

Correlación de la resistividad eléctrica y el fracturamiento al sur de la Mesa de Los Santos

Juan Camilo Ariza Daza
María Fernanda Gómez Acuña

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geólogo

Director
Sergio Andrés García Arias
Magíster en Geofísica

Codirector
Francisco Alberto Velandia Patiño
Doctor en Geociencias

Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas
Geología
Bucaramanga
2023

Dedicatoria

A mis padres, Zaira Daza y Harvin Ariza, pilares de mi vida que han demostrado su amor y apoyo incondicional, a ustedes, amores de mi vida, les dedico mis logros, estaré eternamente agradecido.

A mi hermanita Ana Ariza que con sus ocurrencias me libró del estrés constante.

Padre mío, eres el mejor ejemplo de un buen hombre, el mejor héroe que conozco.

Madre mía, eres la definición de la fortaleza y la palabra resiliencia se te queda corta.

Hermanita de mi alma, mientras yo respire siempre tendrás un brazo en el cual estarás segura.

A ustedes, seres de luz, solamente puedo dedicarles mi vida.

Mi esfuerzo es por y para ustedes.

Camilo Ariza

Dedico esta tesis a todas las personas especiales que han sido mi apoyo constante a lo largo de este desafiante viaje académico. A mi querida mamá, Patricia Acuña, cuyo amor incondicional y aliento inquebrantable me han impulsado a superar cada obstáculo y alcanzar mis metas. A mi padre, Omar Gómez, por las sabias enseñanzas y valiosos consejos que han enriquecido mi vida. A mi abuela Herminia, que con sus deliciosas comidas y tazas de café en las noches de trabajo me recordaba constantemente su afecto y apoyo. A mi abuela paterna, Inés, quien siempre anheló verme convertida en profesional, por el inmenso cariño que siempre me ha brindado.

Agradezco a mis amigos de la universidad, quienes desde afuera observaron los desafíos que enfrenté y me enviaron su apoyo constante, recordándome que no estaba sola en este camino. A mi novio Leo, por representar un apoyo constante y por impulsarme a perseguir mis sueños con determinación. A mis suegros William y Haaylet, por actuar como padres y sentirse orgullosos de mis logros.

A mis colegas de Génesis, que siempre estuvieron ahí para ofrecer su apoyo y ánimo, creyendo en mi potencial. Un agradecimiento especial a mi jefe, Rigo Ramírez, cuyo apoyo psicológico y recordatorios de mi valía como profesional y como mujer fueron fundamentales para superar los desafíos.

No puedo olvidar al profesor Francisco Velandia, quien siempre brindó un apoyo constante en cada paso y confió en nosotros hasta el final. Logró que todo se cumpliera en las fechas establecidas, creyó en nuestro potencial y en nuestro trabajo. Siempre buscó soluciones a nuestros percances y nos aportó palabras positivas en todo momento.

Y, por supuesto, a mis fieles compañeros de cuatro patas, Matías y Theo, cuyas noches largas compartidas y lamidas de consuelo me recordaron que nunca estuve sola en este camino.

A todos ustedes, gracias desde lo más profundo de mi corazón. Este logro es también suyo y esta tesis está dedicada a cada uno de ustedes, pilares fundamentales en mi vida y la culminación de este éxito académico.

María Fernanda Gómez Acuña

Agradecimientos

Queremos expresar nuestro profundo agradecimiento a todas las personas que desinteresadamente contribuyeron a la realización de esta tesis. En primer lugar, agradecemos de manera especial a nuestros compañeros de campo 3, cuya dedicación y esfuerzo fueron fundamentales para llevar a cabo esta investigación. A Jose Moreno, Shaired Vergel, Bianny Remolina, Dana Conde, Laura Merchán, Sofía Zarate, Valentina Moreno, Britney Hernandez, Karen Bolivar, Maria José Beltrán, Alvaro Osma, y Andrea Muñoz, les agradecemos por su colaboración incansable en la construcción de los arreglos y la toma de datos eléctricos, lo cual permitió el desarrollo exitoso de nuestro proyecto.

También queremos extender nuestra gratitud a los profesores de campo 3, Rocío del Pilar Bernal Olaya, Saul Guevara, José Pedro Mora y Maria Alejandra Cetina, quienes desempeñaron un papel fundamental como guías y mentores en todo el proceso. Su experiencia y dirección fueron cruciales para establecer los cimientos de nuestra tesis y avanzar con éxito hasta su conclusión.

Además, agradecemos a nuestro director, Sergio Andrés García Arias, y a nuestro codirector, Francisco Alberto Velandia. Su liderazgo, orientación y asesoramiento fueron esenciales en cada etapa de este proyecto. Sin su apoyo constante y sabios consejos, nada de esto habría sido posible.

En resumen, a todos ustedes, nuestro más sincero agradecimiento. Su colaboración, apoyo y dedicación fueron la piedra angular de esta tesis. Infinitas gracias por hacer posible este logro.

Camilo Ariza y Maria Fernanda Gómez

Tabla de Contenido

		Pág.
Introducción		16
1	Antecedentes	18
1.1	Planteamiento del Problema	21
2	Hipótesis	22
3	Objetivos	22
3.1	Objetivo general	22
3.2	Objetivos específicos	22
4	Marco de Referencia	23
4.1	Marco Geológico	23
4.2	Marco Teórico	25
4.2.1	Métodos geoelectr�icos	25
4.2.1.1	Sondeos Eléctricos Verticales	27
4.2.1.2	Tomografías de Resistividad Eléctrica.	30
4.2.1.3	Resistividad de las rocas.	33
4.2.1.4	Isotropía y anisotropía en física de rocas.	35
4.2.1.5	Paradoja de la anisotropía	36
4.2.1.6	Fracturamiento.	37
5	Metodología	39
5.1	Etapa preliminar	39
5.2	Etapa de campo	40

5.2.1	Adquisición SEV azimutales	40
5.2.2	Adquisición TRE	42
5.2.3	Planos de fracturas	44
5.3	Etapas de oficina.....	45
5.3.1	Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)	45
5.3.2	Inversión de Tomografías de Resistividad Eléctrica	47
5.3.3	Diagramas rosas	52
5.3.4	Interpretación y redacción del documento final.....	53
6	Resultados.....	53
6.1	Sondeos Eléctricos Verticales.....	53
6.1.1	Estación La Mojarra.....	54
6.1.2	Estación Potreros	55
6.1.3	Estación La Chivatera 1	56
6.1.4	Estación La Chivatera 2	57
6.2	Tomografías de Resistividad Eléctrica	59
6.2.1	Estación La Mojarra A.....	61
6.2.2	Estación La Mojarra B	62
6.2.3	Estación La Chivatera 1 A	64
6.2.4	Estación La Chivatera 1 B	65
7	Análisis y discusión	66
7.1	Sondeos Eléctricos Verticales.....	66
7.1.1	Estación Potreros	68
7.1.2	Estación La Mojarra.....	71

7.1.3	Estación La Chivatera 1	73
7.1.4	Estación La Chivatera 2	75
7.2	Tomografías de Resistividad Eléctrica	77
7.2.1	Estación La Mojarra.....	78
7.2.2	Estación La Chivatera 1	80
7.3	Discusión general.....	82
8	Conclusiones	86
9	Recomendaciones	87
10	Referencias Bibliográficas	88
11	Apéndices.....	97

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Rangos de resistividad (en $\Omega\cdot m$) para tipos de rocas presentes en la Mesa de Los Santos.	34
Tabla 2 Rangos de resistividades para las Formaciones Rosablanca y Los Santos para plugs mojados y secos.....	35
Tabla 3 Valores de coeficiente de anisotropía (λ).	46
Tabla 4 Parámetros de inversión.....	50
Tabla 5 Datos estadísticos de los valores de resistividad aparente de las cuatro estaciones de SEV azimutales realizados en la Mesa de Los Santos	58
Tabla 6 Tabla compilada con información de las inversiones de las TRE.....	60
Tabla 7 Cantidad de fracturas consideradas para la relación de la anisotropía de resistividad y el fracturamiento.....	67

Lista de Figuras

Figura 1 <i>Localización de las zonas de estudio en una cartografía base.</i>	18
Figura 2 <i>Contexto Geológico de la zona de estudio en la Mesa de Los Santos y ubicación de los puntos de adquisición.</i>	24
Figura 3 <i>Disposición de electrodos para el arreglo Wenner.</i>	27
Figura 4 <i>Disposición de electrodos para los arreglos dipolares.</i>	28
Figura 5 <i>Esquema representativo de un sondeo eléctrico vertical en arreglo Schlumberger.</i>	29
Figura 6 <i>Adquisición de Tomografías de Resistividad Eléctrica.</i>	30
Figura 7 <i>Matrices utilizadas según el arreglo de electrodos.</i>	31
Figura 8 <i>Profundidad media de investigación (Z_e) para cada arreglo. L corresponde a la longitud del arreglo.</i>	31
Figura 9 <i>Rangos de resistividades eléctricas para tipos de roca.</i>	33
Figura 10 <i>Rangos de resistividad (en $\Omega \cdot m$) para diferentes minerales y tipos de roca.</i>	34
Figura 11 <i>Elipses de resistividad eléctrica según planos de debilidad orientados N-S.</i>	37
Figura 12 <i>Diagrama de esfuerzo y deformación en ensayos de rocas sometidas a compresión.</i>	38
Figura 13 <i>Esquema ilustrativo de planta para SEVs azimutales.</i>	42
Figura 14 <i>Esquema representativo de adquisición de TREs en planta y corte.</i>	44
Figura 15 <i>Revisión estadística de datos adquiridos.</i>	45
Figura 16 <i>Gráfico de dispersión de resistividades aparentes superpuestos con histogramas de fracturas y contrastados con datos SEVs en los puntos de estudio.</i>	46
Figura 17 <i>Histogramas estadísticos de la distribución de los valores de resistividad aparente.</i>	47

Figura 18 <i>Gráficos de pseudo profundidad para conocer la distribución de los datos de resistividad real y conocer los puntos con datos más confiables.</i>	48
Figura 19 <i>Figura ejemplo de resultado de la inversión 0.</i>	49
Figura 20 <i>Figura ejemplo, identificación y eliminación de Bad Data Points.</i>	49
Figura 21 <i>Modelo discretizado o de cuadrícula</i>	50
Figura 22 <i>Pseudosección aparente vs pseudosección calculada del modelo invertido generado</i>	51
Figura 23 <i>Disminución del RMS con cada inversión.</i>	51
Figura 24 <i>Datos con RMS</i>	51
Figura 25 <i>Modelo invertido obtenido con topografía incluida.</i>	52
Figura 26 <i>Diagramas polares de resistividad, superpuestos en rosetas de fracturamiento según el azimut de rumbo.</i>	53
Figura 27 <i>Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación La Mojarra según el azimut de rumbo</i>	55
Figura 28 <i>Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación Potreros según el azimut de rumbo.</i>	56
Figura 29 <i>Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación La Chivatera 1 según el azimut de rumbo.</i>	57
Figura 30 <i>Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación La Chivatera 2 según el azimut de rumbo.</i>	58
Figura 31 <i>Ortofoto para la estación La Mojarra con las líneas de TRE A y B donde con las adquisiciones realizadas con sondeos eléctricos verticales y los electrodos ajustados</i>	59
Figura 32 <i>Ortofoto para la estación La Chivatera 1 con las líneas de TRE A y B.</i>	60

Figura 33 Modelo 2D obtenido para la Estación La Mojarra, línea A.....	62
Figura 34 Modelo 2D obtenido para la Estación La Mojarra, línea B.....	63
Figura 35 Modelo 2D obtenido para la Estación La Chivatera 1, línea A.....	64
Figura 36 Modelo 2D obtenido para la Estación La Chivatera 1, línea B.....	66
Figura 37 Localización TRE 01, TRE 02 (izquierda) y los diagramas rosa obtenidos en la estación Potreros.....	68
Figura 38 Perfil geológico 01 en la estación Potreros obtenido con la relación de la Tomografía de Resistividad Eléctrica.....	69
Figura 39 Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación Potreros	70
Figura 40 Diagramas polares de resistividad, superpuesto en rosetas de fracturamiento según el azimut de rumbo para la estación Potreros.....	70
Figura 41 Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación La Mojarra	72
Figura 42 Diagramas polares de resistividad, superpuesto en diagramas de rosa de fracturamiento según el azimut de rumbo para la estación La Mojarra.....	72
Figura 43 Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación La Chivatera 1.....	74
Figura 44 Diagramas polares de resistividad, superpuesto en rosetas de fracturamiento según el azimut para la estación La Chivatera 1.....	75
Figura 45 Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación La Chivatera 2.....	76

Figura 46 <i>Diagramas polares de resistividad, superpuesto en rosetas de fracturamiento según el azimut de rumbo para la estación La Chivatera 2.</i>	76
Figura 47 <i>Interpretación del modelo 2D obtenido para La Mojarra A (arriba) La Mojarra B (abajo).</i>	79
Figura 48 <i>Ortofoto relacionada a la Estación La Mojarra con el posible plano de fracturamiento.</i>	80
Figura 49 <i>Interpretación del modelo 2D obtenido para La Chivatera I A (arriba) y La Chivatera I B (abajo).</i>	81

Lista de Apéndices

Apéndice A <i>Mapa de tendencias de fracturamiento relacionadas a las tendencias de valores de resistividad aparente para cada estación y su conexión con las fallas aledañas de dirección NW.</i>	97
Apéndice B <i>Metodología, etapa de campo para la estación La Mojarra. Montaje geoelectrico.</i>	98
Apéndice C <i>Metodología, etapa de campo para la estación La Mojarra. Medición fracturas. .</i>	98
Apéndice D <i>Metodología, etapa de campo para la estación Potreros. Montaje geoelectrico....</i>	99
Apéndice E <i>Metodología, etapa de campo para la estación LaChivatera. Montaje geoelectrico</i>	99
Apéndice F <i>Metodología, etapa de campo para la estación La Chivatera 2. Medición fracturas</i>	100
Apéndice G <i>Metodología, etapa de campo para la estación La Chivatera 2. Montaje geoelectrico</i>	101

Resumen

Título: Correlación de la resistividad eléctrica y el fracturamiento al sur de la Mesa de Los Santos*

Autor: Maria Fernanda Gómez Acuña, Juan Camilo Ariza Daza **

Palabras Clave: Anisotropía, Mesa de los Santos, Sondeos Eléctricos Verticales Azimutales Colineales, Fracturamiento.

Descripción: Este estudio geofísico se centra en la relación entre el fracturamiento y la resistividad eléctrica al sur de la Mesa de Los Santos. Se utilizaron técnicas de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) y Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) para analizar la anisotropía de la resistividad en el subsuelo y su relación con el fracturamiento. Se recolectaron datos de fracturas en superficie y se correlacionaron con las respuestas de resistividad eléctrica. Los hallazgos revelaron que las fracturas parecen estar llenas de un material menos resistivo, lo que se traduce en una disminución de la resistividad en direcciones perpendiculares al fracturamiento preferencial. Sin embargo, esta relación es compleja y puede verse influenciada por factores como la apertura de las fracturas, el ángulo de la falla más cercana y la ubicación del bloque colgante o yacente. Las TRE proporcionaron información sobre la distribución de la resistividad en profundidad, revelando zonas saturadas y áreas de posible karstificación. Además, se observaron cambios laterales y a profundidad relacionados con fracturas. Aunque el estudio tiene limitaciones en cuanto a la profundidad y el alcance, los resultados aportan información para comprender la geología estructural de la región y tienen aplicaciones directas en la gestión de recursos hídricos y futuros estudios geológicos en la zona.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Geología. Director: Sergio Andrés García

Arias. Magíster en Geofísica. Codirector: Francisco Alberto Velandia Patiño. Doctor en Geociencias.

Abstract

Title: Correlation of electrical resistivity and fracturing south of the Mesa de Los Santos*

Author(s): María Fernanda Gómez Acuña, Juan Camilo Ariza Daza ¹

Key Words: Azimuthal Resistivity Survey, Electrical Resistivity Tomography, anisotropy, Mesa de Los Santos, Fracturation.

Description: This geophysical study focuses on the relationship between fracturing and electrical resistivity south of the Mesa de Los Santos. Azimuthal Resistivity Survey (ARS) and Electrical Resistivity Tomography (ERT) techniques were used to analyze the anisotropy of resistivity in the subsurface and its relationship with fracturing. Surface fracture data were collected and correlated with electrical resistivity responses. The findings revealed that fractures appear to be filled with less resistive material, resulting in a decrease in resistivity in directions perpendicular to preferential fracturing. However, this relationship is complex and may be influenced by factors such as fracture opening, angle of the nearest fault, and location of the hanging or lying block. The SRTs provided information on the distribution of resistivity at depth, revealing saturated zones and areas of possible karstification. In addition, lateral and depth changes related to fractures were observed. Although the study has limitations in depth and scope, the results provide information for understanding the structural geology of the region and have direct applications in water resource management and future geological studies in the area.

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Geología. Director: Sergio Andrés García

Arias. Magíster en Geofísica. Codirector: Francisco Alberto Velandia Patiño. Doctor en Geociencias.

Introducción

La Mesa de los Santos es una planicie morfológica de aproximadamente 430 km², con una altitud promedio de 1.650 msnm. y una temperatura que oscila entre los 23° y 30° C. Se localiza en la región central del departamento de Santander y fisiográficamente en el sector noroeste de la Cordillera Oriental (Figura 1). Esta zona ha sido objeto de numerosos estudios hidrogeológicos debido a la escasez en el suministro hídrico, mayormente las veredas al sur (Díaz et al., 2009; IDEAM, 2019). La mayoría de las fuentes de agua son subterráneas suministradas de los pozos de explotación (Corporación Autónoma Regional de Santander-CAS, 2016) considerándose como la única fuente actual de consumo de este recurso.

De acuerdo con cifras del IDEAM (2022) en una estación cercana al municipio Los Santos, las precipitaciones para la zona en un periodo de 18 años (período 2003-2021), evidencian datos pluviométricos mínimos de aproximadamente 367 mm/año para el año 2020 y máximos de hasta 1.165 mm/año para el año 2010. Si bien los datos de precipitaciones anuales representan en buena medida la condición hidrológica del sector, no son muestra directa del comportamiento del agua en el subsuelo.

Al norte de la Mesa de Los Santos aflora en su mayoría el miembro superior de la Formación los Santos, constituido principalmente por areniscas que presentan altas porosidades y permeabilidades, favoreciendo la captación de aguas y un mayor potencial hidrogeológico. Las precipitaciones son mayores a el norte de la Mesa de Los Santos y favorecen la recarga del sistema acuífero. Al suroeste de la Mesa aflora la Formación Rosa Blanca, constituida por unidades carbonatadas, caracterizadas por tener porosidades y permeabilidades bajas (Díaz et al., 2009), además y con precipitaciones escasas en este sector (Roenes y Peña., 2022), se considera con un

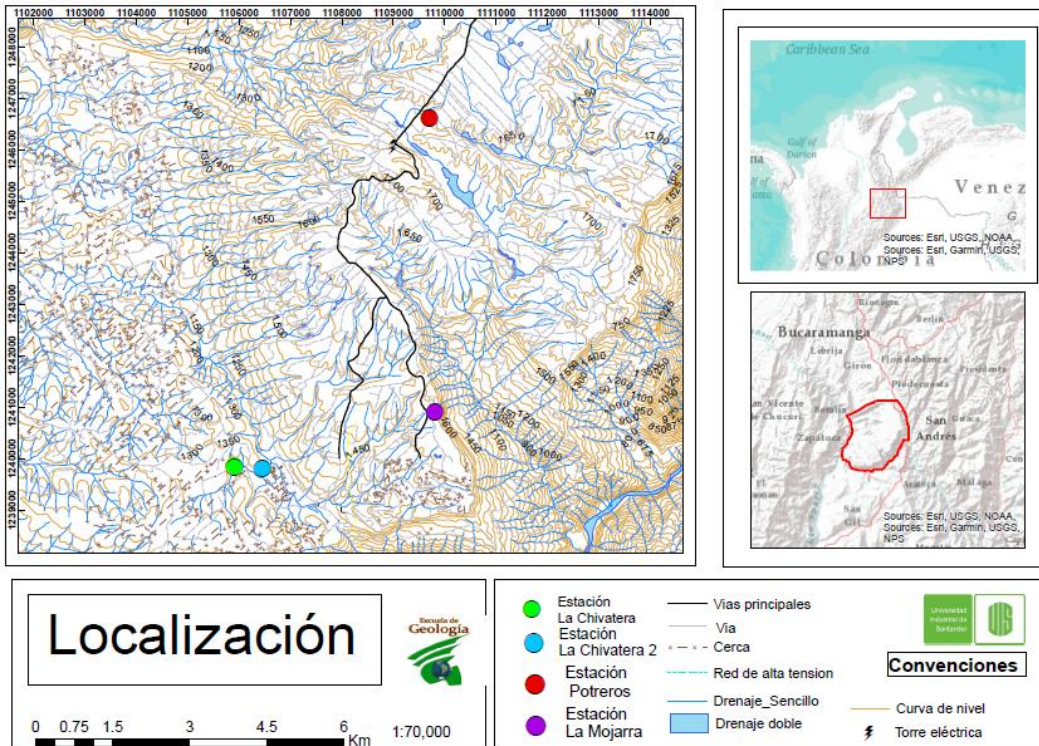
bajo potencial hidrogeológico. Sin embargo, Arguello et al., (2018) resaltan que esta formación es de mayor predisposición para la captación y percolación de agua por su comportamiento kárstico. El nivel arenoso de la Formación Rosablanca se considera como un posible acuífero, debido al fracturamiento en las zonas de daño de fallas y la porosidad secundaria por disolución de material carbonatado, lo cual incrementa su potencial hidrogeológico (Díaz et al., 2009).

La exploración de aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos se ha apoyado de métodos geofísicos, siendo los estudios geoelectricos los de mayor aplicación (Díaz Duarte y Duarte Tarazona, 2019; García Arias y Gómez García, 2015; Ingeoexploraciones, 2016; Moyano Nieto, 2010; Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007); Vargas Cáceres, 2021; Vergel y Remolina, 2023; Zarate y Moreno, 2023). La exploración geoelectrica se ha concentrado mayoritariamente en la zona norte, sin embargo, el estudio realizado por Moyano Nieto (2010) abarca parte de la zona sur próxima a la Falla Los Santos y concluye que las formaciones litoestratigráficas que afloran en la zona sur de la Mesa de Los Santos presentan un alto potencial de fracturamiento y saturación en la zona de daño de la Falla Los Santos.

El sistema acuífero en la Mesa de Los Santos se considera como un acuífero fracturado (Díaz et al., 2009; Tarazona et al., 2021), por lo que se hace necesario conocer cómo las fallas mayores cercanas a los puntos de estudio influyen en el potencial hidrogeológico que puedan tener dichas formaciones. Para comprender la influencia del fracturamiento en la hidrogeología, en sectores donde no se cuenta con evidencias de fracturamiento en superficie, se hizo la implementación de Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs) dispuestos de manera azimutal y de geometría colineal. Para identificar posibles zonas saturadas se realizan Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE), que ayudan a inferir la presencia de estructuras en la zona.

Figura 1

Localización de las zonas de estudio en una cartografía base.



1 Antecedentes

Díaz et al. (2009), realizaron una evaluación preliminar del potencial hidrogeológico de las formaciones aflorantes en La Mesa de Los Santos fundamentado en la integración de mapas geológicos, estratigráficos y registros de puntos de agua en épocas de alta y baja precipitación. Este trabajo se enriqueció mediante el análisis de la porosidad primaria según estudios petrográficos, y la porosidad secundaria relacionada estadísticamente con la cantidad de fracturas de cada formación, su apertura, su interconexión y buzamiento (cantidad y dirección). Así se definió al miembro superior de la Formación Los Santos como la unidad con mayor potencial

hidrogeológico y para la Formación Rosablanca se considera una baja porosidad primaria y secundaria en los niveles calcáreos, pero su nivel arenoso evidencia un aumento de porosidad por disolución de materiales calcáreos permitiendo que aumente la permeabilidad y tenga un potencial hidrogeológico medio.

En el análisis de microcuencas al sur de la Mesa de Los Santos, realizado por Arguello et al. (2018), la Formación Rosablanca adquiere un gran valor en zonas de alta porosidad secundaria por su densidad de fracturamiento. Gracias a procesos tectónicos que, acompañados de procesos de disolución de minerales, pueden presentar significativas zonas de almacenamiento de agua.

Moyano Nieto (2010), a partir de la prospección geoelectrica de SEV, con arreglo Schlumberger, concluye que para el sector sur la concentración de zonas con mayor fracturamiento y/o saturación se localiza en las franjas cercanas a la falla Los Santos. Concluyendo que la litología no es el factor predominante en la acumulación de agua en la Formación los Santos, también el fracturamiento de las rocas condiciona el flujo y almacenamiento del agua.

Díaz Duarte y Duarte Tarazona, (2019) utilizaron métodos geoelectricos con el fin de identificar los contrastes de resistividad en rocas sedimentarias cretácicas para determinar espesores en las litologías presentes. Así identifican tres unidades geoelectricas: una unidad de areniscas ligeramente conglomeráticas con un espesor promedio de 20 m y rangos de resistividad de 472.9 a 901 $\Omega \cdot m$; una unidad de areniscas con un espesor de 15 m y rangos de resistividad de 300 m a 548.1 $\Omega \cdot m$; por último, la unidad de areniscas con conglomerados con un espesor de 65 m y rangos de resistividad de 1500 a 1872 $\Omega \cdot m$.

Vargas Cáceres (2021) realiza una comparación de la anisotropía de resistividad eléctrica del miembro superior de la Formación Los Santos con métodos geoelectricos de Tomografías de

Resistividad Eléctrica y sondeos eléctricos de arreglo cuadrado en zonas aledañas a una falla normal y una inversa para estimar su escala, dirección de anisotropía y estructuras en puntos determinados de la Mesa de Los Santos identificando cuál de ellas tiene mayor importancia geológica y favorece el flujo de aguas subterráneas en el sector norte. Vargas Cáceres, (2021) concluye que el flujo de aguas subterráneas puede estar favorecido por fallas normales con componente de rumbo y sugiere que estas fallas al ser paralelas y de rumbo pueden tener una cinemática similar para el mismo campo de esfuerzos. Además, la anisotropía de resistividad para el miembro superior de la Formación Los Santos, se encuentra influenciada por la presencia de zonas fracturadas en cercanía de las distintas fallas normales o de rumbo que favorecen el flujo de aguas subterráneas.

En el análisis cuantitativo del sistema de fracturas al Sur de la Mesa de Los Santos, Tarazona et al., (2021) determinan la orientación preferencial de las fracturas al sur de la Mesa de Los Santos con dirección N60-70W. Esta dirección de fracturamiento está asociada a fallas longitudinales con orientación NW, y resaltan el interés hidrogeológico por la alta intensidad y densidad del fracturamiento, el cual puede favorecer la recarga del sistema acuífero y establecer interconexiones a profundidad. García Arias (2022) establece para la Mesa de Los Santos una dirección del máximo esfuerzo horizontal a los 290°, delimitando áreas de interés hidrogeológico mediante la interpretación conjunta del análisis estructural, las propiedades físicas de la roca y mapas generados por redes neuronales. Para el sector sur los resultados del análisis de fracturamiento son mayores respecto al sector norte, concluyendo que los procesos naturales de karstificación pueden influir en el flujo de agua de la Formación Rosa Blanca. Estos procesos de karstificación pueden generar lateralmente y a profundidad, una conexión con el miembro superior de la Formación los Santos, producto de la discontinuidad lateral en secuencia estratigráfica

generada por la Falla Los Santos, para la cual establece una cinemática de rumbo sinistral con componente inverso.

1.1 Planteamiento del Problema

Existen variedad de trabajos publicados a la fecha que abordan la problemática del recurso hídrico en la Mesa de Los Santos (Proyecto Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007); Díaz et al., 2009; Hincapié y Veloza, 2009; Moyano, 2010; Vergel y Remolina, 2023; Roenes y Peña et al., 2022; Casadiegos Agudelo, 2023; Conde y Merchán, 2023). No obstante, son pocos los estudios realizados para comprender la geología estructural de la zona (García Arias, 2022; Tarazona et al., 2021; Vargas Cáceres, 2021; Conde y Merchán, 2023), los cuales han buscado relacionar el comportamiento hidrogeológico con el fallamiento. Igualmente, los trabajos de exploración geoelectrica realizada en la Mesa de Los Santos (Díaz Duarte y Duarte Tarazona, 2019; García Arias y Gómez García, 2015; Ingeoexploraciones, 2016; Vargas Cáceres, 2021; Wilches y Corzo, 2015) han resaltado la influencia del fracturamiento para el almacenamiento del agua subterránea, principalmente en la Formación Los Santos y en cercanía a otras fallas, pero se han realizado pocos análisis enfatizados en conocer la respuesta geofísica con el fracturamiento (Vargas Cáceres, 2021; Conde y Merchán, 2023). A partir de ello se plantea las preguntas de investigación:

- ¿Qué efectos tiene el fracturamiento en los valores de resistividad aparente?
- ¿Están asociados los cambios de resistividad eléctrica en el subsuelo con las fallas geológicas cercanas?

2 Hipótesis

Considerando las preguntas de investigación, la hipótesis está constituida por dos ideas:

1. La variación azimutal de los valores de resistividad aparente se correlaciona con las direcciones de fracturamiento. Estas direcciones pueden estar asociadas a fallas mayores cercanas.
2. Las fallas geológicas y fracturas asociadas condicionan el flujo de aguas subterráneas, por lo que el fracturamiento estaría generando cambios laterales y en profundidad de la resistividad eléctrica del subsuelo en los puntos de estudio de la Mesa de Los Santos.

3 Objetivos

3.1 Objetivo general

Determinar la anisotropía de resistividad eléctrica y su correlación con el fracturamiento al sur de la Mesa de Los Santos.

3.2 Objetivos específicos

Identificar cambios de resistividad eléctrica empleando el método geofísico de Sondeos Eléctricos Verticales azimutales colineales en los sitios de análisis aledaños a fallas orientadas en dirección NW.

Definir variaciones de la resistividad eléctrica en profundidad y lateralmente a partir de Tomografías de Resistividad Eléctrica.

Inferir el control estructural local según las respuestas de resistividad eléctrica y su correlación con las fracturas medidas en superficie.

4 Marco de Referencia

4.1 Marco Geológico

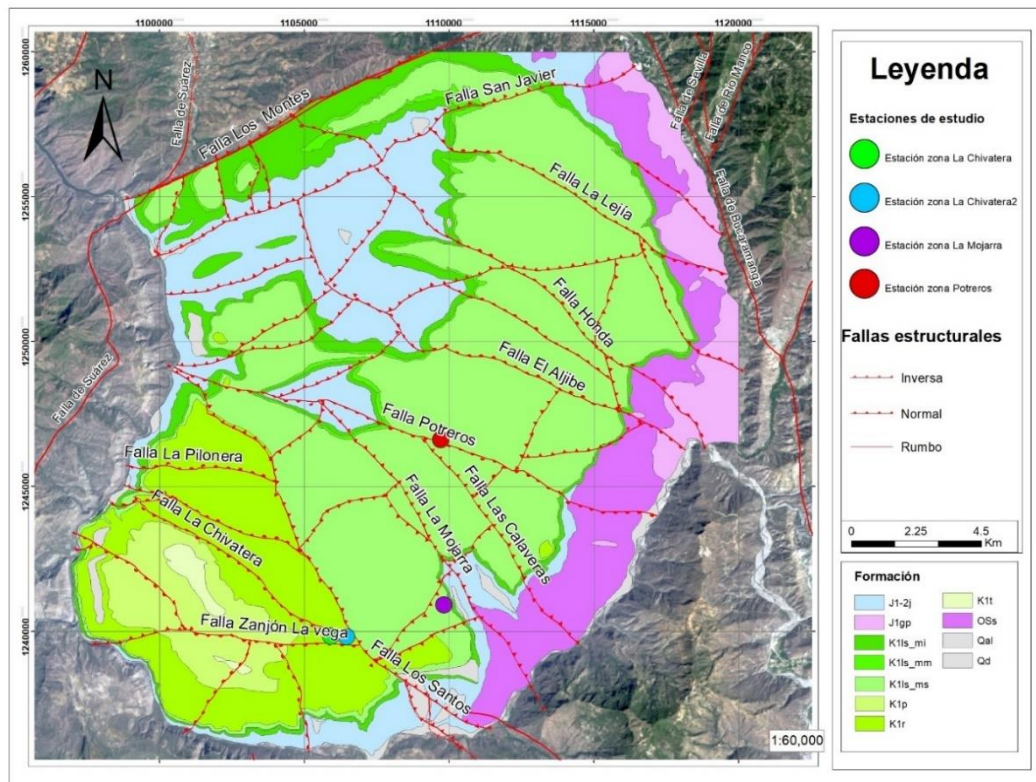
El basamento geológico de la Mesa de Los Santos se compone de rocas metamórficas de bajo a medio grado pertenecientes a la Formación Silgará (OSs) de edad Paleozoico y rocas ígneas intrusivas del Granito de Pescadero (J1gp) de edad Jurásico (Ward et al., 1973). Durante el Jurásico se depositaron sedimentos asociados a la Formación Jordán (J1-2j), seguidos por rocas del Cretácico de las Formaciones Los Santos (K1ls), Rosablanca (K1r), Paja (K1p) y Tablazo (K1t) (Proyecto Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007)). En la zona de estudio afloran las formaciones Los Santos y Rosablanca (Figura 2).

La Formación Los Santos aflora en la mayor parte de la Mesa con formas escarpadas y zonas de pendientes suaves a planas. Presenta un espesor de más de 200 m en el borde W de la Mesa y de 120 m en el borde E, infiriendo un adelgazamiento hacia el Macizo de Santander (Pinto et al., 2007). La unidad está constituida por tres miembros: inferior, medio y superior. El miembro inferior está compuesto de areniscas conglomeráticas arcillo arenosas, y hacia el tope de areniscas de grano fino a muy grueso con intercalaciones de areniscas conglomeráticas y conglomerados. El miembro medio presenta limolitas y arcillolitas intercaladas con areniscas de grano fino a muy fino. El miembro superior, de principal interés hidrogeológico, consta de cuarzoarenitas y sublitoarenitas en capas medias a gruesas (Hincapié y Veloza, 2009) este miembro se caracteriza por su alta densidad de fracturamiento hacia el sur de la Mesa de Los Santos (Moyano, 2010). La Formación Los Santos presenta contacto fallado al Sur con la Formación Rosablanca, producto de la Falla Los Santos (Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007)).

La Formación Rosablanca aflora al suroeste de la Mesa de Los Santos, y su espesor es de 300 m aproximadamente. Presenta capas de caliza y yeso con oolitos, ostrácodos y dolomías en la parte inferior; hacia la parte superior consta de areniscas y lodolitas calcáreas (Julivert, 1958). Adicionalmente, de base a tope presenta potentes capas de caliza con capas delgadas a medias de limolitas calcáreas, seguida de intercalaciones de capas medias de limolitas calcáreas con calizas; y capas medias a gruesas de arenisca de grano fino a medio ferruginosas con huellas fósiles, alternadas con capas delgadas a medias de calizas y capas delgadas a medias de arcillolitas calcáreas (Díaz et al. 2009).

Figura 2

Contexto Geológico de la zona de estudio en la Mesa de Los Santos y ubicación de los puntos de adquisición.



Nota: Adaptado de de García Arias (2022) y Proyecto Ingeominas-UIS, Pinto et al., 2007.

Estructuralmente, la Mesa de los Santos se encuentra limitada por las Falla del Suárez al oeste, de tipo inversa de alto ángulo que sigue el curso de los ríos Suarez y Sogamoso (Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007)). Al este la Mesa está limitada por la Falla Bucaramanga (Julivert, 1958), de rumbo sinistral y componente inverso (Velandia, 2017). La zona de estudio se encuentra afectada principalmente por la Falla Los Santos, ubicada al suroeste de la mesa, con una dirección NW, y que se comporta también como una falla rumbo sinistral con componente inverso, con una extensión aproximada de 14 km y un trazo subparalelo a la Falla Bucaramanga (Tarazona et al., 2021; García Arias, 2022). Las fallas locales se presentan con dos orientaciones preferenciales NW-SE o NE-SW, denominadas sistemas longitudinales o transversales por Pinto et al. (2007); además presentan otra tendencia de W-E en un número menor de fallas. Debido a que la mayoría de las fallas se encuentran orientadas de forma oblicua al tensor regional W-E, presentan un componente de rumbo (Velandia et al., 2020) principalmente las fallas longitudinales con orientación NW, las cuales favorecen el flujo de agua (Velandia, 2010).

4.2 Marco Teórico

4.2.1 Métodos geoelectricos

Los métodos de prospección geoelectrica en corriente continua se fundamentan en la teoría general del campo eléctrico estacionario y se basan en detectar los efectos superficiales que produce el flujo de una corriente eléctrica, natural o inducida por el subsuelo (Toledo Baca, 2015). La electricidad que pasa a través de un material cualquiera puede ser entendida a través de la Ley de Ohm, la cual establece que la diferencia de potencial (ΔV) medida en dos puntos entre los cuales

circula una corriente (I), es proporcional a la resistencia (R) que opone dicho medio al paso de electricidad:

$$\Delta V = I * R \quad (1)$$

La resistencia R está definida por la resistividad (ρ), que es una característica propia del medio, y por la longitud (L) de un cilindro imaginario (trazado con relación a donde fluya la corriente eléctrica) sobre su área transversal (A_t), de forma tal que:

$$R = \rho * (L/A_t) \quad (2)$$

Así pues, la relación entre la diferencia de potencial o voltaje y la resistividad para un material cualquiera está definida como:

$$\Delta V = I * \rho * (L/A_t) \quad (3)$$

Para las rocas, la resistividad eléctrica tiene unidades de Ohmios metro ($\Omega \cdot m$) y está influenciada por propiedades intrínsecas como la porosidad, permeabilidad, contenido de iones disueltos y tipo de fluido presente. El factor condicionante para los contrastes de resistividades eléctricas dentro de una misma roca en la mayoría de los casos es el fluido de poro (Telford et al., 1990). Así pues, se obtienen anomalías eléctricas que, para el caso de fracturas, se dan gracias a la diferencia de resistividad con el entorno circundante debido a presencia de fluidos, mayor porosidad y contenido de iones disueltos.

4.2.1.1 Sondeos Eléctricos Verticales. El método de exploración geofísica de Sondeos Eléctricos Verticales inyecta una corriente de amperaje conocido mediante dos electrodos corriente A y B, que generan líneas teóricas equipotenciales, y la medición de la diferencia de potencial a partir de otros dos electrodos de potencial M y N. Con la diferencia de potencial medida en dos puntos, se logra calcular la resistencia asociada a un campo equipotencial, a su vez ligado por la posición de los electrodos. La resistividad eléctrica medida para las rocas en superficie se denomina resistividad eléctrica aparente, debido a que es calculada con una constante geométrica preestablecida para cada arreglo según la posición de los cuatro electrodos (Telford et al., 1990).

$$\rho_a = \Delta V / (I * k) \quad (4)$$

Donde k para cualquier montaje se define como:

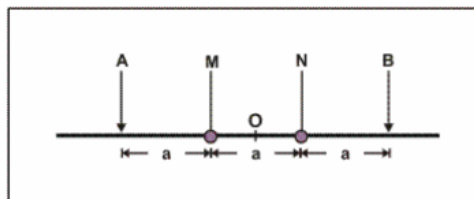
$$k = \frac{2\pi}{\frac{1}{r_{AM}} - \frac{1}{r_{BM}} - \frac{1}{r_{AN}} + \frac{1}{r_{BN}}} \quad (5)$$

La constante electródica, denotada como k , depende de la configuración de los electrodos. Diversos tipos de arreglos o configuraciones electródicas han sido concebidos, cada uno con un valor de k distinto (Auge, 2008).

- Arreglo Wenner: Los electrodos se disponen equidistantes sobre una línea en el orden AMNB (Figura 3).

Figura 3

Disposición de electrodos para el arreglo Wenner.

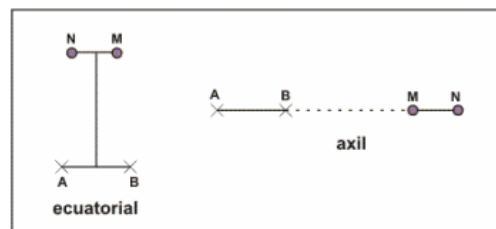


Nota: Tomado de Auge (2008)

- Arreglos dipolares: En esta disposición, tanto los puntos AB como MN se encuentran a una distancia mucho más cercana entre sí. En la práctica, las configuraciones más comunes son la ecuatorial y la axial. Los dispositivos dipolares (DD) demandan niveles de corriente significativamente más altos en comparación con los lineales (SEV), por lo que su uso es menos frecuente. Generalmente, se emplean únicamente en investigaciones geoelectricas profundas (Figura 4).

Figura 4

Disposición de electrodos para los arreglos dipolares.



Nota: Tomado de Auge (2008)

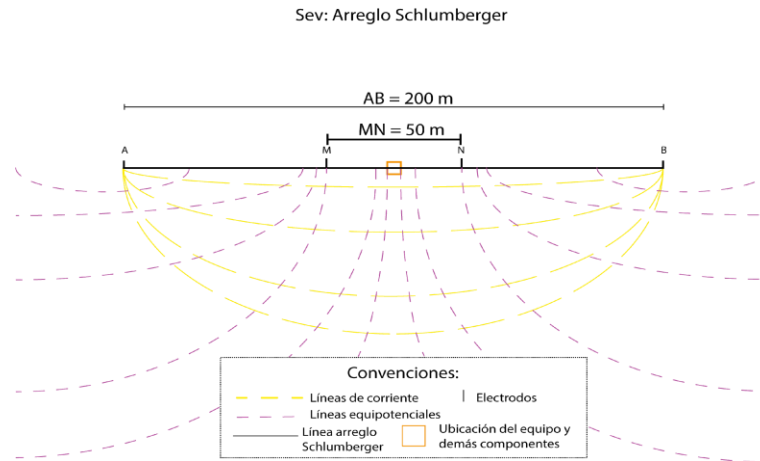
- Arreglo Schlumberger: Se trata de un dispositivo de simetría que debe satisfacer la condición de que la separación entre los puntos A y B debe ser igual o superior a cinco veces la distancia entre M y N. para el caso de estudio planteado, se tiene 4 veces la distancia entre el equipo y el electrodo A contra la longitud entre el centro y M (Figura 5).

La configuración geométrica del arreglo Schlumberger es menos susceptible a variaciones laterales del medio físico, irregularidades del terreno y ruidos producto de fuentes artificiales (Braga, 2006); y su factor geométrico cambia respecto a la constante general:

$$k = \frac{\pi \left(\frac{1}{AM} * \frac{1}{AN} \right)}{MN} \quad (6)$$

Figura 5

Esquema representativo de un sondeo eléctrico vertical en arreglo Schlumberger.



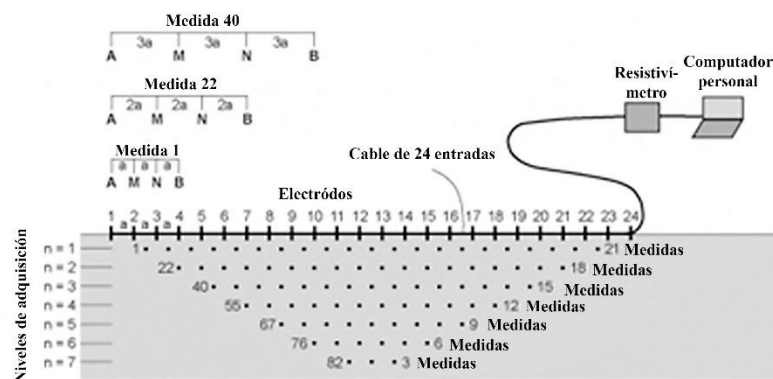
Se encuentran representadas teóricamente las líneas de corriente (entre los electrodos de corriente) y las líneas equipotenciales producto del campo eléctrico que son medidas por los electrodos M y N.

4.2.1.2 Tomografías de Resistividad Eléctrica. El método geofísico de Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) se basa en la obtención de modelos 2D o 3D del subsuelo. Su principio físico es el mismo que un el SEV (Kearey et al., 2002; Lowrie, 2007). Sin embargo, a diferencia de los SEV, las tomografías cuentan con un mayor número de electrodos, distribuidos a espaciamiento equidistante (Figura 6). La distancia de estos condicionará la resolución y la profundidad máxima a alcanzar, de manera que, a menor separación, mayor resolución, pero menor profundidad. De esta forma se irá obteniendo la variación de resistividad del subsuelo tanto en profundidad como lateralmente (Berlanga, 2013)

Este método se lleva a cabo a lo largo de líneas en una dirección determinada, donde se introduce una corriente eléctrica y se analiza la respuesta del subsuelo mediante el dispositivo receptor. El resultado de este proceso son datos de resistividades aparentes (Figura 6). Se caracteriza por ser una técnica multielectródica cuyo arreglo depende de los objetivos de estudio (Ontiveiros, 2003).

Figura 6

Adquisición de Tomografías de Resistividad Eléctrica.



Nota: Tomado de Scapozza y Laigre (2014)

A continuación, se muestran las matrices más utilizadas para los estudios de resistividad (Figura 7). La elección de la mejor matriz depende del tipo de estructura que se vaya a cartografiar,

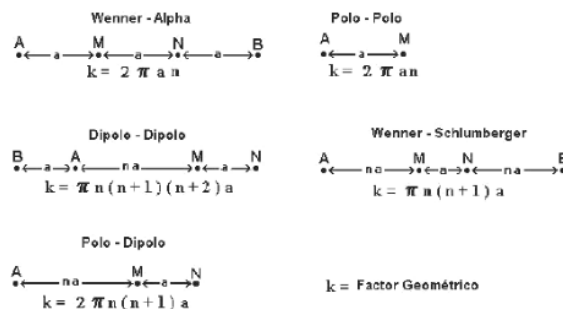
la sensibilidad del resistivímetro y el nivel de ruido a fondo. Entre las características que deben tenerse en cuenta se encuentran: la sensibilidad del conjunto a los cambios verticales y horizontales de la resistividad del subsuelo, la profundidad de investigación, la cobertura horizontal de los datos y la intensidad de señal (Loke,1999).

La tabla 1 muestra la profundidad media de investigación de las distintas matrices (Z_e). La mediana de la profundidad de investigación da una idea de la profundidad a la que podemos llegar con una determinada matriz. Para determinar la profundidad máxima alcanzada, se multiplica la separación máxima entre los electrodos "a" o la longitud máxima del conjunto "L" por el factor de profundidad adecuado para el arreglo. En el caso de los conjuntos dipolo-dipolo, polo-dipolo y Wenner-Schlumberger, también hay que tener en cuenta otro factor "n" que corresponde al tipo de arreglo (Figura 8).

Con las mediciones adquiridas se construye una sección en dos dimensiones (2D), que muestra una primera aproximación de los cambios del subsuelo. Posteriormente se aplicará un algoritmo de inversión para obtener la distribución real de resistividades o imagen eléctrica. Esta imagen permitirá obtener información de las características físicas del subsuelo (Berlanga, 2013).

Figura 7

Matrices utilizadas según el arreglo de electrodos.



Nota: Tomado de Loke,1999.

Figura 8

Profundidad media de investigación (Z_e) para cada arreglo. L corresponde a la longitud del arreglo.

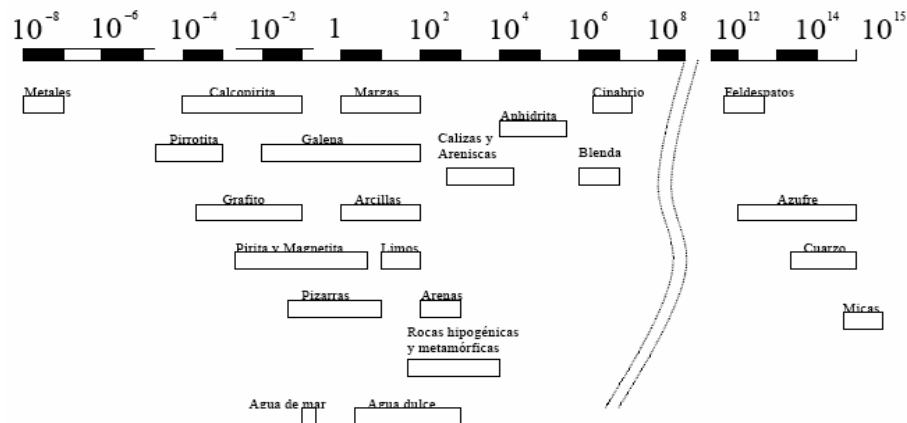
Array type		z_e/a	z_e/L
Wenner Alpha		0.519	0.173
Wenner Beta		0.416	0.139
Wenner Gamma		0.594	0.198
Dipole-dipole	n = 1	0.416	0.139
	n = 2	0.697	0.174
	n = 3	0.962	0.192
	n = 4	1.220	0.203
	n = 5	1.476	0.211
	n = 6	1.730	0.216
Equatorial dipole-dipole	n = 1	0.451	0.319
	n = 2	0.809	0.362
	n = 3	1.180	0.373
	n = 4	1.556	0.377
Wenner - Schlumberger	n = 1	0.52	0.173
	n = 2	0.93	0.186
	n = 3	1.32	0.189
	n = 4	1.71	0.190
	n = 5	2.09	0.190
	n = 6	2.48	0.190
Pole-dipole	n = 1	0.52	
	n = 2	0.93	
	n = 3	1.32	
	n = 4	1.71	
	n = 5	2.09	
	n = 6	2.48	
Pole-Pole		0.867	

Nota: Tomado de Loke, 1999.

4.2.1.3 Resistividad de las rocas. La resistividad puede variar en función de las propiedades del suelo, incluyendo composición química (por ejemplo, contenido de sal soluble en agua), la naturaleza de constituyentes sólidos (como la distribución de tamaño de partícula o la mineralogía), distribución del tamaño de poro, contenido de agua y temperatura (Gasulla Forner, 1999). Se han establecido diferentes rangos de valores de resistividad para distintos materiales del subsuelo (Orellana, 1982) (Figura 9 y 10). Es importante tener en cuenta que la resistividad de los materiales del subsuelo podría estar por encima o por debajo de los límites establecidos en las tablas de referencia, debido a que la geología es influida por diferentes factores físicos y químicos. Por consiguiente, la interpretación de métodos resistivos debe apoyarse principalmente en criterios geológicos específicos usando como base los rangos de resistividad teóricos (Tablas 1 y 2).

Figura 9

Rangos de resistividades eléctricas para tipos de roca.



Nota: Tomado de Orellana, (1982)

Figura 10

Rangos de resistividad (en $\Omega \cdot m$) para diferentes minerales y tipos de roca.



Nota: Tomado de Auge, (2008)

Tabla 1

Rangos de resistividad (en $\Omega \cdot m$) para tipos de rocas presentes en la Mesa de Los Santos.

Resistividad (en $\Omega \cdot m$)	Interpretación
1 a 5	Arcillas, margas, arcillolitas y limolitas saturadas, suelos residuales saturados
5 a 12	
12 a 30	
30 a 80	Arcillolitas y limolitas moderadamente saturadas. Areniscas altamente fracturadas saturadas.
80 a 200	Areniscas fracturadas con media saturación de agua. Calizas fracturadas saturadas.
200 a 490	Areniscas fracturadas con media a moderada saturación de agua. Calizas moderadamente saturadas.
490 a 1220	Areniscas moderadamente fracturadas y /o con moderada o baja saturación de agua. Calizas con baja saturación y fracturamiento
1220 a 3050	Areniscas pobremente fracturadas con baja saturación de agua. Calizas masivas
3050 a 7630	Areniscas masivas secas a pobremente saturadas
> 7630	Rocas masivas secas.

Nota: Tomado de: Hincapié y Veloza (2009).

Tabla 2

Rangos de resistividades para las Formaciones Rosablanca y Los Santos para plugs mojados y secos.

Formación	Litología	Rho Dry ($\Omega \cdot m$)	Rho Wet ($\Omega \cdot m$)
Los Santos (Superior)	Arenisca	57.67 - 4680623.90	49.64 - 5211.36
Los Santos (Medio)	Lodolita	69.02 - 14123.72	43.57 - 944.58
Los Santos (Inferior)	Conglomerado	12213.72 - 320030.27	624.16 - 1958.78
Los Santos (Inferior)	Arenisca	1773.65 - 1135279.79	163.71 - 1565.94
Rosablanca	Lodo calcáreo	149.95 - 122772.72	26.88 - 17385.51
Rosablanca	Caliza	2543.99 - 256244.33	87.68 - 37015.69
Rosablanca	Biomicrota	384.18 - 1096692.68	143.92 - 13122.12
Rosablanca	Areniscas	589378.17 - 2584162.39	411.71-5522.10
Rosablanca	Areniscas calcáreas	1664.79 - 440459.41	154.27 - 2956.38

Nota: Tomado de García Arias (2022).

4.2.1.4 Isotropía y anisotropía en física de rocas. Para definir el comportamiento de un material respecto a las orientaciones en el espacio, se considera anisótropo cuando se presenta una variación del valor medido de una propiedad determinada con la dirección en que se mide, lo cual puede producirse en todas las escalas (Taylor y Fleming, 1988). En cambio, un material es isótropo, cuando no presenta una variación en la dirección del valor medido de una propiedad determinada. Propiedades como la saturación de fluidos, homogeneidad, porosidad y resistividad, estarán influenciadas por la naturaleza de la roca (Milsom, 2003; Lowrie, 2007; Suarez-Burgoa, 2015) y permitirán que características como fracturas y planos de estratificación puedan generar anisotropía (Watson y Barker, 1999).

Las medidas de resistividad aparente se representan en coordenadas polares con respecto al azimut en torno a un punto central fijo. Cuando los diagramas resultan circulares, esto sugiere que no hay anisotropía. Esto puede deberse a la ausencia de fracturas en la roca subterránea o al hecho de que el volumen de roca examinado es tan pequeño que cualquier anisotropía presente no

es detectable. Por otro lado, si los diagramas son elípticos, esto indica claramente la presencia de anisotropía y, por ende, se debe considerar la existencia de alguna característica de anisotropía geológica en la formación (Watson y Barker, 1999).

4.2.1.5 Paradoja de la anisotropía. Cuando se realizan mediciones de la resistividad eléctrica en Sondeos Eléctricos Verticales de arreglo colineal o SEV, se produce lo que se conoce como la “paradoja anisotrópica”, la cual se refiere al hecho de que el eje mayor de la elipse en el gráfico de resistividad indica el rumbo principal de fracturamiento, mientras que el eje menor de la elipse indica la resistividad asociada a este (Watson y Barker, 1999). Por ejemplo, si hay fracturas verticales en la formación y se realiza una medición en la misma dirección que el rumbo de estas fracturas (paralela), el valor de la resistividad aparente será igual a la resistividad media de la formación. Si en cambio, la medición se realiza en una dirección perpendicular a las fracturas, la resistividad aparente será igual a la resistividad longitudinal o paralela al rumbo de las fracturas (Figura 11) (Keller and Frischknecht, 1966 en Udosen George, 2018; Watson y Barker, 1999).

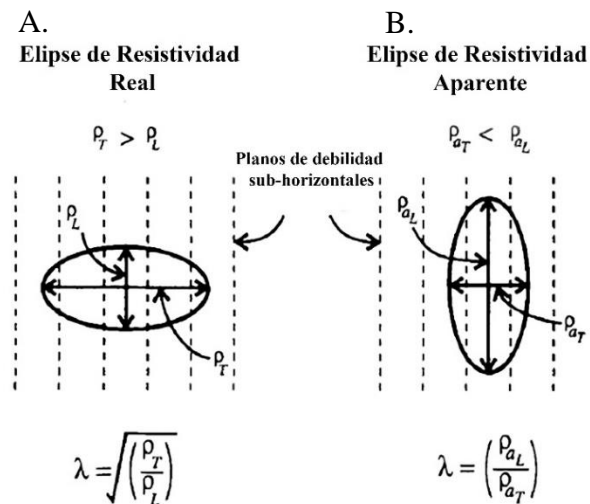
El coeficiente de anisotropía, presentado por Watson y Barker (1999), es un valor adimensional que representa la anisotropía de un medio, asumiendo que este es homogéneo. Se tiene en cuenta el eje menor y mayor de las resistividades aparentes medidas de forma azimutal. (Figura 11) $\lambda = \rho_L/\rho_T$, siendo ρ_L la resistividad longitudinal o el eje mayor de la resistividad aparente y ρ_T la resistividad transversal o el eje menor de la resistividad aparente.

En la Figura 11, se observa en A, la resistividad “real” de los planos según el arreglo se dispone de forma perpendicular a ellos, es decir, la resistividad longitudinal (ρ_L) será la resistividad aparente. En B, cuando el sondeo es paralelo a la fractura la resistividad aparente será igual al valor medio de la resistividad de la formación. La resistividad aparente es la elipse que se

obtuvo, ya que se consideran fracturas verticales y por tanto $\rho_L > \rho_T$, caso contrario a como ocurre en la resistividad real donde $\rho_T > \rho_L$.

Figura 11

Elipses de resistividad eléctrica según planos de debilidad orientados N-S.



Nota: Adaptado de Watson y Barker (1999).

4.2.1.6 Fracturamiento. Una fractura es una discontinuidad planar o subplanar que se desarrolla en la roca cuando su límite de elasticidad es superado como consecuencia de la aplicación de un esfuerzo (Fossen, 2016), generando una ruptura. La deformación que sufre un cuerpo de roca puede clasificarse en dos categorías: elástica y plástica. La deformación elástica es proporcional al esfuerzo aplicado y la roca recupera su forma original cuando se elimina el esfuerzo. Sin embargo, si se supera el valor crítico de un esfuerzo específico para cada material, denominado límite de elasticidad, la deformación se vuelve permanente. A medida que se incrementa la magnitud de esfuerzo, la roca finalmente llega a un punto de ruptura (Billings, 1972).

Cuando hay un aumento continuo en el esfuerzo de la roca, se desarrollan una o más fracturas y la roca puede ceder a obtener un comportamiento frágil. Un material frágil es aquel

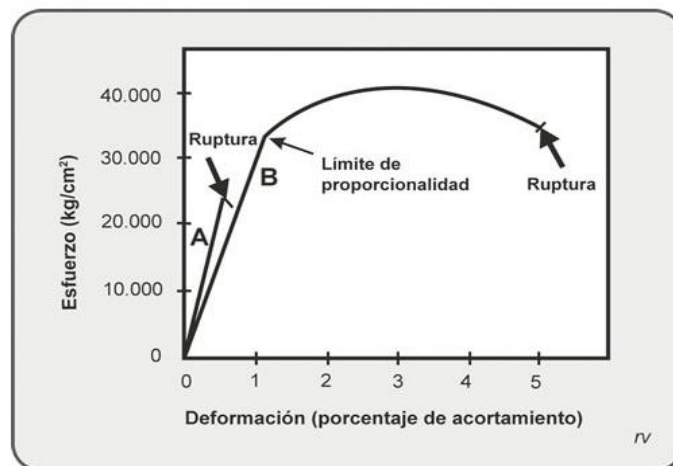
que sufre ruptura antes de que tenga lugar ninguna deformación plástica. Cuanto menores son la temperatura y la presión hidrostática y mayor la velocidad de deformación, lo más probables es que la roca se comporte de manera frágil (Billings, 1972).

En el diagrama de esfuerzo-deformación (Figura 12), el límite de proporcionalidad o elasticidad es el punto en el cual la curva A se aparta de una línea recta. La curva B representa un material frágil.

El término resistencia surge aquí, denominado también resistencia a la ruptura, y se puede definir como la fuerza por unidad de área necesaria para causar la ruptura, a la temperatura ambiente y la presión de la atmósfera en experimentos de corta duración (León, 1994).

Figura 12

Diagrama de esfuerzo y deformación en ensayos de rocas sometidas a compresión.



Nota: A. Material frágil. B. Material Dúctil. Tomado de: Billings, (1972).

Las fracturas incluyen fallas, en estas los dos lados son desplazados entre sí, se denominan grietas cuando los dos lados no muestran desplazamiento diferencial, grietas de cicatriz o sello, donde los fluidos que pasan a través de la roca han unido parcial o completamente los lados adyacentes por la deposición de material cristalino, y filones, donde un espesor considerable ($E > 1\text{mm}$) de material rellano ocupa la región entre las paredes (León, 1994). La información

obtenida de diferentes familias de fracturas ayuda a definir la historia de deformación que ha ocurrido en la zona lo cual es sumamente importante para el análisis tectónico regional (Ramsay y Huber., 1987).

5 Metodología

La ejecución del trabajo de investigación se realizó de manera general en tres etapas. Se inició con la Etapa preliminar o revisión bibliográfica, en la cual se compilo la información geológica y geofísica de referencia, junto con establecer los métodos geofísicos a implementar considerando trabajos previos. La etapa de campo o adquisición de información se realizó en proximidades a fallas con orientación NW. El procesamiento de datos, interpretación y análisis de los resultad fue realizado en la Etapa de oficina, en la cual también se realizó la redacción del documento final).

5.1 Etapa preliminar

Se inició con un análisis de los conceptos teóricos pertinente a partir de manuales, trabajos de grado, artículos, mapas, revistas y otros documentos académicos para obtener un diagnóstico geológico, hidrogeológico y geofísico de la zona. Durante este proceso se establecieron los parámetros de adquisición preliminares, métodos geofísicos a implementar (Tomografía de resistividad Eléctrica y Sondeos Eléctricos Verticales Azimutales Colineales) y potenciales áreas de estudio. El tipo de arreglo para los métodos geoelectricos fue seleccionado considerando los estudios previos realizados en la Mesa de los Santos.

Culminada la revisión bibliográfica se procedió con la planeación de la Etapa de campo, esto incluyó la realización de una salida pre-campo o de reconocimiento para verificar las

condiciones en las potenciales áreas de estudio. Entre los criterios de evaluación se consideró que fueran accesibles, que no presentaran interferencias electromagnéticas que generaran ruido y distorsionaran las mediciones, que se fuera una potencial zona de riesgo o accidentes, áreas donde fuera posible el adquirir información geológica relevante para el trabajo de investigación (evidencia de fracturamiento), que la topografía y geomorfología permitan realizar la adquisición.

5.2 Etapa de campo

5.2.1 Adquisición SEV azimutales

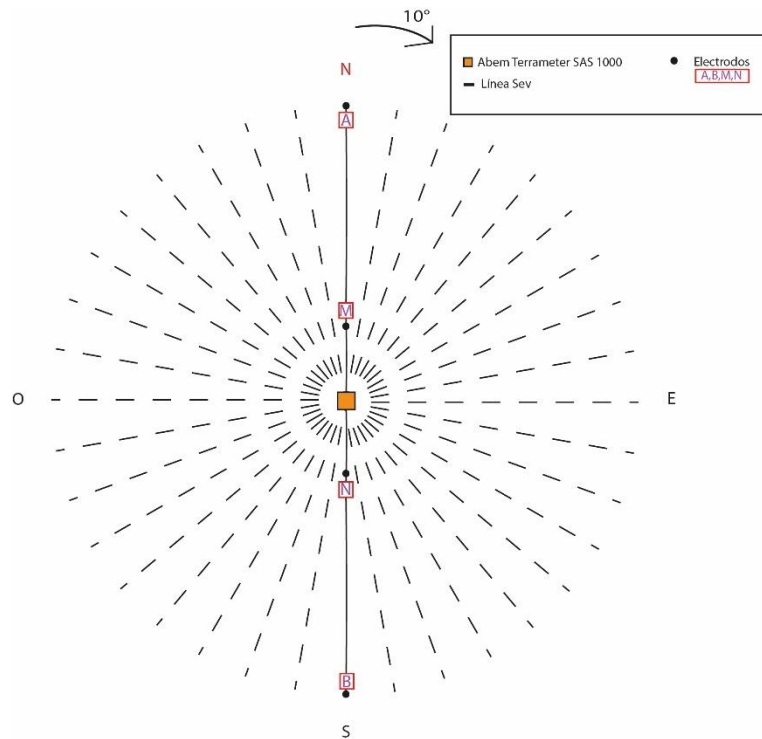
La adquisición se realizó con el equipo Terrameter SAS 1000 y requirió los siguientes accesorios: consola de mando Terrameter SAS 1000, 5 electrodos de acero inoxidable, 4 carretes, 4 decámetros, 4 caimanes, brújula, GPS, batería 12 V, cable de poder, cargador de la batería, 2 cables positivos y 2 cables negativos. El despliegue geofísico constó de:

- Se ubicó el Terrameter SAS 1000 en la mitad del arreglo o punto de interés, en este punto se situó uno de los electrodos como referencia para el centro y su localización con GPS fue tomada.
- Desde el punto central se procedió a extender las cintas métricas en dirección N-S, para la posterior extensión de los cables de potencial y de corriente considerando los parámetros de adquisición.
- Extendidos los cables de potencial y corriente, se localizaron y conectaron los respectivos electrodos de potencial (M y N) y de corriente (A y B).
- Con el arreglo armado el operario procedió a conectar la consola a la fuente de poder y encenderla. Con la consola encendida se procede a establecer en el equipo

los parámetros adicionales de adquisición y conexión de los cables de potencial y corriente a la misma.

- Previo a iniciar la medición el operario da aviso para informar a los demás y evitar tocar los electrodos durante la medición. Identificado que no existen peligros, se procede a realizar la medición.
- Durante y finalizada la medición el operario está atento a si se evidencia valores atípicos, problemas en la medición, error por fuera del límite establecido o cualquier otro inconveniente que requiera nuevamente de una medición. Este inconveniente y demás información relevante fueron anotadas en la bitácora de campo.
- Finalizada la medición, se procedió a la desconexión de los caimanes, recoger los cables para proceder con la rotación de 10° respecto al norte en sentido horario (Figura 13). Realizada la rotación, se procedió nuevamente a la medición. Este proceso iterativo se realizó hasta una rotación total de 170° .

Se eligió de manera arbitraria la rotación antihoraria y el ángulo de rotación de 10° fue seleccionado bajo la consideración de tener una mayor cantidad de datos para lograr un mayor grado de detalle de la anisotropía del subsuelo. El criterio para la selección del arreglo a usar en el SEV fue el trabajo de Moyano (2010), al ser este uno de los que ha cubierto gran parte de la Mesa de Los Santos y para una posterior comparación de los valores de resistividad aparente.

Figura 13*Esquema ilustrativo de planta para SEVs azimutales*

El arreglo colineal Schlumberger se rota cada 10° respecto al norte en sentido horario.

5.2.2 Adquisición TRE

La adquisición se realizó con el equipo ZZ Universal 96 y requirió los siguientes accesorios: consola de mando ZZ Universal 96, 2 cables multielectrónicos de 32 salidas o *takeouts* (permitiendo adquisiciones de hasta 64 electrodos) con espaciado de 5 metros, 65 electrodos (1 para el polo a tierra), 2 porras, 4 decámetros, brújula, GPS, cable de poder, batería 12 V y cargador de la batería.

En cada lugar de estudio se realizó la adquisición de 2 TRE ortogonales entre ellas. Como criterio en la orientación de los perfiles geoelectricos, se consideró el rumbo de 290° (Figura 14), el cual García Arias, (2022) identificó como la orientación del máximo esfuerzo horizontal en la Mesa de Los Santos, este rumbo es casi paralelo a las fallas NW. El criterio de selección del arreglo

para las TRE fue mantener el mismo que el de los SEV, durante la revisión bibliográfica se identificó que es este arreglo es uno de los más usado para la exploración de aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos. El despliegue geofísico se desarrolló de la siguiente manera:

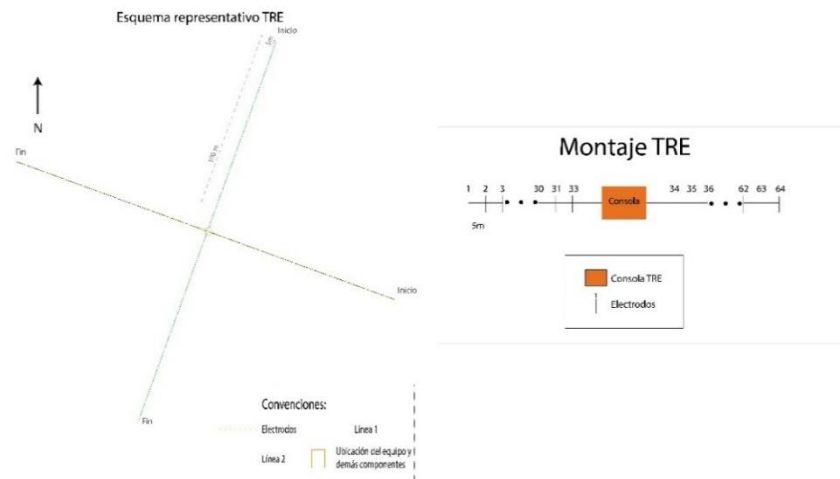
- Se ubicó la consola de mando ZZ Universal 96 en el centro o punto de intersección de las dos TRE. Desde este punto se procedió a medir el respectivo rumbo de interés y se procedió a extender la cinta métrica.
- Con las cintas métricas extendidas se procedió a extender los cables multielectródicos, se ubican los electrodos a lo largo del perfil y estos son conectados a su receptivo *take-out*. Se registraron con el GPS las coordenadas de cada uno de los electrodos.
- Realizada la conexión cable-electrodo, se procedió a conectar los cables a la consola, junto con la fuente de poder, electrodo polo a tierra y conexión USC con el Computador.
- Finalizado el montaje, se procedió a encender el computador y la consola. Una vez iniciado el software de adquisición, el operario a establecer parámetros adicionales de adquisición.
- Previo a iniciar la medición el operario da aviso para informar a los demás y evitar tocar los electrodos durante la medición. Identificado que no existen peligros, se procede a iniciar con las mediciones.
- Durante todo el proceso de medición, el operario debió estar atento a la evidencia de valores atípicos, problemas en la medición o cualquier otro inconveniente que requiera parar la medición para verificación y posterior reanudación del trabajo.

Estos inconvenientes y demás información relevante fueron anotadas en la bitácora de campo.

- Finalizada la medición, se procedió al desmontaje de todo el perfil geoelectrico, manteniendo solo fijo la conexión Consola-Computador. Se procedió a realizar la rotación de 90° respectiva, y se realizó todo el montaje nuevamente para la adquisición de la segunda TRE (Figura 14).

Figura 14

Esquema representativo de adquisición de TREs en planta y corte.



5.2.3 Planos de fracturas

Durante las respectivas adquisiciones geofísicas, se procedió con la medición de datos estructurales correspondientes a planos de estratificación y fracturamiento en afloramientos cercanos a las zonas de adquisición. Estos datos geológicos son los más relevantes en el análisis de las variaciones de la resistividad, al localizarse próximos de las zonas de estudios. Los planos de fracturas del compilado obtenido de los trabajos de: Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007), Tarazona y Vargas (2021) y García Arias (2022).

5.3 Etapa de oficina

El análisis de los datos y flujo de procesamiento de la información se generaliza a continuación para cada uno de los métodos. Se ejemplifica el proceso solo para una de las estaciones ya que este procedimiento se replicó en todas.

5.3.1 Sondeos Eléctricos Verticales (SEVs)

Se realizó una revisión estadística de los datos en cada una de las estaciones verificando que no hubiera ningún valor anómalo (Figura 15). A los valores de resistividad aparente no se les realizó ningún proceso de inversión. Para comparar los valores de resistividad aparentes medidos con los de Moyano (2010) se realizó un gráfico de dispersión de los valores de resistividad aparentes junto con histogramas del fracturamiento registrado y compilado para cada estación (Figura 16). Los datos de fracturamiento se consideraron en 3 grupos, datos medidos en el trabajo actual de investigación, y planos de fracturamiento en un radio menor a 1 y 2 km.

Figura 15

Revisión estadística de datos adquiridos.

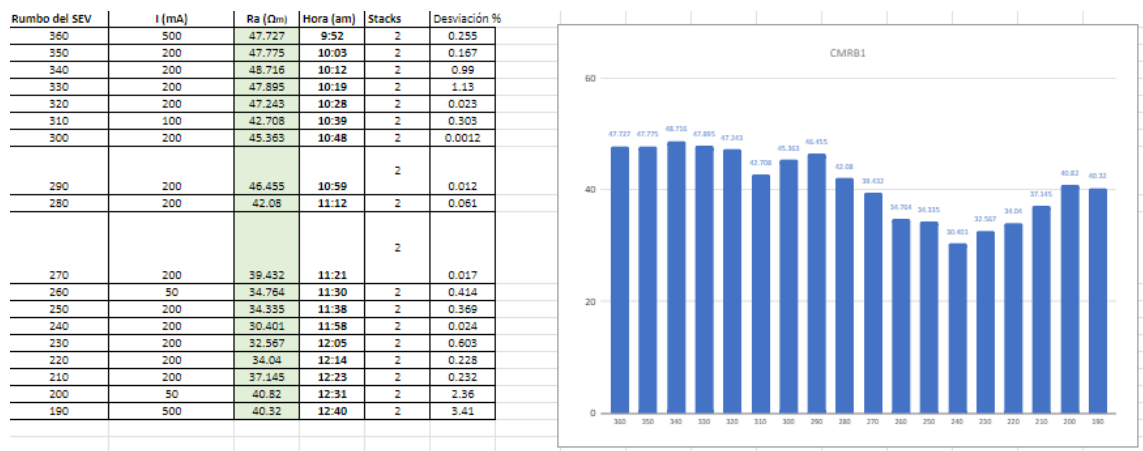
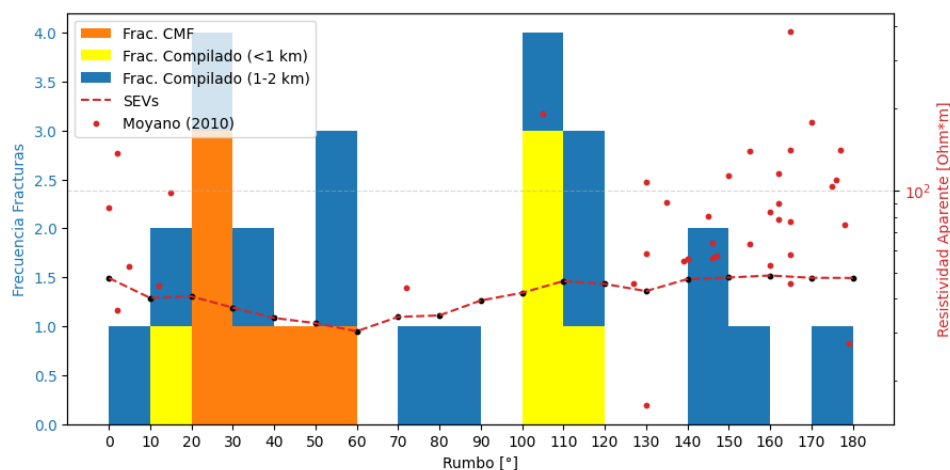


Figura 16

Gráfico de dispersión de resistividades aparentes superpuestos con histogramas de fracturas y contrastados con datos SEVs en los puntos de estudio.



Los puntos rojos representan los datos de SEVs adquiridos por Moyano (2010), los histogramas de fracturamiento del compilado están filtrados por radio < 1km (amarillo), 1-2 km (azul) y datos propios medidos en afloramiento (naranja); la línea roja punteada es referente a la adquisición de SEV azimutal hecha en la estación.

Tabla 3

Valores de coeficiente de anisotropía (λ).

SEV	Coefficiente de anisotropía (λ)	Coefficiente de anisotropía (λ prom)
La Mojarra	3.065	-
Potrerros	1.381	1.155
La Chivatera 1	3.182	1.126
La Chivatera 2	1.602	1.933

Datos calculados a partir de los valores promedio de las tendencias de resistividad menores, mayores además de usar los datos puntuales del valor máximo y mínimo para cada estación.

También se realizó el cálculo del coeficiente de anisotropía (Watson y Barker, 1999) teniendo en cuenta los valores promedio de las tendencias de resistividades bajas y altas de las estaciones Potrero, La Chivatera 1 y La Chivatera 2. Adicionalmente, se realizó el cálculo con los valores mayores y menores puntuales de cada estación (La Mojarra, Potreros, La Chivatera 1 y La Chivatera 2). (Tabla 3)

5.3.2 Inversión de Tomografías de Resistividad Eléctrica

Previo al proceso de inversión se realizó un análisis de la distribución estadística de los valores de resistividad aparente (Figura 17), para identificar posibles valores atípicos. El criterio de valor atípico en los datos de resistividad aparente corresponde con las recomendaciones del manual del Software Res2DInv (Loke, 1999). también se realizó un gráfico de dispersión correspondiente a la pseudoprofundidad de investigación (Figura 18) para evaluar la ausencia de datos y la posible localización de los datos atípicos identificados previamente.

Figura 17

Histogramas estadísticos de la distribución de los valores de resistividad aparente.

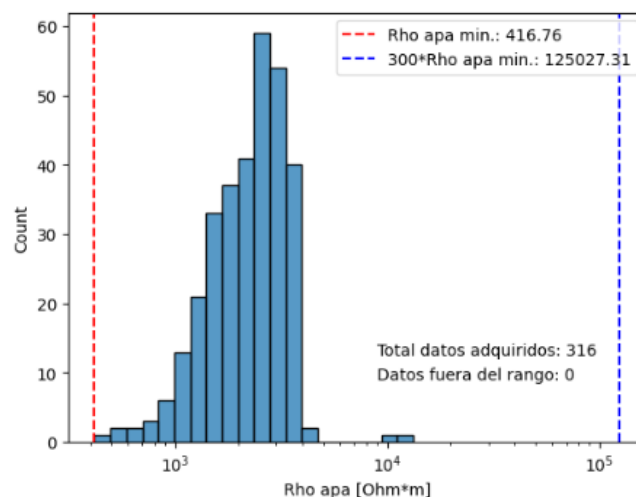
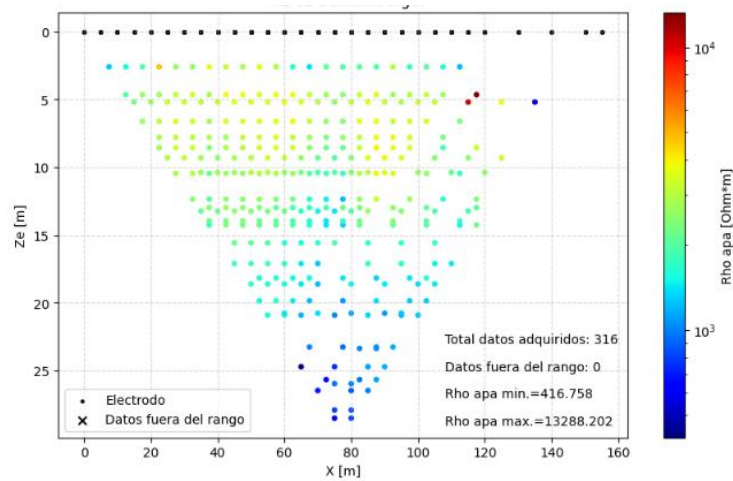


Figura 18

Gráficos de pseudo profundidad para conocer la distribución de los datos de resistividad real y conocer los puntos con datos más confiables.



Los valores de las elevaciones o perfil topográfico de las TRE fueron obtenidos de la información del GPS. Estos valores topográficos fueron incluidos en los valores de resistividad precios al proceso de inversión. Finalizada la preparación de los datos, se procedió con el proceso de inversión en el software Res2DInv y generar un modelo de resistividad 2D del subsuelo a partir de los datos compilados.

- Se realizó una primera inversión con el fin de revisar el comportamiento de las resistividades aparentes que se obtuvieron en la adquisición y de ser requerido hacer ajustes al modelo discretizado y parámetros de inversión (Figura 19).
- Posterior a la primera inversión se identificaron los valores anómalos para cada nivel de profundidad (Figura 20). Estos puntos pueden asociarse a ruido en la medición, a la geometría o algún error al momento de realizar el arreglo.

- Se ajustan los parámetros inversión (Tabla 4) y la discretización del modelo (Figura 21) del modelo discretizado o el de cuadrícula) considerando los objetivos de estudio, considerando la calidad de los datos. Se procede a hacer una segunda inversión de los datos.

Figura 19

Figura ejemplo de resultado de la inversión 0.

```

Schlumberger array
Electrode spacing is 2.500.
Wenner-Schlumberger array
No user defined model depths.
Total number of datum points is 287.
Position of mid-point of array is given.
287 157.500 15.000 6.000 32.0
Electrode locations are 60.00 and 70.00.
Minimum and maximum electrode locations are 60.00 and 255.00.
Minimum and maximum electrode locations are 60.0 and 255.0.
Line length is 195.0.
Minimum electrode spacing is 2.5.
Sorting data points.
Number of data levels is 42.
Number of electrodes is 79.
Reading inversion results.
The model has 16 layers and 764 blocks.
Iteration 1 : RMS error 59.98.
Iteration 2 : Abs. error 30.11.
Iteration 3 : Abs. error 23.73.
Iteration 4 : Abs. error 19.97.
Iteration 5 : Abs. error 18.19.
Iteration 6 : Abs. error 17.59.
Iteration 7 : Abs. error 17.16.
Iteration 8 : Abs. error 16.84.
Iteration 9 : Abs. error 16.70.
Reference resistivity used is 33.108
Topographical data present in inversion file.
Damped topography was incorporated into inversion model.
Blocks sensitivity information present.
Average sensitivity is 0.901.
Inversion constraints information present.

```

Figura 20

Figura ejemplo, identificación y eliminación de Bad Data Points.

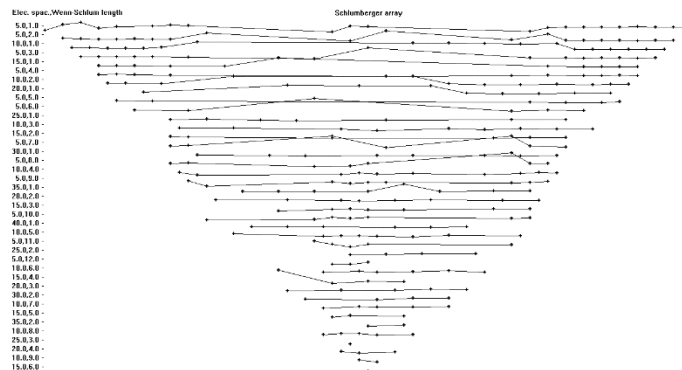
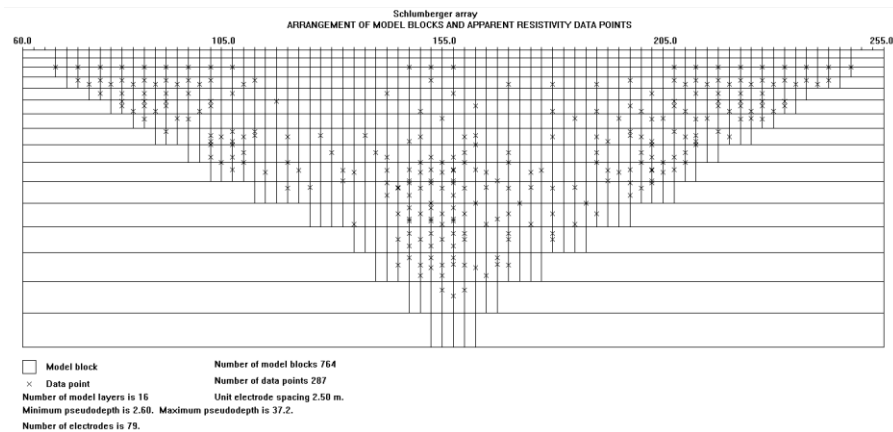


Tabla 4*Parámetros de inversión*

Parámetro	Valor
Número de iteraciones	10
Insertar modelo refinado	Si
Topografía	Si
Factor de escala de visualización	1

Figura 21*Modelo discretizado o de cuadrícula.*

- Los resultados son una pseudosección aparente y una pseudosección calculada del modelo teórico obtenido o invertido generado (Figura 22). El proceso de inversión es un proceso de iterativo en el cual busca ser minimizado el error. Por lo que se analizó la variación del Root Mean Square Error (RMSE) de los datos (Figura 23).

Figura 22

Pseudosección aparente vs pseudosección calculada del modelo invertido generado.

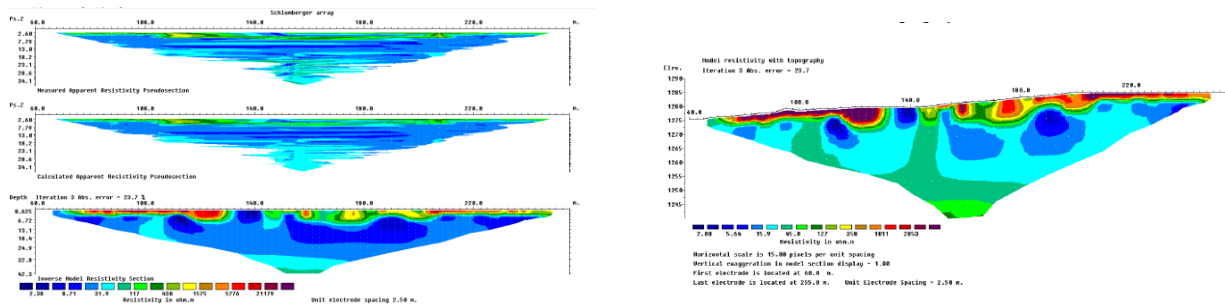


Figura 23

Disminución del RMS con cada inversión.

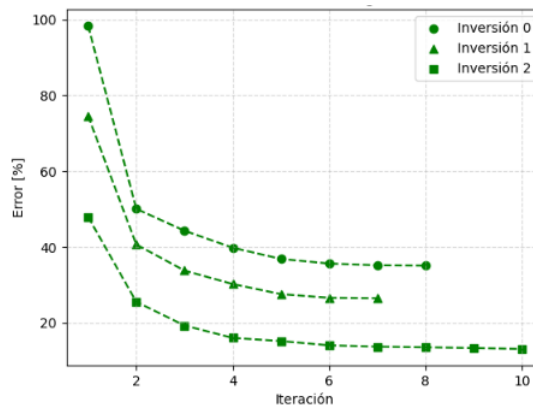
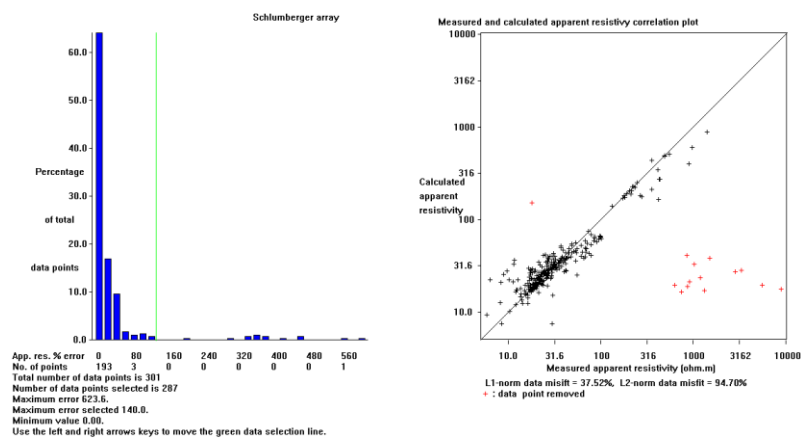


Figura 24

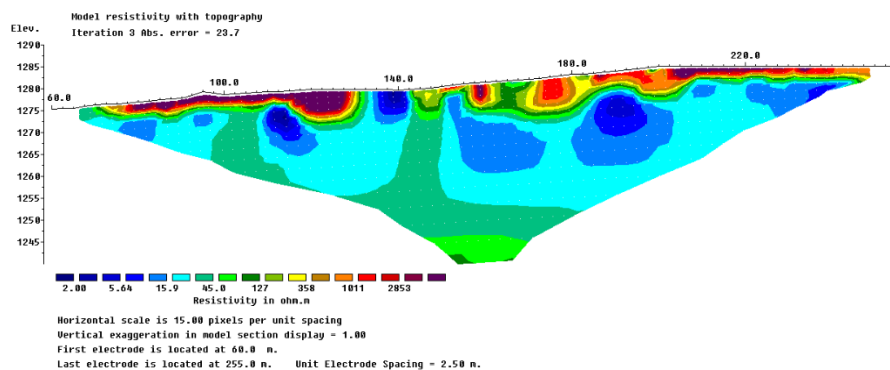
Datos con RMS



- De observar datos con un valor de error alto o por fuera de la tendencia se puede realizar una eliminación de estos (Figura 24).
- De haber sido realizado el filtrado o eliminación de datos con un error alto, se procede nuevamente a realizar la inversión de los datos reducidos, para obtener una última inversión y obtener el modelo final.
- Durante el proceso de inversión, filtrado de los datos y selección del modelo final a interpretar, no solo se consideró el disminuir el error. Adicional a este criterio se consideró el cambio o decaimiento del error, la coherencia del modelo obtenido con considerado un criterio geológico claro u objetivos del trabajo de investigación. Una vez seleccionado el modelo se procedió a visualizarlo incluyendo la topografía (Figura 25.)

Figura 25

Modelo invertido obtenido con topografía incluida.



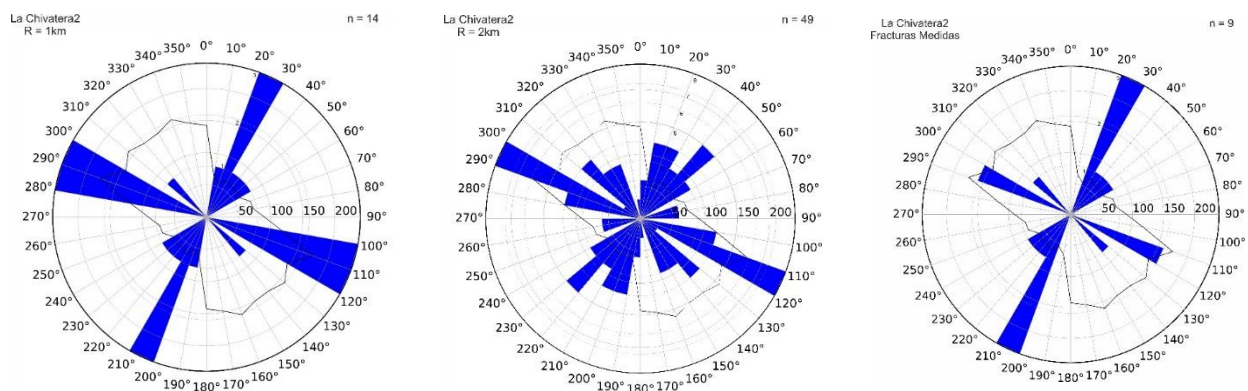
5.3.3 Diagramas rosas

Los datos estructurales medidos en campo y compilados correspondientes al fracturamiento, fueron representados por medio de diagramas rosas. Los cuales fueron

superpuestos en gráficos polares correspondientes a los valores de resistividad aparentes medidos en los SEV azimutales (Figura 26). La visualización conjunta de los diagramas rosas y gráficos polares tienen el propósito de ayudar en el análisis y comprensión de la relación entre el fracturamiento y la anisotropía de resistividad eléctrica.

Figura 26

Diagramas polares de resistividad, superpuestos en rosetas de fracturamiento según el azimut de rumbo.



5.3.4 Interpretación y redacción del documento final

Con los resultados obtenidos correspondientes a los histogramas de fracturamiento vs resistividad, diagramas de rosa, gráficos polares y obtención del modelo final de TRE se realizó una interpretación en cada una de las estaciones. Durante esta etapa de análisis se buscó relacionar los cambios de resistividad radial, profundidad y lateralmente con el fracturamiento.

6 Resultados

6.1 Sondeos Eléctricos Verticales

Un total de cuatro Sondeos Eléctricos Verticales azimutales fueron realizados, considerando la geología de Pinto et al., 2007 dos se localizan sobre material de la Fm. Los Santos

y los dos restantes sobre material de la Fm. Rosa Blanca. El nombre nemotécnico para cada estación consideró la falla geológica cercana, siendo: Estación Potreros, Estación La Mojarra, Estación La Chivatera 1 y La Chivatera 2. La profundidad de investigación estimada de los SEV es de 38 metros, y corresponde a un factor de 0.19 de la longitud total AB, considerando el trabajo de Loke (1999) generalizado por la regla empírica de 1/5 de su longitud total AB.

Las mediciones en todas las estaciones se realizaron con una longitud AB/2 constante de 100 metros, exceptuando en la Estación La Mojarra, y MN de 50 metros variando su rumbo cada 10°, obteniendo dieciocho medidas por estación. En la Estación La Mojarra debido a dificultades relacionadas con los permisos para adquirir en el terreno, se realizaron mediciones con un AB variable en algunos rumbos, pero conservando el centro del SEV, afectando a su vez la profundidad de investigación. En oficina se procedió a realizar el cálculo del factor geométrico nuevo y posterior recalculó de la resistividad aparente para cada dirección de rumbo afectada para la Estación La Mojarra.

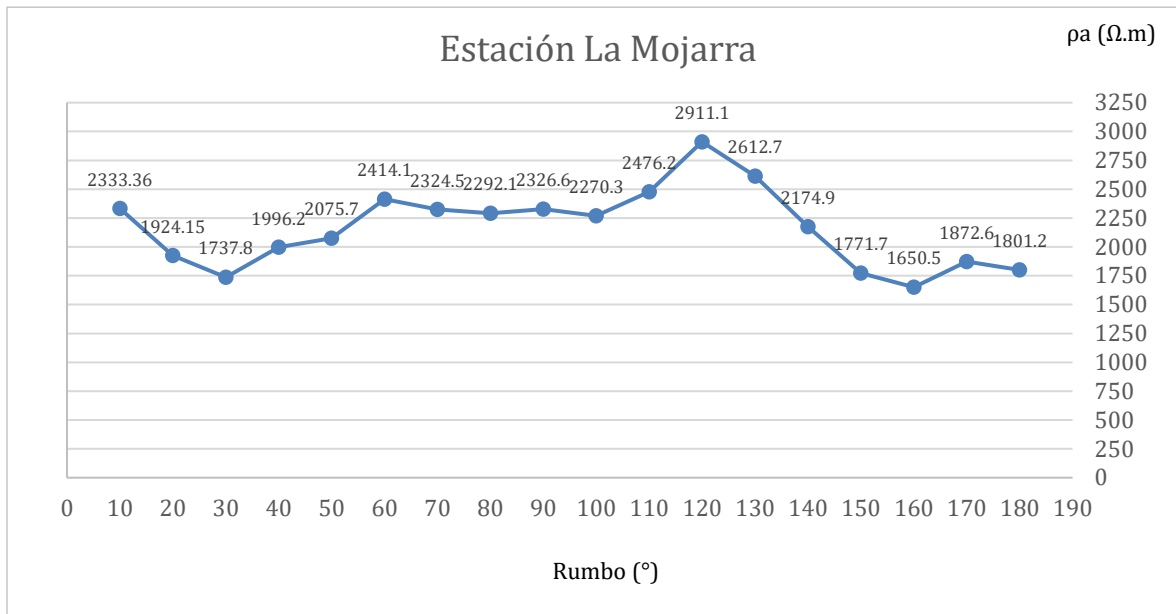
6.1.1 Estación La Mojarra

Este montaje fue realizado aproximadamente a 870 metros de la Falla La Mojarra, al sur de la MLS, sobre material del miembro superior de la Formación Los Santos. Los valores de resistividad eléctrica aparente medidos (Figura 27) corresponden con un valor mínimo de 1650 $\Omega\cdot m$, valor máximo de 2911.1 $\Omega\cdot m$, una media de 2164.76 $\Omega\cdot m$ y desviación estándar de 337.59 (Figura 26). Los valores de resistividad eléctrica aparente bajos, puntos mínimos producto de una tendencia a la disminución del valor de la resistividad, se obtuvieron en los rumbos de 20 a 100° y 130 a 180°, y los puntos mínimos de la disminución del valor de la resistividad, se obtuvieron en los rumbos de 30° y 160° con resistividades aparentes de 1737.80 y 1650.50 $\Omega\cdot m$

respectivamente. Se aprecia una tendencia de resistividad eléctrica aparente baja en los rumbos de 20° a 100°. Los valores de resistividad eléctrica aparente altos, puntos máximos producto de una tendencia al incremento del valor de la resistividad, se obtuvo en el rumbo de 120°.

Figura 27

Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación La Mojarra según el azimut de rumbo.



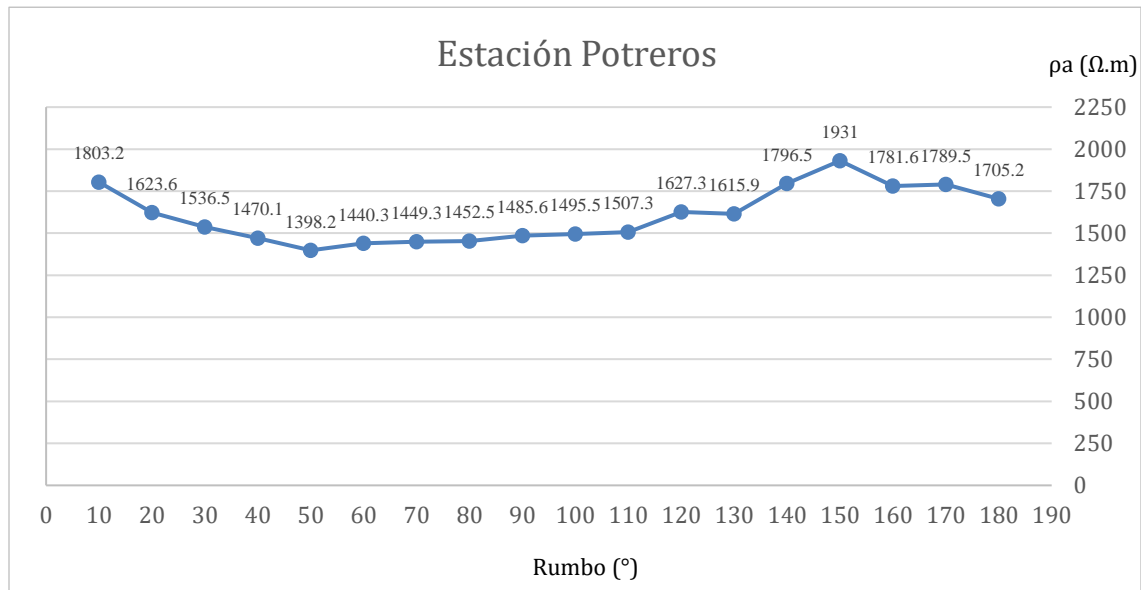
6.1.2 Estación Potrerros

Este montaje fue realizado aproximadamente a 100 metros de la Falla Potrerros, entre el centro y el sur de la MLS, sobre material del miembro superior de la Formación Los Santos. Los valores de resistividad eléctrica aparente medidos corresponden con un valor mínimo de 1398.2 $\Omega \cdot m$., valor máximo de 1931 $\Omega \cdot m$., una media de 1606.06 $\Omega \cdot m$. y desviación estándar de 159.87 (Figura 28). Los valores de resistividad eléctrica aparente bajos se localizan desde el rumbo de 40° hasta 110°, considerando el punto mínimo en el rumbo de 50° con resistividad aparente de 1398.2 $\Omega \cdot m$. Dos puntos máximos, producto de una tendencia al incremento del valor de la resistividad,

se localiza en los rumbos de 10° y 160° con resistividades aparentes de 1803.2 y 1931 $\Omega\cdot m$ respectivamente.

Figura 28

Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación Potrerros según el azimut de rumbo.



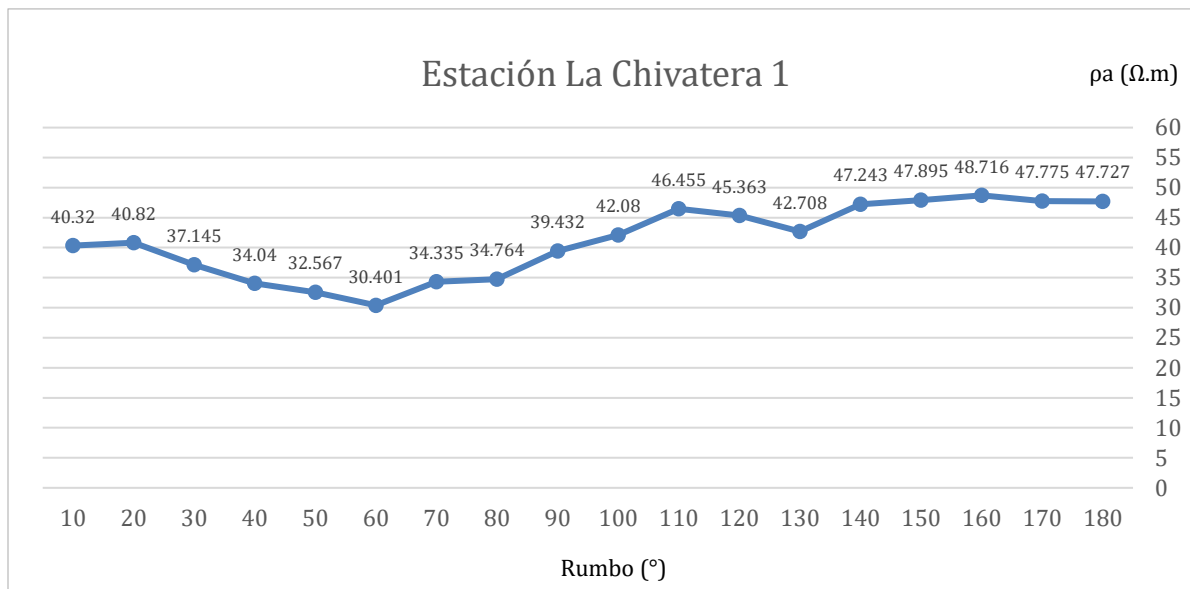
6.1.3 Estación La Chivatera 1

Este montaje fue realizado aproximadamente a 100 metros de la Falla La Chivatera, al sur de la MLS, sobre material carbonatado de la Formación Rosa Blanca. Los valores de resistividad eléctrica aparente medidos corresponden con un valor mínimo de 30.401 $\Omega\cdot m$., valor máximo de 48.72 $\Omega\cdot m$., una media de 41.09 $\Omega\cdot m$. y desviación estándar de 6.05 (Figura 29). Los valores de resistividad eléctrica aparente bajos se localizan desde el rumbo de 20° hasta 110° , considerando el punto mínimo en el rumbo de 60° con resistividad aparente de 30.401 $\Omega\cdot m$ respectivamente. Se aprecia una tendencia de resistividad eléctrica aparente baja en los rumbos de 40° a 100° . Los valores de resistividad eléctrica aparente altos, puntos máximos producto de una tendencia al

incremento del valor de la resistividad, se obtuvo en el rumbo de 120°. Los valores de resistividad eléctrica aparente altos tiene un comportamiento casi homogéneo entre los rumbos de 110° y 180°, presentando una disminución de la resistividad aparente en el rumbo de 130°.

Figura 29

Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación La Chivatera 1 según el azimut de rumbo.



6.1.4 Estación La Chivatera 2

Este montaje fue realizado aproximadamente a 220 metros de la Falla La Chivatera, al sur de la MLS, sobre material carbonatado de la Formación Rosa Blanca. Los valores de resistividad eléctrica aparente medidos corresponden con un valor mínimo de 55.14, valor máximo de 175.47, una media de 108.65 y desviación estándar de 44.51 (Figura 30). Los valores de resistividad eléctrica aparente bajos se localizan desde el rumbo de 10° hasta 80°, con un comportamiento casi homogéneo aproximado de 60 $\Omega \cdot m$. Entre los rumbos de 80° y 110° se evidencia una tendencia en el incremento en los valores de la resistividad aparente. Los valores altos de resistividad aparente

se obtuvieron entre los rumbos de 120° y 180°, visualizando una dispersión mayor de los valores respecto a los valores bajos de resistividad.

Figura 30

Gráfico de dispersión de las resistividades obtenidas para la estación La Chivatera 2 según el azimut de rumbo.



Tabla 5

Datos estadísticos de los valores de resistividad aparente de las cuatro estaciones de SEV azimutales realizados en la Mesa de Los Santos.

Estadístico	La Mojarra	Potreros	La Chivatera 1	La Chivatera 2
Promedio	2164.761667	1606.061111	41.099222	108.656222
Des. estándar	337.591466	159.873914	6.053319	44.515615
Mínimo	1650.500000	1398.200000	30.401000	55.141000
Cuartil 1 (25%)	1885.487500	1473.975000	35.359250	65.218750
Mediana (50%)	2222.600000	1576.200000	41.450000	104.6150

Estadístico	La Mojarra	Potreros	La Chivatera 1	La Chivatera 2
Cuartil 3 (75%)	2331.670000	1762.500000	47.046000	149.562500
Máximo	2911.100000	1931.000000	48.716000	175.470000

6.2 Tomografías de Resistividad Eléctrica

Solo en dos de las cuatro estaciones donde se adquirieron los SEV azimutales se realizaron las TRE ortogonales, para un total de cuatro TRE. La nemotecnia usada para las TRE considera la orientación aproximada de los perfiles geoelectricos, denotándose con A aquellos que son casi horizontales o con rumbo aproximado al Este-Oeste y denotando con B al perfil geoelectrico vertical o con rumbo aproximado Norte-Sur, siendo B perpendicular a A.

Figura 31

Ortofoto para la estación La Mojarra con las líneas de TRE A y B donde con las adquisiciones realizadas con sondeos eléctricos verticales y los electrodos ajustados

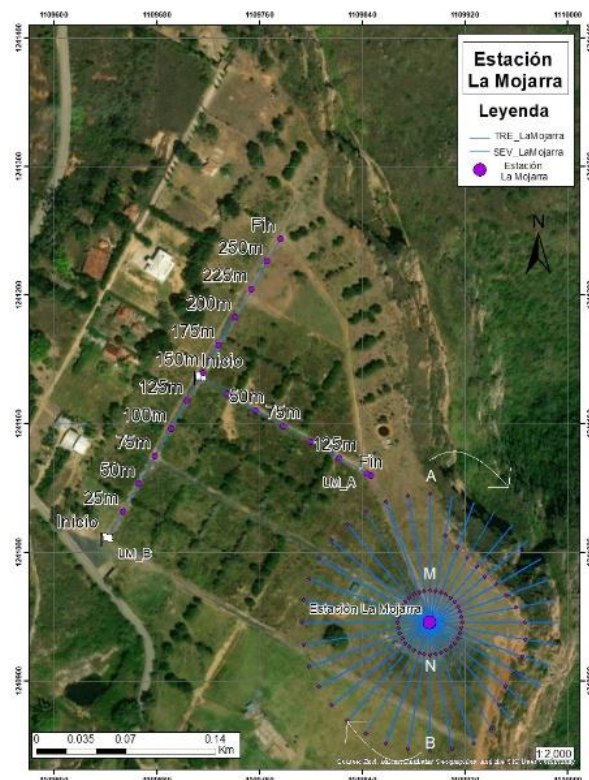


Figura 32

Ortofoto para la estación La Chivatera 1 con las líneas de TRE A y B.

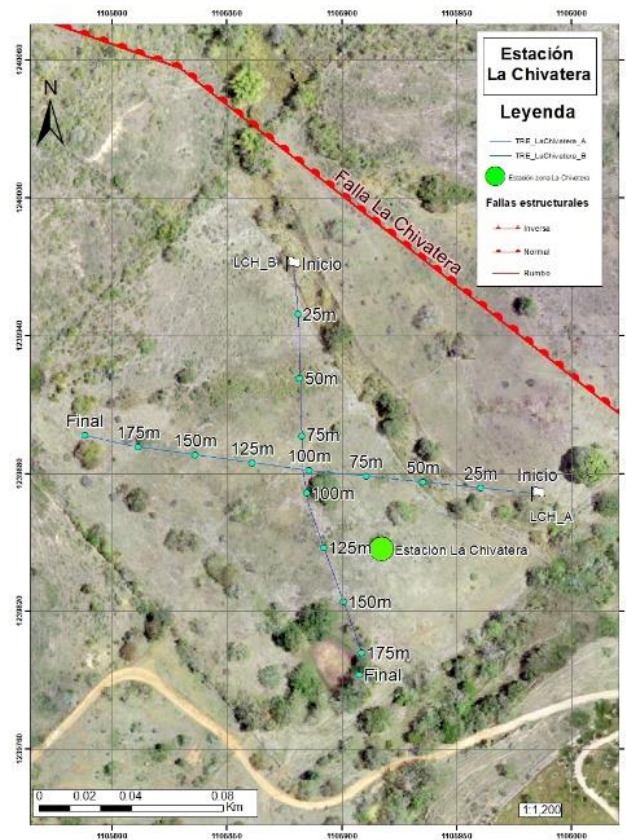
**Tabla 6**

Tabla compilada con información de las inversiones de las TRE.

Estación	Datos adquiridos	Cantidad de datos eliminados	Inversiones realizadas	Iteración utilizada en la inversión final	Error [%]
La Mojarra A	316	6	2	3	3.49
La Mojarra B	856	0	1	5	6.20
La Chivatera 1 A	301	5	3	3	23.73
La Chivatera 1 B	289	6	3	4	15.99

Las dos TRE realizadas sobre la Fm. Los Santos en la Estación La Mojarra (Figura 31) tuvieron una dirección de rumbo de 122° para A y 32° para B, con una longitud de 155 y 270 metros respectivamente (Tabla 6). El punto de intersección o cruce entre las dos TRE es a los 0 metros en A y 130 metros en B. La visualización de los resultados y escala de valores de resistividad se ajustaron para que fueran similares a los de Vergel y Remolina (2023), considerando que realizaron TRE ortogonales en la Fm. Los Santos y ser comparables.

Las dos TRE realizadas sobre la Fm. Rosablanca en la Estación La Chivatera 1 (Figura 32) tuvieron una dirección de rumbo de 290° para A y 200° para B, con una longitud de 190 y 110 metros respectivamente (Tabla 6). El punto de intersección o cruce entre las dos TRE es a los 110 metros en A y 91 metros en B. La visualización de los resultados y escala de valores de resistividad se ajustaron para que fueran similares entre ellas, no se consideraron trabajos anteriores para esta visualización.

El proceso de inversión realizado (Tabla 6) para las cuatro TRE consideró los criterios estadísticos descritos en la metodología, con los cuales se buscó obtener modelos matemáticamente adecuados (con un bajo error) y geológicamente correctos.

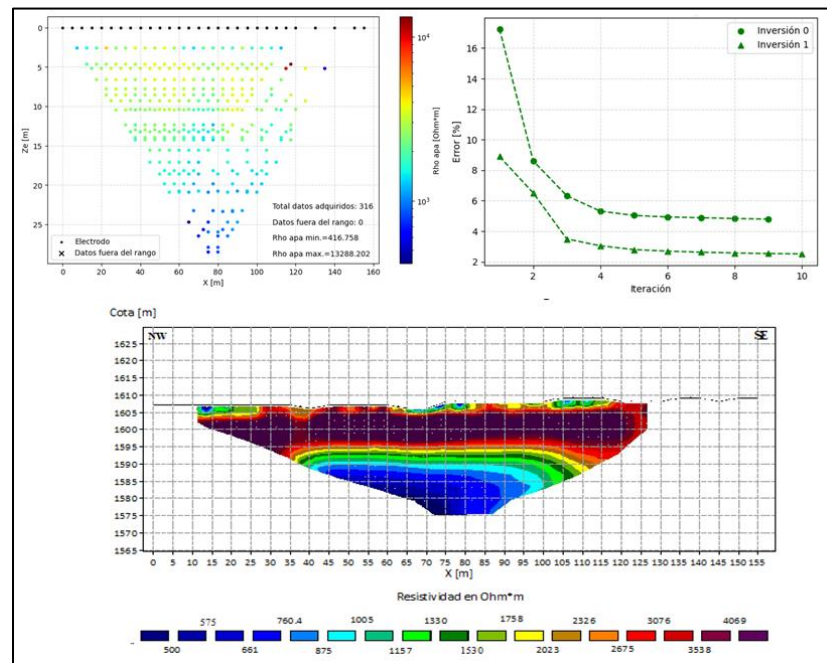
6.2.1 Estación La Mojarra A

El modelo final obtenido para la TRE de La Mojarra A (Figura 33) estima una profundidad aproximada de 35 metros. En los primeros 5 metros de profundidad del modelo presentan variaciones laterales en la resistividad entre los $500 \Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades azules) y $3076 \Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades rojizas). Los contrastes laterales significativos se evidencian en las abscisas 28, 60 y 110 metros. A profundidades mayores de los 5 metros se generaliza una casi homogeneidad lateral en los valores de resistividad, pero con dos variaciones o contrastes verticales. El primero entre las cotas aproximadas de 1603 y 1590 metros, profundidades entre los 5 a 13 metros, se estiman

valores de resistividad entre los 2675 y 4069 $\Omega\cdot\text{m}$ (tonos rojos a morados), y se le estima un espesor aproximado de 10 metros. Para este rango de profundidad, se aprecia una leve disminución lateral en los valores de resistividad en la abscisa de 37 metros. El segundo contraste a cotas inferiores a los 1593, con valores de resistividad inferiores a los 2024 $\Omega\cdot\text{m}$ (tonos azules y verdes).

Figura 33

Modelo 2D obtenido para la Estación La Mojarra, línea A.



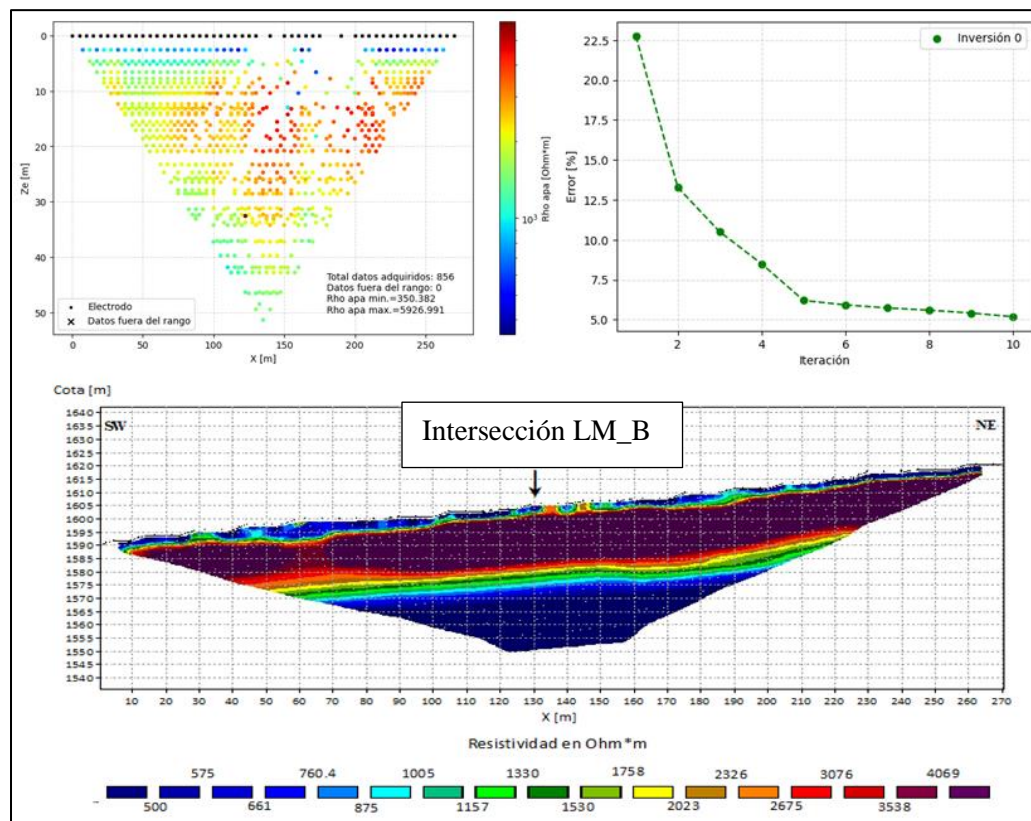
6.2.2 Estación La Mojarra B

El modelo final obtenido para la TRE de La Mojarra B (Figura 34) estima una profundidad aproximada de 70 metros. Al igual que en La Mojarra A, tres contrastes de resistividad son inferidos. Los primeros 5 metros de profundidad del modelo presentan una casi homogeneidad lateral, con valores de resistividad aproximados a los 760 $\Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades azules). Dos contrastes laterales significativos se evidencian en las abscisas 135 y 145 metros, con resistividades aproximadas de 2675 $\Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades amarillas). A profundidades mayores de los 5 metros, entre las cotas aproximadas de 1605 y 1570 metros, profundidades entre los 3 a 13 metros, se estiman

valores de resistividad mayores a los $3538 \Omega \cdot m$ (tonos rojos a morados), y se le estima un espesor aproximado de 20 metros. En la abscisa de 65 metros se aprecia una leve disminución lateral en los valores de resistividad. El ultimo contraste a cotas promedio inferiores a los 1550 metros, profundidades mayores a los 22 metros aproximadamente, con valores de resistividad inferiores a los $1567 \Omega \cdot m$ (tonos azules y verdes).

Figura 34

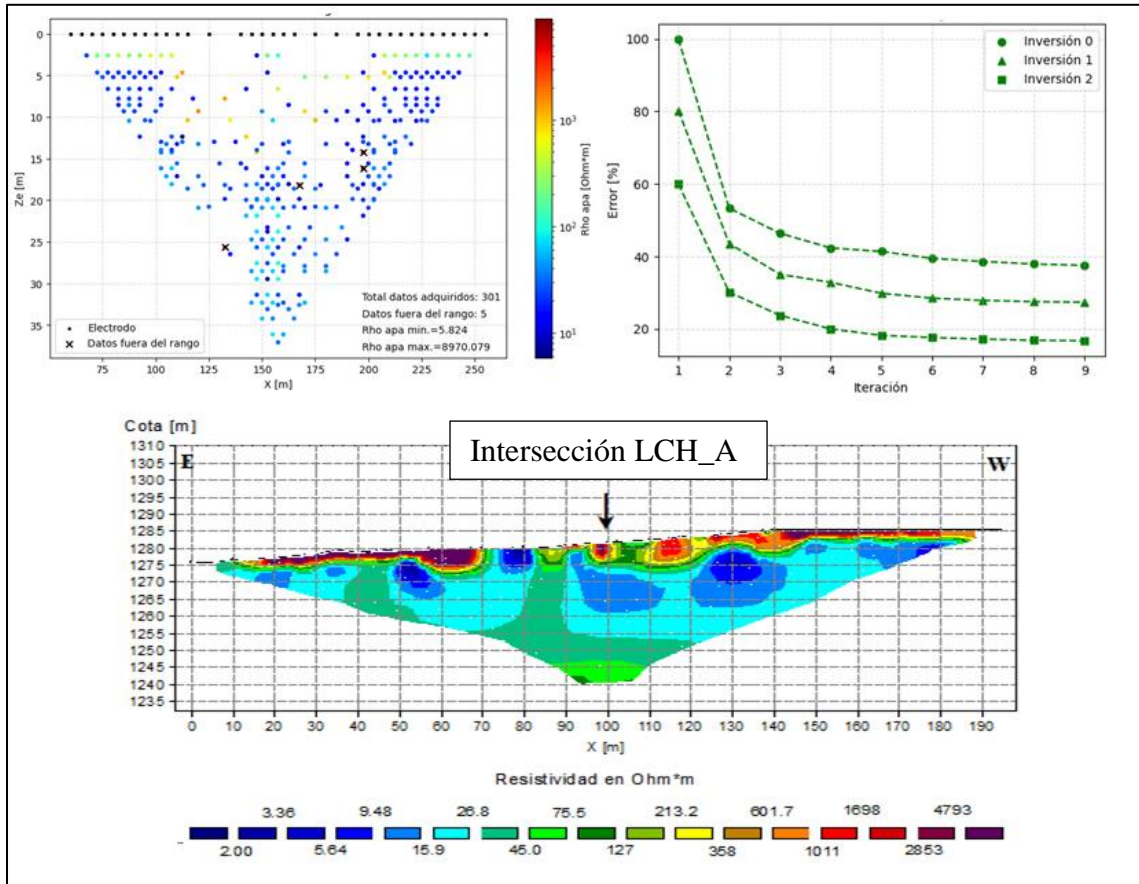
Modelo 2D obtenido para la Estación La Mojarra, línea B



6.2.3 Estación La Chivatera 1 A

Figura 35

Modelo 2D obtenido para la Estación La Chivatera 1, línea A



El modelo final obtenido para la TRE de La Chivatera 1 A (Figura 35) estima una profundidad aproximada de 40 metros. Los primeros 5 metros de profundidad del modelo presentan una variación lateral en la resistividad entre los $5 \Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades azules) y $2800 \Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades rojizas). Dos contrastes laterales significativos se evidencian en las abscisas 75 y 105 metros, con resistividades aproximadas de $127 \Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades verdes). A profundidades mayores de los 5 metros, entre las cotas aproximadas de 1270 y 1250 metros, profundidades entre los 5 a 25 metros, se estiman valores de resistividad inferiores a los $26.8 \Omega\cdot\text{m}$ (tonalidades azules), y se le estima un espesor aproximado de 25 metros. Para este rango de profundidades, se

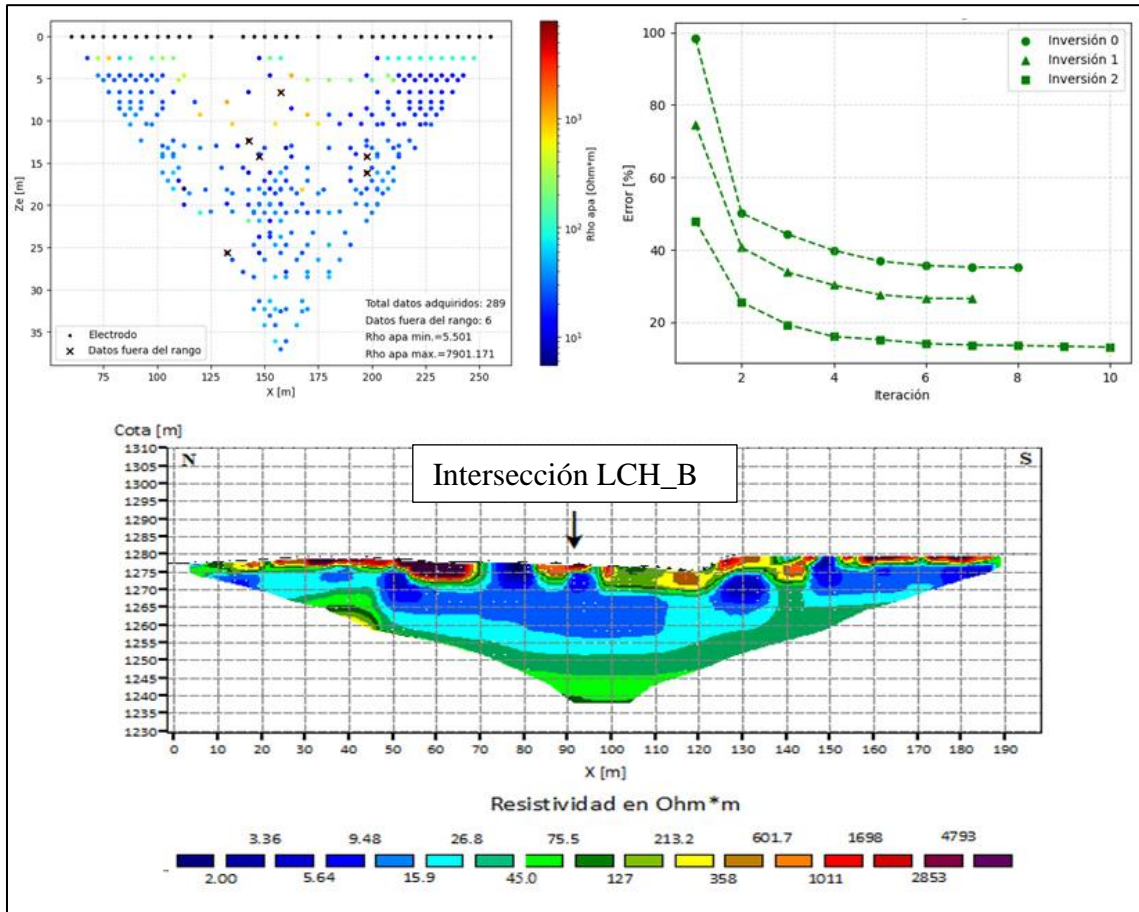
obtuvieron variaciones laterales en la resistividad en las abscisas de 45 y 85 metros, donde las resistividades incrementan a $45.0 \Omega \cdot m$ aproximadamente (tonalidades verdes). Puntualmente se observan valores de resistividad inferiores a los $15 \Omega \cdot m$ en las abscisas de 15, 35, 75; 100 y 130 metros (tonos azul oscuro). En cotas inferiores a los 1250 metros, profundidades mayores de los 30 metros el modelo aparente ser homogéneo con valores de resistividad aproximados a los $45.0 \Omega \cdot m$ (tonalidades verdes).

6.2.4 Estación La Chivatera 1 B

El modelo final obtenido para la TRE de La Chivatera 1 B (Figura 36) estima una profundidad aproximada de 40 metros. El modelo presenta similitud con La Chivatera 1 A, para los primeros 5 metros de profundidad del modelo presentan variación lateral en las abscisas de 75, 95 y 155 metros, con resistividades aproximadas de $5 \Omega \cdot m$ (tonalidades azules). A profundidades mayores de los 5 metros, entre las cotas aproximadas de 1275 y 1250 metros, profundidades entre los 5 a 30 metros, se estiman valores de resistividad inferiores a los $45.0 \Omega \cdot m$ (tonalidades azules), y se le estima un espesor aproximado de 25 metros. Para este rango de profundidades, se obtuvieron variaciones laterales en la resistividad en las abscisas de 50 y 120, con resistividades inferiores a los $15 \Omega \cdot m$ (tonos azules), y en la abscisa de 140 metros un incremento en la resistividad a $127 \Omega \cdot m$ aproximadamente (tonalidades verdes). En cotas inferiores a los 1250 metros, profundidades mayores de los 30 metros el modelo aparente ser homogéneo con valores de resistividad aproximados a los $45.0 \Omega \cdot m$ (tonalidades verdes).

Figura 36

Modelo 2D obtenido para la Estación La Chivatera 1, línea B.



7 Análisis y discusión

7.1 Sondeos Eléctricos Verticales

Las fracturas corresponden a planos de debilidad que, en términos geofísicos, representan una anomalía, en el caso de una corriente eléctrica inducida se comportarán dependiendo de varios factores como por ejemplo la geología del medio circundante, la apertura y longitud de esta y, lo más importante, el fluido que contenga (si es un gas como el aire la resistividad será muy alta, mientras que si se trata de un líquido lleno de iones la resistividad será muy baja).

Un total de 348 datos estructurales asociados al fracturamiento (para este estudio) fueron compilados de los trabajos del proyecto Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007); Tarazona y Vargas, 2021; y García Arias, 2022. Adicional, un total de 18 planos de fracturas fueron medidos durante este trabajo de investigación en la Estación La Mojarra y 9 planos en la Estación La Chivatera 2. De manera arbitraria se consideró un radio de 1 y 2 kilómetros (Tabla 6) para comparar el fracturamiento y la anisotropía de resistividad de los SEV.

Tabla 7

Cantidad de fracturas consideradas para la relación de la anisotropía de resistividad y el fracturamiento.

Estación SEV	Medidos	Acumulados 1 km	Acumulados 2 km
Potreros	0	44	94
La Mojarra	18	64	146
La Chivatera 1	0	17	59
La Chivatera 2	9	14	49

Los valores de resistividad aparente de los SEV de arreglo Schlumberger, con un AB/2 próximo a los 100 metros, en Moyano (2010) fueron considerados, diferenciándolos en aquellos localizados sobre la Fm. Los Santos y la Fm. Rosa Blanca. Para la relación del fracturamiento y la anisotropía de resistividad aparente de los SEV se consideró el concepto de la “paradoja anisotrópica” (Watson y Barker, 1999), estableciendo que los valores de resistividad aparente en la dirección de buzamiento del fracturamiento estarían relacionados a dichos planos de fracturas.

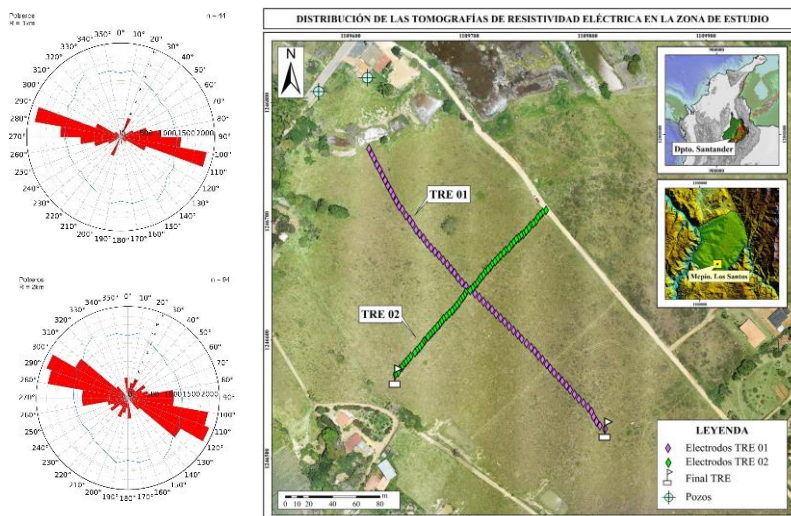
7.1.1 Estación Potreros

Los valores de resistividad aparente medidos en campo en la Estación Potreros son al menos 10 veces mayores a los localizados en la Fm. Los Santos realizados por Moyano (2010) (Figura 39). Debido a esta diferencia en magnitudes y la ausencia de información entre los rumbos de 30° y 120° del trabajo de Moyano (2010) no es posible relacionarlos con el actual trabajo.

El fracturamiento para un radio de 1 y 2 km evidencia una fracturamiento dominante hacia los 100-110° y una menor tendencia menor hacia los 20-30° de rumbo. El fracturamiento dominante es casi paralela al trazo de la falla Potreros (Apéndice A). El gráfico polar de la resistividad aparente medida presenta una similitud con una elipse (Figura 40). Simplificando, la dirección aproximada del máximo valor en la resistividad aparentes correspondería a los 340°-350°, y de 50°-60° para el valor mínimo de resistividad aparente. Bajo el criterio de la “paradoja anisotrópica”, los valores altos de resistividad se relacionarían con el fracturamiento dominante 100°-110°.

Figura 37

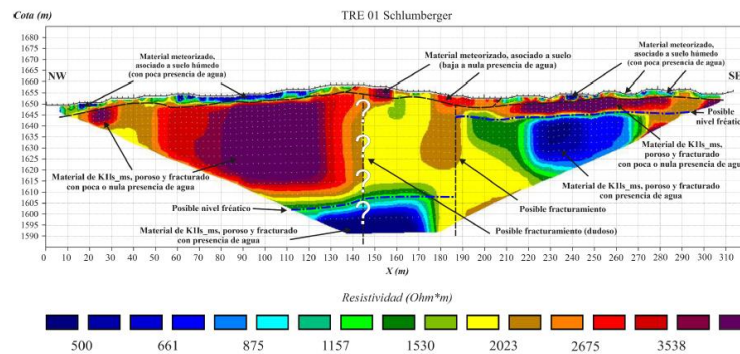
Localización TRE 01, TRE 02 (izquierda) y los diagramas rosa obtenidos en la estación Potreros.



Nota: Las TRES con un rumbo de 320° . Tomado de: Vergel y Remolina (2023)

Figura 38

Perfil geológico 01 en la estación Potrereros obtenido con la relación de la Tomografía de Resistividad Eléctrica.



Nota: Tomado de Vergel y Remolina (2023).

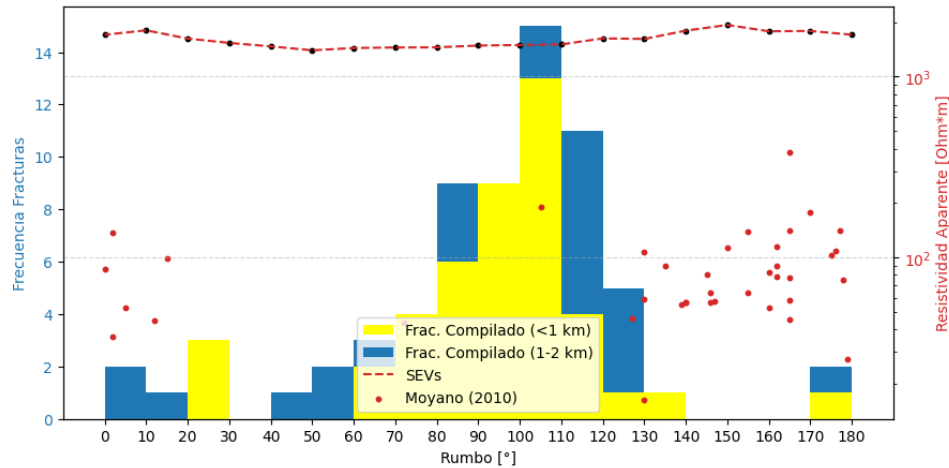
Adicionalmente, en la tesis de Vergel y Remolina (2023) se evidencia una posible fractura que las autoras infieren como posible plano de falla en aquellas adquisiciones (TRE 01, SIS 01 y SIS 03) con rumbo 320° (Figura 37). No existe una relación con los datos de fracturamiento obtenidos cercanos a la estación, sin embargo, el posible plano de debilidad parece presentar coherencia con los valores de resistividad tomados gracias a los SEVs azimutales en la estación (Figura 38 y 40).

Contando con el rumbo de las líneas correspondiente a 320° y que allí se observan los planos de fractura perpendicularmente, se puede inferir que en realidad el plano de fracturamiento tomado en cuenta presenta un su rumbo de 90° menos, es decir, 230° . Se logra inferir que, de acuerdo con la “paradoja anisotrópica”, a pesar de no ser tan directa la coherencia, hay una caída en la tendencia de los valores asociados a la dirección de buzamiento.

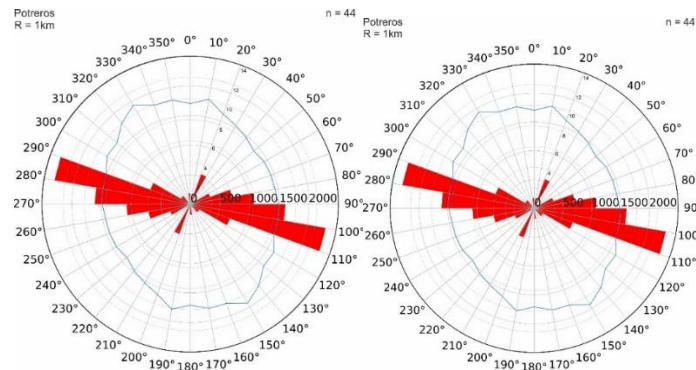
Figura 39

Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación

Potreros

**Figura 40**

Diagramas polares de resistividad, superpuesto en rosetas de fracturamiento según el azimut de rumbo para la estación Potreros.



De igual manera, el coeficiente de anisotropía obtenido para la estación es $\lambda_{\text{Potreros (prom)}} = 1.381$ (Tabla 3), evidenciando así una tendencia menor y mayor de resistividades que denota un medio anisótropo.

7.1.2 Estación La Mojarra

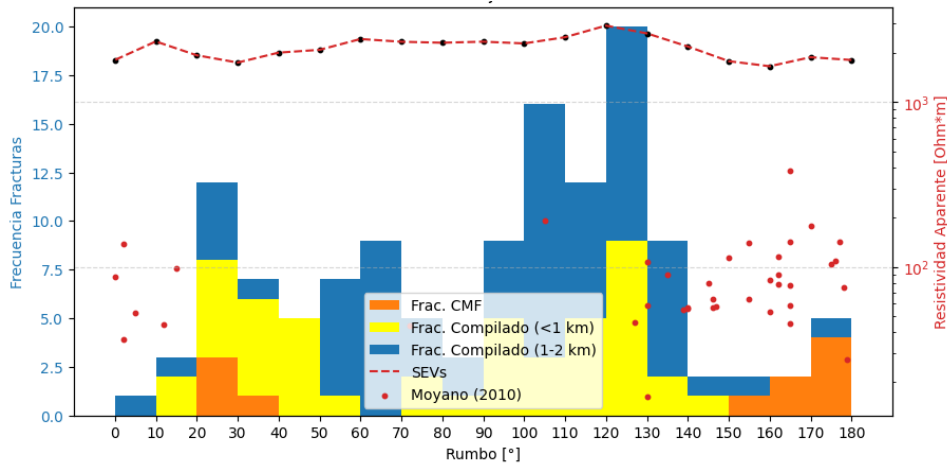
Los valores de resistividad aparente medidos en campo en la Estación La Mojarra, son al menos 10 veces mayores a los localizados en la Fm. Los Santos realizados con SEVs lineales por Moyano (2010) (Figura 41). Esta relación es similar a la observada en la Estación Potrerros, no obstante, debido a la ausencia de líneas adquiridas por Moyano (2010) entre los rumbos de 30° y 120° no es posible relacionar en su totalidad los valores de resistividad aparente con los obtenidos en la estación La Mojarra.

El fracturamiento para un radio de 1 km evidencia dos direcciones de fracturamiento dominante, uno a los 120-130° o casi paralelo al trazo de la Falla La Mojarra, y el otro a los 20°-30°, este rumbo es casi paralelo a las fallas transversales a la Falla La Mojarra (Apéndice A). Al considerar el fracturamiento en un radio de 2 km, se evidencia una mayor fracturamiento en los rumbos 100°-140°, una segunda a los 20°-30° y una tercera a los 60°-70°. En esta estación se realizó la medición de planos de fracturamiento a unos 70 metros del centro del arreglo azimutal, dos direcciones de fracturamiento se evidencian, una entre los 150°-180° y la otra a los 20°-40°.

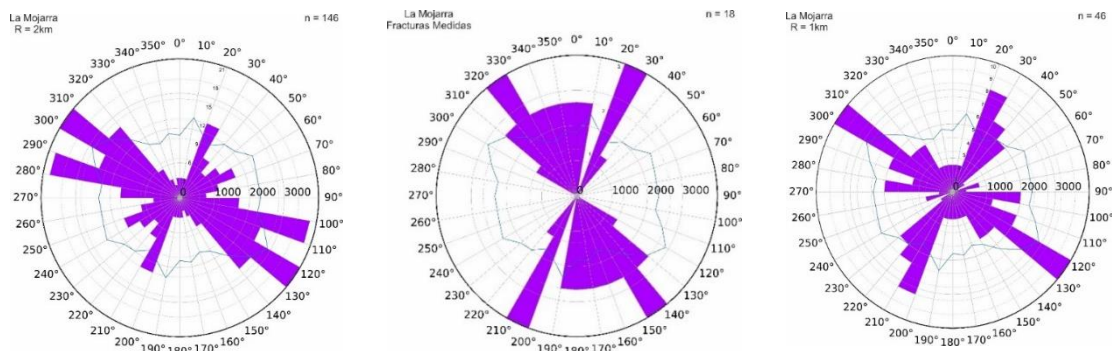
El gráfico polar de la resistividad aparente medida no presenta una similitud clara a una elipse (Figura 42), infiriendo al menos tres direcciones de valores altos de resistividad aparente, 10°, 60° y 120°. Dos posibles direcciones de valores bajos de resistividad aparente se localizarían a los 30° y 160°. Considerando las direcciones de fracturamiento medidas en campo y la “paradoja anisotrópica”, valores altos de resistividad aparente se asocian con las fracturas de rumbo 150°-180° y 20°-40°. Los valores bajos de resistividad aparente corresponderían a fracturas con rumbos de 70° y 120°, estas direcciones son evidentes en el compilado de fracturas de 2 km.

Figura 41

Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación La Mojarra.

**Figura 42**

Diagramas polares de resistividad, superpuesto en diagramas de rosa de fracturamiento según el azimut de rumbo para la estación La Mojarra.



El diagrama de rosas graficado de acuerdo a las fracturas medidas en la estación evidencia claramente dos tendencias, una hacia los 20-30° y la siguiente hacia los 200-210°. La curva del diagrama polar sin embargo, mostraría, de acuerdo a la paradoja de la anisotropía, que los valores bajos de resistividad hacia los 210° correspondería a fracturas con rumbos de 90-100° (no hay

registro en los datos medidos a 70 metros de la estación), aquella tendencia de resistividades bajas entre los 130 y 180° no corresponderían a datos de fracturas entre los 20-90° ya que no se encontraron en las cercanías a la estación. Por último, la caída de resistividad a los 100° parece ser coherente a aquellos datos estructurales entre los 0 y 10°.

El valor del coeficiente de anisotropía para la estación La Mojarra fue $\lambda_{\text{La Mojarra}} = 3.065$ (Tabla 3) evidenciando que existe anisotropía, no obstante, los ejes menor y mayor asociados a las tendencias de resistividades aparentes mayores y menores respectivamente, no son claras.

7.1.3 Estación La Chivatera 1

Los valores de resistividad aparente medidos en campo en la Estación La Chivatera 1 son similares a los localizados en la Fm. Rosablanca realizados por Moyano (2010) (Figura 43). Aunque no se presenta una diferencia representativa en las magnitudes, la ausencia de información entre los rumbos de 20° y 130° del trabajo de Moyano (2010) no es posible relacionarlos con el actual trabajo.

El fracturamiento para un radio de 1 km evidencia un fracturamiento dominante hacia los 100-120°, siendo casi parralero a la Falla La Chivatera (Apéndice A), otras tres tendencias menores hacia los 10°-20°, 30°-40° y 140°-150° de rumbo. Al considerar el fracturamiento en un radio de 2 km, se generalizan tres direcciones dominantes del fracturamiento, las dos primeras en los rumbos 100°-120° y 40°-50°, la tercera a los 350°-20°. En esta estación no se realizó la medición de planos de fracturamiento, pero se encuentra localizada a unos 546 metros del afloramiento próxima a La Chivatera 2, donde si se realizó medición a planos de fracturas. En el afloramiento de La Chivatera 2, el fracturamiento tiene una dirección de rumbo entre los 20°-60°, siendo preferencial el rumbo 20°-30°, este fracturamiento es casi ortogonal a la dirección de la Falla La Chivatera.

El gráfico polar de la resistividad aparente medida presenta una similitud con una elipse (Figura 44). Permitiendo simplificar en dos direcciones de anisotropía, la dirección de máximo valor en la resistividad aparentes correspondería a los 330° aproximadamente, y de 60° para el valor mínimo de resistividad aparente. Bajo el criterio de la “paradoja anisotrópica” y priorizando los valores medidos en el afloramiento de La Chivatera 2, valores altos de resistividad aparente se relacionarían con el fracturamiento dominante 20° - 60° . Para las fracturas con rumbo de 100° - 120° en un radio de 1 km, se asociaron posibles valores bajos de resistividad. La relación considerando un fracturamiento en 2 km, es de valores altos de resistividad aparente para las fracturas 40° - 50° , valores moderadamente bajos en la resistividad aparente para los rumbos de 100° - 120° y 350° - 20° . Los valores mínimos de resistividad aparente, aproximadamente a los 60° , se asociarían con el fracturamiento con rumbo 150° .

Figura 43

Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación La Chivatera 1.

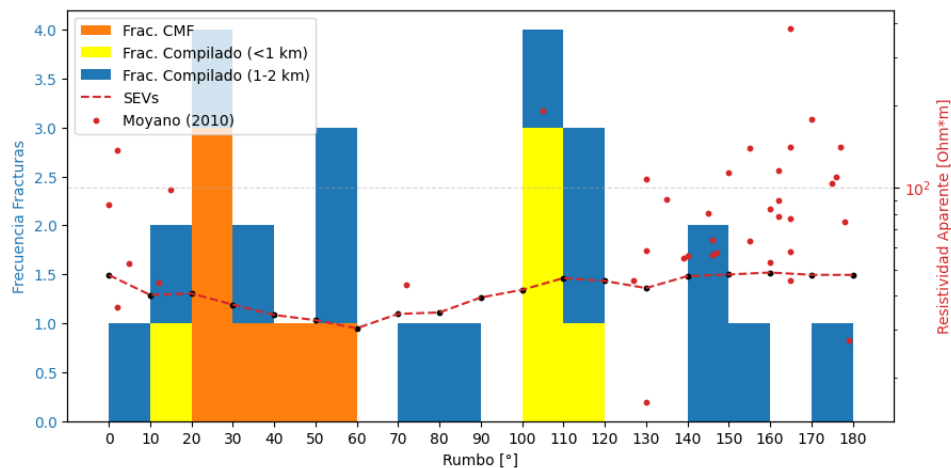
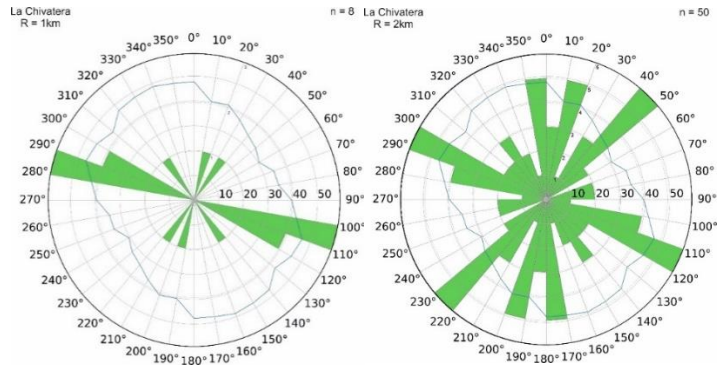


Figura 44

Diagramas polares de resistividad, superpuesto en rosetas de fracturamiento según el azimut para la estación La Chivatera 1.



Así mismo, el coeficiente de anisotropía obtenido para la estación es $\lambda_{\text{La Chivatera 1 (prom)}} = 1.126$ (Tabla 3), evidenciando así una tendencia menor y mayor de resistividades que denota un medio anisótropo.

7.1.4 Estación La Chivatera 2

Los valores de resistividad aparente medidos en campo en la Estación La Chivatera 2 son similares a los localizados en la Fm. Rosablanca realizados por Moyano (2010) (Figura 45). Esta relación es similar a la observada en la Estación La Chivatera 1, por lo que, la ausencia de información entre los rumbos de 20° y 130° en el trabajo de Moyano (2010) no ayuda a relacionar directamente los valores de resistividad aparente con el actual trabajo.

El fracturamiento para un radio de 1 y 2 km evidencia dos direcciones de fracturamiento dominante, entre los 100°-120°, rumbos casi parraleros a la Falla La Chivatera (Apéndice A), y entre los 20°-30°. Las estaciones La Chivatera 1 y La Chivatera 2 se localizan más próximas a la Falla Los Santos, por lo que se incluyen en fracturamiento planos de fracturas tanto en la Fm. Los Santos como la Fm. Rosa Blanca. En esta estación, La Chivatera 2, se realizó la medición de planos de fracturamiento en un afloramiento localizado a unos 18 metros aproximadamente del centro del

arreglo azimutal. El fracturamiento del afloramiento tiene una dirección de rumbo entre los 20°-60°, siendo preferencial el rumbo 20°-30°, dirección de rumbo casi ortogonal al trazo de la Falla La Chivatera y predominante en los diagramas rosas de radio 1 y 2 km.

El gráfico polar de la resistividad aparente medida no presenta una similitud clara con una elipse (Figura 46), pero permite inferir dos direcciones de anisotropía. La dirección de máximo valor en la resistividad aparentes correspondería a los 320°-330° aproximadamente, y de 40°-50° para el valor mínimo de resistividad aparente. Al comprar estas direcciones de anisotropías con las direcciones de fracturamiento del afloramiento, bajo el criterio de la “paradoja anisotrópica”, los valores altos de resistividad aparente se relacionarían con el fracturamiento dominante 20°-60°. Para la segunda dirección preferencial de fracturamiento, en un radio de 1 y 2 km, con rumbo de 100°-120° se asociarían anomalías de resistividad aparente bajas.

Figura 45

Histograma de SEVs vs Fracturamiento en función del azimut de rumbo para la estación La Chivatera 2.

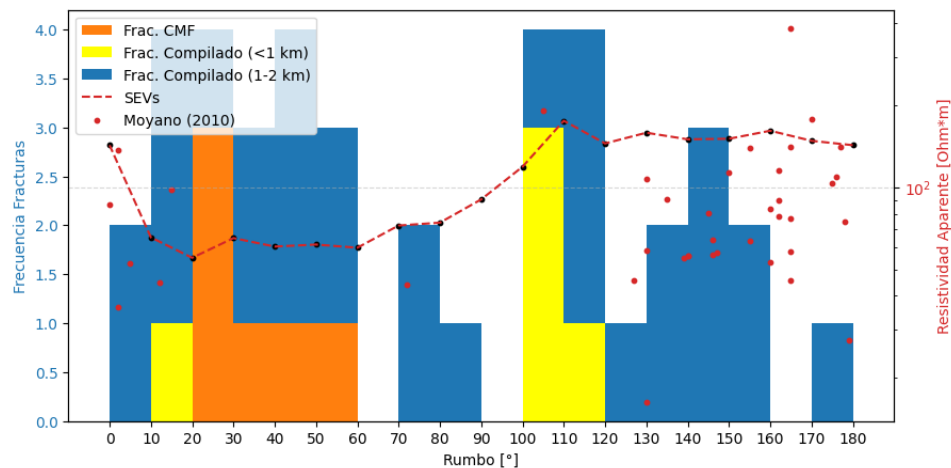
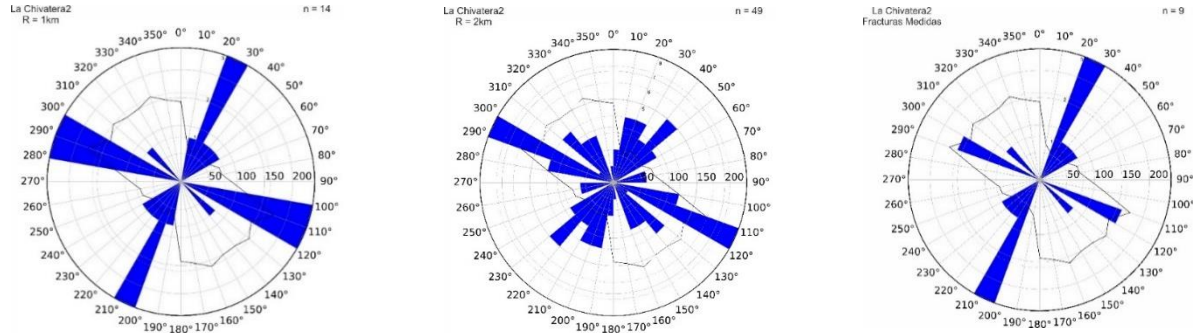


Figura 46

Diagramas polares de resistividad, superpuesto en rosetas de fracturamiento según el azimut de rumbo para la estación La Chivatera 2.



Las fracturas medidas a los 18 metros aproximadamente desde el centro de la estación evidencian una tendencia marcada hacia los 20-30° y otra menor hacia los 110-120°. Dicha tendencia dominante presenta coherencia con la caída de la tendencia de la resistividad hacia los 110-120°. Aquellas resistividades más bajas entre los 20° y 60° no parecen presentar una relación directa con fracturas entre los 110 y 150° ya que solo se tienen datos hacia los 20-30°. No obstante, la relación de estas anomalías se hace más evidente con un radio de 2km.

Por otro lado, el coeficiente de anisotropía obtenido para la estación es $\lambda_{\text{La Chivatera 2 (prom)}} = 1.933$ (Tabla 3), evidenciando así una tendencia menor y mayor de resistividades que denota un medio anisótropo.

7.2 Tomografías de Resistividad Eléctrica

Para la interpretación de las tomografías de resistividad eléctrica (TRE) e inferir variaciones de resistividad eléctrica laterales y verticales, se revisaron y tomaron como referencia los trabajos de Vergel y Remolina (2023), Zarate y Moreno (2023) y Vargas (2021). Debido a la similitud entre las dos TRE (A y B) en las respectivas estaciones, se procedió a realizar una interpretación simultánea de los resultados por estación.

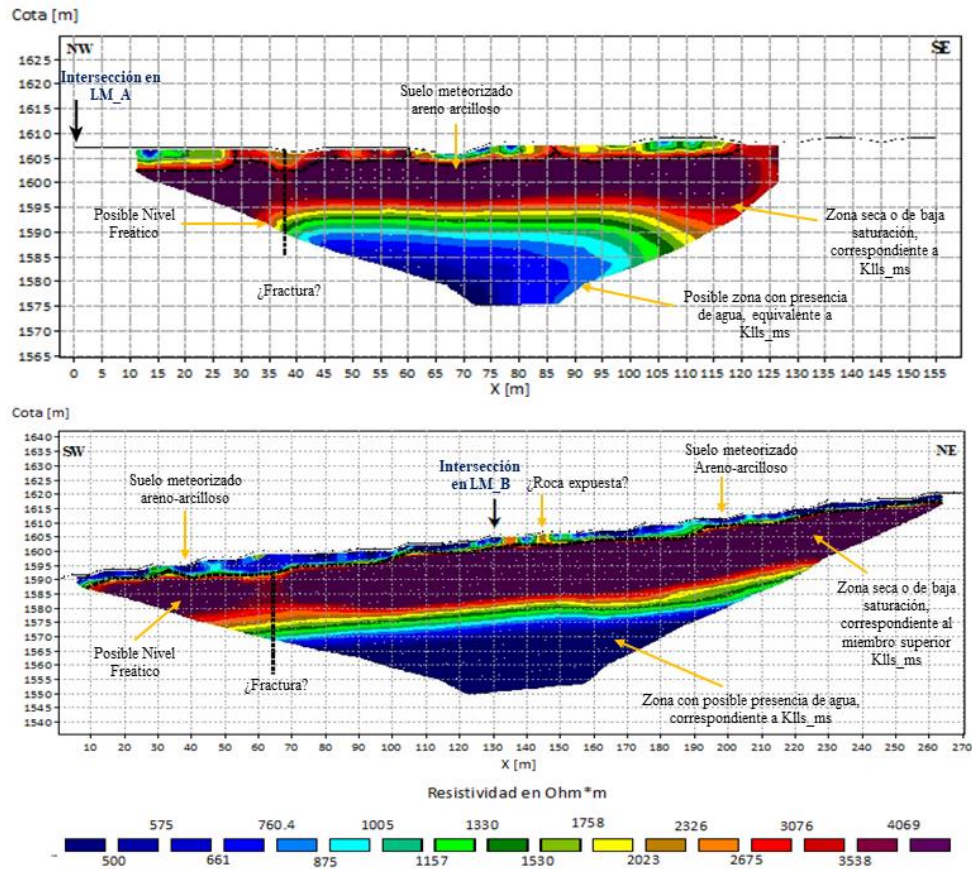
7.2.1 Estación La Mojarra

Los modelos 2D de resistividad eléctrica obtenidos para La Mojarra A y La Mojarra B permiten generalizar tres capas (Figura 47). Los valores de resistividad obtenidos para los primeros 5 metros de profundidad o primera capa, se asocian con material de suelo meteorizado, posiblemente material areno arcilloso. Los valores de resistividad bajos, entre los 500 y 1005 $\Omega\cdot m$, sugieren la existencia de un material de suelo menos resistivo, posiblemente material arcillo o material de suelo con presencia de agua, este último es inferido por la presencia de pastos en algunos de los lotes. En la zona de estudio no se evidenció roca expuesta en la zona, y las evidencias de parcialización del terreno, se infiere que los valores altos de resistividad ($>1758 \Omega\cdot m$) pueden estar relacionados con la compactación del material.

Entre los 5 y 15 metros de profundidad se localizaría la capa dos, caracterizada por valores altos de resistividad eléctrica ($> 2675 \Omega\cdot m$). Esta capa o nivel se interpreta como una zona no saturada del Miembro Superior de la Fm. Los Santos, correspondiendo a material arenoso. A profundidades aproximadas de los 15 a 20 metros, se localizaría parte de la tercera capa, la cual se caracteriza por valores de resistividad bajos ($<1157 \Omega\cdot m$). Por los bajos valores de resistividad eléctrica, se considera como una zona con posible presencia de agua o poco saturada (Figura 47), y es asociado con material arenoso del Miembro Superior de la Fm. Los Santos. El posible nivel freático, considerando el límite entre la capa uno y dos, se localizaría a profundidades mayores a los 20 metros.

Figura 47

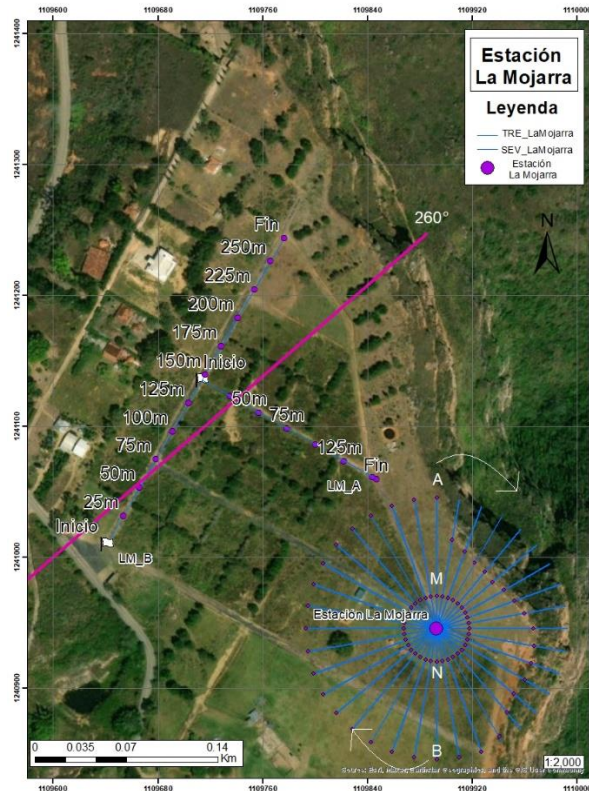
Interpretación del modelo 2D obtenido para La Mojarra A (arriba) La Mojarra B (abajo).



Las variaciones laterales de la resistividad eléctrica evidenciados en ambos modelos en las abscisas de 30 metros en La Mojarra A y 65 metros en La Mojarra B se interpreta como una posible fractura (Figura 48). Por su localización, topografía del terreno y ausencia de evidencias geomorfológicas, estos planos son asociados a fracturamiento y, al proyectar en planta ambos planos evidenciados en las líneas, se propone un rumbo para la posible fractura de 260° . Sin embargo, los datos estructurales medidos cercanos a la estación no demuestran una relación. No es sino hasta aumentar el radio de tolerancia para los datos de fracturas a 1km es que se observa la familia de fracturas.

Figura 48

Ortofoto relacionada a la Estación La Mojarra con el posible plano de fracturamiento.



La posible fractura presenta un azimuth rumbo de 260° aproximadamente.

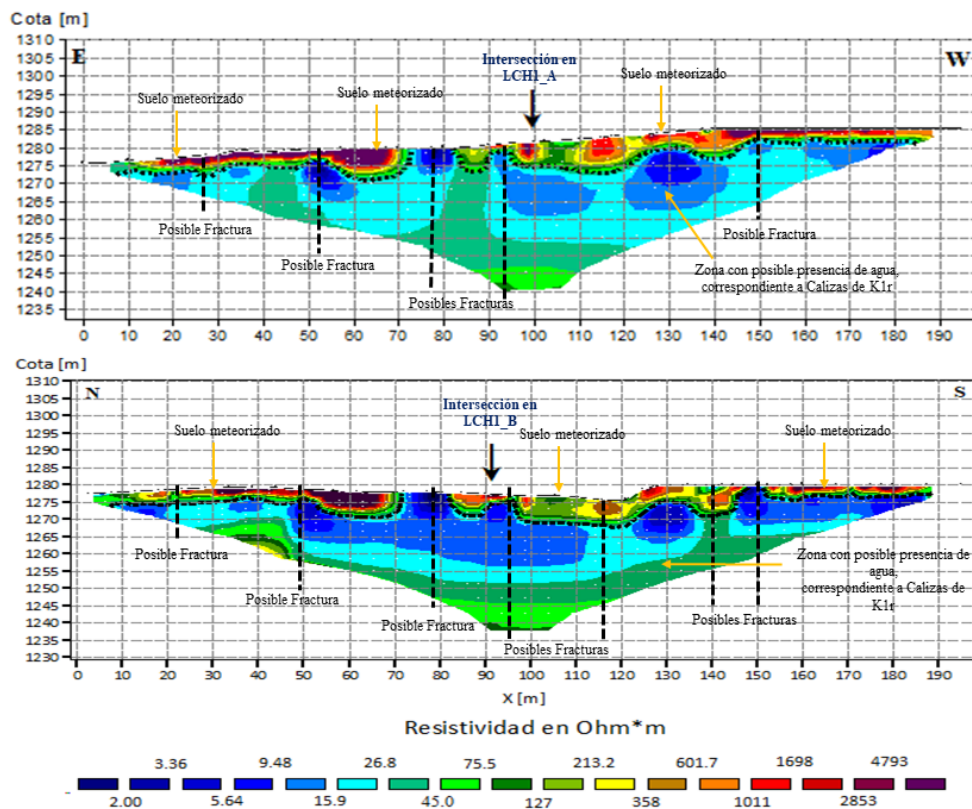
7.2.2 Estación La Chivatera 1

Los modelos 2D de resistividad eléctrica obtenidos para La Chivatera 1 A y La Chivatera 1 B se evidenciaron tres posibles contrastes de resistividad, pero considerando la coherencia geológica se generalizan dos niveles o capas (Figura 49). Los valores de resistividad más someros se asocian con la primera capa, la cual presenta una variación en su espesor entre los 5 a 10 metros, esta primera capa se asocia con material de suelo producto de la meteorización del material carbonatado de la Fm. Rosa Blanca. Los valores de resistividad bajos, entre los 2 y 25.9 $\Omega\cdot m$, sugieren la existencia de un material de suelo menos resistivo, posiblemente material arcilloso o material de suelo con presencia de agua, en la zona de estudio se evidencian pastos bajos y algunos

árboles. En la zona de estudio, en algunos sectores se evidenció roca expuesta, y durante el montaje geofísico del perfil geoelectrico se tuvo dificultad en la localización de los electrodos, por lo que esta primera capa puede estar constituida por material de roca de la Fm. Rosa Blanca. Considerando la posibilidad de la presencia de material rocoso en la primera capa, los valores altos de resistividad ($>1011 \Omega \cdot m$) pueden estar relacionados con material calcáreo más compacto, pero por su naturaleza y posible karstificación/disolución, la presencia de porosidad secundaria incrementaría los valores de resistividad.

Figura 49

Interpretación del modelo 2D obtenido para La Chivatera 1 A (arriba) y La Chivatera 1 B (abajo).



La segunda capa se localiza a profundidades mayores de los 5 o 10 metros, este nivel se caracteriza con valores bajos de resistividad ($<26.8 \Omega \cdot m$), por la localización geológica y valores

bajos de resistividad, se asocia la capa dos con material carbonatado de la Fm. Rosa Blanca. Aunque en la revisión de los resultados se planteó un posible contraste o variación en la vertical en ambas TRE a una profundidad aproximada de los 30 metros, debido a la profundidad de investigación del perfil, aproximadamente de 35 a 40 metros, se considera que los valores de resistividad resueltos por el modelo corresponderían a lo denominado como efectos de borde. Lo que implicaría una incertidumbre de la interpretación a profundidades mayores de los 30 metros.

Semejante a lo interpretado en las dos TRE en la Estación La Mojarra, las variaciones laterales en la Estación La Chivatera 1 se infieren como posibles planos de fracturamiento o fallas. Por ser material calcáreo susceptible a la disolución, no se descarta que las posibles variaciones laterales correspondan a porosidad secundaria, la cual permita el flujo y almacenamiento de agua, esto al considerar la presencia de árboles en el área de estudio. Esta estación se localiza relativamente cerca de la Falla La Chivatera por lo que, debido a la poca profundidad de las TRE y en caso tal que la Falla pase por los bordes de esta se tendría la incertidumbre por efectos de borde.

7.3 Discusión general

Los valores en la resistividad aparente medida se ven afectados por las fluctuaciones estacionales, localización, equipo utilizado, entre otros. Estos factores pueden justificar la diferencia en el rango de valores de resistividad de los SEV azimutales medidos en la Fm. Los Santos y los valores de Moyano (2010). Pero, los valores asociados a la Fm. Rosablanca no variaron tanto entre ambos trabajos, por lo que sería necesario realizar un análisis multitemporal para evaluar el comportamiento en los valores de resistividad aparente en ambas formaciones a lo largo del tiempo.

Aunque se consideró la “paradoja anisotrópica” para inferir la relación entre las anomalías de resistividad y el fracturamiento, esta relación puede variar o ser menos evidente conforme se aumenta el radio de fracturamiento. Otro de los factores que influyen en la “paradoja anisotrópica” sería la apertura de las fracturas y el material que las rellena. Los diagramas polares de los SEV muestran una disminución significativa en los valores de resistividad eléctrica en direcciones perpendiculares al fracturamiento preferencial para las estaciones Potreros, La Mojarra, La Chivatera 1 y La Chivatera 2, considerando la paradoja de la anisotropía.

Para el actual trabajo de investigación, en la Estación La Mojarra y La Chivatera 2, donde fue posible medir planos de fractura, se hace evidente que los valores bajos de resistividad se localizaron en direcciones de rumbo similares a los planos de fracturamiento (Figura 42 y 46). Al incrementar el radio de búsqueda de fracturas, se acentuaban o se incluían nuevas direcciones de fracturamiento, dando la posibilidad de existir en el subsuelo planos de fractura que no se evidencian en el afloramiento.

Las TRE en la estación La Mojarra evidencia una posible zona con presencia de agua o poco saturada, asociada al miembro superior de la Fm. Los Santos, el cual se considera como el principal para la captación de aguas subterráneas (Díaz et al., 2009). Para la estación La Chivatera 1 se infiere, considerando la presencia de vegetación, una posible zona con contenido de agua, producto conjunto del fracturamiento y la karstificación. Para la Fm. Rosa Blanca, Díaz et al., 2009. menciona que uno de los posibles niveles con potencial hidrogeológico es el nivel arenoso, el cual no está cartografiado y diferenciado claramente en la Mesa de Los Santos. Debido a la falta de datos de pozos cercanos a estos puntos, no se pudo analizar el nivel freático.

La correlación entre las fracturas superficiales y las respuestas de resistividad eléctrica proporcionaron información valiosa sobre la presencia, orientación y densidad de las fracturas en profundidad. Esto es crucial para caracterizar fracturas en el subsuelo.

Una de las principales limitaciones de este estudio radica en su alcance, debido a que se realizaron muy pocas estaciones para poder definir un control estructural de la zona, ya que las condiciones geológicas y geofísicas pueden variar significativamente en diferentes áreas. Sumado a esto, la profundidad fue limitada y no se exploraron profundidades extremadamente grandes debido a restricciones técnicas y de recursos.

Por último, el estudio no tuvo en cuenta posibles factores externos que podrían influir en las mediciones de resistividad eléctrica, como las condiciones estacionales o presencia de minerales conductores. Aunque se tuvo en cuenta la falla más cercana, no se analizó si correspondía al bloque colgante o al bloque yacente, por lo tanto, se cuestiona el hecho de que tan confiable sería la tendencia de fracturamiento ya que se trata de una zona estructuralmente compleja.

Los resultados del estudio tienen aplicaciones directas en la gestión de recursos hídricos en la Mesa de Los Santos. La comprensión de la relación entre el fracturamiento y la resistividad eléctrica es fundamental para la extracción de este recurso. El estudio proporciona información valiosa para la exploración de agua subterránea en la región.

La anisotropía cuantificada a través del coeficiente “ λ ” propuesto por Watson y Barker (1999) para los SEVs azimutales en las estaciones Potreros, La Chivatera 1 y La Chivatera 2 arrojó valores que demuestran anisotropía de forma matemática (además de la forma visual de los diagramas polares); a pesar que los autores proponen el cálculo para medios que, se asumen homogéneos, se obtuvieron valores que indican que sí hay anisotropía en medios aproximadamente

homogéneos (Tabla 3), exceptuando la estación La Mojarra, en donde no se evidencia un comportamiento homogéneo del subsuelo pero sí se tienen anisotropías en él, coincidiendo con Vargas (2021) quién establece heterogeneidad con las adquisiciones hechas en el bloque estructural La Mojarra definido por el proyecto Ingeominas-UIS (Pinto et al., 2007).

Por otro lado, Vargas (2021) propone que para el miembro superior de la formación Los Santos, se identificaron dos zonas de resistividades, una con valores entre los 0 y 1000 ohm. m y otra con valores menores a los 4000 ohm. m que varían de manera azimutal en las adquisiciones realizadas (existe anisotropía). Además, la autora complementa que aquellas adquisiciones paralelas a fallas de tipo normal presentan resistividades bajas que se asocian a fracturas conectadas y saturación de agua en ellas. No obstante, cabe tener en cuenta que, a pesar de que las adquisiciones se hicieron en el bloque estructural La Mojarra, están un poco más hacia el norte de la Mesa de Los Santos y con un método no colineal (SEVs cuadrados), por tanto, entra en discusión la influencia de las fallas y la distancia a ellas.

8 Conclusiones

De acuerdo con la respuesta de la resistividad eléctrica con los planos de fracturas medidas en superficie se logró determinar una relación con la caída de los valores de resistividad y las tendencias de fracturamiento a través de la paradoja de anisotropía, siendo estos datos estructurales vinculados a las caídas en los valores de resistividad eléctrica aparente perpendiculares al rumbo propio de dichos planos de debilidad (es decir, siguiendo la dirección del buzamiento). Las resistividades aparentes se ven afectadas negativamente gracias a las tendencias de fracturamiento de cada estación, tanto medidas cerca al punto de adquisición como recopiladas en la base de datos.

El medio en cuestión fue contrastado respecto a las propiedades físicas del suelo gracias a las TRE, donde se obtuvieron rangos de resistividad eléctrica (variables para cada estación) que comprobaron las diferentes capas “geoeléctricas” directamente asociadas a las propiedades del subsuelo en cada zona. Siendo notorio el contraste entre zona con posible presencia de agua y zona con disminución dramática en el porcentaje de fluido. Del mismo modo, la evidencia de posibles fracturas se hizo aún más presentes gracias a la interrupción o caída súbita de resistividades en la pseudosección, de tal forma se logró determinar que las estaciones en cuestión sí presentan una anisotropía medible.

Las fracturas evidenciaron un rumbo generalizado NW (Figura 50), de bajo ángulo de convergencia con las fallas más cercanas a cada estación, siendo estas fracturas las responsables de las tendencias bajas de resistividad en los SEVs (el eje menor de los diagramas polares). Al mismo tiempo, aquellas fracturas con alto ángulo de convergencia respecto a la falla más cercana a cada estación demostraron presentar caídas leves en las tendencias de resistividad mayores (ejes mayores de los diagramas polares).

9 Recomendaciones

Realizar un trabajo de modelado sintético, en laboratorio y en campo controlados, que permitan evaluar con claridad el concepto de “paradoja anisotrópica” para la Mesa de Los Santos.

Aumentar la profundidad de investigación incrementando el AB/2 del SEV, para obtener curvas de resistividad en profundidad para cada rumbo e inferir posibles cambios de material geológico. Igualmente, para obtener más información realizar TRE con longitudes mayores a los 500 metros, para lograr profundidades teóricas de al menos 60 metros.

Para evidenciar y correlacionar cambios verticales y laterales con una perspectiva tridimensional realizar TRE adquisiciones con una distribución próxima al 3D o 2.5D. El flujo de procesamiento de los datos se debe realizar en un software que permita inversión 3D, de no ser posible por el costo computacional, tener presente la incertidumbre en las interpretaciones 2.5D.

Realizar SEV lineales azimutales próximos a los escarpes. Para inferir la continuidad vertical del fracturamiento y conectividad vertical de las formaciones geológicas, permitiendo un control de la variación litológica y de fracturamiento.

10 Referencias Bibliográficas

Arguello, A.; Becerra, N.; Herrera, L.; Prada, F. (2018). *Estudio del recurso hídrico subterráneo en la zona sur occidental del municipio de Los Santos, Santander*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Auge, M. P. (2008). *Métodos geoeléctricos para la prospección de agua subterránea*. Tesis doctoral. Universidad Nacional de Buenos Aires. Buenos Aires, Argentina.

Berlanga, Á. R. Q. (2013). *Aplicación de la tomografía eléctrica en la caracterización del deslizamiento de Doña Mencía*. Tesis de Máster. Universidad de Granada. Granada, España.

Billings, M. P. (1972). *Structural Geology: Third Edition*. Harvard University. New York, United States.

Braga, A.C.D.O. (2006). *“Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática”*. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, Brasil.

Casadiegos Agudelo, L. (2023). *Análisis de vulnerabilidad a la contaminación del sistema acuífero del miembro superior de la formación Los Santos, Mesa de los Santos-Santander (Colombia)*. Tesis de Máster. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Corporación Autónoma de Santander - CAS. Mapa de localización de concesiones de aguas subterráneas en el municipio de los Santos. Escala 1:100000. San Gil. 2016. 1p.

Conde Gómez, D.A., y Merchán Caballero, L.C. (2023). *Estimación del porcentaje y direcciones de anisotropía empleando sísmica de refracción en dos puntos ubicado a diferentes distancias de la Falla Potreros, Mesa de Los Santos*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/12317>

Díaz Duarte, A. J., y Duarte Tarazona, A. F. (2019). *Evaluación geofísica en rocas cretácicas sedimentarias de los municipios de Barichara, Mogotes el sector conocido como la Mesa de los Santos en el departamento de Santander, mediante sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) y sondeos eléctricos verticales (SEV)*. Tesis de Máster. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Díaz, E.; Contreras, N.M.; Pinto, J.E.; Velandia, F.; Morales, C.J.; Hincapie, G. (2009). *Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander*. Boletín de Geología.

Fossen, H. (2016). *Structural geology*. University of Bergen. Bergen, Norway.

García Arias, S. A. (2022). *Análisis estructural de la Mesa de Los Santos y redes neuronales para la estimación local de propiedades físicas de la roca*. Universidad Industrial de Santander. Tesis de Máster. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

García Arias, S. A., y Gómez García, E. A. (2015). *Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la formación Los Santos en la Mesa de Los Santos-Santander, Colombia*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Gasulla Forner, M. (1999). *Obtención de imágenes de la distribución de impedancia eléctrica del subsuelo. Aplicación de la detección de objetos locales*. Tesis doctoral. Universitat Politècnica de Catalunya. Catalunya, España.

<http://hdl.handle.net/2117/93628>

Hincapié, G. y Veloza, J. (2009). *Informe hidrogeológico de la Mesa de Los Santos*. Bogotá. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Ingeoexploraciones. (2016). *Elaboración y formulación del plan de manejo de aguas subterráneas en el sector de la mesa, municipio de Los Santos. Fase III. Reporte técnico*.

IDEAM (2019). *Estudio nacional del agua 2018*. Technical report. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ingeominas.

IDEAM (2022). *Estudio nacional del agua 2022*. Technical report. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ingeominas.

Julivert, M. (1958). *La Morfoestructura de la Zona de las Mesas al SW de Bucaramanga (Colombia S.A)*. Boletín de Geología.

Keller, G.V. and Frischknecht, F.C. (1966) *Electrical Methods in Geophysical Prospecting*. Pergamon Press, Oxford University. Oxford, England.

Kearey, P., Brooks, M., y Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration Third Edition (3rd Edition)* University of Texas. Austin, United States.

León Silvestre, L.A. (1994). *Geología Estructural*. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Loke, M. H. (1999). *A Practical Guide to 2D and 3D Surveys*. Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies.

Lowrie, W. (2007). *Fundamentals of geophysics*. Cambridge University Press. Cambridge, United Kingdom.

Morales, C.J.; Forero, H.; Rojas, N.; Alvarado, S. (2010). *Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander*. Bogotá. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Milsom, J. (2003). *Field Geophysics, third*. University College London. London, England.

Moyano Nieto, I. E. (2010). *Prospección Geoeléctrica en La Mesa de Los Santos (Santander). Procesamiento e Interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales*. Ingeominas. Bogotá, Colombia.

Orellana, E. (1982). *Prospección geoeléctrica de corriente continua*. Segunda edición. Biblioteca técnica Philips. Madrid.

Pinto, J.E.; Clavijo, J.; Gómez, S.; Gutiérrez, D.; Mora, J.P.; Rojas, N.; Adarme, I.; Aldana, S.; Contreras, N.; Díaz, E.; Melo, L.; Reátiga, G.; Rincón, M.; Vargas, C.; Morales, C.; Velandia, F.; Hincapié, G.; Forero, H.; Duarte, R.; De Bermúdez, O. (2007). *Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en la Mesa de Los Santos, sector noreste de Curití y borde occidental del macizo de Santander, departamento de Santander*. Bucaramanga. Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMINAS).

Ramsay, J. G., y Huber, M. I. (1987). *Modern structural geology. Folds and Fractures*. Geological Magazine. Cambridge University. Cambridge, England.

doi:10.1017/S0016756800010384

Roenes Mejía, D. R., Peña La Rotta, A. M., y Dominguez Rivera, I. C. (2022). *Evaluación del abatimiento de las aguas subterráneas en la Mesa de Los Santos (Santander)*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Scapozza, C., y Laigre, L. (2014). The contribution of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in Alpine dynamics geomorphology: case studies from the Swiss Alps. *Géomorphologie: relief, processus, environnement*, 20(1), 27-42.

Suarez-Burgoa, L. O. (2015). *Geonetdigitizer: Open-source code to digitalize information given in Wulff and Lambert nets*. *Boletín de Ciencias de la Tierra*, 37, 25–34. <https://doi.org/10.15446/rbct.n37.43392>

Tarazona, Y.; Vargas, M.C. (2020). *Análisis cuantitativo de sistemas de fracturas como aporte al conocimiento hidrogeológico de la zona sur de la Mesa de Los Santos, Santander - Colombia*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.

Taylor, R. W., y Fleming, A. H. (1988). *Characterizing Jointed Systems by Azimuthal Resistivity Surveys*. *Ground Water*, 26(4), 464–474. <https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.1988.tb00413.x>

Telford, W.M., Geldart, L.P. and Sheriff, R.E. (1990) Resistivity Methods. In: Applied Geophysics, 2nd Edition, Cambridge Univ. Press, Cambridge, UK, 353-358.

<https://doi.org/10.1017/cbo9781139167932.012>

Toledo Baca, J. C. (2015). *Aplicación de los métodos geoelectricos en la prospección geofísica*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.

Udosen, N. I., y George, N. J. (2018). Characterization of electrical anisotropy in North Yorkshire, England using square arrays and electrical resistivity tomography. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*.

Vargas Cáceres, M. I. (2021). *Comparación de la anisotropía de resistividad eléctrica del subsuelo fracturado en zonas aledañas a diferentes tipos de estructuras, e implicaciones hidrogeológicas para un área rural del municipio de los Santos, Santander*. Tesis de Máster. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

Velandia, F. (2017). *Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander-énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la Falla de Bucaramanga*. PhD Tesis. Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.

Velandia, F., García-Delgado, H., Zuluaga, C. A., López, J. A., Bermúdez, M. A., y Audemard M, F. A. (2020). *Present-day structural frame of the Santander Massif and Pamplona Wedge: The interaction of the Northern Andes*. *Journal of Structural Geology*, 137, 104087.

<https://doi.org/10.1016/j.jsg.2020.104087>

Velandia, F.A. (2010). *Análisis de fracturas para exploración de aguas subterráneas en el centro de Santander*. En: Hidrogeología para la gestión del recurso hídrico (pp. 149-158). Universidad de Antioquia. Medellín, Colombia.

Vergel Navarro, S., y Remolina Rivero, B. Y. (2023). *Estudio del nivel freático de la unidad acuífera del Miembro Superior de la Formación Los Santos, vereda La Fuente, municipio Los Santos del departamento de Santander, mediante los métodos geofísicos de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sísmica de Refracción*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia

. <https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14433>

Ward, D. E., Goldsmith, R., Cruz B., J., y Restrepo A., H. (1973). *Geología de los cuadrángulos H-12 Bucaramanga y H-13 Pamplona, departamento de Santander*. *Boletín Geológico*, 21(1-3), 1-134. <https://doi.org/10.32685/0120-1425/bolgeol21.1-3.1973.383>

Watson, K. A., y Barker, R. D. (1999). *Differentiating anisotropy and lateral effects using azimuthal resistivity offset Wenner soundings*. *Geophysics*, 64(3), 739-745. <https://doi.org/10.1190/1.1444583>

Wilches Sánchez, L., y Corzo Farfán, A. F. (2015). *Caracterización geoelectrica en la vereda "la esperanza" sector de la Mesa de los Santos", municipio de Piedecuesta, Santander*. Tesis de pregrado. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.

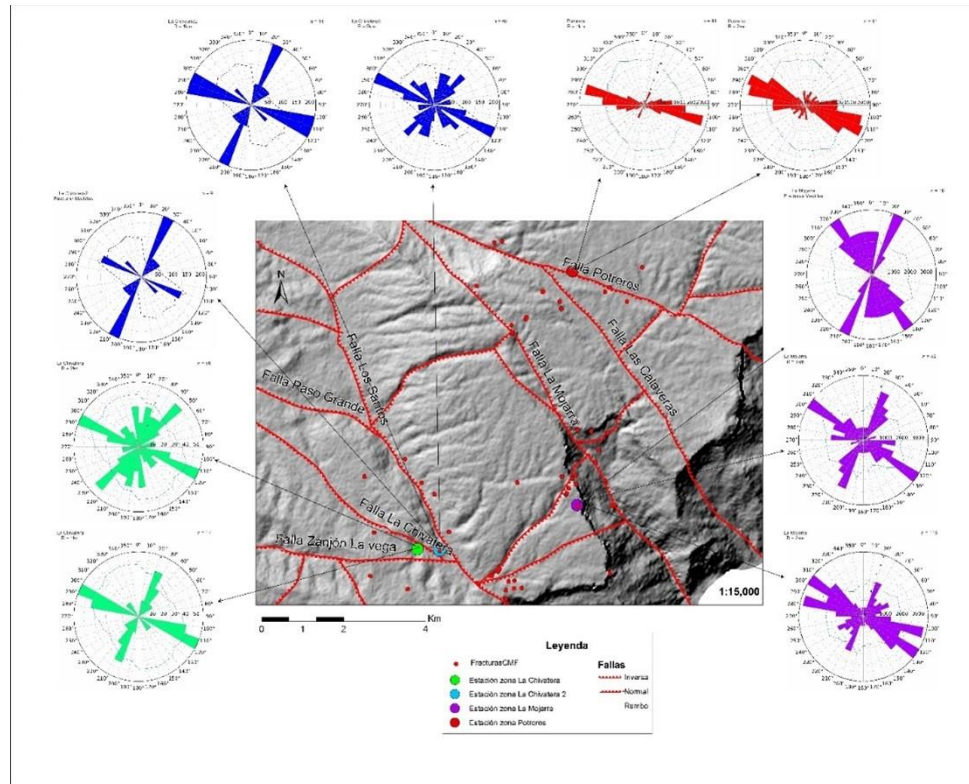
Zarate Martínez, P. S., y Moreno Moreno, J. A. (2023). *Caracterización de perfiles de meteorización del miembro superior de la Formación Los Santos y su correlación mediante modelamiento geoelectrico y de georradar en La Mesa de Los Santos*. Universidad Industrial de Santander.

<https://noesis.uis.edu.co/handle/20.500.14071/14345>

11 Apéndices

Apéndice A

Mapa de tendencias de fracturamiento relacionadas a las tendencias de valores de resistividad aparente para cada estación y su conexión con las fallas aledañas de dirección NW.



Apéndice B

Metodología, etapa de campo para la estación La Mojarra. Montaje geoelectrico.

**Apéndice C**

Metodología, etapa de campo para la estación La Mojarra. Medición fracturas.



Apéndice D

Metodología, etapa de campo para la estación Potreros. Montaje geoelectrico.



Apéndice E

Metodología, etapa de campo para la estación LaChivatera. Montaje geoelectrico



Apéndice F

Metodología, etapa de campo para la estación La Chivatera 2. Medición fracturas



Apéndice G

Metodología, etapa de campo para la estación La Chivatera 2. Montaje geoelectrico

