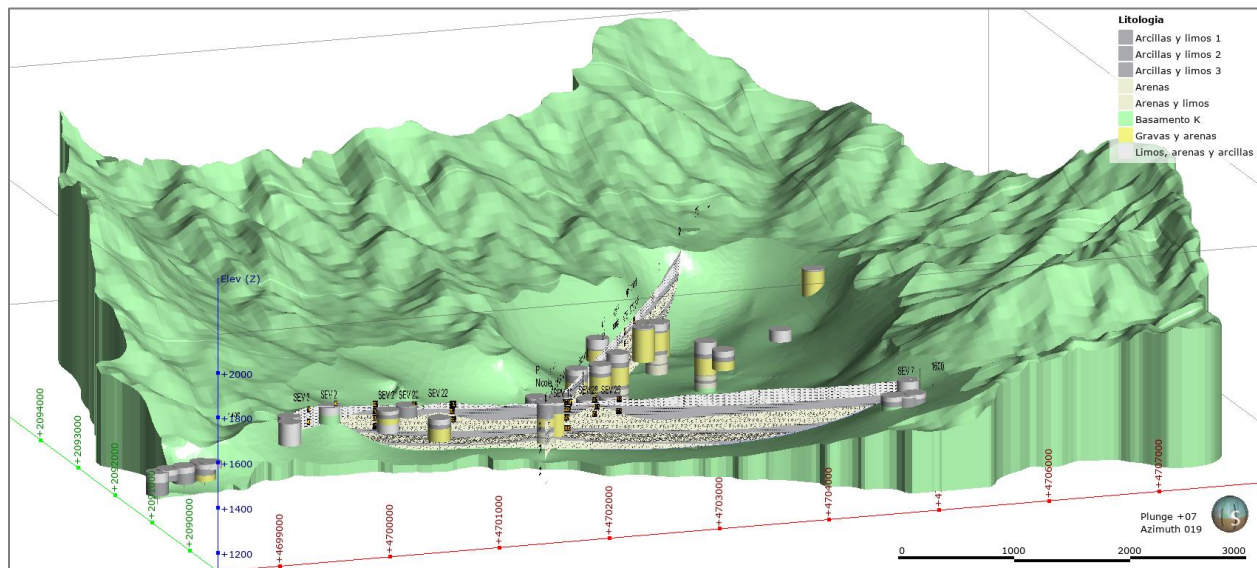
6.4 Modelación tridimensional

El modelo tridimensional generado en Leapfrog Geo permitió caracterizar con precisión la configuración geométrica del sistema acuífero en la subcuenca de Dosquebradas. Para mejorar la visualización, se aplicó una escala vertical duplicada en el visor del software, lo que facilita la identificación de las variaciones en los estratos geológicos.

En la base del modelo se estableció el límite del basamento Cretácico, caracterizado por un contacto erosivo para la modelación, que actúa como la unidad más antigua e impermeable, delimitando la parte inferior del sistema acuífero (Figura 25). Este basamento presenta una morfología irregular, con variaciones en su profundidad que configuran una estructura en forma de cuenca. Sobre el basamento, se modelaron las unidades litológicas más recientes, correspondientes a depósitos Cuaternarios, que constituyen los principales medios acuíferos, los cuales presentan una distribución heterogénea y espesores variables.

Figura 25. Basamento Cretácico y espacio de almacenamiento de los depósitos Cuaternarios.

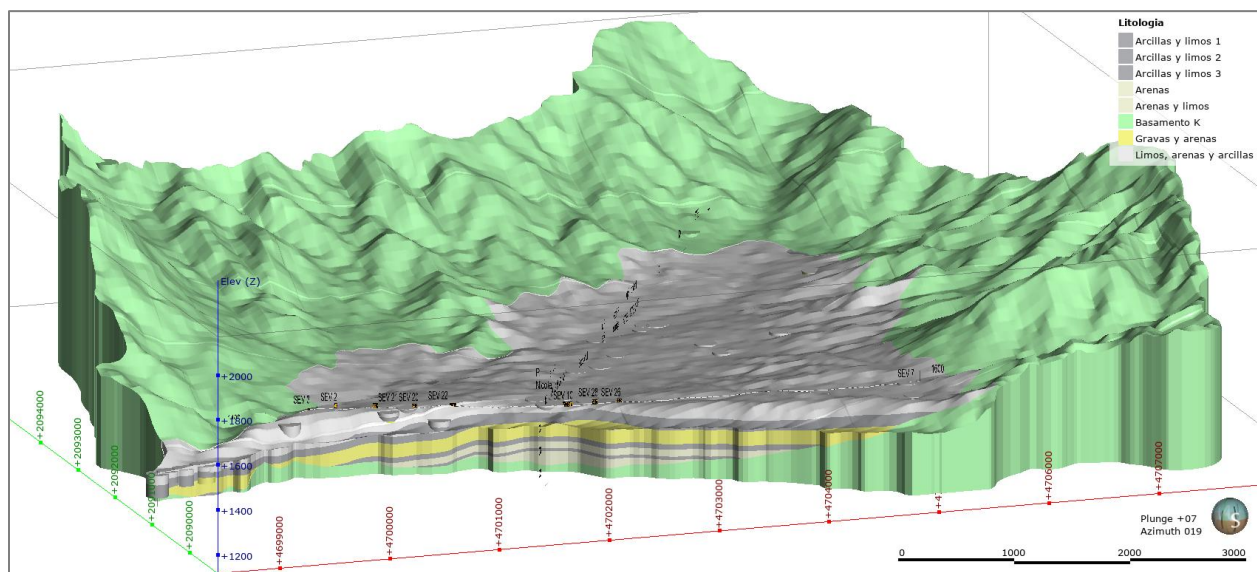
Fuente: Autor.



De igual modo, la modelación permitió visualizar con detalle la disposición y continuidad de las unidades hidrogeológicas, destacando la presencia de las siete (7) capas no consolidadas con diferentes características hidráulicas. Asimismo, se observó que las unidades litológicas presentan una intercalación de capas permeables y menos permeables. Estas fueron representadas en color amarillo (mayor permeabilidad) y gris (menor permeabilidad) para facilitar su identificación. Sumando a eso, se destaca que las capas presentan una inclinación hacia el suroeste, lo cual es congruente con la topografía del área y la dirección del nivel base local, determinado por el río Otún y la quebrada Dosquebradas (Figura 26).

Figura 26. Modelación de unidades litológicas sobre el basamento Cretácico.

Fuente: Autor.



Con fines geoespaciales, se calculó el volumen de las unidades Cuaternarias no consolidadas, las cuales constituyen los principales reservorios de agua subterránea en el área de estudio. En la Figura 27 se muestra el modelo geométrico de estas unidades, excluyendo el basamento Cretácico para aislar su contribución hidrogeológica. Adicionalmente, la Tabla 10 resume los parámetros geométricos obtenidos mediante el modelado geoespacial en el software SIG, incluyendo; altura mínima y máxima de la unidad litológica, área máxima y volumen total estimado.

Figura 27. Modelación de unidades litológicas Cuaternarias no consolidadas.

Fuente: Autor.

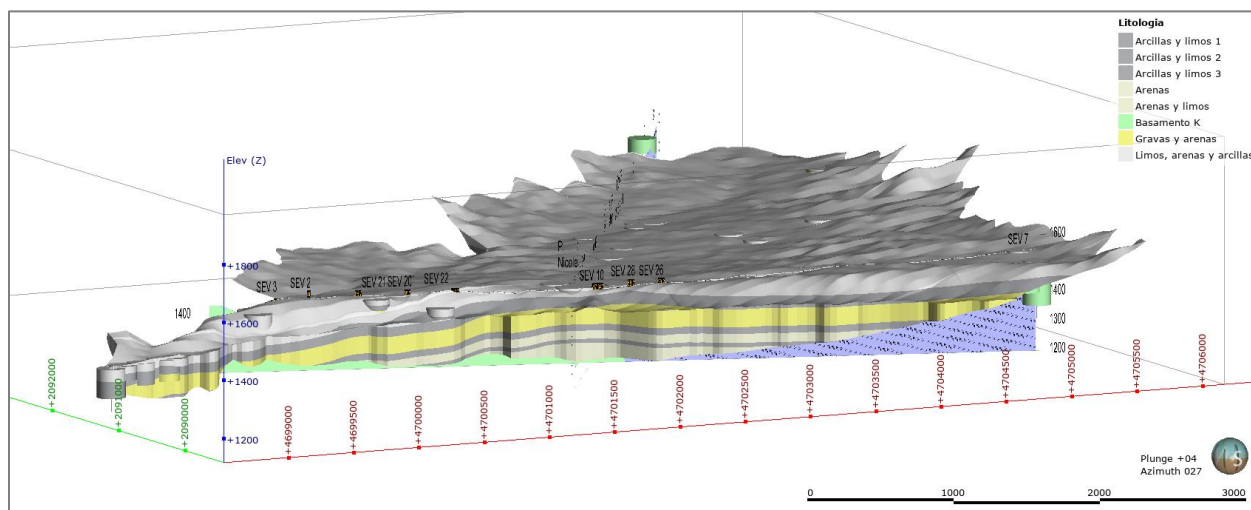


Tabla 8. Parámetros geométricos de las unidades litológicas modeladas con el software SIG.

Fuente: Autor.

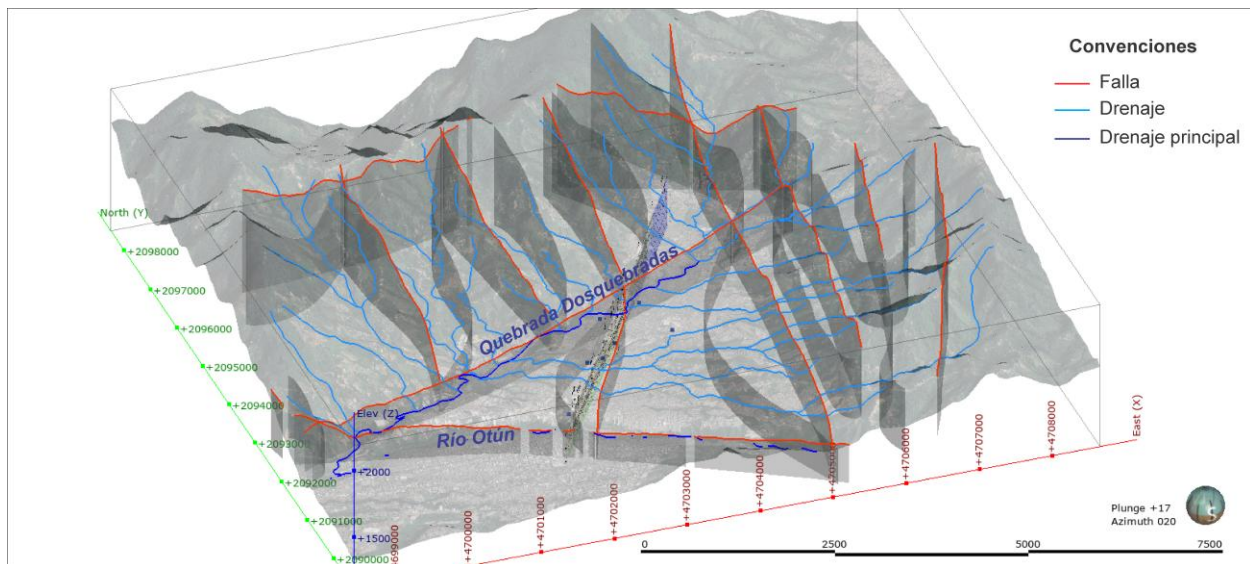
Unidad litológica	Mínima altura (m)	Máxima altura (m)	Máxima área (m ²)	Volumen (m ³)
Limos, arenas y arcillas	1,264.53	1,688.27	40,848,000	671,840,000
Arcillas y limos 1	1,220.55	1,540.26	36,417,000	556,040,000
Gravas y arenas	1,199.99	1,530.22	33,522,000	892,270,000
Arcillas y limos 2	1,199.99	1,415.52	27,177,000	296,930,000
Arenas	1,232.93	1,385.04	24,752,000	334,760,000
Arcillas y limos 3	1,232.12	1,347.99	21,016,000	137,850,000
Arenas y limos	1,215.91	1,328.43	18,944,000	351,620,000

Como parte del análisis estructural, se modelaron las fallas geológicas y los drenajes a partir de la base de datos geográfica (GDB) del POMCA del río Otún. Los resultados evidencian que la falla Santa Rosa sobre la quebrada Dosquebradas ejerce un control estructural en la subcuenca, condicionando la dirección de los drenajes hacia su cauce en lugar del río Otún, el cual actúa como nivel base regional. Esta configuración sugiere que las estructuras geológicas (fallas y fracturas) no solo influyen en el drenaje superficial, sino que también podrían desempeñar un rol crítico en la hidrogeología del área mediante dos mecanismos clave; el primero podría ser en la generación de porosidad secundaria, favoreciendo la infiltración y recarga de acuíferos. Y el segundo podría ser en la modificación de la dirección del flujo subterráneo, debido a su

comportamiento dual como sistemas "conducto-barrera" (Bense et al., 2013), que según Bense et al. (2013), corresponden a zonas de fallas que pueden actuar simultáneamente como conductos para el desplazamiento de fluidos a lo largo de la falla y como barreras que restringen el desplazamiento de fluidos que atraviesan la falla, debido a la heterogeneidad en su estructura interna, donde el núcleo de la falla suele tener baja permeabilidad debido a procesos de fragmentación y sellado, mientras que la zona de daño puede permitir un mayor flujo de fluidos si está bien conectada.

Figura 28. Sistemas de fallas en la cuenca de Dosquebradas, con evidencia de controles estructurales en los drenajes.

Fuente: Autor.



6.5 Caracterización hidrogeológica

La parametrización hidrogeológica del modelo tridimensional desarrollado en Leapfrog Geo se basó en dos fuentes principales de información; los resultados de las pruebas de bombeo de diversos informes (Tabla 9) y las propiedades granulométricas descritas para cada unidad litológica. Los valores de conductividad hidráulica (K) y transmisividad (T), obtenidos directamente de los ensayos de bombeo, representan mediciones empíricas del comportamiento hidrodinámico de las unidades en condiciones reales. Estos se complementaron con las

características texturales de los materiales, como la distribución de tamaños de partícula (arcilla, limo, arena y grava), utilizando relaciones empíricas para estimar K en sedimentos no consolidados, combinando así datos empíricos y propiedades intrínsecas de los materiales.

Sumando a esto, se recopilaron los niveles estáticos de los pozos profundos, los cuales se utilizaron para determinar el nivel piezométrico en relación con la elevación obtenida del DEM. Esta información permitió identificar la dirección de flujo del agua subterránea en las áreas cercanas a los pozos analizados, proporcionando una mejor comprensión del comportamiento hidráulico del sistema acuífero.

Tabla 9. Propiedades hidráulicas de pozos profundos.

Fuente: Autor.

Pozo profundo	Altura (m)	Nivel Estático (m)	Nivel Piezométrico (m)	T (m ² /d)	K (m/d)	Año medición	Fuente
Nicole S.A.	1460.4	38.8	1421.64	-	-	2020	(CARDER, 2023)
La Rosa	1460.9	19.74	1441.24	97.7	0.87	2014	(GEOSUB S.A.S., 2014)
Omnes P #2	1482.8	17.43	1465.38	11.6	0.45	2023	(GEOSUB S.A.S., 2023)
Cartones y Papeles	1467.3	28.12	1439.2	-	-	2020	(CARDER, 2023)
Postobón P #2	1452.4	8.44	1444.03	-	-	2020	(CARDER, 2023)
Postobón P #3	1454.9	20.6	1434.39	-	-	2020	(CARDER, 2023)
Papeles Regionales	1453.1	6.05	1447.12	5.61	1.12	2021	(GEOSUB S.A.S., 2021)

En la Figura 29 se presenta el mapa piezométrico elaborado a partir de los niveles medidos en los pozos profundos y realizado por el medio de interpolación IDW, preferido por la baja cantidad de datos y porque da mayor peso a los puntos cercanos, proporcionando estimaciones razonables sin requerir un gran volumen de información. En este mapa se evidencia una dirección de flujo preferencial del agua subterránea hacia el suroeste. Esta dirección coincide con los niveles base de la quebrada Dosquebradas y el río Otún. El nivel piezométrico más alto se registra en el

pozo Omnes P#2, mientras que el más bajo corresponde al pozo Nicole S.A., ubicado en proximidad al río Otún.

Por otro lado, en la Figura 30 se observa la distribución del nivel piezométrico en profundidad. Dicho nivel se encuentra en contacto principalmente con las dos primeras capas litológicas: la primera compuesta por limos, arenas y arcillas, y la segunda por arcillas y limos. Este comportamiento podría indicar la presencia de un efecto de confinamiento generado por dichas capas, lo que provocaría un ascenso del nivel piezométrico en los acuíferos subyacentes identificados. No obstante, determinar este fenómeno, se necesitaría realizar más estudios respecto a los niveles freáticos.

Figura 29. Mapa piezométrico con pozos profundo.

Fuente: Autor.

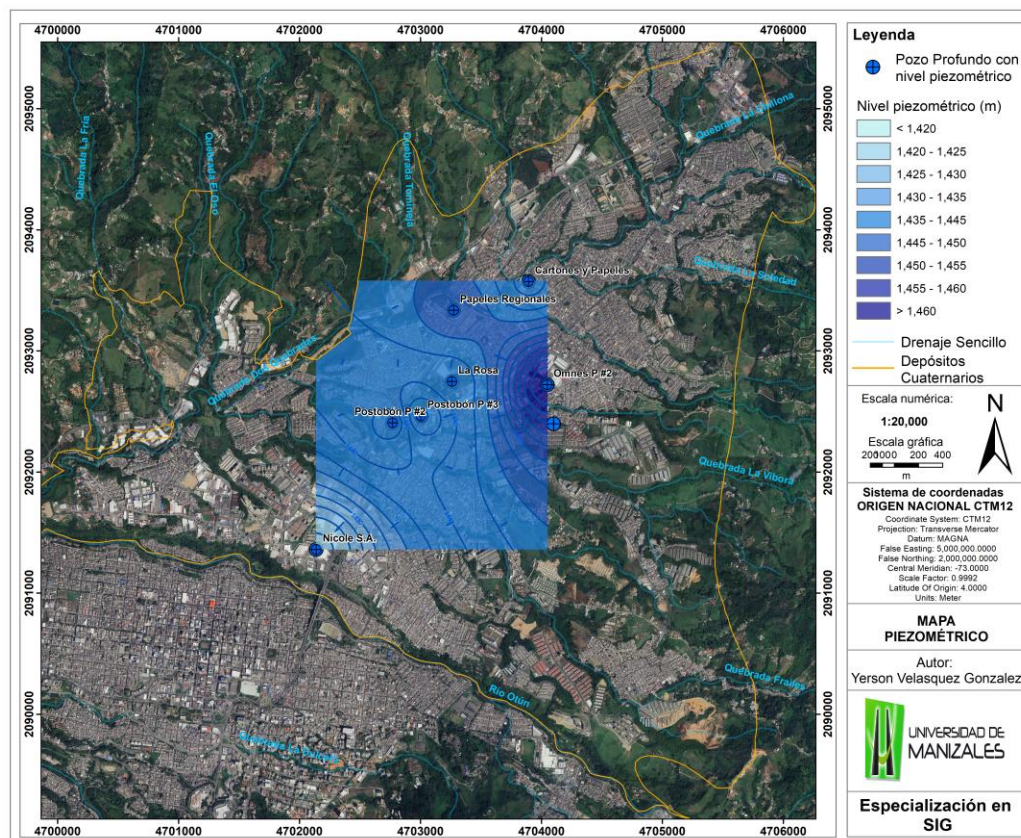
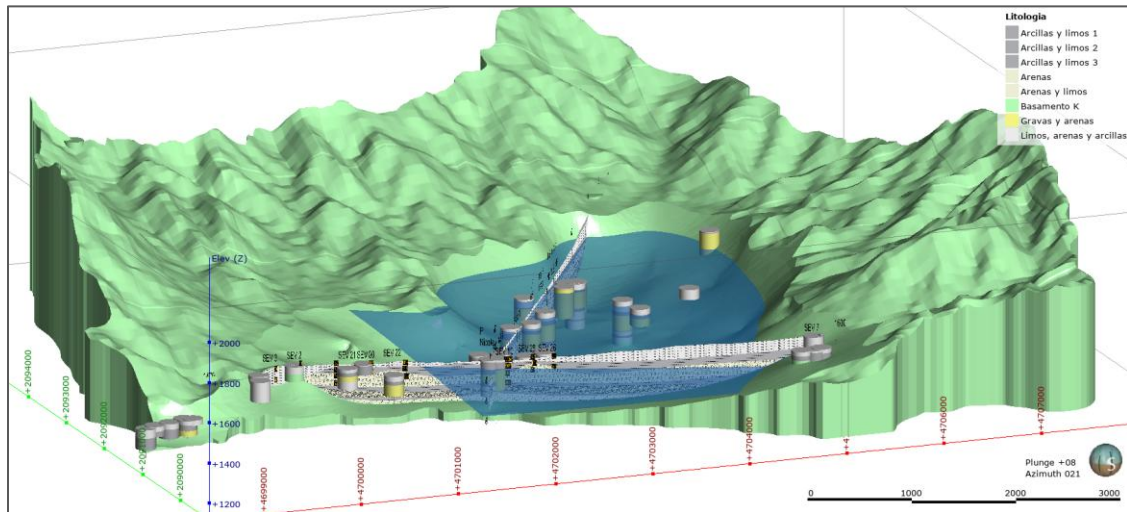


Figura 30. Nivel piezométrico la modelación hidrogeológica.

Fuente: Autor.



Para la caracterización del sistema acuífero se asignaron propiedades hidráulicas a cada unidad litológica modelada, de acuerdo con su granulometría. En este proceso se consideraron parámetros fundamentales como la porosidad total, la porosidad efectiva, el espesor promedio de las unidades obtenidas del modelamiento, la conductividad hidráulica y, a partir de estos, la transmisividad.

En primer lugar, se determinaron la porosidad total y la porosidad efectiva a partir de valores reportados en la literatura (Bosch, 2014), ajustándolos según el tipo de material (grava, arena, limo, arcilla).

Posteriormente, a cada unidad litológica se le asignaron valores de conductividad hidráulica (K) basados en rangos típicos de acuerdo con su granulometría, basados en los rangos sugeridos por Sanders, (1998). Utilizando el espesor promedio (b) y la conductividad hidráulica (K) se calculó la transmisividad (T) de cada unidad a través de la relación:

$$T=K*b$$

Este cálculo permitió cuantificar la capacidad de cada unidad para transmitir el flujo de agua subterránea, ofreciendo una visión integral del comportamiento hidráulico del sistema.

La comparación de los resultados del modelo con las pruebas de bombeo realizadas en pozos profundos reveló algunas discrepancias, las cuales se deben en parte a la naturaleza de los pozos de la zona. Por ejemplo, en el pozo "La Rosa" se reportó una transmisividad de 97.7 m²/día y una conductividad de 0.87 m/día, mientras que en el pozo "Omnes P #2" se obtuvo una transmisividad de 11.6 m²/día y una conductividad hidráulica de 0.45 m/día. Cabe señalar que estos pozos no presentan filtros continuos, lo que significa que los filtros se ubican en diversas capas litológicas, impidiendo caracterizar de forma directa cada unidad a partir de las pruebas de bombeo. En consecuencia, los datos obtenidos de las pruebas representan un promedio de las condiciones locales y deben interpretarse como tales.

La integración de múltiples fuentes de información (datos geofísicos, registros de pozos y ensayos de laboratorio) en el modelo tridimensional permitió superar las limitaciones inherentes a las pruebas de bombeo, ofreciendo una representación más robusta y detallada del sistema acuífero. Esto garantiza que, a pesar de las limitaciones en la caracterización directa de cada capa, el modelo refleje de manera coherente la distribución y las propiedades hidráulicas de las unidades litológicas en la subcuenca. En la Tabla 10 se presenta el resumen de las propiedades hidrogeológicas a cada unidad litológica modelada.

Tabla 10. Caracterización hidrogeológica.

Fuente: Autor.

Unidad litológica	Porosidad Total (%)	Porosidad Efectiva (%)	b (m)	K (m/d)	T (m ² /d)
Limos, arenas y arcillas	20	3	-	8.64E-3	-
Arcillas y limos 1	50	1	-	8.64E-5	-
Gravas y arenas	35	35	45.63	8.64	3,942.43
Arcillas y limos 2	50	1	14.43	8.64E-5	0.001
Arenas	30	25	25.75	8.64E-1	222.48
Arcillas y limos 3	50	1	8.75	8.64E-5	0.0008
Arenas y limos	45	6	32.75	8.64E-2	2.83

Por último, la conversión del modelo hidrogeológico elaborado en Leapfrog Geo a código MODFLOW se realizó aprovechando las herramientas integradas en el propio software, lo que permitió trasladar la geometría, la discretización (100m x 100m) de las unidades litológicas y las propiedades hidráulicas al formato numérico compatible con MODFLOW. Este proceso facilitó la integración de la información recopilada en el modelo tridimensional, incluyendo el compendio hidrogeológico de las diferentes unidades.

Este procedimiento garantizó que cada capa del modelo se tradujera en celdas o zonas en las que se respetaban los límites y propiedades identificadas durante la interpretación geológica y geofísica. En este contexto, se resalta la capa compuesta por gravas y arenas, reconocida como la principal unidad acuífera debido a su alta permeabilidad y capacidad de almacenamiento, lo que la convierte en el principal reservorio y conducto de flujo de agua subterránea.

La conversión a código MODFLOW no solo valida el proceso de modelación, sino que además abre una amplia gama de posibilidades para futuros estudios. Entre ellas, se destacan:

Simulaciones de flujo transitorio: Permitiendo analizar la respuesta del sistema acuífero ante variaciones en la recarga o extracción de agua a lo largo del tiempo.

Estudios de impacto de bombeos: Evaluando la influencia de los pozos y la sostenibilidad del recurso hídrico bajo diferentes escenarios de explotación.

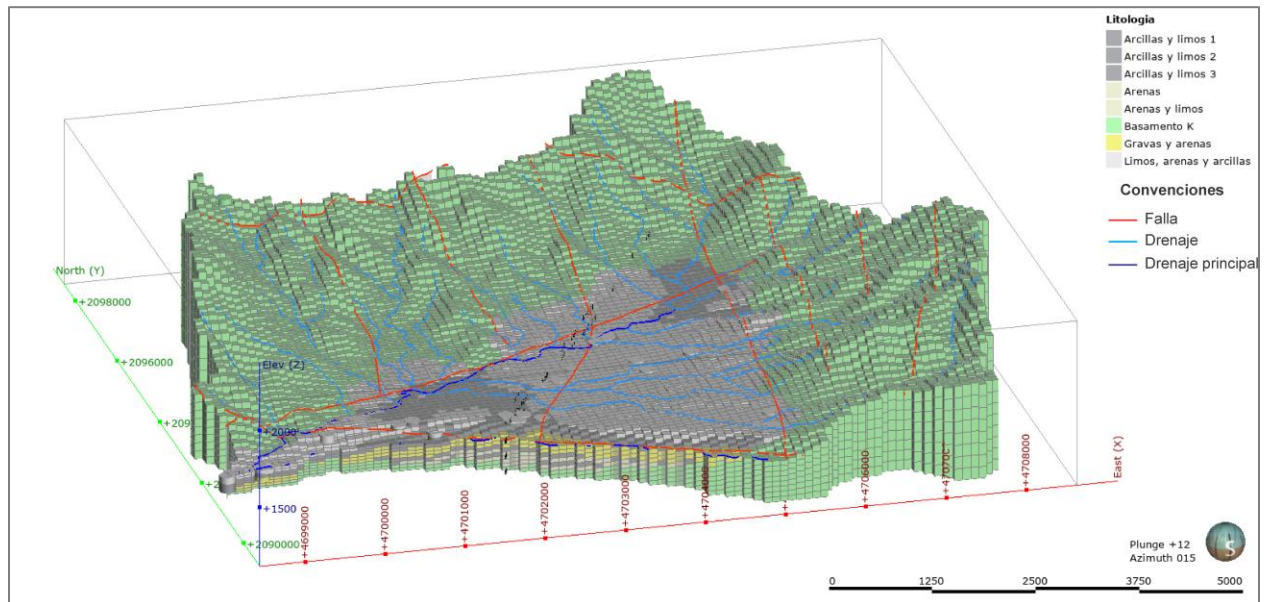
Análisis de contaminantes y transporte: Utilizando el modelo para simular la migración de contaminantes y establecer estrategias de mitigación y protección del acuífero.

Evaluaciones de gestión integral del recurso hídrico: Integrando aspectos ambientales, económicos y sociales para una toma de decisiones informada y sustentable.

En la Figura 31 se presenta el modelo hidrogeológico conceptual realizado con el software SIG Leapfrog Geo convertido a código MODFLOW, el cual incluye el trazo de los drenajes y fallas, que podrían ser analizados como condiciones de borde en modelaciones numéricas.

Figura 31. Modelo hidrogeológico conceptual convertido a código MODFLOW.

Fuente: Autor.



7 Discusión

Los resultados evidencian que, a pesar de la incertidumbre inherente en las zonas con menor disponibilidad de datos, se aplicó un riguroso criterio técnico y geológico que permitió modelar las unidades de forma lógica y coherente. La escasez de información en determinadas áreas del subsuelo genera una incertidumbre en la interpretación, la cual se minimizó mediante la aplicación de técnicas de interpolación y la utilización de conocimientos geológicos para extrapolar comportamientos en zonas poco muestreadas.

Asimismo, es importante destacar que las unidades modeladas pueden presentar variaciones granulométricas propias, producto de cambios de facies que añaden complejidad al comportamiento hidrogeológico del sistema. Por ejemplo, la presencia de laminaciones, paleocanales y otras estructuras sedimentarias indica una heterogeneidad interna que, en condiciones reales, podría influir significativamente en parámetros clave como la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento. Sin embargo, en esta modelación se optó por simplificar las capas, lo que permitió generar un modelo conceptual que, si bien reduce el nivel de detalle en ciertos aspectos, facilita la integración en modelos lógicos y su posterior aplicación en simulaciones hidrogeológicas numéricas.

Esta simplificación es necesaria para obtener un entendimiento global y funcional del sistema, sienta las bases para futuras investigaciones que, con la incorporación de datos adicionales y técnicas avanzadas, puedan refinar el modelo y capturar con mayor precisión las variaciones internas y la complejidad del medio. En definitiva, el enfoque adoptado garantiza una representación coherente del sistema acuífero, permitiendo la evaluación de su comportamiento en el contexto de la gestión sostenible del recurso hídrico.

8 Conclusiones

El uso de los sistemas de información geográfica (SIG) desempeñó un papel fundamental en la integración de datos provenientes de registros de pozos, sondeos eléctricos verticales (SEV) y diversos estudios de distintas fuentes, permitiendo organizar, analizar y visualizar la información espacial de manera eficiente. La capacidad de los SIG para superponer datos geológicos, hidrogeológicos y geofísicos facilitó la generación de mapas temáticos y modelos espaciales, mejorando la interpretación de las relaciones entre las unidades litológicas y los parámetros hidrogeológicos, lo que permitió identificar y delimitar siete (7) unidades litológicas no consolidadas y el basamento Cretácico ya consolidado, los cuales presentan diferentes propiedades granulométricas y comportamientos hidrogeológicos.

Asimismo, la compatibilidad de los SIG con herramientas de modelado como Leapfrog Geo y MODFLOW optimizó la transición entre la caracterización geológica y la simulación hidrogeológica, consolidando un enfoque integral para el análisis y la gestión del recurso hídrico subterráneo.

Además, la integración de información facilitó la generación de secciones geológicas y la elaboración de un panel tridimensional que representa fielmente la geometría de los estratos, su continuidad y su variación geoespacial. Esto permitió obtener un modelo simplificado de las unidades litológicas, facilitando la correlación espacial entre ellas y evidenciando diferencias en sus espesores, una leve inclinación de las capas hacia el suroeste y su relación tridimensional con el subsuelo de la cuenca.

Mediante el uso de Leapfrog Geo se modelaron de manera precisa las unidades geológicas y los datos estructurales, permitiendo representar de forma continua la geometría del subsuelo y obtener volúmenes estimados para cada unidad litológica: limos, arenas y arcillas con 671,840,000 m³; arcillas y limos 1 con 556,040,000 m³; gravas y arenas con 892,270,000 m³; arcillas y limos 2 con 296,930,000 m³; arenas con 334,760,000 m³; arcillas y limos 3 con 137,850,000 m³; y arenas y limos con 351,620,000 m³, resaltando la unidad de gravas y arenas como la principal unidad acuífera debido a su mayor capacidad de almacenamiento y transmisión del agua subterránea.

A cada unidad litológica se le asignaron propiedades hidráulicas específicas, tales como conductividad hidráulica, porosidad total y efectiva, y se calculó la transmisividad a partir del

espesor promedio y la conductividad. Estos parámetros, demuestran que las unidades con mayor permeabilidad, como las formadas por gravas y arenas, son las principales responsables del flujo y almacenamiento de agua subterránea en la subcuenca. La conversión del modelo a un formato compatible con MODFLOW refuerza su aplicabilidad para futuras simulaciones numéricas y estudios de gestión de recursos hídricos.

9 Recomendaciones

Se recomienda establecer, por parte de las autoridades ambientales, un sistema centralizado y de fácil acceso para el almacenamiento y la gestión de la información proveniente de los SEVs y los registros de pozos. La limitación actual en el acceso a estos estudios impide la verificación independiente y el uso óptimo de la información recopilada, lo que afecta la calidad y confiabilidad de los análisis hidrogeológicos. También se recomienda que los registros de pozos sean realizados por geólogos especializados, ya que su experiencia es fundamental para obtener descripciones litológicas precisas. Además, deben incluir datos sobre la humedad y los niveles saturados, elementos esenciales para analizar adecuadamente el comportamiento y la dinámica del sistema acuífero.

Adicionalmente, se sugiere promover la creación de modelos hidrogeológicos conceptuales utilizando herramientas SIG que permitan la modelación tridimensional. Este enfoque facilita la incorporación de espesores reales y la actualización periódica de los modelos, superando las limitaciones de los modelos esquemáticos tradicionales, que no permiten realizar cálculos tridimensionales y, por tanto, no aprovechan plenamente la información interpretada. La modelación tridimensional proporciona una representación más precisa de la complejidad del subsuelo, lo que resulta fundamental para la toma de decisiones en la gestión del recurso hídrico. Asimismo, se recomienda ampliar los estudios en la cuenca, integrando análisis geofísicos y estructurales detallados que permitan determinar el grado de fracturamiento de las rocas, identificar posibles sistemas de fallas y cinemáticas, y evaluar su influencia en el comportamiento hidrogeológico. En particular, se sugiere investigar el basamento Cretácico, ya que podría presentar mayor porosidad secundaria que influya en la recarga, el movimiento del flujo de agua subterránea y la capacidad de almacenamiento del acuífero.

Estas recomendaciones buscan optimizar la precisión y utilidad de los estudios hidrogeológicos, facilitando la actualización de la información y la aplicación de modelos tridimensionales que reflejen de manera realista la dinámica del sistema acuífero, y a su vez, contribuyan a una mejor planificación y gestión sostenible del recurso hídrico en la región.

Se recomienda llevar a cabo modelaciones hidrogeológicas numéricas que integren el análisis de condiciones de borde y parámetros climatológicos, con el fin de obtener una cuantificación precisa de las reservas de agua subterránea, evaluar el comportamiento del flujo en función de variaciones climáticas (como periodos de sequía) y determinar la posible dirección de dispersión de partículas en escenarios de contaminación localizada.

10 Referencias

- Åberg, S. C., Åberg, A. K., & Korkka-niemi, K. (2021). Multiple-point statistical modeling of three-dimensional glacial aquifer heterogeneity for improved groundwater management 10.1007@s10040-020-02299-4-DONE. 1043–1074.
- Alcaldía de Dosquebradas. (2023). Plan de Ordenamiento Territorial (POT) 2023-2035.
- Anderson, M. P., & Woessner, W. W. (2002). Applied groundwater modeling: Simulation of flow and *advective transport*. Academic Press.
- Araujo, G. G. (2017). Caracterización hidrogeológica de la subcuenca Río Bacanuchi, Sonora, México (pp. 34–36).
- Arias, F. G. (1993). Evaluación hidrogeológica para el área de Dosquebradas, Risaralda.
- Bense, V. F., Gleeson, T., Loveless, S. E., Bour, O., & Scibek, J. (2013). Fault zone hydrogeology. *Earth-Science Reviews*, 127, 171–192. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2013.09.008>
- Bosch, A. (2014). Nociones de Hidrogeología para Ambientólogos .No Title. Universidad de Almería.
- Botero, E. (1963). Formación Quebradagrande.
- Braun, A. (2021). Sentinel-1 Toolbox DEM generation with Sentinel-1 Workflow and challenges. January 2020, 1–29. <https://doi.org/10.1515/geo-2020-0246>
- Bustamante Porras, L. Y., & Reyes López, Y. D. (2013). Caracterización y consolidación de información hidrogeológica secundaria disponible de los sistemas acuíferos de la Región Andina de Occidente. https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/432
- Caballero A., H., & Zapata G., G. (1984). Geología y geoquímica de la plancha 224 Pereira. Ingeominas, 1–186.
- Cao, X., Liu, Z., Hu, C., Song, X., Quaye, J. A., & Lu, N. (2024). Three-Dimensional Geological Modelling in Earth Science Research: An In-Depth Review and Perspective Analysis. *Minerals*, 14(7), 686. <https://doi.org/10.3390/min14070686>
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). (2017). Actualización POMCA río Otún. *Investigación y Ciencia*, 23(485), 303–312.
- Corporación Autónoma Regional de Risaralda (CARDER). (2023). Adelantar el estudio técnico: Formulación de medidas de manejo ambiental (FMMAA) del acuífero Abanico Quindío–

Risaralda–Valle del Cauca, fase II, en el marco de los POMCAS priorizados Otún y La Vieja según dispone la Guía Metodológica para Formulación 2014.

Condon, L. E., Kollet, S., Bierkens, M. F. P., Fogg, G. E., Maxwell, R. M., Hill, M. C., Fransen, H. J. H., Verhoef, A., Van Loon, A. F., Sulis, M., & Abesser, C. (2021). Global Groundwater Modeling and Monitoring: Opportunities and Challenges. *Water Resources Research*, 57(12), 1–27. <https://doi.org/10.1029/2020WR029500>

De Graaf, I. E. M., Sutanudjaja, E. H., Van Beek, L. P. H., & Bierkens, M. F. P. (2015). A high-resolution global-scale groundwater model. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19(2), 823–837. <https://doi.org/10.5194/hess-19-823-2015>

Equipozo. (2023). Nivel estático y dinámico en pozos de agua. https://www.equipozo.com/post/nd_ne

Espinosa, A. (2020). A Model of the Quindío and Risaralda Quaternary Deposits. *The Geology of Colombia, Volume 4 Quaternary*, 4(November), 333–352. <https://www2.sgc.gov.co/LibroGeologiaColombia/Paginas/v4ch9.aspx>

Espinoza, S., & Procel, S. (2022). Correlación Entre La Conductividad Hidráulica Y La Resistividad Eléctrica De Depósitos Volcánicos Del Chimborazo En La Cuenca Baja Del Río Chambo, Provincia De Chimborazo. <https://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/23422>

Fitts, C. (2012). *Groundwater science*.

Gao, H. (2011). Groundwater Modeling for Flow Systems with Complex Geological and Hydrogeological Conditions. *Procedia Earth and Planetary Science*, 3, 23–28. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2011.09.061>

Garzón, L. (2002). Aplicación de Visual MODFLOW para el modelamiento numérico del flujo de agua subterránea en el Acuífero Morroa (Sucre–Córdoba). ... de Elementos Finitos y Modelamiento Numérico, ..., 1–13. [http://www.researchgate.net/profile/Leonardo_Donado/publication/240619620_Aplicacin_d_e_Visual_MODFLOW_para_el_modelamiento_numrico_del_flujo_de_agua_subternea_en_el_Acufero_Morroa_\(Sucre_-_Crdoba\)/links/543fbc550cf2be1758cf91a3.pdf](http://www.researchgate.net/profile/Leonardo_Donado/publication/240619620_Aplicacin_d_e_Visual_MODFLOW_para_el_modelamiento_numrico_del_flujo_de_agua_subternea_en_el_Acufero_Morroa_(Sucre_-_Crdoba)/links/543fbc550cf2be1758cf91a3.pdf)

GEOEX. (1993). GEO-02-187. Exploración geoelectrica de aguas subterráneas en la finca La Badea, Dosquebradas, Risaralda.

GEOEX. (2002). GEO-02-219. Exploración geoelectrica de aguas subterráneas, planta Nicole S.A.

GEOSUB S.A.S. (2007). Exploración geoelectrica de aguas subterráneas, planta Austin Reed. *Journal GEEJ*, 7(2), 1–23.

- GEOSUB S.A.S. (2014). Informe determinación de parámetros hidráulicos La Rosa.
- GEOSUB S.A.S. (2015). GEO-02-320. Estudio geoelectrico predio Semillas del Otún.
- GEOSUB S.A.S. (2016a). Exploración geoelectrica, Tintorería.
- GEOSUB S.A.S. (2016b). GEO-02-334. Exploración geoelectrica, planta Zarpollo – Dosquebradas, Risaralda.
- GEOSUB S.A.S. (2021). GEO-04-291. Mantenimiento de pozo profundo Papeles Regionales.
- GEOSUB S.A.S. (2022). GEO-02-416. Exploración geoelectrica para el aprovechamiento de agua subterránea en la planta de Cartones y Papeles del Risaralda.
- GEOSUB S.A.S. (2023). GEO-04-361. Mantenimiento del pozo profundo RIPE-206, Textiles Omnes.
- GEOSUB S.A.S. (2024). GEO-02-424. Estudio geoelectrico, vereda Las Hortensias, Alto del Nudo.
- Geoxnet. (2016). Escala Granulométrica de Udden-Wentworth. <https://post.geoxnet.com/escala-granulometrica-de-udden-wentworth/>
- Gidahatari. (2014). Glosario para evaluaciones hidrogeológicas. <https://gidahatari.com/ih-es/glosario-para-evaluaciones-hidrogeologicas>
- Giraldo, N. (2022). Mapa geológico de Dosquebradas - Colombia.
- Gobernación de Risaralda. (2024). Gobernación de Risaralda A diferencia de otros departamentos, en Risaralda no hay riesgo de racionamiento de agua.
- Guarín, F. (2008). Estudio sedimentológico del abanico volcánico Quindío-Risaralda (Colombia) y su relación con la morfoestructura [Tesis doctoral, Université de Genève]. <https://doi.org/10.13097/archive-ouverte/unige:275>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Glosario. Recuperado de <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Glosario. Recuperado el 29 de mayo de 2025, de <http://www.ideam.gov.co/web/atencion-y-participacion-ciudadana/glosario>
- Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2021, 29 de marzo). Resolución No. 370 de 2021. https://www.igac.gov.co/sites/igac.gov.co/files/resolucion_370_de_2021.pdf
- ingpetol. (2016). valores operativos de los registros de rayos gamma. <https://ingpetol.blogspot.com/2016/07/>

- Instituto Geológico y Minero de España. (2023). Glorasio de términos hidrogeológicos. https://aguas.igme.es/igme/publica/libros1_HR/libro110/Pdf/lib110/in_terminos.pdf
- James, M. E. (1985). Evidencia de colisión entre la Miniplaca Bloque Andino y la Placa Norteamericana desde el Mioceno Medio. Bogotá.
- Jones, R. N., Chiew, F. H. S., Boughton, W. C., & Zhang, L. (2006). Estimating the sensitivity of mean annual runoff to climate change using selected hydrological models. *Advances in Water Resources*, 29(10), 1419–1429. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2005.11.001>
- Lohman. (1972). *Ground-Water Hydraulics*.
- Lozano, H. (1975). Complejo Metasedimentario-volcánico de Aránzazu-Manizales.
- Marín, N. C. (2006). Interpretación y correlación de registros geofísicos en sondeos de captación de aguas subterráneas para la caracterización hidrogeológica y la gestión de la explotación [Tesis de maestría, Universidad de Barcelona]. <http://hdl.handle.net/2445/123456>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2023). Estudio nacional del agua 2022. In Ministerio de Medio Ambiente.
- Otálvaro, D. L., Arias, F. G., & Veléz, M. E. (2009). Uso de métodos geofísicos e isotópicos en la construcción de un modelo hidrogeológico conceptual para los acuíferos de Pereira y Dosquebradas, Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente*, 58, 89–96. http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr/bitstream/handle/11554/6887/Uso_de_metodos_geofisicos_pdf.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Palacios, T. (1997). Estudio geoelectrico para prospección de aguas subterráneas (Reporte No. GEO-02-212).
- Pathak, R., Awasthi, M. K., Sharma, S. K., Hardaha, M. K., & Nema, R. K. (2018). Ground Water Flow Modelling Using MODFLOW –A Review. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, 7(2), 83–88. <https://doi.org/10.20546/ijcmas.2018.702.011>
- Río, J. F. del. (2015). Master ' S Thesis Hydrogeological Model of Aitik Mine Using Leapfrog Geo Software. 75.
- Sánchez, J. S. R. (2022). *Hidrología Superficial y Subterránea*. 1, 1–11.
- Sanders, L. (1998). *Manual of Field Hydrogeology*. Prentice-Hal.
- SEQUENT. (2023). Modelado hidrogeológico utilizando Leapfrog Works. <https://www.sequent.com/es/modelado-hidrogeologico-utilizando-leapfrog-works-serie-de-seminarios-web/>

Serna, L. M., Montes, L., & Vargas, C. (2008). Modelamiento geofísico de un área de la zona de cerritos, municipio de Pererira (Risaralda). *Ciencias de La Tierra*.

Servicio Geológico Colombiano (SGC). (2016). Modelo hidrogeológico de la zona sur del Eje Cafetero-Departamento del Quindío.
<http://recordcenter.sgc.gov.co/B19/23008010028513/Documento/Pdf/2105285131101000.pdf>

Suárez, N. (2021). Construcción de modelo hidrogeológico conceptual del sistema acuífero bajo el casco urbano del municipio de Málaga, Santander.
<https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/80730>

Suter, F., Sartori, M., Neuwerth, R., & Gorin, G. (2008). Structural imprints at the front of the Chocó-Panamá indenter: Field data from the North Cauca Valley Basin, Central Colombia. *Tectonophysics*, 460(1–4), 134–157. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2008.07.015>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2022). The United Nations world water development report 2022: Groundwater: making the invisible visible. <https://doi.org/10.18356/9789210019407>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2024). Agua para la prosperidad y la paz. Recuperado de <https://www.unesco.org/es/wwap/water-security/peace>

Velasco, V., Gogu, R., Vázquez-Suñè, E., Garriga, A., Ramos, E., Riera, J., & Alcaraz, M. (2013). The use of GIS-based 3D geological tools to improve hydrogeological models of sedimentary media in an urban environment. *Environmental Earth Sciences*, 68(8), 2145–2162. <https://doi.org/10.1007/s12665-012-1898-2>

Velásquez, Y. (2023). Estudio geoelectrico para aprovechamiento de aguas subterráneas, vereda Huertas, municipio de Pereira.

Winter, T. C., Harvey, J. W., Franke, O. L., & Alley, W. M. (1998). Ground Water And Surface Water A Single Resource Notes: Includes bibliographical references. U.S. Geolo(May).

Anexos

Carta de solicitud de información CARDER



No de Oficio 36193

D:63
Pereira, 19 de diciembre de 2024

Señor
YERSON ANDREY VELASQUEZ GONZALEZ

Asunto: Respondiendo a: Solicitud de información hidrogeologica de la subcuenca Dosquebradas.
Radicado No.15794 y Ticket 9727 del 2024.

Cordial saludo.

En atención a su solicitud de información relacionada con los pozos profundos que captan recurso hídrico en el municipio de Dosquebradas, así como los datos geofísicos, estudios geológicos y demás información asociada al acuífero de dicho sector, nos permitimos informarle que hemos habilitado un espacio de almacenamiento en línea donde podrá acceder a los archivos solicitados.

Para su conveniencia, los documentos están disponibles en el siguiente enlace de Google Drive:

<https://drive.google.com/drive/folders/17idR5FyOGrVRxz9padRQ4i03ZJRo9KtN?usp=sharing>

En dicho enlace encontrará los archivos Open Source relacionados con:

- Niveles estáticos y dinámicos de los pozos profundos, según corresponda.
- Profundidad de filtros y diseño de pozos disponibles.
- Datos geofísicos, estudios geofísicos y geológicos relacionados con la subcuenca de interés.
- Otros documentos y recursos disponibles para su investigación.

Le agradecemos por su interés en el estudio de los recursos hídricos de nuestra región y quedamos atentos a cualquier consulta adicional que pueda tener en el desarrollo de su proyecto. En caso de requerir información adicional puede contactarse a la línea telefónica 3116511 Ext. 0190 en el siguiente horario: de lunes a jueves de 7 am a 12:00, 1:00 pm a 4:00 pm y los viernes en jornada continua desde las 7:00 am hasta las 3:30 pm.

Atentamente,

www.carder.gov.co

NIT: 891410354-4 - Dirección: Av. Las Américas No 46-40 - Pereira, Risaralda - Colombia.
PBX (+57) 606 311 6511 - Línea gratuita de atención 018000 51840