

Prospección geoeléctrica (sondeos eléctricos verticales “SEV” y tomografías de resistividad eléctrica “TRE”) para la caracterización del subsuelo con fines de exploración del recurso hídrico en la zona alta de la vereda Buenavista en el municipio de Macaravita, Santander.

Silvia Yulieth Pinzón Mogollón

Trabajo de Grado para Optar el título de Geóloga

Director

Luis Eduardo Moreno Torres

Ingeniero civil

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Escuela de Geología
Bucaramanga

2019

Dedicatoria

A mi emprendedora mamá Fanny Mogollón, por ser mi pilar, enseñarme a soñar y a trabajar,

brindarme todo su amor, ser mi apoyo incondicional, mi mejor amiga y consejera.

A mi hermano Anderson Pinzón, por motivarme a ser su ejemplo y mejor persona cada día.

A mi tío Moisés Mogollón, por inculcarme el amor al conocimiento desde mi niñez.

Y a nuestro tesorito Alejandro Mogollón, por ser motivo de unión familiar.

Agradecimientos

A Dios por mi feliz y saludable vida, y permitirme estudiar la profesión que me apasiona. Agradezco a la Universidad Industrial de Santander por ser mi segundo hogar durante estos años de pregrado; al teatro UIS, al equipo de selección Ultimate, al personal docente y demás funcionarios, por aportar a mi formación y hacer de mí, una profesional íntegra.

Al grupo de investigación de GEOMÁTICA por el préstamo del equipo tomógrafo SUPERSTING y a la escuela de Geología por el préstamo del equipo de geoeléctrica ABEM. Al Ingeniero Mecánico Juan David Castellanos Prada por compartir sus ideas y su tiempo, brindarme su aprecio, enseñanzas y apoyo incondicional.

Al ingeniero civil y buen amigo Luis Eduardo Moreno Torres, director de esta tesis y su querida mamá, doña Bertha Torres, por su aprecio y hospitalidad en Málaga.

A la profesora PhD. Rocio del Pilar Bernal Olaya, por su dedicación y correcciones.

Al profesor MSc. Juan David Badillo, por sus enseñanzas en el campo estructural.

A mi gran amiga y profesora Vanessa Rey por sus sugerencias y contribuciones.

Al geólogo Jesús Rincón por compartir sus conocimientos de la maestría.

Al profesor Jaiber Leonardo Villamizar por sus correcciones y consideraciones en el proyecto.

Al Ingeniero MBA. Leonardo Pedrozo por su disposición, consejos y motivación.

A Luis Eduardo Garrido Palencia por toda su colaboración y entrega en el laboratorio.

A Cesar Enrique Llerena Betancour por su ayuda en la escuela.

A Martha Liliana Blanco Giraldo por su paciencia y seguimiento en este proyecto.

Y finalmente, a toda la gente querida de la vereda Buenavista, por su apoyo durante el desarrollo de mi trabajo de campo en la zona y especialmente a Doña Nelly Nova y su familia, por su hospitalidad y cariño durante mi estadía.

Tabla de contenido

Introducción	17
1. Objetivos	18
1.1 Objetivo General	18
1.2 Objetivos Específicos	18
2. Generalidades	19
2.1. Localización	19
2.2. Antecedentes	21
2.3. Marco Geológico	23
2.3.1. Geología estructural.	23
2.3.2. Estratigrafía	30
2.3.3. Geomorfología	33
3. Marco Geofísico	37
3.1. Método Geoeléctrico – Resistividad eléctrica	37
3.2. Arreglos electródicos	38
3.3. Propiedades físicas	40
3.4. Conductividades de las rocas comunes	42
4. Formulación de hipótesis	43
5. Metodología y base de datos	44
5.1. Revisión bibliográfica	44
5.2. Exploración de Campo	45

5.2.1. Reconocimiento hidrogeológico	45
5.2.2. Adquisición con SEV	47
5.2.3. Adquisición con TRE	50
5.3. Procesamiento de datos	52
5.3.1. Procesamiento SEV	52
5.3.2. Procesamiento TRE	54
6. Resultados	57
6.1. Resultados SEV	58
6.2. Resultados TRE	69
7. Discusión	71
8. Conclusiones	73
9. Recomendaciones	74
Referencias bibliográficas	75

Lista de Tablas

Tabla 1. <i>Resistividad en rocas</i>	22
Tabla 2. <i>Resistividad en materiales rocosos</i>	22
Tabla 3. <i>Ambientes morfogenéticos y sus respectivas unidades.</i>	36
Tabla 4. <i>Parámetros utilizados para definir las propiedades conductoras ó resistivas y sus unidades asociadas</i>	41
Tabla 5. <i>SEV 1</i>	58
Tabla 6. <i>Interpretación SEV 1</i>	58
Tabla 7. <i>SEV 2</i>	59
Tabla 8. <i>Interpretación SEV 2</i>	59
Tabla 9. <i>SEV 3</i>	60
Tabla 10. <i>Interpretación SEV 3</i>	60
Tabla 11. <i>SEV 6</i>	61
Tabla 12. <i>Interpretación SEV 6</i>	61
Tabla 13. <i>SEV 8</i>	62
Tabla 14. <i>Interpretación SEV 8</i>	62
Tabla 15. <i>SEV 9</i>	63
Tabla 16. <i>Interpretación SEV 9</i>	63
Tabla 17. <i>SEV 11</i>	64
Tabla 18. <i>Interpretación SEV 11</i>	64
Tabla 19. <i>SEV 12</i>	65

Tabla 20. *Interpretación SEV 12* 65

Tabla 21. *Comparación de resistividades entre diferentes autores*..... 72

Lista de Figuras

Figura 1. Localización geográfica de la vereda Buenavista.	20
Figura 2. Marco Geológico. (A) Marco tectónico general de Colombia. (B) Ubicación de la zona de estudio sobre el terreno geológico Chibcha. Adaptado de Notas explicativas: Mapa geológico de Colombia, Servicio Geológico, 2015. (C) Ubicación de la zona de estudio dentro la cuenca Cordillera Oriental (10) y los sistemas de fallas limítrofes. Adaptado de Cuencas sedimentarias de Colombia, ANH, 2007.	24
Figura 3. Localización geológica de la zona de estudio (recuadro rojo) y las estructuras de deformación como fallas, pliegues, fracturas, sinclinales y anticlinales que la rigen. Adaptado de la Plancha 136, Servicio Geológico Colombiano, 2003.	26
Figura 4. a) Contacto entre la Fm. Aguardiente y la Fm. Tibú-Mercedes, b) Flanco occidental del anticlinal.	27
Figura 5. Corte AA' ubicado al Norte de la zona de estudio. Escala Horizontal y Vertical 1:10.000.	27
Figura 6. Corte BB' ubicado al Sur de la zona de estudio. Escala Horizontal y Vertical 1:10.000.	28
Figura 7. a) Lodolitas basculadas, b) Diaclasas $92^{\circ}/90^{\circ}$, $132^{\circ}/73^{\circ}$, $75^{\circ}/80^{\circ}$ y $205^{\circ}/80^{\circ}$	28
Figura 8. Mapa geológico de la zona de estudio con ubicación de puntos de control, SEV y TRE.	29
Figura 9. Columna estratigráfica generalizada de la vereda Buenavista. Adaptado de Proyecto Cretácico. Etayo, F. (1985) y Memoria explicativa 136 Málaga. Vargas, R. (1981).	32

Figura 10. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio.....	35
Figura 11. Ambiente morfogenético denudacional en sectores de Mesetas y Pantano Grande, respectivamente.....	36
Figura 12. Ambiente morfogenético estructural hacia el Este y ambiente fluvial hacia el Sur, respectivamente.....	36
Figura 13. Esquema del arreglo electródico tipo Wenner. Recuperado de https://www.agiusa.com/wenner-array	38
Figura 14. Esquema del arreglo electródico tipo Schlumberger. Recuperado de https://www.agiusa.com/schlumberger-array	40
Figura 15. Valores de conductividad y/o resistividad eléctrica para tipos de roca comunes. Recuperado de https://gpg.geosci.xyz/_images/resistivity_table1.png	43
Figura 16. Esquema de la metodología propuesta en el presente proyecto.	44
Figura 17. A) Arenisca en la Formación Aguardiente (Kia), B) Caliza de la Formación Tibú- Mercedes (Kitm) y Zona de recarga del agua, C) Contacto neto entre Arenisca y lodolita de la Formación Tibú-mercedes (Kitm), D) Caliza fosilífera de la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) y zona de descarga del agua.....	46
Figura 18. Localización de sondeos eléctricos verticales y tomografías de resistividad eléctrica.	48
Figura 19. SEV. Transecta de 160 m, con equipo ABEM Terrameter y arreglo electródico tipo Schlumberger, en el sector de Sabanetas.	48
Figura 20. TRE. Transecta de 496 m, con equipo SuperSting R8 y arreglo electródico tipo Wenner-Schlumberger, en el sector de Pantano Grande.	51
Figura 21. Resistividades aparentes en el software IPI2Win	53

Figura 22. Inversión y Resistividades reales en el software IPI2Win	53
Figura 23. Procesamiento en EarthImager: Perfil de las resistividades aparentes adquiridas en campo, Perfil calculado de resistividades aparentes y Perfil invertido con resistividades reales.	55
Figura 24. Pseudosección de datos totales. Herramienta Data Misfit Pseudosección. La escala de color se distribuye simétricamente a partir del 0% de error relativo.	55
Figura 25. Pseudosección de datos totales sobre una gráfica de puntos. Herramienta Surface Data Misfit Scatter Plot.	56
Figura 26. Grafica de dispersión. El eje horizontal es el logaritmo de la resistividad aparente medida y el eje vertical es el logaritmo de resistividad aparente calculada o modelada.	57
Figura 27. Resultado al procesar el SEV 1	58
Figura 28. Resultado al procesar el SEV 2.	59
Figura 29. Resultado al procesar el SEV 3	60
Figura 30. Resultado al procesar el SEV 6	61
Figura 31. Resultado al procesar el SEV 8	62
Figura 32. Resultado al procesar el de SEV 9	63
Figura 33. Resultado al procesar el SEV 11	64
Figura 34. Resultado al procesar el SEV 12	65
Figura 35. Perfil 2D a partir de la correlación de los SEV1, SEV2, SEV3, Y SEV6.....	66
Figura 36. Interpretación de la sección de resistividad SEV 1, SEV2, SEV3 y SEV6.....	67
Figura 37. Perfil 2D a partir de la correlación de los SEV8, SEV9, SEV11, SEV12, SEV13 y SEV14.	68
Figura 38. Interpretación de la sección de resistividad SEV 8, SEV9, SEV11 y SEV12.....	68

Figura 39. Pseudosección de resistividad invertida	69
Figura 40. Modelo geológico a partir de la pseudosección de la TRE 1.	70
Figura 41. Pseudosección de resistividad invertida	70
Figura 42. Modelo geológico a partir de la pseudosección de la TRE 2.	71

Lista de Apéndices

(Ver apéndices adjuntos en el CD y visualizarlos en la Base de datos de la biblioteca UIS)

Apéndice A. Cortes Geológicos.

Apéndice B. Mapa geológico con buzamientos y cortes.

Apéndice C. Mapa geológico Plancha 136-IV-A-4 de Málaga a escala 1:10.000.

Apéndice D. Descripción detallada de los puntos de control.

Apéndice E. Columna generalizada.

Apéndice F. Descripción detallada de la geomorfología y las unidades morfogénicas.

Apéndice G. Mapa geomorfológico a escala 1:10.000.

Resumen

TITULO: PROSPECCIÓN GEOELÉCTRICA (SONDEOS ELÉCTRICOS VERTICALES “SEV” Y TOMOGRAFÍAS DE RESISTIVIDAD ELÉCTRICA “TRE”) PARA LA CARACTERIZACIÓN DEL SUBSUELO CON FINES DE EXPLORACIÓN DEL RECURSO HÍDRICO EN LA ZONA ALTA DE LA VEREDA BUENAVISTA EN EL MUNICIPIO DE MACARAVITA, SANTANDER*

AUTORA: SILVIA YULIETH PINZÓN MOGOLLÓN**

DESCRIPCIÓN:

Con la necesidad de buscar fuentes alternativas para el abastecimiento de agua en la vereda de Buenavista, perteneciente al municipio de Macaravita en el departamento de Santander (Colombia); se realiza la caracterización de las capas del subsuelo por medio de observación geológica directa en campo y medidas de resistividad mediante prospección geoeléctrica en la zona de estudio. A partir del análisis geológico se observa que la zona presenta fuerte control estructural, al encontrarse, al Noreste sobre el flanco Oeste del anticlinal de Macaravita, donde se identifica la principal recarga de agua por infiltración y se estima que el recurso hídrico se encuentra en tránsito a través de roca fracturada en afloramientos pertenecientes a la formación Tibú-Mercedes; y al Sur se interpreta el flanco Este del sinclinal de Buenavista, donde se observan depósitos aluviales y se ubica el nacimiento de agua; ésta información correlacionada con el contraste de las resistividades obtenidas por medio de tomografías de resistividad eléctrica (TRE) y sondeos eléctricos verticales (SEV), permite estimar la vocación acuífera de las capas diferenciadas en el subsuelo, ya que los resultados muestran con mayor importancia, una capa de caliza de la formación Tibú-Mercedes, presente en el flanco occidental del anticlinal anteriormente mencionado, con porosidad secundaria, resistividades de (60 a 700) Ohm-m, a 40 metros de profundidad aproximadamente y con un espesor aproximado de 30 metros.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Luis Eduardo Moreno Torres, Ingeniero Civil

Abstract

TITLE: GEOELECTRIC PROSPECTION (VERTICAL ELECTRONIC SURVEYS "SEV" AND ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHIES "TRE") FOR THE CHARACTERIZATION OF THE SUBSIDE FOR THE EXPLORATION OF THE WATER RESOURCE IN THE HIGH AREA OF THE VERENA BUENAVISTA IN THE MUNICIPALITY OF MACARAVITA, SANTANDER*

AUTHOR: SILVIA YULIETH PINZÓN MOGOLLÓN**

DESCRIPTION:

With the need to seek alternative supply for water in Buenavista, Macaravita in the department of Santander (Colombia), the characterization of subsoil layers is carried out through a direct geological observation in the field and resistivity measurements through geoelectrical research in the field of study. From the geological analysis it is observed that the zone presents strong structural control, being located to the Northeast on the western flank of the Macaravita anticline, where the main water recharge is identified by infiltration and it is estimated that the water resource is in transit, through fractured rock in outcrops in the Tibú-Mercedes formation, and, to the south on the eastern flank of the Buenavista syncline, where alluvial deposits are observed, and the water spring is located. This information, correlated with the contrast of the resistivity obtained by the Electrical Resistivity Tomography (ERT) and Vertical Electrical Soundings (VES), allows estimating the aquifer vocation of the differentiated layers in the subsoil, and identifying a limestone layer with secondary porosity and resistivity of (60 – 700) Ohm-m, at approximately 40 meters depth and an approximate thickness of 30 meters, which is of great importance in the hydrogeological system of the area.

* Bachelor Thesis

** Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Geología. Director: Luis Eduardo Moreno Torres, Ingeniero Civil

Introducción

La vereda Buenavista perteneciente al municipio de Macaravita se encuentra localizada en el departamento de Santander y se establece sobre un área aproximada de 11.18 km², tiene una escuela rural, un centro de atención médico y es habitado por cuarenta familias, las cuales, a la fecha no cuentan con un servicio de acueducto ni distrito de riego. En el Plan de ordenamiento territorial de Macaravita del 2003, se evidencia una descripción general acerca de la geología, en el ítem que concierne a la vereda Buenavista, pero no se reportan previas perforaciones ni estudios hídricos en esta zona. De otra parte, y según información SECOP I del año 2015, existe un proyecto de inversión para la construcción del acueducto rural de la vereda y el proceso se encuentra en estado de: “levantamiento topográfico de 18 kilómetros para la determinación de viabilidad de la elaboración del diseño y construcción del acueducto para la vereda Buenavista. De manera que, debido a la falta de información hidrogeológica en la zona, surge la necesidad de realizar el presente estudio sobre un área de trabajo que cubre una extensión de 6 Km² en la vereda, para generar un diagnóstico sobre el tema de agua subterránea, a partir de la observación directa en campo, integrada con los resultados de la prospección geoeléctrica: sondeos eléctricos verticales, en adelante “SEV” y tomografías de resistividad eléctrica, en adelante “TRE”; y así, dar respuesta a preguntas como: ¿Existen capas en el subsuelo con vocación acuífera? y de ser así, ¿Qué tipo de roca se estima está funcionando como acuífero? ¿Presenta la capa rocosa porosidad primaria o secundaria? ¿A qué profundidad se encuentra la capa con vocación acuífera?, entre otras, y de esta manera, poder sugerir a la comunidad una alternativa para el abastecimiento de agua.

1. Objetivos

1.1 Objetivo General

Caracterizar las capas del subsuelo mediante transectas de SEV y TRE, en los sectores de Pantano Grande y Sabanetas (zona alta de la vereda Buenavista), para estimar la vocación acuífera de éstas y sugerir zonas favorables para el abastecimiento del recurso hídrico.

1.2 Objetivos Específicos

Comprender la geología de la zona, con base en información bibliográfica y observación directa, y así realizar el mapa geológico a escala 1:10.000, columna generalizada y corte en el área de estudio.

Generar el modelo geológico del subsuelo en el área de interés, interpretado a partir de los contrastes de resistividad en los modelos geoeléctricos (2D), con sus respectivos espesores, profundidades y resistividades reales, e integrado con las observaciones directas en campo.

Sugerir la ubicación de zonas favorables para el aprovechamiento de agua subterránea, una vez estimado el potencial hídrico del subsuelo en el área de estudio.

2. Generalidades

2.1. Localización

La vereda Buenavista comprende un área de aproximadamente 11.18 km², se encuentra localizada hacia el occidente del municipio de Macaravita, en el departamento de Santander, Colombia, en Latitud 6°30'07''N y Longitud 72°36'26''W (ver figura 1). Se ubica sobre la Cordillera Oriental de los Andes, geológicamente se sitúa en el borde oriental del Macizo de Santander. Geográficamente la zona de estudio se encuentra ubicada en la parte alta de dicha vereda, en los sectores de Sabanetas y Pantano Grande y en general ocupa un área de 6 km².

La zona de estudio presenta clima de montaña y piso biotérmico frío, dado que la vereda se sitúa entre los 2.000 y 3.000 metros de altitud, la temperatura varía entre los 12° y 18° centígrados y la precipitación media oscila entre 900 y 1200 mm anuales. La vereda se encuentra enmarcada por la quebrada los Molinos hacia el Oeste, que limita zonas con buenos pastos para la ganadería y cultivos tales como: papa, trigo, maíz, alverja, frijol, tabaco, frutas y hortalizas (Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Macaravita. Tomo II, 2003).

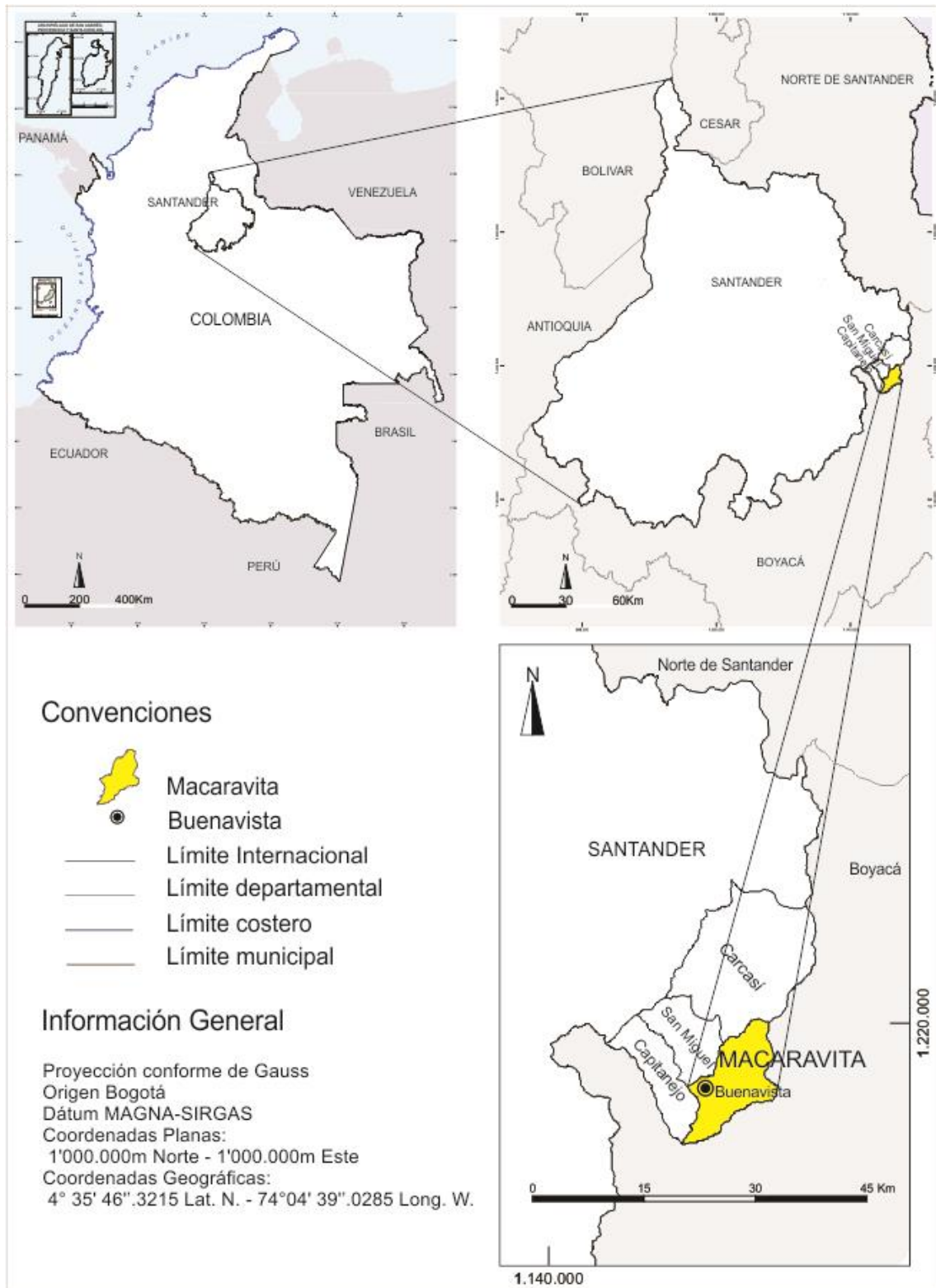


Figura 1. Localización geográfica de la vereda Buenavista.

2.2. Antecedentes

La geología del área de estudio se encuentra descrita en la plancha geológica 136-IV-A de Málaga del SGC (Vargas et al., 1981), así mismo, la descripción litológica y estratigráfica se reconoce en la memoria explicativa de ésta, y se complementa con estudios más detallados identificados en el esquema de ordenamiento territorial de Macaravita (2003).

Respecto al tema geofísico, dos autores han caracterizado a la Formación Tibú-Mercedes, mediante prospección geoelectrica, en detalle así: Para su proyecto de pregrado, Salamanca (2017), a partir de tomografías de resistividad eléctrica en el municipio de Málaga, sugiere al potencial hídrico al miembro calcáreo de la Formación Tibú-Mercedes con rangos de resistividad de 48 a 960 Ohm.m. Del mismo modo, en su tesis de pregrado, Tarazona (2018) mediante experimentos de laboratorio, donde se mide la resistividad para una muestra de caliza perteneciente a la Formación Tibú-Mercedes con dimensiones conocidas y sometida a diferentes condiciones de humedad, propone rangos de resistividades que van desde 310.61 Ohm.m (condiciones saturadas de agua), pasando por resistividades de 2773.9 Ohm.m (ligeramente húmeda) hasta resistividades de 5692.9 Ohm.m (caliza seca).

Knödel. K. (2007) en su estudio sobre los principios para medir resistividad a partir de diferentes arreglos electródicos, describe las resistividades esperadas para cada tipo de material rocoso (ver tabla 1); Y por su parte, Hoyos F. (2000) en su investigación sobre la relación entre resistividad eléctrica y características de los geomateriales a partir de sondeos eléctricos verticales, establece también, unos rangos de resistividades para algunas rocas (ver tabla 2).

Tabla 1. Resistividad en rocas

Material	Resistividad ($\Omega.m$)	
	Mínima	Máxima
Grava	50 (saturda)	>10.000 (seca)
Arena	50 (saturda)	>10.000 (seca)
Limo	20	50
Marga	30	100
Arcilla (húmeda)	5	30
Arcilla (seca)		>1000
Arenisca	<50 (húmeda)	>100.000 (compacta)
Caliza	100 (húmeda)	>100.000 (compacta)
Agua natural	10	300

Nota: Modificado de Knödel K. 2007.

Tabla 2. Resistividad en materiales rocosos

Material	Resistividad ($\Omega.m$)
Basamento. Roca fraturada	1500 - 5000
Basamento. Roca fracturada saturada con agua corriente	100 - 2000
Gravas parcialmente saturadas	500 - 2000
Gravas saturadas	300 - 500
Arenas parcialmente saturadas	400 - 700
Arenas saturadas	100 - 200
Limos parcialmente saturados	100 - 200
Limos saturados	20 - 100

Nota: Modificado de Hoyos F. 2000.

2.3. Marco Geológico

Esta región presenta unidades del periodo geológico que comprende el Cretácico Inferior (Formaciones Tibú-Mercedes y Aguardiente), como también depósitos de origen Aluvial (Fluvial) y Coluvial (Gravitacional) del periodo Cuaternario. Su construcción toma en cuenta la plancha geológica, el esquema de ordenamiento territorial, la interpretación geomorfológica y el control de campo.

2.3.1. Geología estructural. El área de estudio está enmarcada sobre las montañas de la cordillera Oriental de Colombia, ésta a su vez, limitada por las planicies de los ríos Amazonas y Orinoco por el oriente, y el valle del río Magdalena por el occidente, así mismo, hace parte del sistema orogénico de la cordillera de Los Andes, cuya evolución ha sido compleja y en la actualidad se rige por esfuerzos compresivos asociados a la subducción de la Placa de Nazca bajo la Placa Suramericana y a una convergencia incipiente de la Placa Caribe (ver figura 2A). (Esquema de Ordenamiento Territorial Municipio de Macaravita. Tomo II, 2003). Así mismo, la zona se ubica en el terreno geológico Chibcha (ver figura 2B) con notaciones de edades que van desde el Mesoproterozoico (MP) al Neoproterozoico (NP) (Notas explicativas: Mapa geológico de Colombia, Servicio Geológico, 2015). La vereda Buenavista junto a las otras nueve veredas, que hacen parte del municipio de Macaravita, se encuentra incluida en la cuenca Oriental, compuesta por rocas que conforman el Sistema de ruptura Triásica, el cual resultó del llenado por sedimentos continentales marinos Cenozoicos-Mesozoicos del espacio generado por la ruptura de Pangea (Rolón et al., 2001). A principios del Paleógeno un evento de transpresión dextral provocó fallas y plegamientos, que contribuyeron a la inversión estructural de esta cuenca. Como consecuencia de su origen y desarrollo estructural, los límites actuales de la región andina son: al Norte rocas ígneas y metamórficas del Macizo del Santander (S.M.), al Sur el

sistema de fallas Algeciras-Garzón (A.G.F.S.), en el Oeste el sistema de fallas de Bituima y La Salina (B.S.F.S.) y hacia el Este el sistema de fallas de Guaicáramo (G.F.S.). El reciente empuje frontal de la Cordillera Oriental (ver figura 2C), involucró rocas sedimentarias del Cretácico, Paleógeno y Neógeno, suprayacidas por los depósitos Cuaternarios. (Cuencas sedimentarias de Colombia, ANH, 2007).

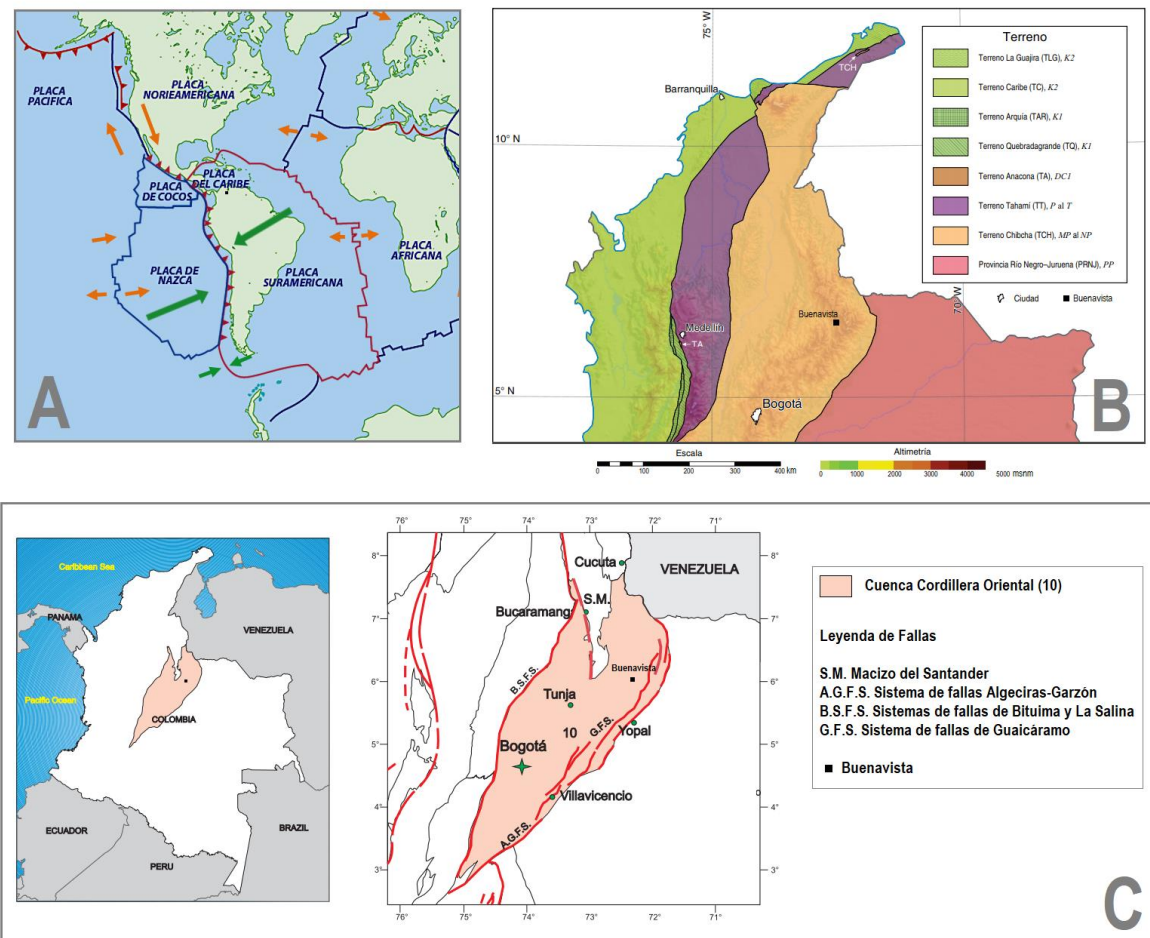


Figura 2. Marco Geológico. (A) Marco tectónico general de Colombia. (B) Ubicación de la zona de estudio sobre el terreno geológico Chibcha. Adaptado de Notas explicativas: Mapa geológico de Colombia, Servicio Geológico, 2015. (C) Ubicación de la zona de estudio dentro la cuenca Cordillera Oriental (10) y los sistemas de fallas limítrofes. Adaptado de Cuencas sedimentarias de Colombia, ANH, 2007.

En el municipio de Macaravita se encuentran evidencias de fallamiento, detallado en función de su orientación y comportamiento estructural, así (ver figura 3):

- Falla Macaravita. El trazo de la falla se encuentra localizada al Oeste del municipio de Macaravita, es de tipo inverso con dirección N - S y enfrenta litologías del Cretáceo.
- Falla El Ramal. El trazo de la falla se encuentra localizada al Este del municipio de Macaravita, es de tipo inverso con dirección N - S y en su transcurso controla el cauce de la Quebrada Honda. Enfrenta litologías del Cretáceo Inferior con Superior.
- Falla La Miel. El trazo de la falla se encuentra localizada en el sector septentrional del municipio, es de tipo rumbo sinistral con dirección NW - SE y en su transcurso controla el cauce de la Quebrada La Miel. Enfrenta litologías del Cretáceo.
- Falla Boca De Monte. El trazo de la falla se encuentra localizado en la parte NW del municipio, con dirección NW - SE y enfrenta litologías del Cretáceo Inferior con Superior con Terciario.
- Sinclinal Tarazona. El trazo del eje se encuentra localizado al E del municipio con dirección N - S y se encuentra desplazado en su parte Norte por el sistema en flor de fallas satélites conformado por litología Terciaria y hacia el Sur es de litología Cretácea.
- Sinclinal De Buenavista. El trazo del eje se encuentra localizado al W del municipio con dirección N - S y se encuentra controlado por las fallas Boca de Monte y Macaravita, conformado por litología Cretácea.

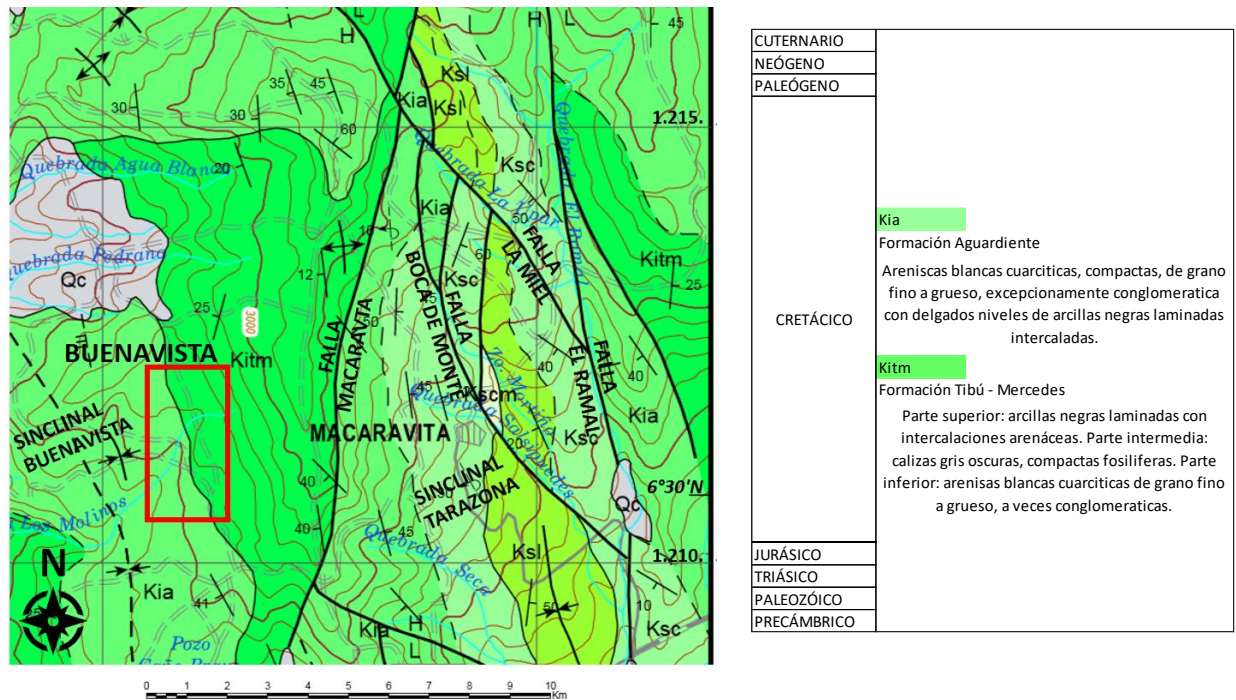


Figura 3. Localización geológica de la zona de estudio (recuadro rojo) y las estructuras de deformación como fallas, pliegues, fracturas, sinclinales y anticlinales que la rigen. Adaptado de la Plancha 136, Servicio Geológico Colombiano, 2003.

Más localmente, en la zona de estudio de la vereda Buenavista (ver figura 8, Apéndice B y C), se identifica que el control estructural tiene dos tendencias principales, una con orientación NE-SW y otra en dirección NW-SE; De acuerdo a los datos medidos en campo, se tiene que hacia el Este en general la dirección de estratificación en Azimut varía de $153^{\circ}/19^{\circ}$ a $166^{\circ}/37^{\circ}$, con diaclasas principales de $92^{\circ}/90^{\circ}$, $132^{\circ}/73^{\circ}$, $75^{\circ}/80^{\circ}$ y $205^{\circ}/80^{\circ}$; y hacia el Oeste la dirección de estratificación varia de $235^{\circ}/28^{\circ}$ a $345^{\circ}/44^{\circ}$ con diaclasas en dirección $241^{\circ}/86^{\circ}$, $345^{\circ}/90^{\circ}$, $40^{\circ}/66^{\circ}$ y $1^{\circ}/54^{\circ}$; De acuerdo a estos datos, al perfil estructural realizado (ver figura 5, 6 y Apéndice A) y los observados en la Plancha 136-IVA de Málaga, se define que la vereda

Buenavista bordea al Noreste con el flanco occidental del anticlinal de Macaravita (ver figura 3), y hacia el Sureste, se encuentra en el flanco oriental del sinclinal Buenavista.

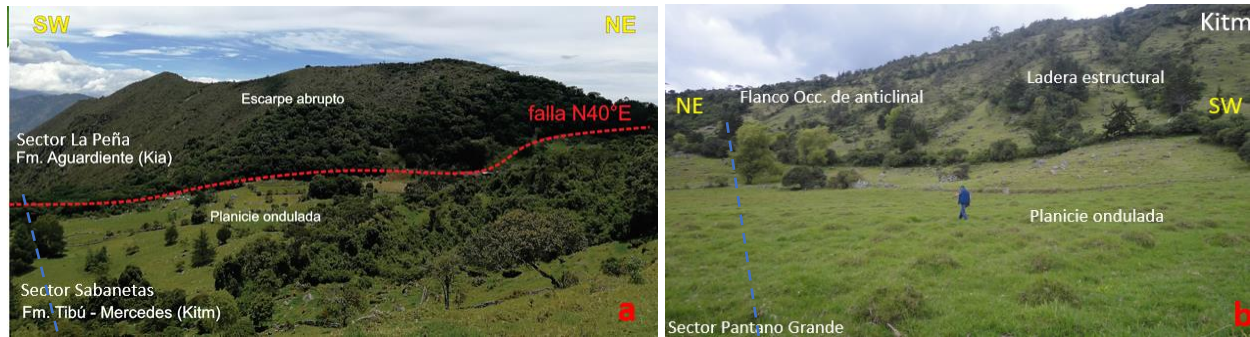


Figura 4. a) Contacto entre la Fm. Aguardiente y la Fm. Tibú-Mercedes, b) Flanco occidental del anticlinal.

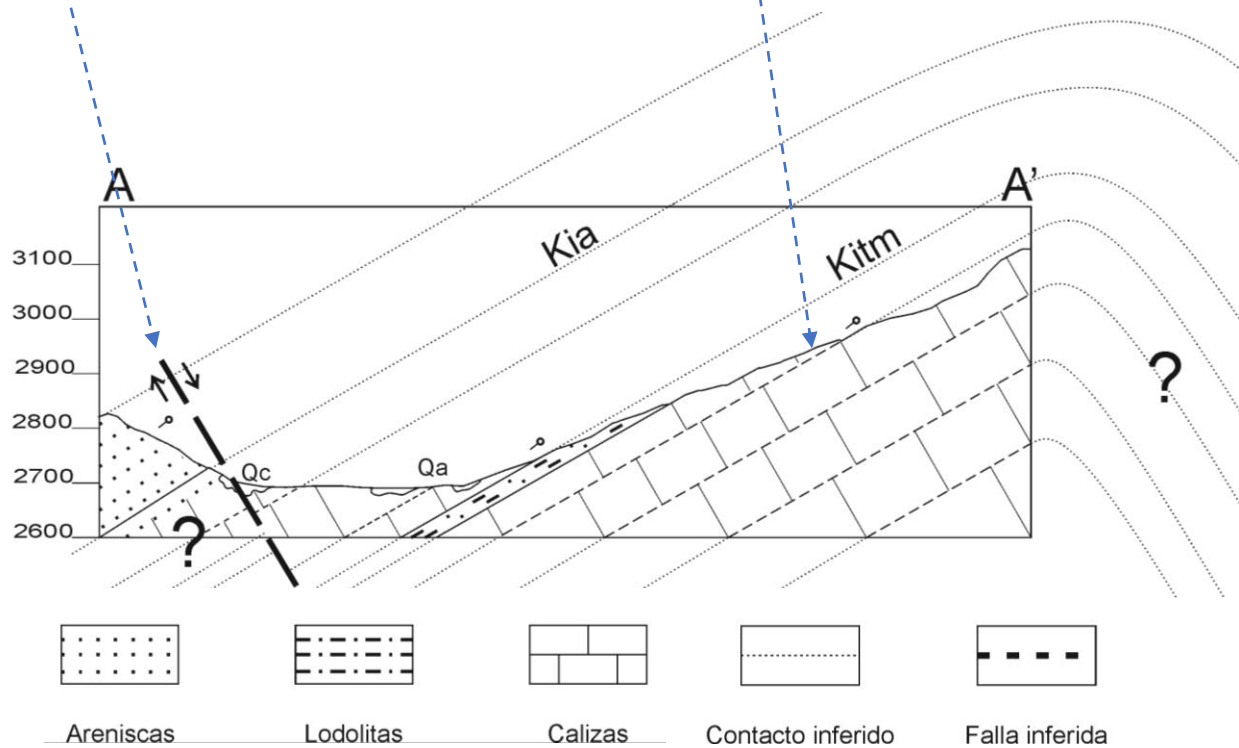


Figura 5. Corte AA' ubicado al Norte de la zona de estudio. Escala Horizontal y Vertical 1:10.000.

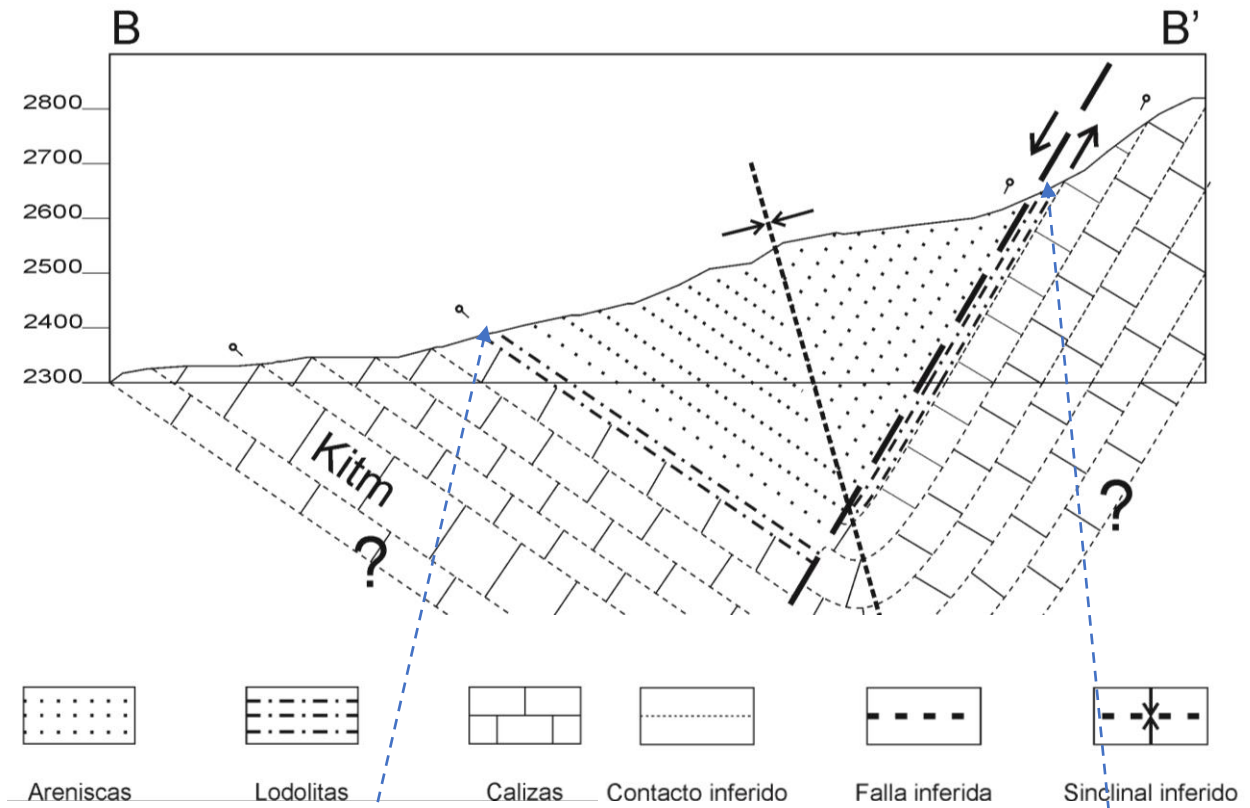


Figura 6. Corte BB' ubicado al Sur de la zona de estudio. Escala Horizontal y Vertical 1:10.000.

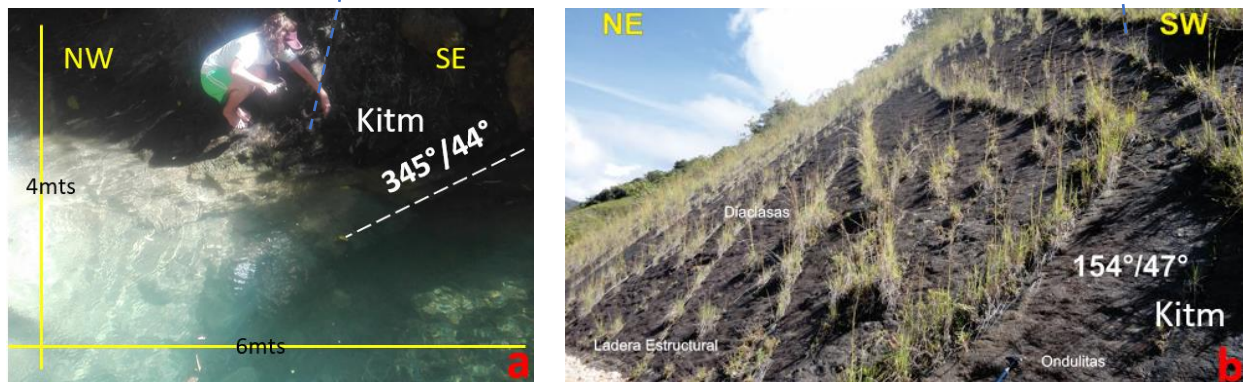


Figura 7. a) Lodolitas basculadas, b) Diaclasas 92°/90°, 132°/73°, 75°/80° y 205°/80°.

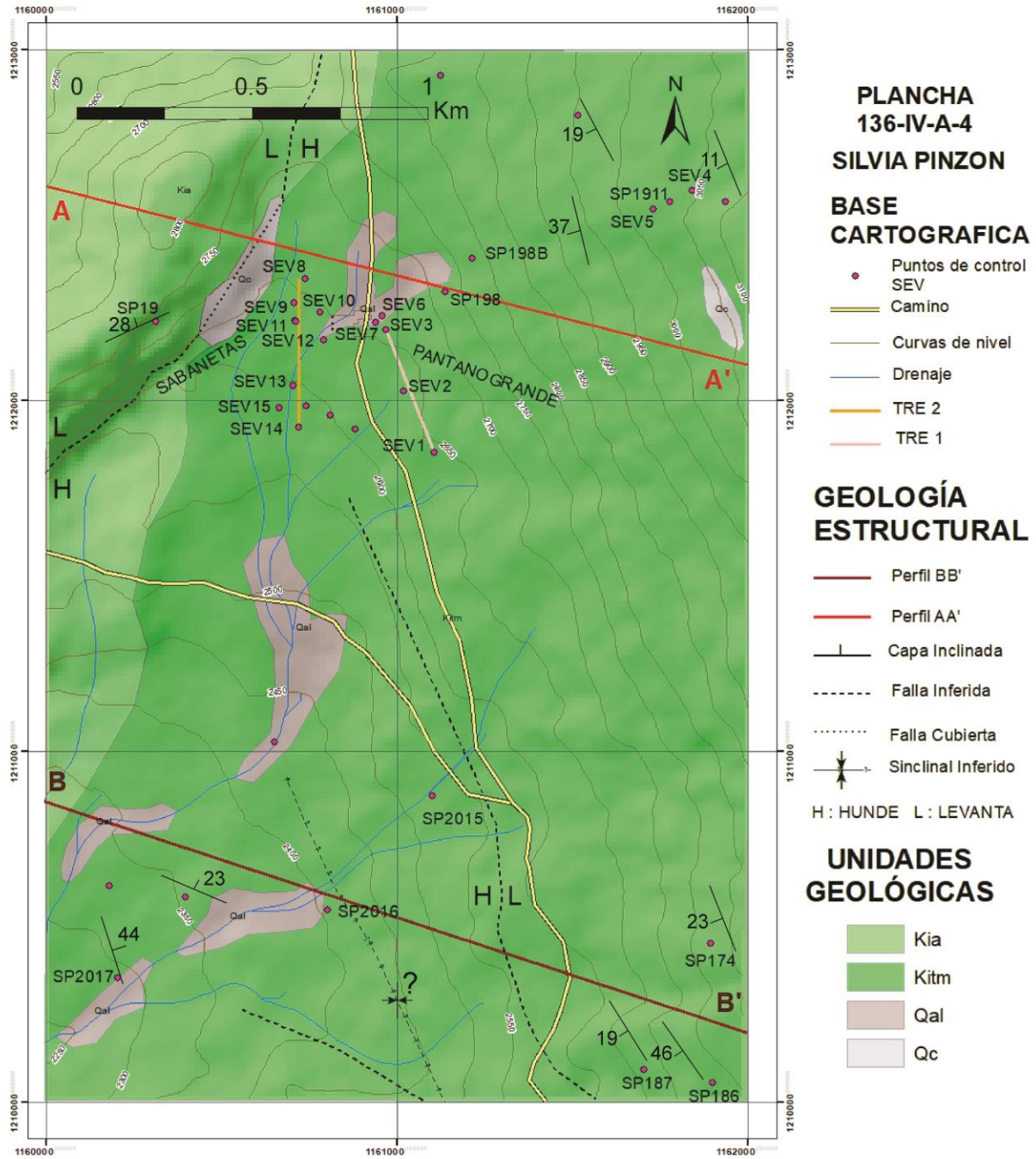


Figura 8. Mapa geológico de la zona de estudio con ubicación de puntos de control, SEV y TRE.

2.3.2. Estratigrafía. Las unidades aflorantes en la zona de estudio en su mayoría de edad Cretácica han sido descritas en publicaciones geológicas especiales del Ingeominas (Proyecto Cretácico, 1985). Un resumen de estas descripciones permite definir las siguientes formaciones, de interés en la zona (ver Apéndice D):

Formaciones Tibú y Mercedes (Kitm) – Aptiano superior.

Derivan su nombre del Río Tibú y del Valle Mercedes en el área de la concesión Barco, cuadrángulo F-13 (Notestein, et al., 1944. pág. 1177). Esta unidad presenta resistividades entre 80 – 5650 Ohm.m (Tarazona, 2018) (ver figura 9 y Apéndice E).

La Formación Tibú (Aptiano), está compuesta de lutitas de color gris oscuro, negro y marrón, con laminación plano-paralela, fisibles, con abundantes restos de conchas y de peces; intercaladas con pequeños niveles de calizas; presenta estratificación ondulada; y areniscas cuarzosas, grises, calcáreas, con abundantes fósiles, bioturbadas, en bancos gruesos macizos (Mondragón, 2000), de 83 m. (~272 pies) en La Donjuana es y de 13 m. (~42 pies) en Sardinata. Se encuentra en contacto superior con la Formación Mercedes (Richards, 1968).

La Formación Mercedes (Albiano Temprano), consiste en calizas arenosas y fosilíferas, intercaladas con lutitas, dolomitas y areniscas. Las calizas han sido clasificadas entre mudstones y grainstones. Se presentan en capas delgadas, ricas en materia orgánica con abundantes foraminíferos plantónicos (Yurewicz, 1993). Según Mondragón (2002), en la columna levantada en el área de Sardinata, por el ICP en 1998, consiste en calizas lumaquéllicas grises oscuras, en capas hasta de 1m., onduladas, no paralelas, continuas, ocasionalmente con pellets, restos de peces y fosfatos. Estas calizas están intercaladas con arcillolitas grises a negras, con laminación ondulada, en ocasiones calcáreas, con concreciones. Es frecuente encontrar restos de peces,

bivalvos y gasterópodos; y óxidos de hierro. El espesor medido en dicha localidad es de 45 m (~148 pies). Se encuentra en contacto superior transicional con la Formación Aguardiente (Richards, 1968).

Formación Aguardiente (Kia) – Albiano-Cenomaniano

El nombre de la formación viene del filo del Aguardiente en la parte norte del domo de Santiago, al sur de la Concesión Barco (Notestein, et al, 1944).

La Formación Aguardiente (Albiano medio a tardío), a escala regional consiste predominantemente de areniscas cuarzosas, de grano grueso, con niveles de glauconita y fosfatos, intercaladas con lutitas y calizas. Algunas lutitas presentan alto contenido de materia orgánica y pueden ser potenciales generadores de hidrocarburos en el área (Yurewicz, 1993). En el sector sur, la unidad consiste en intercalaciones de areniscas cuarzosas, de grano fino a grueso, grises, con estratificación ligeramente ondulada, no paralela, y laminación inclinada de bajo ángulo. Estas areniscas son a veces arcillosas e intensamente bioturbadas, con restos carbonosos. El espesor medido oscila entre los 563 m (~1850 pies) en el sector de La Donjuana y de 313 m (~1030 pies) en Sardinata (Mondragón, 2002). El contacto superior es gradacional con la suprayacente Formación Capacho (Getty, 1982). La unidad (Kia) aflora en la vereda Buenavista, pero dado que se encuentra en un escarpe abrupto imposibilita realizar prospección geoelectrica sobre esta.

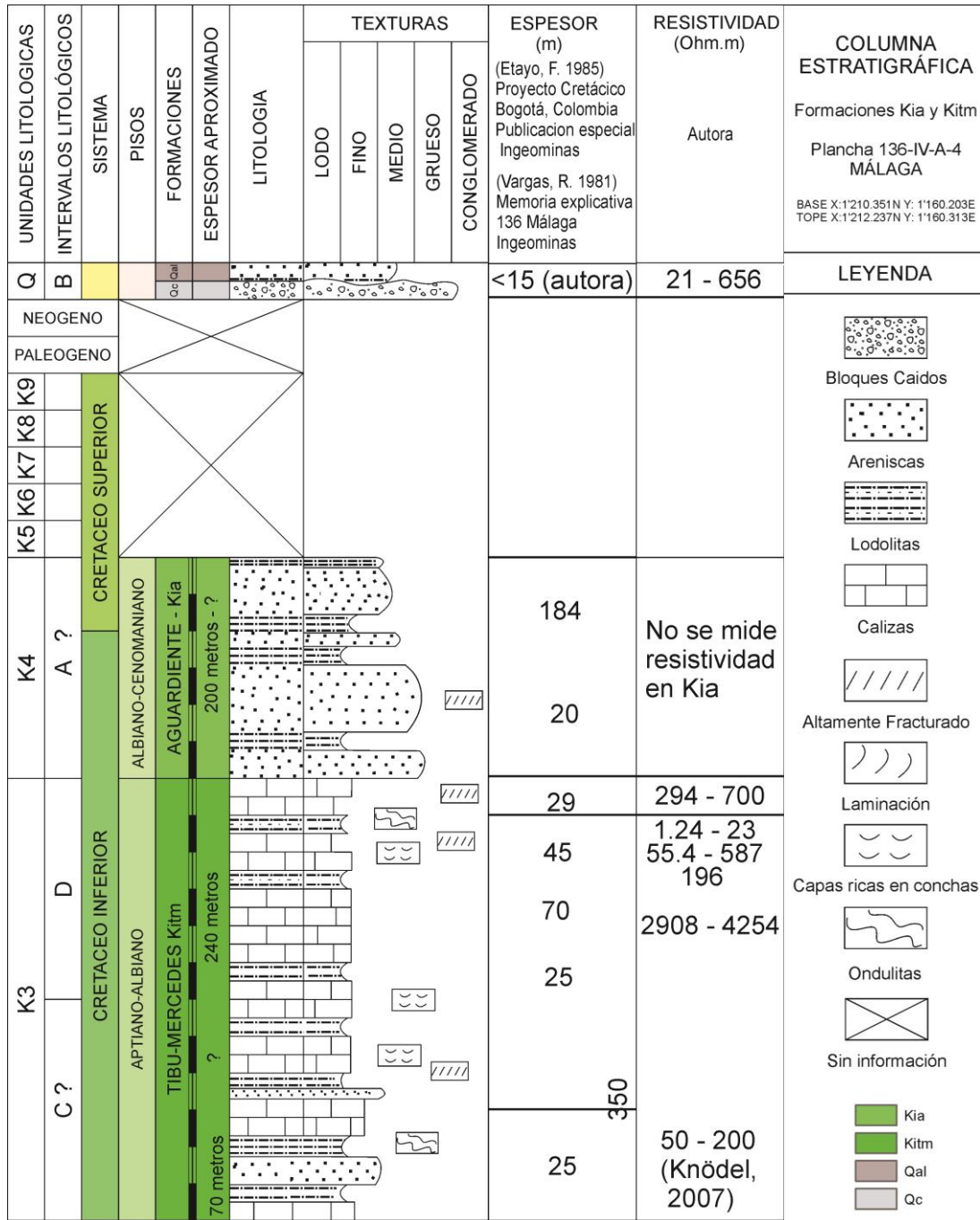


Figura 9. Columna estratigráfica generalizada de la vereda Buenavista. Adaptado de Proyecto Cretácico. Etayo,

F. (1985) y Memoria explicativa 136 Málaga. Vargas, R. (1981).

2.3.3. Geomorfología. La descripción del relieve en la zona se realiza mediante la interpretación de imágenes de Google Earth, el modelo digital de elevación (MDE), la cartografía geológica oficial del SGC, el análisis in situ de las pendientes y la observación en campo (ver Apéndice F). Se tiene en cuenta la nomenclatura del Glosario de Unidades Geomorfológicas propuesta por el Servicio Geológico Colombiano (2012), y se digitaliza en un sistema de información geográfico (SIG) mediante la versión demo del software ArcGIS 10.3.1. (ver Apéndice G).

El contexto geológico en la zona a lo largo del tiempo ha permitido el desarrollo y la evolución de un paisaje moderadamente abrupto, con pendientes que pueden alcanzar los 65° en las zonas de control estructural y que se caracteriza por una morfología abrupta a escarpada en donde predominan los patrones de drenaje sub-dendrítico a sub-paralelo con densidad baja. Es así, como se ha dado lugar para un desarrollo de ambientes morfogenéticos de tipo denudacional, estructural y fluvial (Ver figura 10).

El ambiente morfogenético denudacional se caracteriza por tener un origen generado por la acción de procesos exógenos sobre geoformas preexistentes, lo cual da lugar a la meteorización y erosión de estas, permitiendo la generación de nuevas formas del terreno (ver figura 13). En la región se evidencian unidades como cimas, escarpes de erosión, lomas denudadas, laderas erosivas, laderas onduladas y superficies de erosión. Hacia el Noreste de (NE), sobre la finca conocida como Mesetas (sector de mayor altitud en la vereda) se identifica un relieve de laderas fuertemente inclinadas variando el ángulo de inclinación de 30° a 40° , al descender topográficamente, sobre las fincas Laguardas y Floresta, se suavizan a laderas inclinadas con ángulos entre 20° y lomas de 30° , luego, se identifica un cambio del relieve sobre las fincas

Pantano Grande y Llanitos, éstas ubicadas sobre planicies onduladas y en algunos casos colinadas, con ángulos que varían de 3° a 10°.

El ambiente morfogenético estructural, se caracteriza por su origen asociado a procesos tectónicos (fallas mencionadas anteriormente) que interactúan con las rocas existentes, lo cual da lugar a un fracturamiento y plegamiento de las rocas. Esta condición genera hacia el Sureste, la formación de laderas estructurales de cuesta (ver figura 12); así mismo, sobre el sector conocido como El Arriendo y a lo largo de la carretera que comunica el municipio de Macaravita con la vereda Buenavista, donde se identifica un relieve de laderas fuertemente inclinadas (35°) que varían a laderas levemente inclinadas de 15° a 20°; También, se evidencia en la región sur del área de estudio, fallas inferidas que presentan movimiento y cambios de pendiente dentro de las laderas (depresiones), las cuales posiblemente, generan el colapso de la estructura (silla). Este ambiente estructural también se identifica en dirección Noroeste (NW), donde se percibe un paisaje abrupto sobre una geoforma de cerro (ver figura 4), en el sector conocido como La Peña, con un relieve de escarpe con ángulo de inclinación 45° a 65°, el cual se observa fracturado y cubierto por bosque.

Por último, el ambiente morfogenético fluvial, el cual está directamente relacionado con la dinámica fluvial antigua y reciente de las quebradas y riachuelos temporales, los cuales presentan un comportamiento sub-dendrítico a sub-paralelo, en laderas levemente inclinadas con ángulo de inclinación variable entre 10° y 20°, y en planicies onduladas donde se ha dado lugar a la formación de depósitos de cauces.

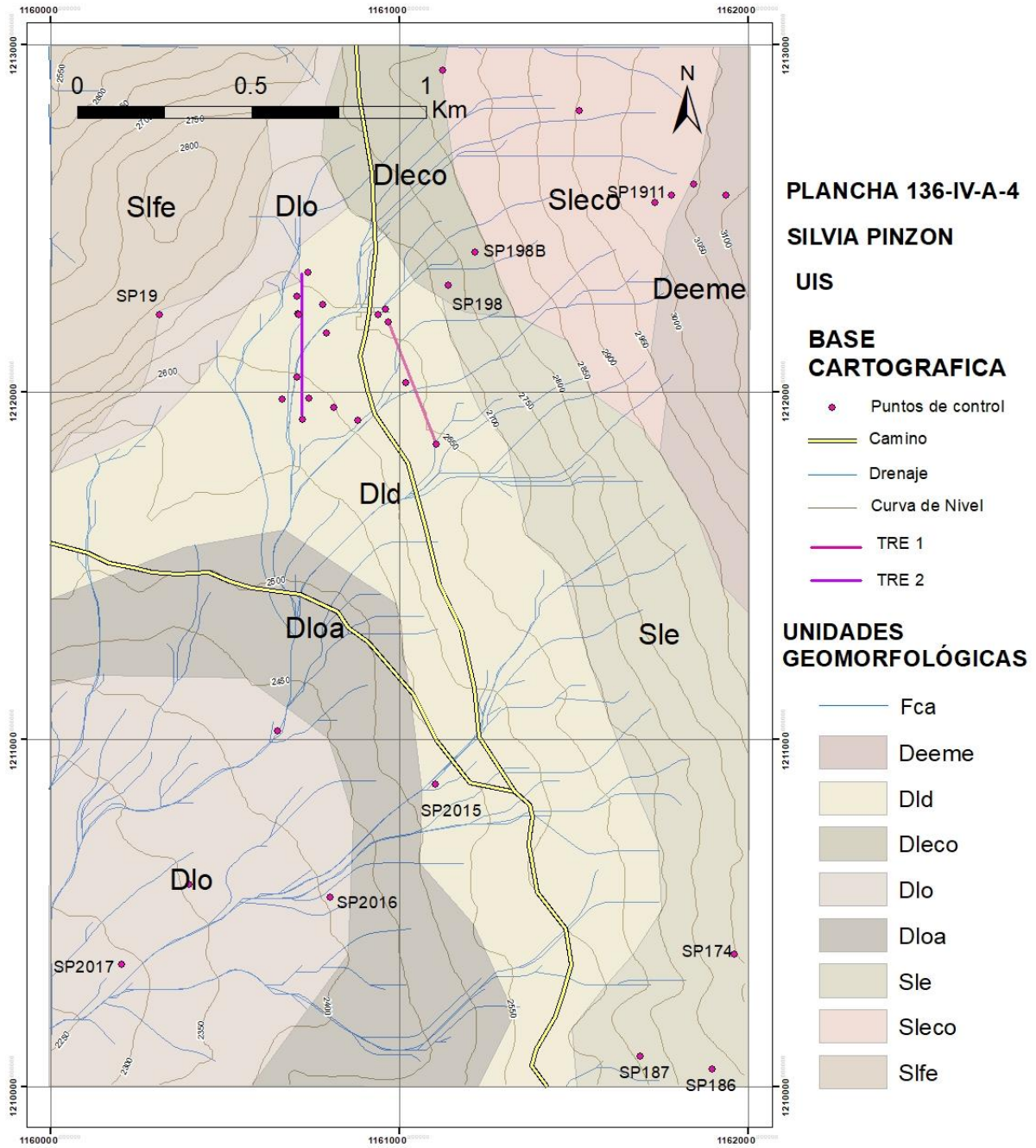


Figura 10. Mapa Geomorfológico de la zona de estudio.

Tabla 3. Ambientes morfogenéticos y sus respectivas unidades.

Código	Ambiente	Unidad
Fca	Fluvial	Cauce aluvial
Deeme	Denudacional	Escarpe de erosión menor
Dld	Denudacional	Loma denudada
Dleco	Denudacional	Ladera erosiva colinada
Dlo	Denudacional	Ladera ondulada
Dloa	Denudacional	Ladera ondulada abrupta
Sle	Estructural	Ladera estructural de cuesta
Sleco	Estructural	Ladera estructural de clina
Slfe	Estructural	Escarpe estructural con línea de falla

Nota: Adaptado del Glosario de Geomorfología, SGC. 2012.



Figura 11. Ambiente morfogenético denudacional en sectores de Mesetas y Pantano Grande, respectivamente.



Figura 12. Ambiente morfogenético estructural hacia el Este y ambiente fluvial hacia el Sur, respectivamente.

3. Marco Geofísico

3.1. Método Geoeléctrico – Resistividad eléctrica

Las técnicas de geoeléctrica aplicada están orientadas a reconocer formaciones geológicas que se encuentran en profundidad mediante la medición de un parámetro físico asociado a ellas: la resistividad eléctrica. La profundidad de penetración y la resolución de este método varía dependiendo del equipo que se utilice y de las condiciones del terreno.

La resistividad eléctrica de los materiales del subsuelo se mide haciendo que una corriente eléctrica fluya en la tierra entre un par de electrodos mientras se mide la tensión a través de un segundo par de electrodos. El resultado se convierte en una resistividad "aparente", el cual es un valor que representa la resistividad promedio ponderada sobre un volumen de subsuelo. Las variaciones en esta medida son causadas por variaciones en la resistividad eléctrica del suelo, las rocas y el fluido presente en los poros (o fracturas si se da el caso).

Los resultados (modelos 1D, 2D o 3D) se interpretan utilizando procedimientos de inversión, para encontrar una representación matemática de la tierra, de modo que cuando se generen respuestas simuladas, entonces las respuestas simuladas estén de acuerdo con las observaciones (estimación de un modelo basado en datos medidos y cierta comprensión del ajuste).

Cuando la prospección se realiza para obtener un modelo 1D, se llama sondeo, los perfiles se utilizan para construir modelos 2D del subsuelo y para obtener interpretaciones en 3D se utilizan arreglos de electrodos más complejos.

En el presente estudio se realizan sondeos y perfiles. Los sondeos son estudios que se organizan de modo que las mediciones revelen variaciones verticales en la resistividad en una

ubicación determinada, de este modo, el subsuelo se interpreta en términos de capas; y los perfiles son prospecciones que se organizan para ser interpretadas en términos de variaciones verticales y laterales bajo una línea de mediciones. Los resultados se interpretan en 2D y se presentan como una sección transversal de la Tierra, es decir, se supone que las estructuras se extienden sin cambios a ambos lados de la línea de levantamiento.

3.2. Arreglos eléctricos

La matriz de electrodos de Wenner es la más simple de las matrices; en ella, los cuatro electrodos (A, M, N y B) se colocan en línea y separados equidistantes entre sí (ver figura 13). Los dos electrodos externos, A y B, son electrodos de corriente, y los dos electrodos internos, M y N, son electrodos potenciales. Con la matriz Wenner, la resistividad de las capas subsuperficiales se encuentra aumentando la distancia entre los electrodos mientras se mantiene la ubicación del punto central de la matriz. Este método se denomina sondeo eléctrico vertical (VES) o perforación eléctrica. La detección de cambios horizontales de resistividad se logra moviendo los cuatro electrodos a través de la superficie mientras se mantiene la separación constante de los electrodos.

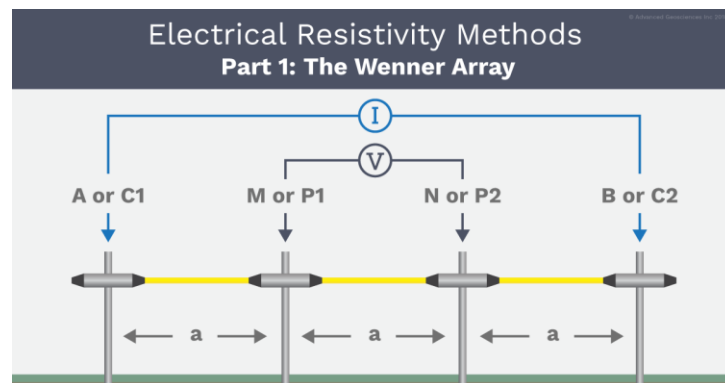


Figura 13. Esquema del arreglo eléctrico tipo Wenner. Recuperado de <https://www.agiusa.com/wenner-array>

El arreglo de Wenner se usa comúnmente en el perfilado para la exploración lateral del suelo, como pruebas de suelo y, a veces, VES para la exploración vertical del suelo, como la definición de capas horizontales. Así como para perfilar o mapear en pruebas de suelo debido a una prueba estandarizada anterior, especificada en ASTM G57, escrita para pruebas de suelo eléctricas.

La ventaja logística de usar la matriz Wenner cuando se perfila es que solo se tienen que mover cuatro electrodos para cada nueva medición a lo largo de la línea; está en desventaja al realizar estudios con SEV, ya que se deben mover los cuatro electrodos para cada nueva medición, esto significa caminar largas distancias y requerir más tiempo, dado el caso, la separación de los electrodos sea grande.

La matriz de Schlumberger es una matriz donde se colocan cuatro electrodos en línea alrededor de un punto medio común. Los dos electrodos exteriores, A y B, son electrodos de corriente, y los dos electrodos internos, M y N, son electrodos de potencial colocados juntos. Con la matriz de Schlumberger, para cada medición, los electrodos de corriente A y B se mueven hacia afuera a una mayor separación a lo largo del levantamiento, mientras que los electrodos de potencial M y N permanecen en la misma posición hasta que el voltaje observado se vuelve muy pequeño para medir (ver figura 14). En este punto, los electrodos potenciales M y N se mueven hacia afuera a una nueva separación. Como regla general, la distancia razonable entre M y N debe ser igual o menor que un quinto de la distancia entre A y B al principio. Esta relación va de hasta una décima parte o una quinceava según la intensidad de la señal.

El arreglo de Schlumberger es el mejor método para VES por razones prácticas: es significativamente menos laboriosa que la matriz de Wenner; se usa comúnmente para explorar aguas subterráneas y minerales agregados, dado que brinda una mejor resolución y demora menos en implementarse que la matriz de Wenner. La matriz de Schlumberger es ventajosa,

porque la mayoría de las veces solo es necesario mover los electrodos exteriores A y B. Normalmente, un equipo de tres personas es suficiente para VES: dos personas moviendo los electrodos externos y el operador del instrumento generalmente mueve los electrodos internos las pocas veces que necesitan moverse.

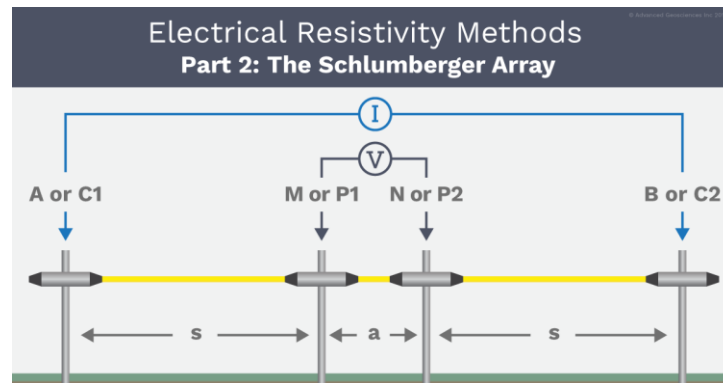


Figura 14. Esquema del arreglo electrodico tipo Schlumberger. Recuperado de <https://www.agiusa.com/schlumberger-array>

3.3. Propiedades físicas

La conductividad eléctrica (σ) es una propiedad física que describe la facilidad con que las corrientes eléctricas pueden fluir a través de un medio cuando se las somete a un campo eléctrico aplicado. Define entonces la relación entre la densidad de la corriente eléctrica (\vec{J}) dentro de un material, y el campo eléctrico (\vec{E}):

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}$$

Dentro de las rocas y otros materiales, hay cargas eléctricas libres. Cuando se aplica un campo eléctrico a un material, estas cargas experimentan una fuerza eléctrica (Coulomb). Esta fuerza hace que las cargas libres se muevan a través del material a lo largo de la dirección del campo aplicado; con cargas positivas moviéndose paralelas al campo y cargas negativas moviéndose en la dirección opuesta. La medida del flujo de cargas eléctricas a través de un material se conoce

como corriente eléctrica (\vec{I}). La densidad de corriente representa la cantidad de corriente que fluye por unidad de área de sección transversal (A), dónde:

$$\vec{J} = \vec{I} / A$$

En materiales conductores (mayor σ), las cargas libres se mueven con bastante facilidad y las corrientes fuertes pueden ser inducidas por un campo eléctrico relativamente débil. En contraste, los materiales resistivos (menor σ) requieren campos eléctricos fuertes para producir cualquier corriente significativa.

La Resistividad, es una propiedad física equivalente a la conductividad (ρ). Por definición, la resistividad de un material es el recíproco de su conductividad:

$$\rho = 1 / \sigma$$

Tanto la conductividad eléctrica como la resistividad son aceptables para describir las propiedades conductoras de las rocas.

Tabla 4. *Parámetros utilizados para definir las propiedades conductoras o resistivas y sus unidades asociadas*

Property	Symbol	Units
Electric Field	\vec{E}	V/m
Current Density	\vec{J}	A/m ²
Electric Current	\vec{I}	A
Conductivity	σ	S/m or mS/m
Resistivity	ρ	$\Omega \cdot m$

Nota. Adaptado de Geophysics for Practicing Geoscientists, 2017. Donde V es voltios, A es Amperios y S es Siemens.

Para medir la conductividad y/o resistividad de un material, se utiliza una fuente para conducir corriente continua (I) a través de una muestra y medir la caída de tensión (ΔV) a lo

largo de ésta, la ley de Ohm puede usarse para determinar la resistencia del circuito (R) causado por el material:

$$R = \Delta V / I$$

La resistencia medida aumenta proporcionalmente a la longitud (L) de la muestra. Esperamos esto dado que la corriente debe fluir a través de más material resistivo. La resistencia medida también es inversamente proporcional al área de la sección transversal (A) de la muestra. En última instancia, la resistividad de la muestra se puede obtener a partir de la resistencia medida, la longitud de la muestra y su área de sección transversal, utilizando la ley de Pouillet:

$$\rho = RA / L$$

3.4. Conductividades de las rocas comunes

A continuación, se muestra una imagen que muestra el rango de valores de conductividad y/o resistividad eléctrica para tipos de roca comunes (ver figura 15).

Debido a que los fluidos de los poros tienen una conductividad más alta que la mayoría de los minerales formadores de rocas, la corriente eléctrica generalmente prefiere fluir a través del espacio poroso siempre que sea posible. Como resultado, la conductividad y/o resistividad de la roca depende en gran medida de su porosidad, la saturación del fluido y el tipo de fluido contenido dentro del espacio poroso. Para rocas que están insaturadas, el espacio poroso está ocupado únicamente por aire, debido a que el aire es muy resistente, obliga a la corriente a fluir a través de los minerales que forman la roca. Como resultado, las rocas insaturadas son muy resistivas. Cuando un porcentaje suficiente del espacio de poros está saturado, el fluido de poros puede ofrecer un camino más eficiente para transmitir la corriente. Por lo tanto, la resistividad disminuye a medida que aumenta la saturación de fluidos. Así mismo, la corriente fluye a través

del fluido poroso de una roca a través de la conducción iónica. Como resultado, la conductividad del fluido de poros depende de la concentración de iones disueltos. Esto implica que las rocas que contienen más fluido salobre en poros son menos resistivas que las rocas que contienen agua dulce.

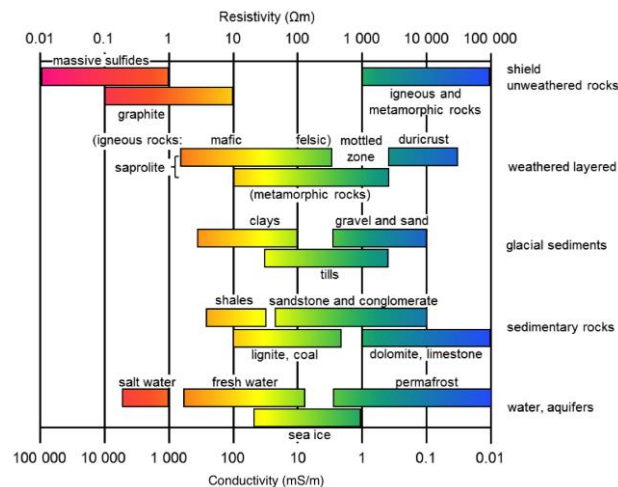


Figura 15. Valores de conductividad y/o resistividad eléctrica para tipos de roca comunes. Recuperado de https://gpg.geosci.xyz/images/resistivity_table1.png

4. Formulación de hipótesis

Existe una zona en el subsuelo con unidades litológicas del Cretácico, conformadas por las formaciones Tibú y Mercedes (Kitm) y Aguardiente (Kia), que presentan propiedades físicas (buena porosidad primaria o secundaria) y propiedades geoelectricas (resistividades generalmente bajas), en areniscas 50-150 ohm.m y en calizas fracturadas 100-400 ohm.m, que indican la presencia de agua subterránea (ver tabla 1, tabla 2 y figura 15), y por lo tanto con potencial de almacenamiento hídrico, a profundidades menores de 200mts, en estas formaciones, en la vereda Buenavista, perteneciente al municipio de Macaravita en el departamento de Santander.

5. Metodología y base de datos

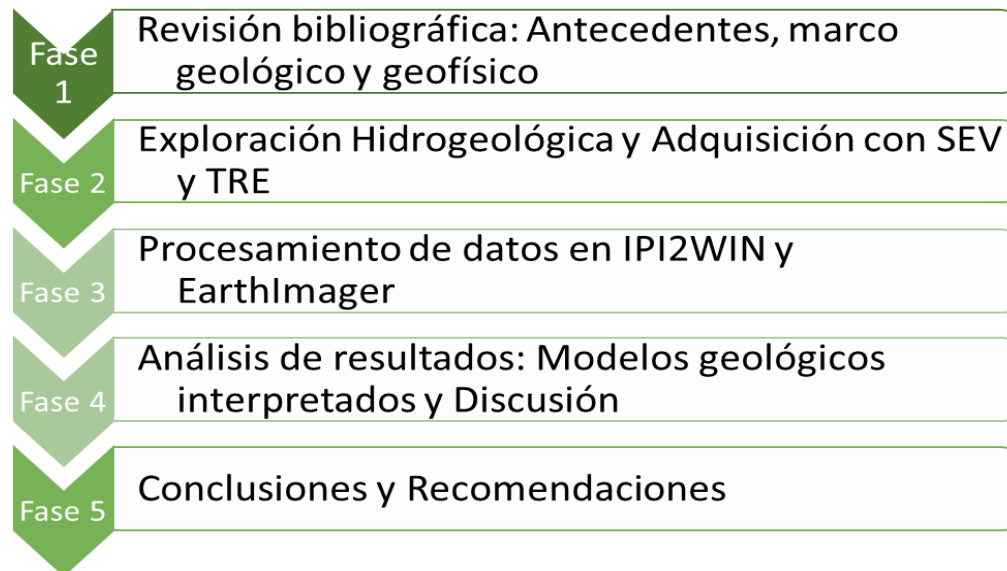


Figura 16. Esquema de la metodología propuesta en el presente proyecto.

5.1. Revisión bibliográfica

En esta fase se desarrolla el plan del proyecto, en el cual se establece el planteamiento del problema, la justificación, y la hipótesis asociada, de igual manera, se definen los objetivos, el cronograma y presupuesto. Luego, se realiza una recopilación bibliográfica acerca de las generalidades de la zona y los antecedentes en el marco geológico y geoelectrico, a partir del cual se definen conceptos geofísicos fundamentales, así como, las actividades y recursos necesarios para aplicar el método de prospección geoelectrica (SEV y TRE) en la zona definida.

A partir de la plancha geológica 136 de Málaga a escala 1:25.000 junto con el uso de la herramienta de Google Earth, se identifica la tendencia preferencial de las estructuras principales, es decir la Falla de Macaravita, con orientación NE-SE, y las falla La Miel - El

Ramal , en dirección NW-SE; así mismo, se tiene en cuenta la dirección del eje del anticlinal de Macaravita y se localiza la zona topográficamente más plana de acuerdo al espaciamiento entre curvas de nivel; Determinando así, realizar las ocho (8) transectas de SEV y dos (2) de TRE, paralelas al rumbo de las capas y al eje del anticlinal de Macaravita o en dado caso al eje del sinclinal de Buenavista, sobre la misma cota de nivel, y que se extendieran 150 m cada SEV y 450 m cada TRE, con el fin de obtener un cubrimiento de datos de resistividad que permita identificar contrastes generalmente bajos (Ohm.m) y así estimar la vocación acuífera del subsuelo en la zona alta de la vereda Buenavista.

5.2. Exploración de Campo

Se lleva a cabo en tres campañas de campo, teniendo en cuenta las fechas en que los equipos estaban disponibles para el préstamo y que zona a estudiar se encontrara en época de sequía.

5.2.1. Reconocimiento hidrogeológico. La campaña tuvo una duración de quince (15) días, donde se realizaron puntos de control litológico, y según lo observado en campo, la geología del área de estudio hacia el Norte, en sectores como Mesetas, Pantano Grande, Sabanetas y Llanitos, corresponde principalmente a estratos intercalados de rocas sedimentarias de tipo caliza y lodolita, hacia el sur, capas de calizas con una intercalación de arenisca y lodolitas, pertenecientes a la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) (ver figura 17B y 17C), formación sobre la cual se realizará la prospección geoelectrica en la zona alta de la vereda (Pantano Grande y Sabanetas); La formación se evidencia basculada, en general con datos de estratificación en un rango de $158^{\circ}/11^{\circ}$ a $154^{\circ}/47^{\circ}$ en Azimut, y se observan fracturadas, con cuatro familias de diaclasas principales: $92^{\circ}/90^{\circ}$, $132^{\circ}/73^{\circ}$, $75^{\circ}/80^{\circ}$ y $205^{\circ}/80^{\circ}$. En dirección Noroeste, conformando un escarpe abrupto, se identifican areniscas de grano grueso a medio, pertenecientes a la Formación Aguardiente (Kia) (ver figura 17A), esta formación se reconoce en

la zona, pero no presenta interés para prospección geoelectrónica. También se identifica en la zona de mayor altitud 3.100 m.s.n.m. al Noreste sobre el sector de Mesetas, la recarga del agua por infiltración del goteo continuo sobre roca caliza fracturada conforme en la estructura definida como flanco occidental del anticlinal de Macaravita. En contraste, a una altura de 2.200 m.s.n.m. se reconoce en la zona más baja topográficamente, la descarga del agua o manantial en el sector conocido como El nacimiento (ver figura 17D).

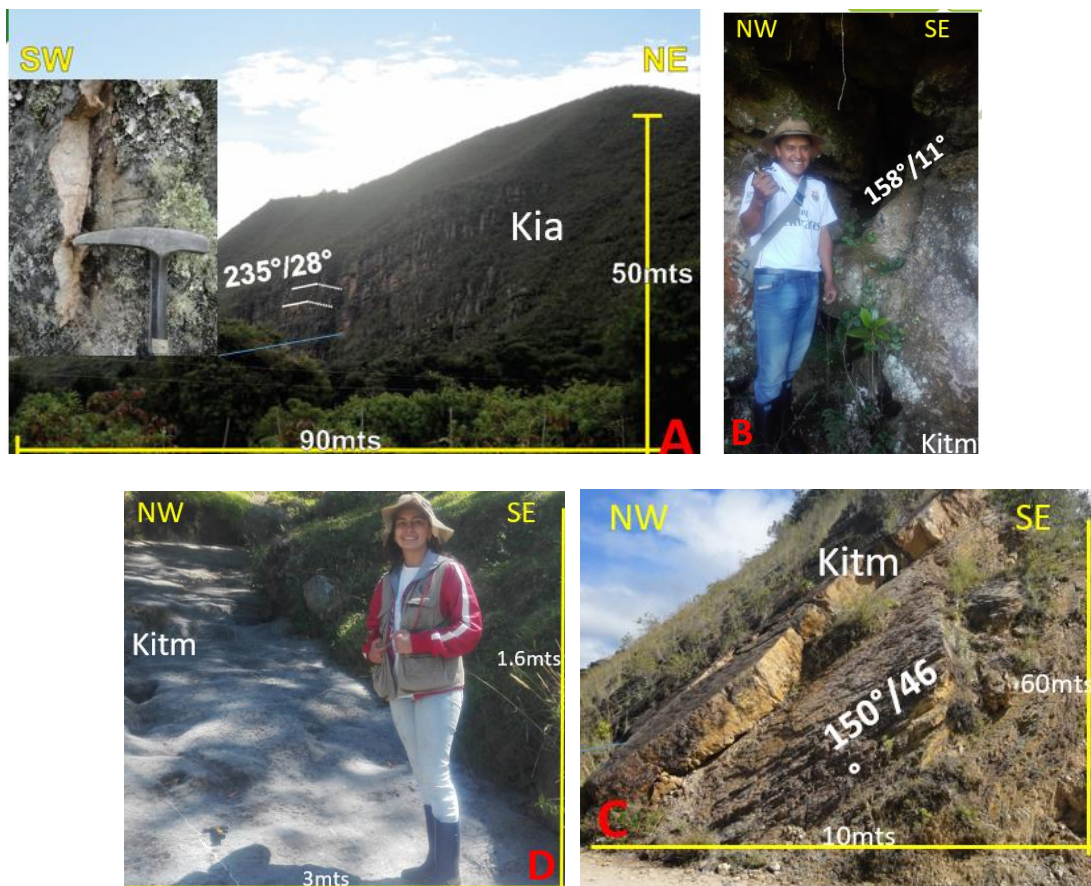


Figura 17. A) Arenisca en la Formación Aguardiente (Kia), B) Caliza de la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) y Zona de recarga del agua, C) Contacto neto entre Arenisca y lodolita de la Formación Tibú-mercedes (Kitm), D) Caliza fosilífera de la Formación Tibú-Mercedes (Kitm) y zona de descarga del agua.

5.2.2. Adquisición con SEV. Con base en el mapa geológico (ver figura 8), proyección de sobras, pendientes, curvas de nivel, y lo definido preliminarmente en la primera fase de la metodología, se determina realizar las transectas de los ocho (8) SEV en dirección NW-SE aproximadamente paralelas al rumbo de las capas, sobre las zonas con relieve más plano y a lo largo de la misma curva de nivel en la parte alta de la vereda, hacia el Noreste (NE) sobre las fincas conocidas como Llanitos, Pantano Grande, Floresta y hacia el Noroeste (NW) sobre Sabanetas, Lagunitas y El Jagüí; de esta manera poder explorar y caracterizar el subsuelo a lo ancho de la vereda (ver figura 18). Una vez adquiridos los datos de resistividad aparente en campo, el paso a seguir consiste en descargarlos del equipo Terrameter SAS4000/SAS1000 a un ordenador, para esto es necesario instalar el software ABEM TERRAMETER UTILITIES, y posteriormente se procede a procesarlos mediante el software IPI2WIN.

Para este trabajo se utiliza el arreglo electródico tipo Schlumberger, donde las distancias entre los electrodos de corriente (AB) se van incrementando cada cinco metros (1,5,10,15,20...) por cada dato de resistividad aparente medido hasta alcanzar una máxima amplitud de ciento sesenta metros ($AB = 160\text{ m}$, $AB/2 = 80\text{m}$), manteniendo fijo el centro del arreglo y aumentando los electrodos de potencia (MN) a una distancia cinco veces menor respecto la distancia entre los electrodos de corriente (ver figura 19). Para cada cambio de distancia se hace una medición de la resistividad aparente, resultante del promedio de la inyección de cuatro pulsos de corriente continua por cada stack.

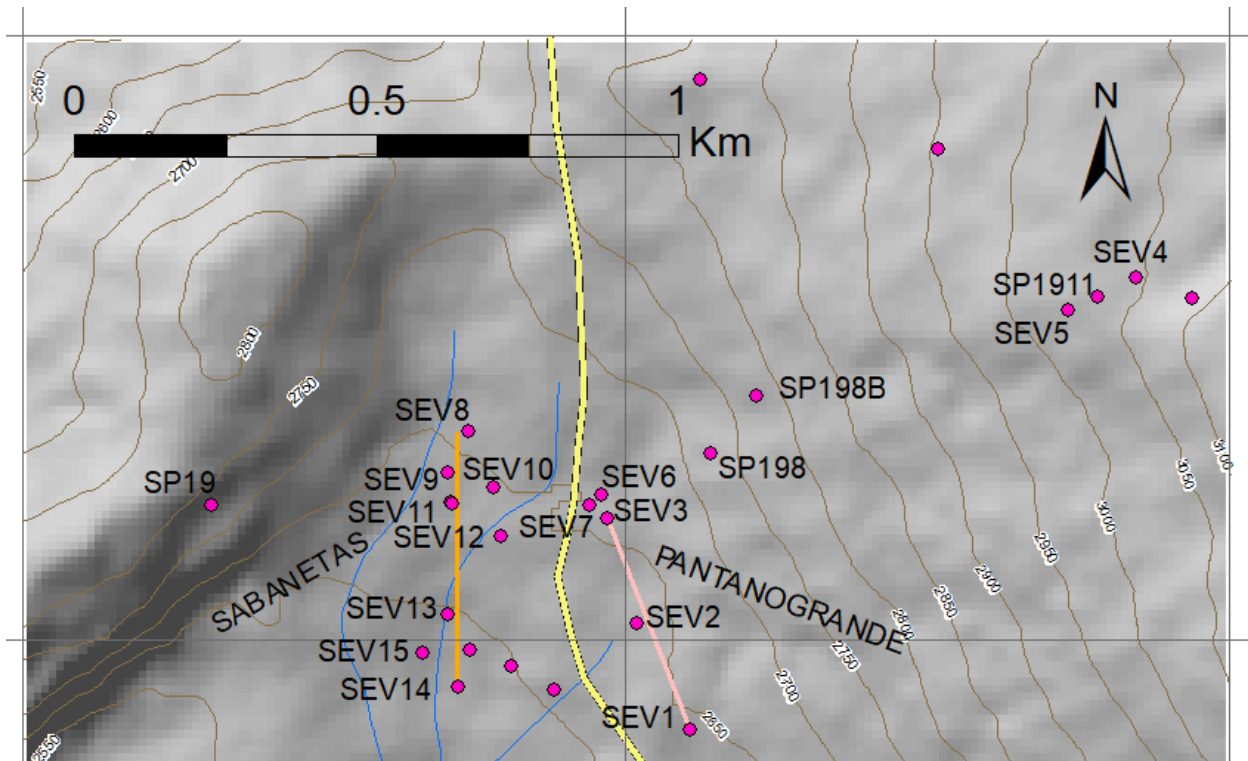


Figura 18. Localización de sondeos eléctricos verticales y tomografías de resistividad eléctrica.



Figura 19. SEV. Transecta de 160 m, con equipo ABEM Terrameter y arreglo electrónico tipo Schlumberger, en el sector de Sabanetas.

Descripción del equipo

La adquisición de los sondeos eléctricos verticales se realiza con el instrumento ABEM Terrameter SAS 4000/ SAS 1000, desarrollado por la compañía ABEM Instrument AB, el cual consta de los siguientes componentes:

- Unidad básica llamada “Terrámetro SAS 4000/ SAS 1000” con cuatro canales de entrada, incluyendo bandeja con enganche para la batería.
- Adaptador para batería externa SAS EBA
- Cable de entrada de corriente continua para SAS EBA
- Adaptador multicanal (con toma de conector en banana para los cuatro canales, junto con tres resistencias acopladas y un condensador para pruebas).
- Cable RS 232 (con conector KPT al SAS 4000 y conector DSUB al PC).
- Dos (2) carretes de potencial
- Cuatro (4) caimanes conectores
- Dos (2) carretes de inducción eléctrica
- Dos (2) cables conectores entre carretes y unidad central para potencial
- Dos (2) cables conectores entre carrete y unidad central para corriente
- Una (1) batería de carga profunda de 12V y 1200Amp
- Un (1) cargador de batería
- Diecinueve (19) electrodos de acero inoxidable
- Dos (2) porras
- Equipo de comunicación con cuatro (4) walkie-talkies, marca Motorola, con sus respectivos cargadores

5.2.3. Adquisición con TRE. En el presente proyecto, se realizan dos (2) transectas de tomografías de resistividad eléctrica (TRE), en dirección NW-SE en Pantano Grande y N-S en Sabanetas (ver figura 18), paralelas al rumbo de las capas y sobre la misma curva de nivel, con arreglo electródico Wenner – Schlumberger, arreglo electródico que ha demostrado *“ser una alternativa razonable, por su buena resolución vertical y horizontal, además de su buena intensidad de la señal para este tipo de rocas, perteneciente al Cretácico, y en este tipo de exploración”* (Prospección geoelectrónica para el modelado 2D de la resistividad del subsuelo en el área perimetral del casco urbano de Málaga, Rincón J, en proceso de publicación).

Para la adquisición se procede a instalar los cincuenta y seis (56) electrodos a lo largo de las fincas de Pantano Grande (TRE 1) y Sabanetas (TRE 2) (ver figura 20), con espaciado definido de nueve (9) metros, garantizando buen contacto electrodo-suelo, de manera equiespaciada en línea recta, se definen puntos origen y final para ajustar mejor el perfil, y en lo posible sobre relieve plano, para evitar anomalías en las mediciones de resistividad, dado que no se realiza corrección topográfica.

Se aplica la configuración electródica Wenner-Schlumberger, por su buena calidad para diferenciar secuencias horizontales y alta capacidad de llegar a mayor profundidad en comparación con las otras configuraciones.



Figura 20. TRE. Transecta de 496 m, con equipo SuperSting R8 y arreglo electrónico tipo Wenner-Schlumberger, en el sector de Pantano Grande.

Descripción del equipo

La adquisición de datos con tomografía de resistividad eléctrica se realiza con el instrumento SuperSting R8, desarrollado por la compañía Advanced Geosciences, Inc especializada en tecnología avanzada para adquisición de imágenes geofísicas. El equipo consta de los siguientes componentes:

- Una (1) CPU, unidad central de registro
- Ocho (8) cables con siete (7) electrodos
- Cincuenta y seis (56) pines conductores conectados a los electrodos
- Una (1) swich-box, caja conmutadora multielectrodo (la cual conecta la CPU con los electrodos)
- Una (1) batería de carga profunda de 12V, para el funcionamiento del equipo

5.3. Procesamiento de datos

5.3.1. Procesamiento SEV. Se procede a descargar e instalar el software de uso libre IPI2WIN (Moscow State University, Geoscan-M Ltd.) para realizar la inversión de resistividades aparentes y obtener las resistividades reales, generar el perfil 1D para cada sondeo y al correlacionarlos, obtener una un perfil 2D.

A continuación, se presenta el procedimiento realizado en el software IPI2Win para un SEV y del mismo modo, se realiza la inversión para los siete (7) restantes. Se importan los datos de separación ($AB/2$), longitudes de la línea de medición (MN), la resistividad aparente (Ro_a) y se define el arreglo electródico con el cual se adquirieron (Schlumberger) (ver figura 21). Se visualizan los datos en la interfaz gráfica, la resistividad aparente es marcada por círculos, sobre una curva color negro, ésta es ploteada en escala logarítmica, para ambos ejes (separaciones y resistividades), la línea color rojo representa la curva teórica del modelo y la línea color azul es la invertida en el modelo, el valor del error de ajuste representa la diferencia relativa entre la curva teórica y práctica, para el sondeo analizado y los parámetros de su modelo (ver figura 22). Se realiza este procedimiento para cada uno de los sondeos (1D), luego se realiza la correlación de los sondeos para realizar el perfil (2D), de este modo, se relacionan SEV 1, SEV2, SEV3 y SEV6 en un perfil y SEV8, SEV9, SEV11 y SEV12 en otro.

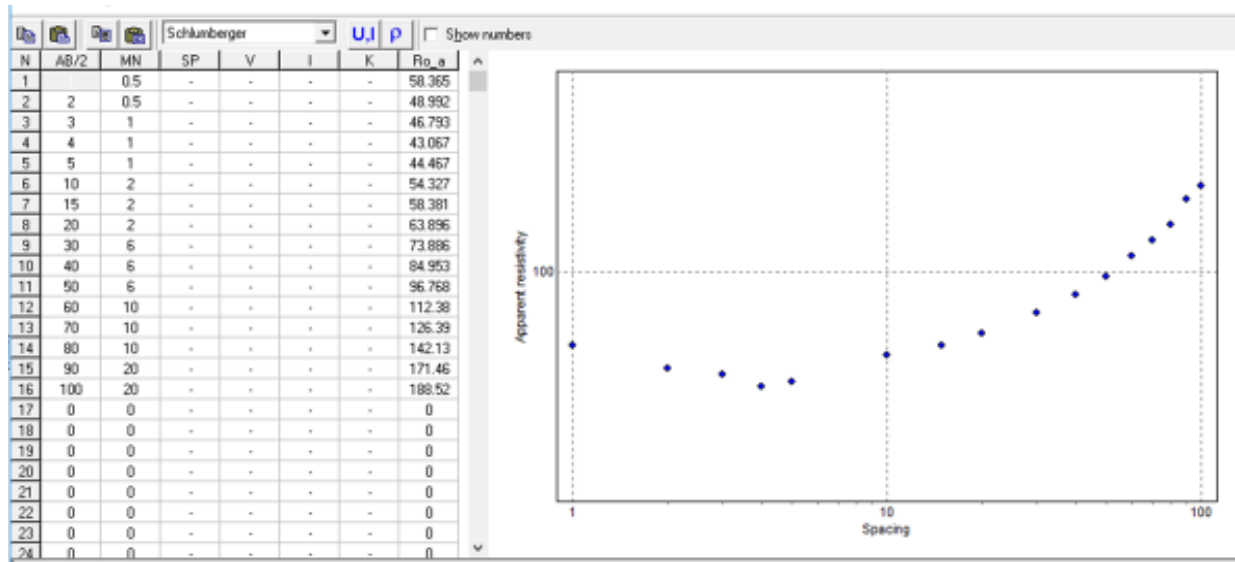


Figura 21. Resistividades aparentes en el software IPI2Win

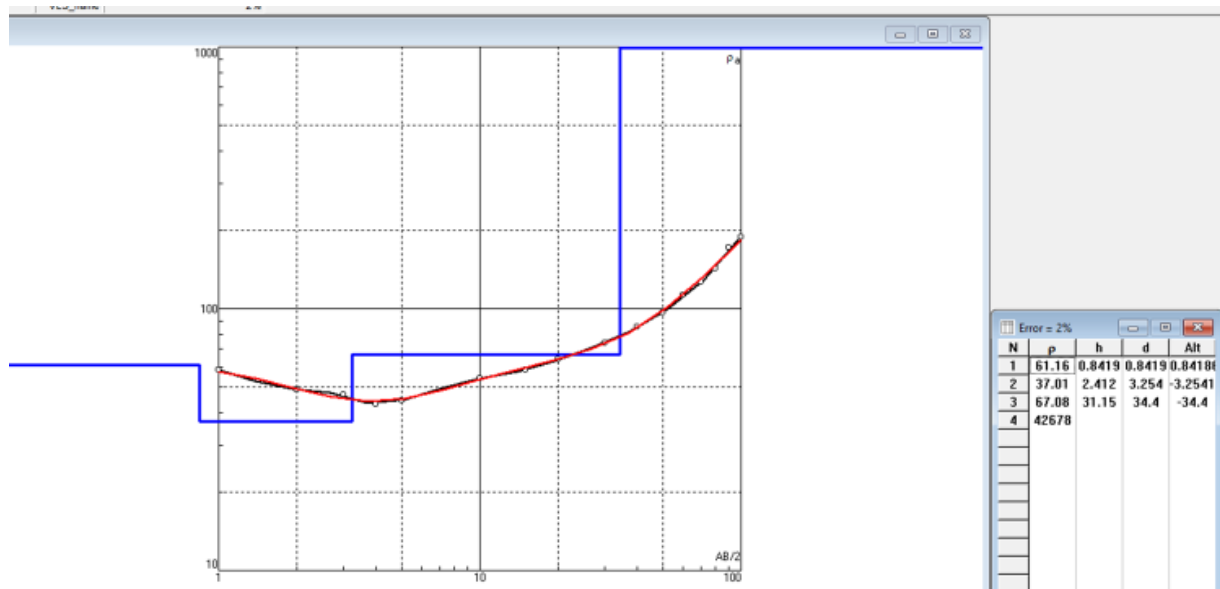


Figura 22. Inversión y Resistividades reales en el software IPI2Win

5.3.2. Procesamiento TRE. Luego de descargar los datos de resistividad aparente adquiridos (archivos con extensión .stg) del SuperSting al ordenador, se realiza el procesamiento, para esto, se requiere instalar el software EarthImager 2D desarrollado por Advanced Geosciences, Inc., propio del tomógrafo, el cual requiere USB-llave para funcionar; tanto el instalador como la USB son suministrados por el grupo de investigación de Geomática.

Al importar el archivo se observa el perfil de aparente obtenida en campo, luego, se define la opción Surface, de esta manera se indica que los datos de resistividad se recogieron sobre la superficie del terreno, se dispone el método Smooth Model Inversión, ya que es el método más estable y seguro, y se configuran los parámetros restantes en base al manual de procesamiento, de esta manera, se define el voltaje normalizado por la corriente, de tal manera que valores menores a este (0.2Ohm) sean eliminados, se establece el porcentaje máximo de mediciones repetidas, valores de resistividad aparente más pequeños y más grandes permitidos, así mismo, se fijan los criterios que finalicen las iteraciones, para realizar el proceso de inversión y obtener las resistividades reales. Luego, se da inicio al proceso de inversión. Se observan las iteraciones y las comparaciones que realiza a través de su interfaz gráfica, hasta ajustar el perfil de resistividad aparente al perfil calculado y así determinar el perfil de resistividad invertida (ver figura 23).

Concluido el proceso de inversión, se procede a analizar estadísticamente los datos adquiridos, para determinar mediante una imagen la desviación estándar de los datos, y así, identificar los datos de campo que presentan desviaciones mayores a la estándar de toda la muestra.

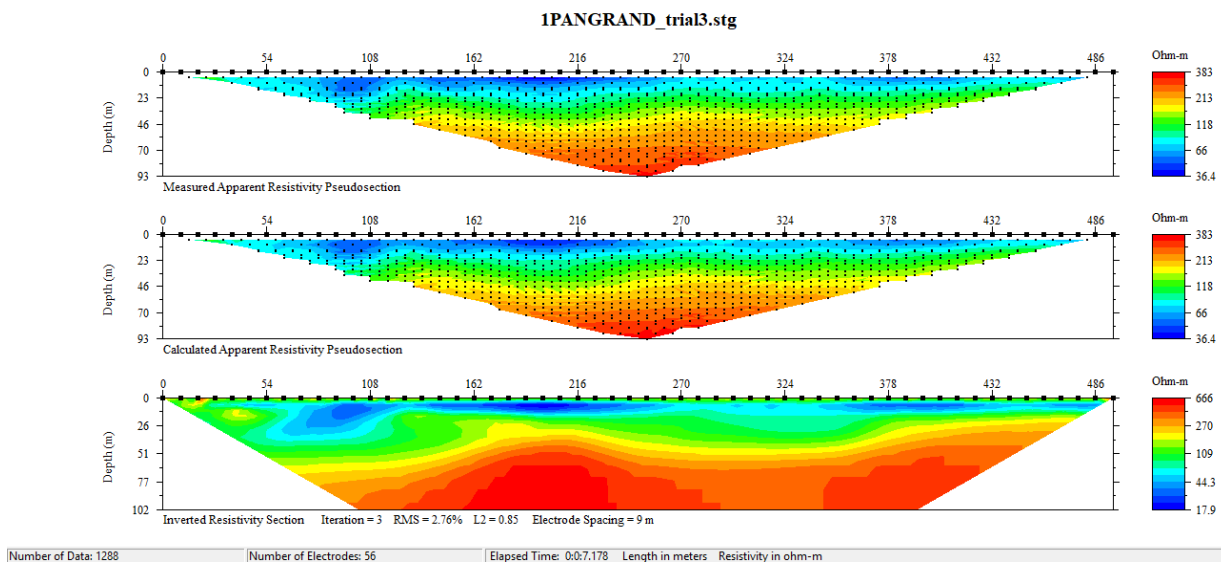


Figura 23. Procesamiento en EarthImager: Perfil de las resistividades aparentes adquiridas en campo, Perfil calculado de resistividades aparentes y Perfil invertido con resistividades reales.

A partir de la herramienta *Relative Data Misfit Pseudosección* (ver figura 24), identificando el error relativo en la distribución de resistividad aparente calculada (con mayor desviación respecto a la desviación estándar); y con la herramienta *Surface Data Misfit Scatter Plot*, se observa la pseudosección en una gráfica de puntos, de esta manera, se establece qué puntos de la medición se encuentran por fuera de la desviación estándar y se procede a eliminarlos (ver figura 25).

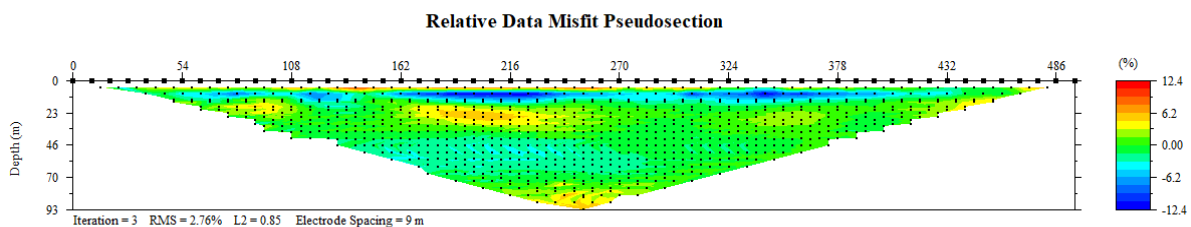


Figura 24. Pseudosección de datos totales. Herramienta Data Misfit Pseudosección. La escala de color se distribuye simétricamente a partir del 0% de error relativo.

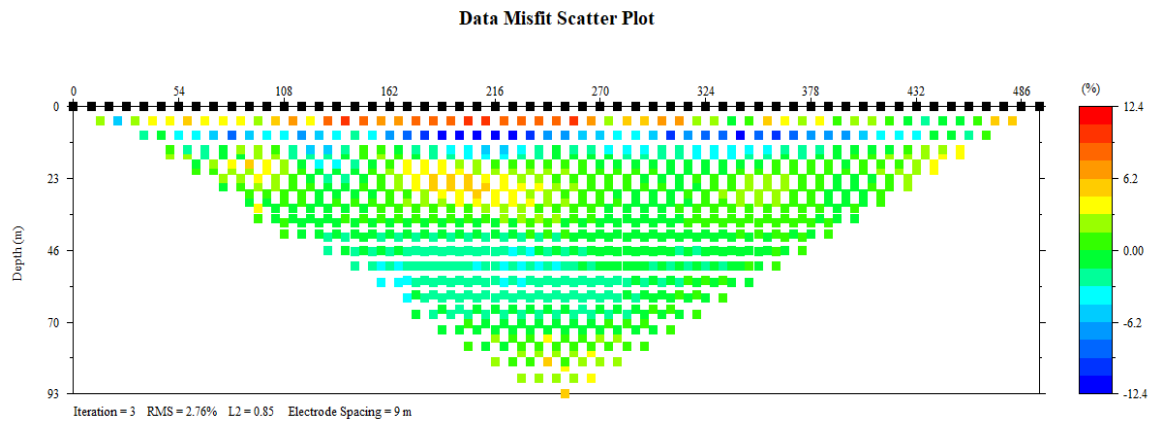


Figura 25. Pseudosección de datos totales sobre una gráfica de puntos. Herramienta Surface Data Misfit Scatter Plot.

Continua el proceso de optimizar el modelo con la herramienta *Data Misfit*, la cual permite remover los datos con alta dispersión, para esto, se tiene en cuenta la distribución del error y se selecciona el umbral de datos a remover (datos con dispersiones respecto a la curva teórica relativas mayores al 10% debe ser eliminados). Luego se reinicia el proceso de inversión para obtener un nuevo modelo, descartando los datos removidos anteriormente. Se puede observar la disminución del error *Root Mean Squared* (RMS), el cual indica el promedio de los datos con cada iteración del modelo, sobre la curva de convergencia.

Finalmente, a partir de la herramienta *Data Misfit Crossplot*, se observa la gráfica de dispersión con los datos estadísticamente validos que ahora se ajustan sobre la línea color verde (ver figura 26).

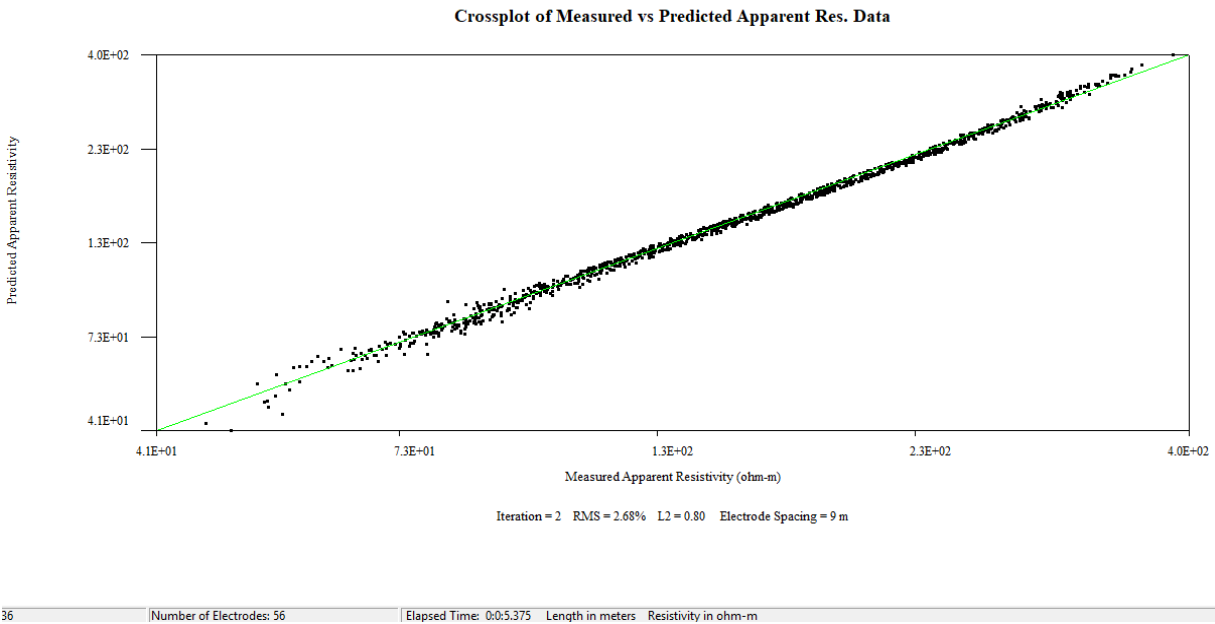


Figura 26. Grafica de dispersión. El eje horizontal es el logaritmo de la resistividad aparente medida y el eje vertical es el logaritmo de resistividad aparente calculada o modelada.

6. Resultados

La detección de depósitos de agua en el subsuelo se basa en localizar disminuciones anómalas de la resistividad en el modelo real, de acuerdo a los contrastes litológicos, sin embargo; ¿qué valores de resistividad podemos considerar, son suficientemente bajos para determinar que puede existir agua?, la respuesta dependerá de cada problema en concreto y la litología presente (Serrano, 2003).

Una vez caracterizada la geología de la zona, se procede a interpretar los modelos geoelectricos, comparando los contrastes de resistividad obtenidos en la zona, con los valores de resistividades establecidos en tablas según Tarazona (2018), Knödel (2007) y Hoyos (2000).

6.1. Resultados SEV

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 5) se realiza en las coordenadas Este: 1'161.106, Norte: 1'211850 y elevación 2.636 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error del 2% entre la curva de resistividad aparente (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 5. SEV 1

SEV1		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	58.365
2	0.5	48.992
3	1	46.793
4	1	43.067
5	1	44.467
10	2	54.327
15	2	58.381
20	2	63.896
30	6	73.886
40	6	84.953
50	6	96.768
60	10	112.38
70	10	126.39
80	10	142.13
90	20	171.46
100	20	188.52

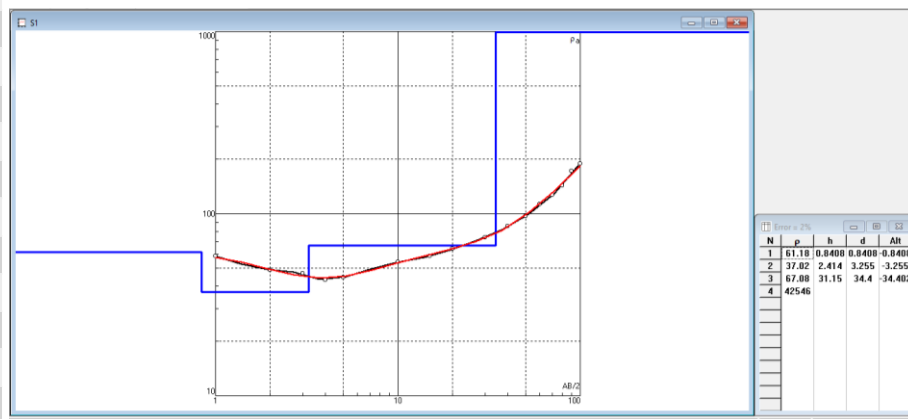


Figura 27. Resultado al procesar el SEV 1

Tabla 6. Interpretación SEV 1

Intervalo SEV1	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	61.18	0.8408	0 - 0.8408	Suelo húmedo con bloques caídos
2	37.02	2.414	0.8408 - 3.255	Suelo húmedo
3	67.08	31.15	3.255 - 34.4	Caliza fracturada saturada
4	4254		>34.4	Caliza compacta

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 7) se realiza en las coordenadas Este:1'161.019, Norte: 1'212.027 y elevación 2.635 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error de 7.11% entre la curva de resistividad aparente (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 7. SEV 2

SEV2		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	30.529
2	0.5	42.456
3	1	39.684
4	1	39.029
5	1	40.04
10	2	41.414
15	2	47.961
20	2	53.471
30	6	86.542
40	6	89.5
50	6	79.834
60	10	90.697
70	10	99.873
80	10	110.51
90	20	120.65
100	20	130.07

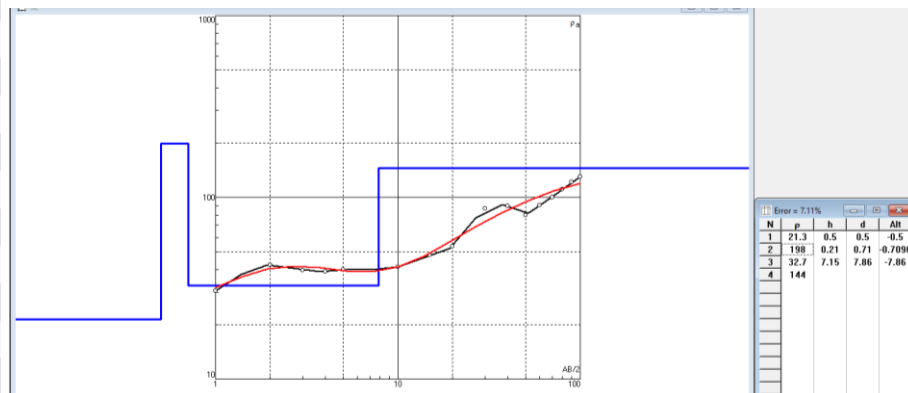


Figura 28. Resultado al procesar el SEV 2.

Tabla 8. Interpretación SEV 2

Intervalo SEV2	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	21.3	0.5	0 - 0.5	Suelo húmedo
2	198	0.21	0.5 - 0.71	suelo seco con bloques caidos
3	32.7	7.15	0.71 - 7.86	Suelo húmedo
4	144		>>7.86	Caliza fracturada saturada

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 9) se realiza en las coordenadas Este:1'160.967, Norte: 1'212.212 y elevación 2.636 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error de 5.33% entre la curva de resistividad aparente (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 9. SEV 3

SEV3		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	59.93
2	0.5	59.438
3	1	54.644
4	1	59.411
5	1	64.526
10	2	70.36
15	2	75.254
20	4	78.075
30	6	83.462
40	6	90.905
50	6	98.675
60	10	115.17
70	10	128.22
80	10	146.77
90	20	102.35
100	20	113.79

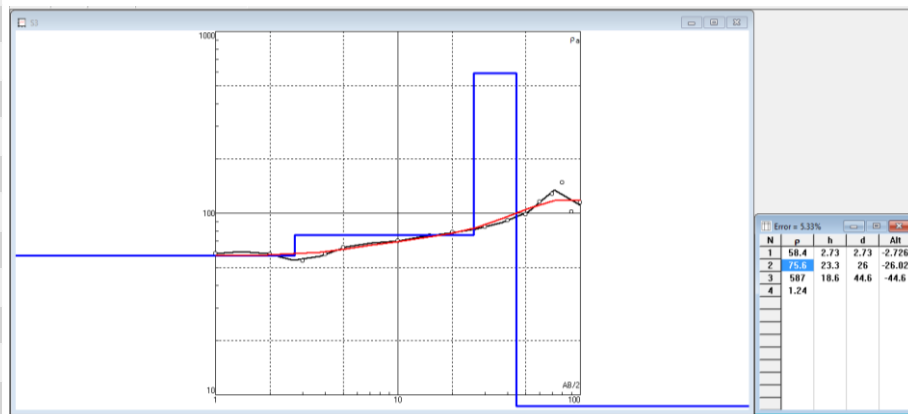


Figura 29. Resultado al procesar el SEV 3

Tabla 10. Interpretación SEV 3

Intervalo SEV3	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	58.4	2.73	0 - 2.73	Suelo húmedo con bloques caídos
2	75.6	23.3	2.73 - 26	Suelo húmedo
3	587	18.6	26 - 44.6	Caliza fracturada saturada
4	1.24		>44.6	Lodolita saturada

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 11) se realiza en las coordenadas Este: 1'160.959, Norte: 1'212.239 y elevación 2.641 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error de 11.2% entre la curva de resistividad aparente (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 11. SEV 6

SEV6		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	60.855
2	0.5	65.45
3	0.5	66.698
4	0.5	64.816
5	1	66.24
10	2	79.772
15	2	81.896
20	4	90.299
25	4	88.653
30	6	83.598
35	6	83.025
40	6	79.878
45	6	80.502
50	10	89.698
60	10	108.23
70	10	119.17
80	10	136.78
90	20	134.49
100	20	148.44

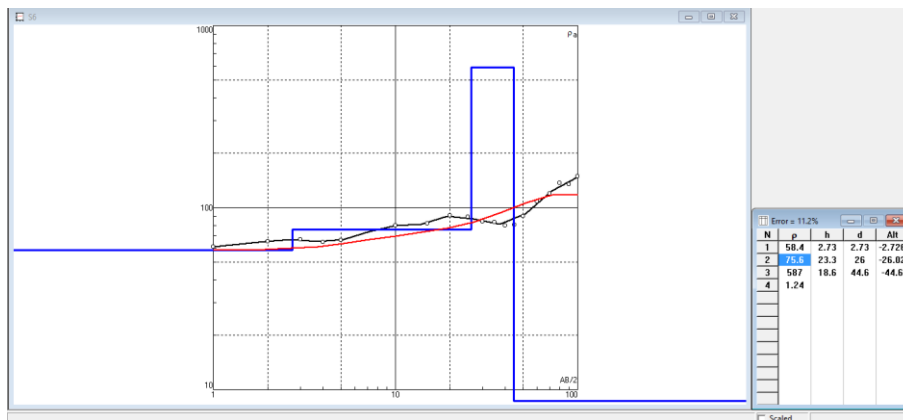


Figura 30. Resultado al procesar el SEV 6

Tabla 12. Interpretación SEV 6

Intervalo SEV6	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	58.4	2.73	0 - 2.73	Suelo húmedo con bloques caídos
2	75.6	23.3	2.73 - 26	Suelo húmedo
3	587	18.6	26 - 44.6	Caliza fracturada saturada
4	1.24		>44.6	Lodolita saturada

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 13) se realiza en las coordenadas Este:1'160.738, Norte: 1'212.345 y elevación 2.646 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error de 2.8% entre la curva de resistividad aparente (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 13. SEV 8

SEV8		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	203.57
2	0.5	115.14
3	0.5	106.13
4	0.5	85.821
5	1	72.781
10	2	56.737
15	2	62.331
20	4	67.835
25	4	74.337
30	6	84.684
40	6	98.05
50	10	98.601
60	10	106.43
70	10	113.39
80	10	132.49
90	15	139.63

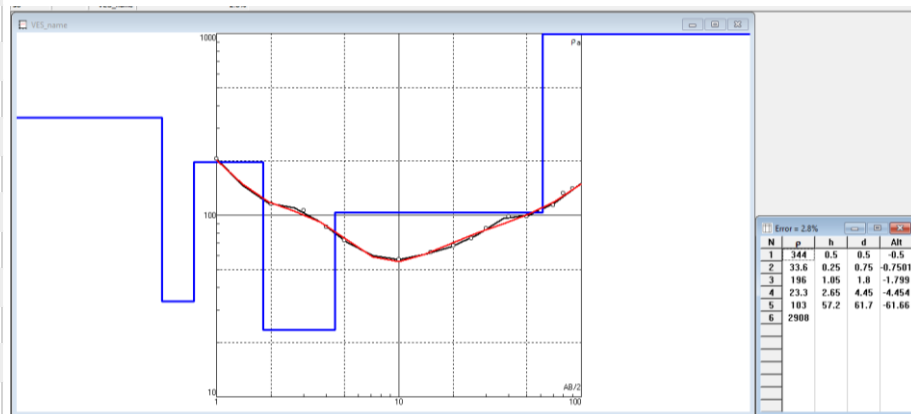


Figura 31. Resultado al procesar el SEV 8

Tabla 14. Interpretación SEV 8

Intervalo SEV8	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	344	0.5	0-0.5	Suelo seco
2	33.6	0.25	0.5 - 0.75	Suelo húmedo
3	196	1.05	0.75 - 1.8	lodolita seca
4	23.3	2.65	1.8 - 4.45	Lodolita saturada
5	103	57.2	4.45 - 61.7	Caliza fracturada saturada
6	2908		>61.7	Caliza compacta

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 15) se realiza en las coordenadas Este:1'160.706, Norte: 1'212.276 y elevación 2.639 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error de 9.37% entre la curva de resistividad aparente (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 15. SEV 9

SEV9		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	172.75
2	0.5	143.68
3	0.5	113.98
4	0.5	97.964
5	1	103.08
10	2	134.96
15	2	173.75
20	4	174.95
25	4	121.36
30	6	92.38
40	6	78.7
50	10	78.752
60	10	80.533
70	10	62.774
80	10	65.318

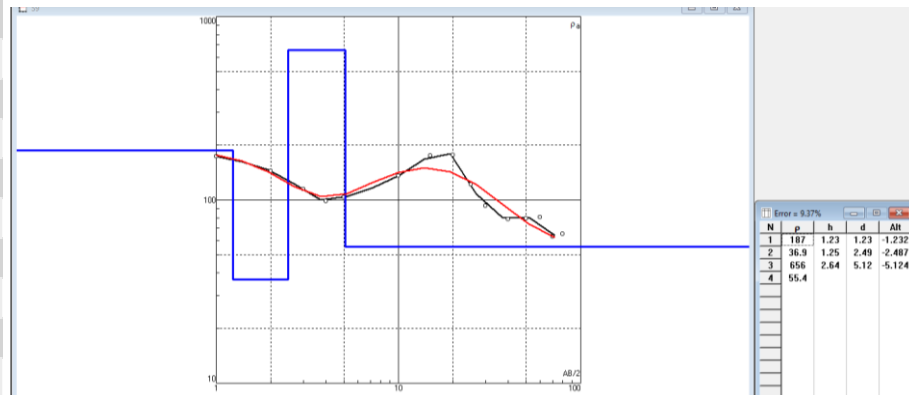


Figura 32. Resultado al procesar el de SEV 9

Tabla 16. Interpretación SEV 9

Intervalo SEV9	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	187	1.23	0 - 1.23	Suelo seco
2	36.9	1.25	1.23 - 2.49	Suelo húmedo
3	656	2.64	2.49 - 5.12	Suelo seco
4	55.4		>>5.12	Caliza fracturada saturada

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 17) se realiza en las coordenadas Este:1'160.710, Norte: 1'212.227 y elevación 2.633 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error de 6.29% entre la CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE CRA (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 17. SEV 11

SEV11		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	107.56
2	0.5	100.73
3	0.5	91.895
4	0.5	84.747
5	1	88.154
10	2	79.515
15	2	89.18
20	4	104.7
25	4	122.41
30	6	122.74
40	6	90.629
50	10	83.194
60	10	87.366
70	10	93.734
80	10	96.372

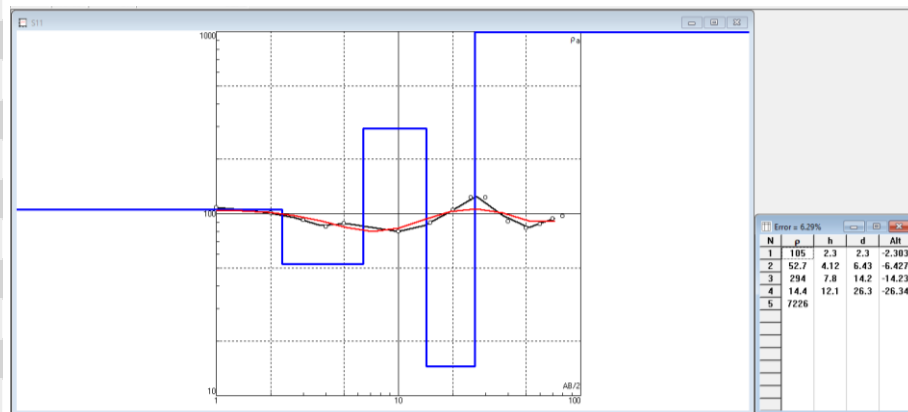


Figura 33. Resultado al procesar el SEV 11

Tabla 18. Interpretación SEV 11

Intervalo SEV11	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	105	2.3	0 - 2.3	Suelo seco
2	52.7	4.12	2.3 - 6.43	Suelo húmedo
3	294	7.8	6.43 - 14.2	Caliza húmeda
4	14.4	12.1	14.2 - 26.3	Lodolita saturada
5	7226		>26.3	Caliza compacta

La adquisición de resistividades aparentes (ver tabla 19) se realiza en las coordenadas Este:1'160.712, Norte: 1'212.224 y elevación 2.600 msnm, se procesan con el software IPI2WIN, con un error de 1.61% entre la CURVA DE RESISTIVIDAD APARENTE CRA (curva de campo) y la línea teórica.

Tabla 19. SEV 12

SEV12		
AB/2	MN	Ωm
1	0.5	59.596
2	0.5	60.421
3	0.5	57.715
4	0.5	57.091
5	1	60.388
10	2	75.969
15	2	90.647
20	4	102.61
25	4	104.09
30	6	105.9
40	6	102.66
50	10	99.431
60	10	96.336
70	10	97.657
80	10	101.19

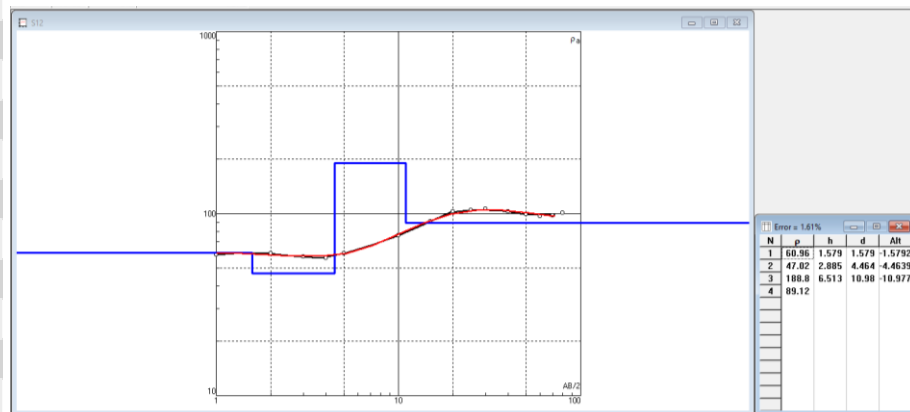


Figura 34. Resultado al procesar el SEV 12

Tabla 20. Interpretación SEV 12

Intervalo SEV11	Resistividad (Ohm.m)	Espesor (m)	Profundidad (m)	Litología interpretada
1	105	2.3	0 - 2.3	Suelo seco
2	52.7	4.12	2.3 - 6.43	Suelo húmedo
3	294	7.8	6.43 - 14.2	Caliza húmeda
4	14.4	12.1	14.2 - 26.3	Lodolita saturada
5	7226		>26.3	Caliza compacta

Se realiza la correlación en el software IPI2WIN de los SEV1, SEV2, SEV3 y SEV6, generando el perfil 2D (ver figura 35) y su respectivo modelo geológico (ver figura36). Se interpretan en general cinco capas de rocas diferenciadas de acuerdo a los rangos de resistividades; la más superficial es el suelo húmedo, en algunas zonas acompañado de bloques caídos (21 – 58 Ohm.m), luego se encuentran las capas de caliza fracturadas saturadas (67 – 144 Ohm.m), infrayace una delgada capa de cinco metro aproximadamente compuesta de lodolitas saturadas (1.4 – 23 Ohm.m), en la base se identifica nuevamente la caliza fracturada (144 – 587 Ohm.m) y en algunos casos solo se dispone húmeda y finalmente se determina la caliza compacta, con resistividades de 4254 Ohm.m

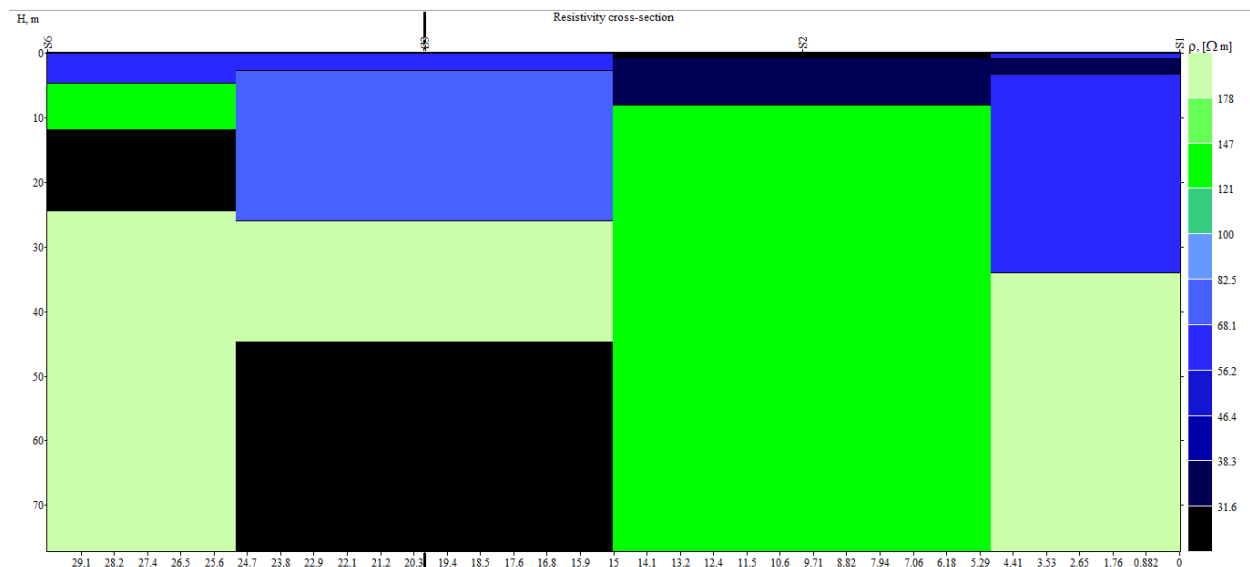


Figura 35. Perfil 2D a partir de la correlación de los SEV1, SEV2, SEV3, Y SEV6.

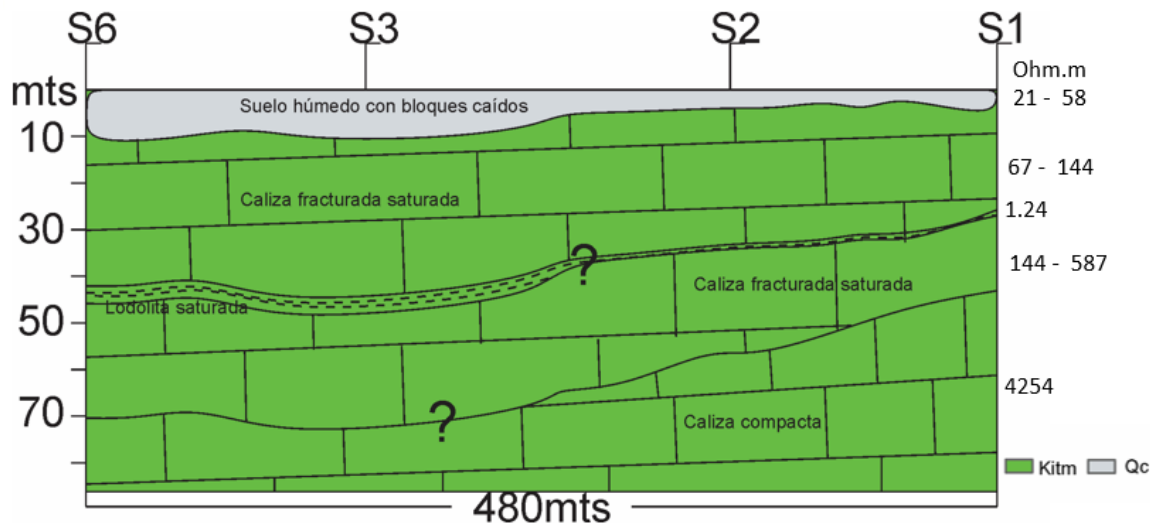


Figura 36. Interpretación de la sección de resistividad SEV 1, SEV2, SEV3 y SEV6.

Así mismo, se realiza la correlación en el software IPI2WIN de los SEV8, SEV9, SEV11 y SEV12, generando el perfil 2D (ver figura 37) y su respectivo modelo geológico (ver figura 38). Se interpretan en general seis capas de rocas diferenciadas de acuerdo a los rangos de resistividades; la más superficial es el suelo seco (187 – 344 Ohm.m) y el suelo húmedo (51 – 58 Ohm.m), luego se encuentran las capas de caliza fracturadas saturadas (57 – 89.12 Ohm.m), intercalaciones de lodolita saturada (14.4 – 23 Ohm.m) luego vuelve la secuencia de caliza (103 Ohm.m), y finalmente se determina la roca caliza seca (2908 – 7226 Ohm.m).

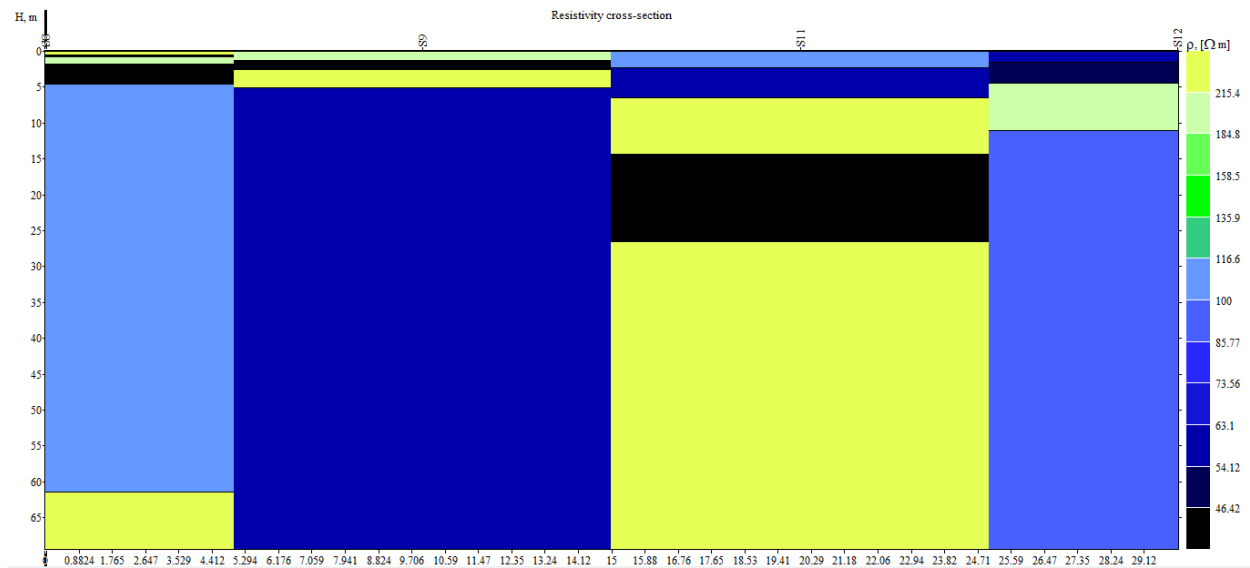


Figura 37. Perfil 2D a partir de la correlación de los SEV8, SEV9, SEV11, SEV12, SEV13 y SEV14.

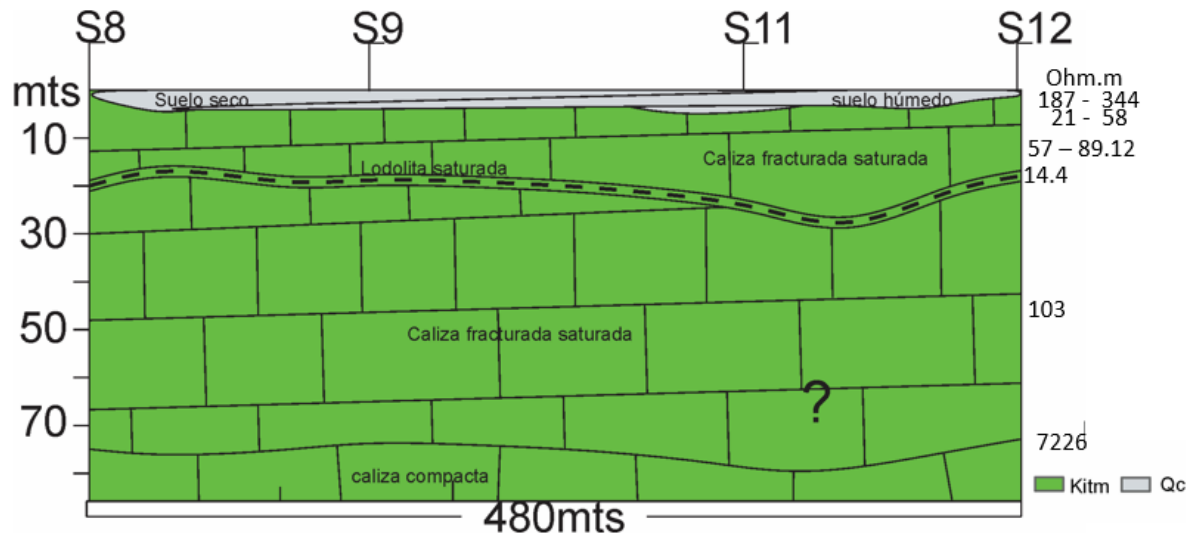


Figura 38. Interpretación de la sección de resistividad SEV 8, SEV9, SEV11 y SEV12.

6.2. Resultados TRE

Al correlacionar las observaciones y descripciones geológicas con los modelos geoelectricos, se determina el modelo geológico para las tomografías de resistividad eléctrica TRE.

Para el TRE 1 localizado en el sector conocido como Pantano Grande, con coordenadas Este:1°16'16.019, Norte: 1°21'20.27 y elevación de 2.635msnm; se realiza la correlación de la pseudosección (2D) generada por medio del software EarthImager (ver figura 39) y su respectivo modelo geológico (ver figura 40). Se interpretan en general siete capas de rocas diferenciadas de acuerdo a los rangos de resistividades; la más superficial es el depósito coluvial húmedo (20 – 50 Ohm.m), otra de suelo húmedo (90 – 200 Ohm.m), infrayacidas por delgadas capas de lodolitas saturadas (20 – 35 Ohm.m), a una profundidad de aproximadamente cuarenta (40) metros, se interpretan las calizas fracturadas saturadas (100 – 500 Ohm.m) con espesores de treinta (30) metros, las cuales junto a las lodolitas son las capas que por su porosidad secundaria presentan vocación acuífera, a diferencia de las dos últimas capas, las calizas compactas y las calizas masivas, las cuales presentan resistividades muy altas (4254 Ohm.m).

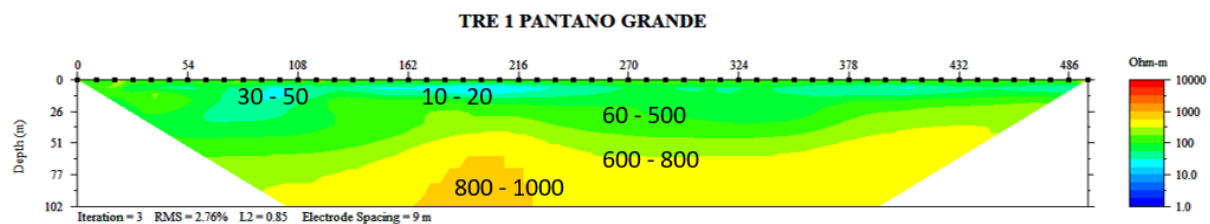


Figura 39. Pseudosección de resistividad invertida de la TRE 1.

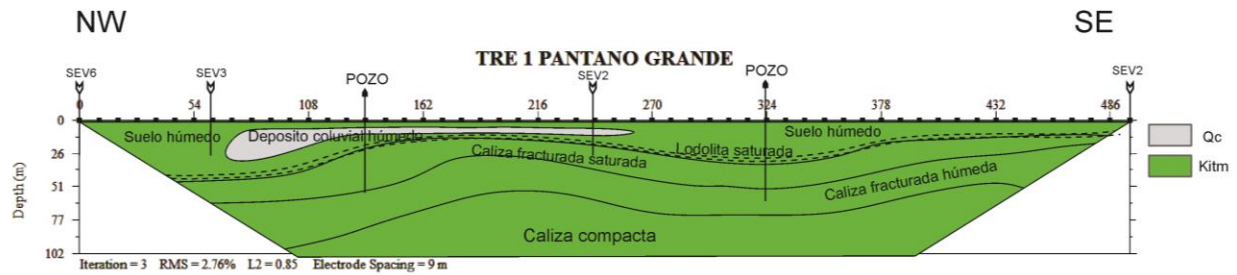


Figura 40. Modelo geológico a partir de la pseudosección de la TRE 1.

Para el TRE 2 localizado en el sector conocido como Sabanetas, con coordenadas Este: 1'160.710, Norte: 1'212.227 y elevación de 2.633msnm; se realiza la correlación de la pseudosección (2D) generada por medio del software EarthImager (ver figura 41) y su respectivo modelo geológico (ver figura 42). Se interpretan en general seis capas de rocas diferenciadas de acuerdo a los rangos de resistividades; la más superficial es el depósito coluvial húmedo (25 – 50 Ohm.m), otra de suelo húmedo (75 -150 Ohm.m), infrayacidas por delgadas capas de lodolitas saturadas (20 – 35 Ohm.m), a una profundidad de aproximadamente treinta (30) metros, se interpretan las calizas fracturadas saturadas (100 – 600 Ohm.m) con espesores de treinta (30) metros, las cuales junto a las lodolitas son las capas que por su porosidad secundaria presentan vocación acuífera, a diferencia de las dos últimas capas, las calizas compactas, las cuales presentan resistividades muy altas (700 - 42546 Ohm.m).

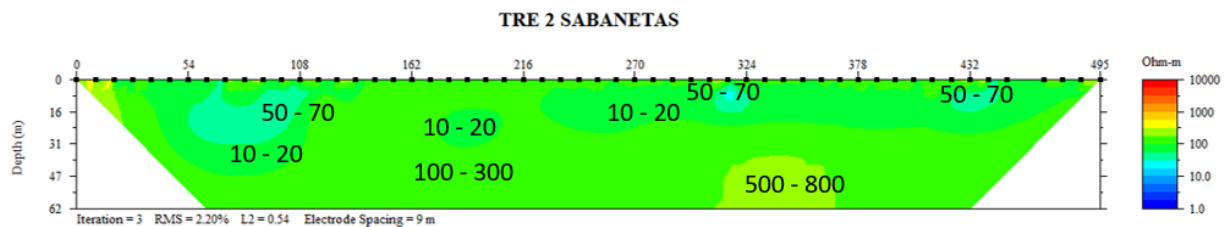


Figura 41. Pseudosección de resistividad invertida de la TRE 2

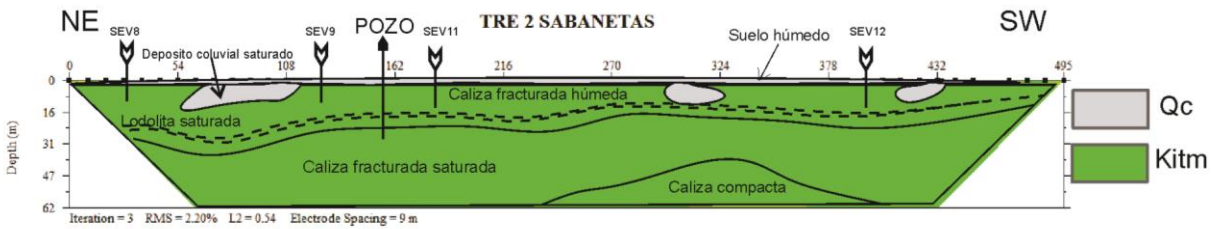


Figura 42. Modelo geológico a partir de la pseudosección de la TRE 2.

7. Discusión

En la zona Noreste (NE) del área de estudio, se ubica en el sector Mesetas, zona más elevada de la vereda, boscosa, que representa la posible zona de recarga del agua que se almacena en el subsuelo en la roca caliza fracturada. Aparece dicha área cubierta por especies vegetales briofitas y epifitas, estas plantas tienen influencia en el ciclo hidrológico actuando en la infiltración y acumulación del agua; ayudan a esos procesos, ya que retardan el deslizamiento del agua sobre la roca en forma de escorrentía, por lo cual el goteo continuo posibilita la filtración del agua a través de las fracturas en las rocas generándose acumulación en capas más profundas.

Se encuentran manantiales un poco más abajo, localizándose uno de ellos en coordenadas X:1'210.546N Y:1'160.802E (Plana Gauss-Kruger) y a una altura de 2.403 msnm, sobre la finca llamada El Tablón, en detalle, se describe como una fuente natural de agua que brota sobre un depósito aluvial, dando a entender que el agua infiltrada, se moviliza por las fracturas de roca caliza pertenecientes a la formación Tibú-Mercedes hasta este punto.

Se determina el ambiente de depositación de las rocas pertenecientes a las formaciones Tibú-Mercedes, en un ambiente marino somero, dadas las estructuras de ondulitas en las capas de lodolitas ubicadas al sureste de la zona, además de definir el techo de la unidad rocosa.

La zona se define estructuralmente sobre el flanco Oeste del anticlinal de Macaravita, por donde se estima que el agua se encuentra en tránsito.

Las resistividades reales, tanto de las pseudosecciones en las tomografías, como en la de los sondeos, presentan correlación, en todos los casos se han identificado, suelo, seco y húmedo, así como intercalaciones de rocas calcáreas con lodolitas; se han detectado delgadas capas de lodolitas, las cuales pueden estar saturadas, ya que tiende a confundirse porque las lodolitas de por sí, presentan agua en su estructura, y se ha definido a la caliza fracturada saturada (porosidad secundaria) como la unidad rocosa del Cretácico, perteneciente a las formaciones Tibú – Mercedes con vocación acuífera, dados los rangos de resistividad (60 -700 Ohm) generadas por el modelo.

Se comparan las resistividades invertidas en el presente proyecto, con las encontradas sobre la misma formación Tibú-Mercedes, pero aflorando en el municipio de Málaga (Tarazona, 2018) donde son correlacionables pero mayores respecto a los contrastes de resistividades interpretados en Buenavista, como suelos (seco, húmedo) y caliza (seca, húmeda y saturada), por otro lado, no se correlacionan las lodolitas con este autor (ver tabla 21).

Tabla 21. Comparación de resistividades entre diferentes autores

Material	Resistividad (Ω.m)	Resistividad (Ω.m) (Tarazona, 2018)	Resistividad (Ω.m) (Hoyos, 2000)	Resistividad (Ω.m) (Knödel, 2007)
suelo seco	187 - 656	121 - 5013		
suelo húmedo	21.3 - 61.18	9.5 - 191		
caliza húmeda	294 - 700	800 - 2800		
caliza fracturada saturada	55.4.08 - 587	80 - 700	100 - 2000	100 - 900
caliza compacta	2908 - 4254	3000 - 5650	1500 - 5000	
lodolita fracturada saturada	1.24 - 23.3		20 - 100	20 - 50
lodolita seca	196			

8. Conclusiones

A partir de la caracterización en campo de la geología, geología estructural y geomorfología, la zona de estudio está comprendida entre el tope de la formación Tibú-Mercedes (piso D) conformadas por intercalaciones de potentes capas de calizas y lodolitas de menor espesor, y la base de la formación Aguardiente (piso A) conformada por areniscas de grano grueso a medio; depositadas en un ambiente marino somero, de edad Cretácica inferior, posteriormente deformadas en plegamientos de tipo anticlinal hacia el Noreste (NE) y sinclinal hacia el Sureste (SE) por esfuerzos compresivos, que inducen la generación de porosidad secundaria a través de fracturas que acompañan la deformación.

La correlación entre la geoelectrica SEV, TRE y la geología que se proyecta mediante la estructura del flanco del anticlinal, sobre los sectores de Pantano Grande y Sabanetas, permite definir una capa de roca caliza con porosidad secundaria (fracturada), con espesor de treinta (30) metros aproximadamente y a una profundidad de cuarenta (40) metros, con rango de resistividades que van desde los 30 hasta los 600 Ohm.m, y delgadas capas de roca lodolita en contacto con las calizas, con rango de resistividades desde 1 a 23 Ohm.m, en la zona Norte de la parte alta de la vereda de Buenavista en el municipio de Macaravita.

En las abscisas 135 y 324 de la TRE 1 - Pantano Grande, se ubican capas desde la superficie hasta una profundidad de cuarenta (40) metros en total, conformadas por suelos (observados en campo), lodolitas y calizas fracturadas, éstas proyectadas sobre la zona de prospección, conforme al flanco del anticlinal definido estructuralmente e identificadas en afloramientos en la parte alta,

completamente saturados, que determinan un punto óptimo para la ubicación de un pozo profundo, para la explotación de las aguas subterráneas, como alternativa de abastecimiento al suministro de agua para los diferentes usos humanos, agrícolas y pecuarios.

9. Recomendaciones

Se considera indispensable realizar perforaciones en los sectores de Pantano Grande y Sabanetas, con recuperación de testigo o ripios y su respectivo registro de pozo, para comparar la litología estimada a partir de correlación entre afloramientos observados y los valores de resistividades adquiridos mediante SEV y TRE.

Se aconseja ejecutar una perforación exploratoria en la zona de Pantano Grande, con fin de realizar ensayos de bombeo, para definir los parámetros hidráulicos de las capas acuíferas y la calidad físico, química y bacteriológica del agua, para determinar su uso, y los caudales de explotación (Modelo hidrogeológico conceptual).

Se recomienda hacer un estudio de isotopos y trazadores, con el propósito de determinar el origen del agua subterránea, su tiempo de recorrido (antigüedad) y revalidar la zona de recarga del sistema hidrogeológico.

Referencias bibliográficas

Alcaldía de Macaravita. (2003). Sistema de documentación e información municipal. Esquema de ordenamiento territorial de Macaravita Tomo II, 20-71. Recuperado de <http://cdim.esap.edu.co/>

Etayo, F. et. al. (1985). Proyecto Cretácico. Bogotá, Colombia. Editorial: Ingeominas.

Geophysics for Practicing Geoscientists. (2017). Valores de conductividad y/o resistividad eléctrica para tipos de roca comunes. Recuperado de https://gpg.geosci.xyz/images/resistivity_table1.png

Gómez, J., Nivia, Á., Montes, N., Almanza, M., Alcárcel, F. y Madrid, C.A. (2015). Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015, 13-19. Recuperado de <https://www.sgc.gov.co/ProgramasDeInvestigacion/Geociencias/Documents/>

Hoyos F. (2000). Las aguas subterráneas de los valles de San Nicolás. Universidad Nacional de Colombia. Recuperado de https://www.academia.edu/1283270/Las_Aguas_Subterr%C3%A1neas_del_Valle_de_San_Nicol%C3%A1s

Knödel K. et. al. (2007). Principe de la mesure de la resistivite avec quatre electrodes. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Principe-de-la-mesure-de-la-resistivite-avec-quatre-electrodes-Knoedel-et-al-2007_fig2_286080236

Notestein, F., Hubman, C. y Bowler, J. (1944). Geology of the Barco Concession, Republic of Colombia, South America. Geol. Bull. (Tulsa, Oklahoma) 24, 1611-1619.

Parasnis. (1997). Manual de instrucciones del ABEM Terrameter SAS 4000/ SAS 1000.

Rincón. J. (En proceso de publicación). Prospección geoelectrica para el modelado 2D de la resistividad del subsuelo en el área perimetral del casco urbano de Málaga

Richards, H. (1968). Cretaceous section in Barco area of northeastern Colombia: Am. Assoc, Petr. Geol. Bull. (Tulsa, Oklahoma) 52 (12), 2324-2336.

Salamanca A. (2017). Caracterización del subsuelo mediante prospección geofísica de resistividades (TRE y SEV) con fines hidrogeológicos en la sede de Málaga de la Universidad Industrial de Santander. Tesis de pregrado.

Servicio Geológico Colombiano. (2012). Glosario de unidades y subunidades geomorfológicas. Recuperado de <https://es.scribd.com/doc/253673069/Glosario-de-Unidades-Geomorfológicas>

Tarazona J. (2018). Estudio para la prospección de aguas subterráneas en la zona urbana y perimetral del municipio de Málaga, Santander. Universidad Industrial de Santander. Tesis de Pregrado.

Vargas, R., Arias, A., Jaramillo, L., Téllez, N. (1981). Geología de las planchas 136 Málaga y 152 Soata, Cuadrángulo I, Memoria explicativa. Ingeominas, 13 24(3), 32-49. Recuperado de <http://www.tuinfopro.com/memoria100.html>.