

COMPARACIÓN DE LA ANISOTROPÍA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUBSUELO
FRACTURADO EN ZONAS ALEDAÑAS A DIFERENTES TIPOS DE
ESTRUCTURAS, E IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS PARA UN ÁREA
RURAL DEL MUNICIPIO DE LOS SANTOS, SANTANDER.

MAYRA ISABEL VARGAS CÁCERES

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELAS DE FÍSICA Y GEOLOGÍA
MAESTRÍA EN GEOFÍSICA
BUCARAMANGA
2021

COMPARACIÓN DE LA ANISOTROPÍA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUBSUELO
FRACTURADO EN ZONAS ALEDAÑAS A DIFERENTES TIPOS DE
ESTRUCTURAS, E IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS PARA UN ÁREA
RURAL DEL MUNICIPIO DE LOS SANTOS, SANTANDER.

AUTOR:

MAYRA ISABEL VARGAS CÁCERES

Trabajo de grado para optar al título de
Magíster en Geofísica

Directora:

ROCIO BERNAL OLAYA

PhD. Geología

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

FACULTAD DE CIENCIAS

ESCUELAS DE FÍSICA Y GEOLOGÍA

MAESTRÍA EN GEOFÍSICA

BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

A Dios, a mi familia.

AGRADECIMIENTOS

A las escuelas de geología y física por la oportunidad de realizar esta maestría y el préstamo de los equipos para realizar mi investigación, a mi directora del proyecto de grado que con su valiosa orientación y paciencia me ayudó a salir adelante con este trabajo de grado, a Héctor Andrés y su familia por el apoyo para realizar las adquisiciones en campo, a mi hermana Karime por su apoyo y orientación en la escritura y revisión del documento, a mi familia por sus palabras y apoyo en los momentos más críticos.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	13
1 MARCO PROBLEMÁTICO	17
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
1.1. PREGUNTA DE INVESTIGACIÓN	19
1.1.2 HIPÓTESIS	19
1.1.3 OBJETIVOS	20
1.1.3.1 Objetivo General.....	20
1.1.3.2 Objetivos específicos.....	20
2 MARCO TEÓRICO.....	21
2.1 MARCO GEOLÓGICO	21
2.2 ANTECEDENTES	28
2.2.1 Anisotropía de Resistividad Eléctrica.	31
2.2.1.1 Anisotropía Geofísica: Sondeos Eléctricos Azimutales..	31
2.2.1.2 Anisotropía Geológica..	38
2.2.1.3 Tomografía de resistividad Eléctrica TRE.	40
2.2.1.4 Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW.....	42
2.2.2 Resistividades en la zona de estudio.	45
3 MARCO METODOLÓGICO	54
3.1 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN	54
3.1.1 Adquisición de Datos Geofísicos.	55
3.2 TRATAMIENTO DE LOS DATOS	60
3.2.1 Técnicas de procesamiento y análisis.	60
3.2.2 Interpretación, integración y análisis de los modelos obtenidos.....	63
4 RESULTADOS	64
4.1 RESULTADOS GEOLÓGICOS.....	64
4.1.1 Reconocimiento de sectores aledaños a zonas de fallas.....	64
4.1.2 Concesiones de aguas subterráneas CAS (2016).	68
4.1.3 Condominio El Bosque.	81
4.1.4 Lago Casa de Campo.....	84

4.1.5 Finca La Esperanza.....	86
4.2 RESULTADOS GEOFÍSICOS	88
4.2.1 Modelos directos..	88
4.2.2 Adquisición geofísica.....	95
4.2.2.1 Condominio El Bosque (punto de adquisición1).....	96
4.2.2.2 Lago casa de campo (punto de adquisición 2).	101
4.2.2.3 Finca La Esperanza (punto de adquisición 3).	104
4.3 ANALISIS DE LOS RESULTADOS	105
5 DISCUSIÓN	119
6 CONCLUSIONES.....	123
7 RECOMENDACIONES	125
BIBLIOGRAFIA	126
ANEXOS.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa geológico con los puntos de adquisición de geoelectrica para el presente trabajo de investigación.	25
Figura 2: Columna estratigráfica generalizada de La Mesa de Los Santos.	26
Figura 3: Tipos de fracturas según movimiento relativo de los bloques	28
Figura 4: Relación de las diaclasas (líneas punteadas) con a) fallas normales, b) fallas inversas vista de perfil y c) fallas de rumbo en vista en planta.	30
Figura 5: a) Ejemplo de zona de falla para una falla de rumbo sinextral (Gudmundsson, 2011). b) Ejemplo de deformación en una zona de falla.	31
Figura 6: Medida de la resistividad para una familia de diaclasas paralelas a partir de un arreglo cuadrado, que cuando es rotado se forma una elipse de resistividad aparente.....	33
Figura 7: Arreglo cuadrado sobre una superficie de un medio anisotrópico.	35
Figura 8: Tipos de anisotropía eléctrica en el subsuelo a diferentes escalas con resistividades transversales ρ_T y longitudinales ρ_L	38
Figura 9: Modelos de isotropía y homogeneidad del terreno	39
Figura 10: Esquema del arreglo de los electrodos relacionado con un modelo 2D y secuencia de las medidas para la construcción de un pseudoperfil.	40
Figura 11: Patrón de radiación 2D de las ondas Rayleigh generadas por una fuente puntual vertical.....	42
Figura 12: Identificación de parámetros con base en la dispersión geométrica....	44
Figura 13: Mapa de bloques estructurales con los diagramas de rosa de las fracturas medidas.	46
Figura 14: Mapa de distribución de diaclasas abiertas y cerradas.....	47
Figura 15: Mapa de densidad de fracturas	49
Figura 16: Mapa de distribución de rangos de buzamiento de las diaclasas	52
Figura 17: Esquema del arreglo para los Sondeos Azimutales y su rotación.	56
Figura 18: Esquema de la configuración Wenner alfa para la adquisición de los datos de los sondeos eléctricos co - lineales.....	57

Figura 20: Equipo para la toma de datos de geoeléctrica en campo: a) consola del Tomógrafo Flash-RES UNIVERSAL 96, b) tendido del cableado del tomógrafo y c) electrodos de corriente y de potencial, d) consola del equipo de los sondeos eléctricos ABEM Terrameter SAS 1000 y e) cableado, pinzas y electrodos del ABEM y f) Terralog de ABEM para adquisición de datos sísmicos MASW.....	58
Figura 21: vista esquemática de un equipo de campo, geófonos, fuente sísmica, sismógrafo y onda Rayleigh propagándose.....	60
Figura 22: Esquema de adquisición y procesamiento de los datos de TRE	61
Figura 23: Procedimiento de adquisición, procesamiento e inversión de los datos de MASW.....	63
Figura 24: Vista panorámica del trazo de la falla La Lejía..	65
Figura 25: Areniscas cuarzosas de grano medio al norte de la zona de estudio ..	65
Figura 26: Areniscas del miembro superior de la Formación Los Santos hacia el sur de la zona de estudio fragmento del mapa geológico de la figura 1.	66
Figura 27: Panorámica de la falla La Mojarra, al sur de La Mesa de Los Santos. J1-2j formación Jordán, K1ls formación Los Santos.	67
Figura 28: Panorámica de la falla Potreros (normal dextral) hacia el sur de la zona de estudio	67
Figura 29: Punto de adquisición geofísica para el sector El Bosque.	81
Figura 30: a) Perfil del suelo arcilloso erosionado, con presencia de surcos, b) escala de la erosión del suelo principalmente arcilloso.	83
Figura 31: Correlación litológica de pozos perforados de concesiones de aguas cercanos al sector El Bosque.	83
Figura 32: Punto de adquisición geofísica para el sector Lago casa de campo. ..	84
Figura 33: Correlación litológica de pozos para el punto casa de campo.	86
Figura 34: Vista panorámica desde el extremo E de la quebrada El Barbón hacia el sur del punto de adquisición	87
Figura 35: Areniscas cuarzosas con presencia de óxidos, en laminación plano paralela.	87
Figura 36: vista al NW del punto de adquisición La Esperanza	87

Figura 37: Parámetros empleados de cálculo del modelo inverso.....	91
Figura 38: Modelo conceptual de capas horizontales.....	91
Figura 39: inversión del modelo conceptual obtenido.....	92
Figura 40: Modelo conceptual para un caso de zonas fracturadas de diferentes resistividades	93
Figura 41: Modelo de la inversión generada para el caso de un medio heterogéneo y anisotrópico.....	93
Figura 42: Diagramas polares con los valores de resistividades calculados para el punto Lago casa de campo (a) y Bosque (b)	94
Figura 43: Centro de la consola del equipo SEV para el arreglo cuadrado.....	96
Figura 44: Imagen TIF del punto El Bosque.	96
Figura 45: TRE A-A' paralela y B-B' perpendicular a la falla inversa a) vista en dirección N y b) vista en dirección NE la estrella indica la posición de sondeo azimuthal cuadrado y co – lineal, donde la línea roja del eje de coordenadas indica el norte.....	98
Figura 46: Perfil 2D MASW en dirección de la TRE A-A'	98
Figura 47: Perfil MASW 1D obtenido para una distancia de 33 metros.	99
Figura 48: Diagrama Polar vs diagrama de rosetas realizado por Vargas (2008) para el sector El Bosque.....	100
Figura 49: TRE C-C' perpendicular y D-D' paralela a la falla normal, la estrella indica la posición del centro del arreglo cuadrado y SEV.	102
Figura 50 Sondeo eléctrico azimuthal punto Lago Casa de Campo vs diagrama de rosetas obtenido por Vargas, (2008).	102
Figura 51: TRE E-E' y F-F' en dirección paralela a la falla El Barbón.....	104
Figura 52: a) Sección de la falla de Bucaramanga (Ward et al. (1977b), Pulido (1985), y Gómez et al. (2015) en Velandia (2017)),(b) dirección de los esfuerzos a escala regional (Woodcock y Shubert (1994) en Davis et al. (2012), citados en Velandia, (2017), c) Ubicación del punto El Bosque (punto 1) y Casa de Campo (punto 2) tomado del mapa geológico de la figura 1, y d) orientación de las fracturas	

para una falla de rumbo, para el caso de la adquisición del punto 2 tomado de Martínez, 2002.....	106
Figura 53: Correlación de la TRE A-A' con las litologías presentes en la zona ..	107
Figura 54: Correlación de la TRE B-B' con las litologías presentes en la zona. .	108
Figura 55: Correlación de la TRE D-D' con las litologías presentes en la zona..	109
Figura 56: Correlación de la TRE C-C' con las litologías presentes en la zona. .	110
Figura 57: Inversión de la TRE C-C' con el software Res2Dinv convertida a Schlumberger	111
Figura 58: SEV ortogonales para el sector del Bosque	112
Figura 59: Interpretación del SEV para el punto El Bosque azimuth 45° (izquierda) y 315° (derecha).	113
Figura 60: SEV ortogonales para el sector Lago casa de campo	114
Figura 61: SEV para el punto Lago casa de campo azimuth 45° (izquierda) y 315 (derecha)	115
Figura 62: Perfil MASW 1D A-A'	116
Figura 63: Correlación de los perfiles de MASW y TRE A-A' de acuerdo con las litologías presentes.	117

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Valores típicos de V_p y V_s para distintos tipos de rocas a profundidades someras. (Foti et al., 2015)	44
Tabla 2: Relación del largo del centro del arreglo a los electrodos VS profundidad de adquisición para el punto 1 y 2.	57
Tabla 3: Nombres de los pozos para concesiones de aguas subterráneas con descripciones de pozos disponibles.	69
Tabla 4: Descripción de los pozos para concesiones de aguas tomadas de la CAS al 2016.	70
Tabla 5: Secuencia estratigráfica utilizada para la generación de los modelos directos.	89
Tabla 6: Parámetros de anisotropía y homogeneidad para el punto El Bosque. .	101
Tabla 7: Parámetros de anisotropía y homogeneidad para el punto Lago Casa de Campo.	103

RESUMEN

TÍTULO: COMPARACIÓN DE LA ANISOTROPÍA DE LA RESISTIVIDAD DEL SUBSUELO FRACTURADO EN ZONAS ALEDAÑAS A DIFERENTES TIPOS DE ESTRUCTURAS, E IMPLICACIONES HIDROGEOLÓGICAS PARA UN ÁREA RURAL DEL MUNICIPIO DE LOS SANTOS, SANTANDER.*

AUTOR: MAYRA ISABEL VARGAS CÁCERES.**

PALABRAS CLAVE: PROSPECCIÓN GEOFÍSICA, RESISTIVIDAD, SONDEO ELÉCTRICO VERTICAL AZIMUTAL, HIDROGEOLOGÍA, ROCAS FRACTURADAS.

La zona de estudio se ubica en La Mesa de Los Santos, Santander, caracterizada por presentar una geomorfología de altiplanicie con escarpes en los extremos. Estructuralmente se presentan fallas menores con direcciones NW (normales) y NE (inversas) que cortan formaciones geológicas del Ordovícico (Silgará), Jurásico (Jordán) y Cretácico (miembros superior, medio e inferior de la Formación Los Santos, Rosablanca, Paja y Tablazo) con buzamientos casi horizontales. El objetivo general es comparar la anisotropía de la resistividad del subsuelo fracturado para determinar sus implicaciones hidrogeológicas en el miembro superior de la Formación Los Santos en zonas cercanas a diferentes tipos de fallas. Se analizó información estructural preliminar de la zona y trabajos previos indicadores de que esta formación es la que tiene mejor potencial hidrogeológico. Se utilizaron las técnicas de Sondeos Eléctricos Azimutales y Colineales, Tomografías de Resistividad Eléctrica - TRE, y MASW – Multichannel Analysis of Surface Waves. Así, se identificó que el tipo de estructura más favorable para la acumulación de agua subterránea corresponde a las fallas normales con componente de rumbo con rangos de resistividad que indican saturación de aguas en las rocas, generalmente valores menores a los 1000 ohm*m, aunque también asociados a litologías como las arcillas y limos. Los resultados obtenidos y su interpretación, permitirá aumentar el conocimiento del potencial hídrico y se constituirá en un aporte de información de calidad con un impacto social en el área de estudio.

Trabajo de grado para optar por el título de magister en Geofísica

**Facultades de ciencias e ingenierías físico químicas. Escuela de física y geología: Directora Rocío Bernal Olaya, PhD Geología.

ABSTRACT

TITLE: COMPARISON OF THE ANISOTROPY OF THE RESISTIVITY OF THE FRACTURED BEDROCK NEAR TO AREAS TO DIFFERENT TYPES OF STRUCTURES, AND HYDROGEOLOGICAL IMPLICATIONS FOR A RURAL AREA OF LOS SANTOS TOWN, SANTANDER.*

AUTHOR: MAYRA ISABEL VARGAS CÁCERES.**

KEY WORDS: GEOPHYSICAL SURVEY, RESISTIVITY, AZIMUTHAL VERTICAL ELECTRICAL SOUNDING, HYDROGEOLOGY, FRACTURE BEDROCK.

The study area is located at La Mesa de Los Santos, Santander, characterized by presenting a plateau geomorphology with escarpments at the ends. Structurally there are minor faults with NW (normal) and NE (reversed) directions that cut geological formations of the Ordovician (Silgará), Jurassic (Jordan) and Cretaceous (upper, middle and lower members of the Los Santos, Rosablanca, Paja and Tablazo Formations) with almost horizontal dips. The main aim is to compare the anisotropy of the resistivity of the fractured bedrock to determine its hydrogeological implications in the upper member of the Los Santos Formation in areas close to different types of faults. Preliminary structural information of the area and previous work indicating that this formation is the one with the best hydrogeological potential was analyzed. The techniques of Azimuthal and Collinear Electrical Soundings, Electrical Resistivity Tomographs - TRE, and MASW - Multichannel Analysis of Surface Waves were used. Thus, it was identified that the most favorable type of structure for the accumulation of groundwater corresponds to normal faults with a heading component with resistivity ranges that indicate water saturation in the rocks, generally values less than 1000 ohm * m, although also associated with lithologies such as clays and silts. The results obtained and their interpretation will allow to increase the knowledge of the water potential and will constitute a contribution of quality information with a social impact in the study area.

Research project to opt for the master's degree in Geophysics

** Faculties of physical-chemical science and engineering. School of Physics and Geology: Director Rocío Bernal Olaya, PhD Geology.

INTRODUCCIÓN

El presente trabajo de investigación se realizó como parte del programa de la maestría en Geofísica de la Universidad Industrial de Santander UIS y se encuentra inscrito al grupo de investigación ENERGY AND OTHER NON RENEWABLE RESOURCES RESEARCH GROUP de la Escuela de Geología de la misma universidad.

El agua es un recurso indispensable para la vida y el desarrollo humano; sin embargo, en La Mesa de Los Santos, punto central de estudio de este proyecto, la mayoría de las fuentes de agua son subterráneas (Corporación Autonoma Regional de Santander - CAS., 2016) y por lo tanto la única fuente de consumo son pozos de explotación. No obstante, son escasos los estudios que determinen los puntos exactos de recarga de los acuíferos; de aquí la importancia de los estudios geofísicos, como el presente, que contribuyan en la identificación de estos lugares exactos. Desde los estudios geoelectrónica, se parte del hecho según el cual las fallas están asociadas directamente con el favorecimiento del flujo del recurso (Watson y Barker, 1999).

Esta investigación se realizó en el sector rural del municipio de Los Santos en zonas ubicadas en los bloques estructurales definidos por Vargas (2008) de La Mojarra y El Tabacal ubicados hacia el centro y norte de la zona de estudio. En estos, la CAS (2016) mostró el mayor número de concesiones de aguas subterránea, y además INGEOMINAS - UIS (2007) identificaron que es en estas zonas donde se encuentra el miembro superior de la formación Los Santos, definido como unidad hidrolitológica importante por sus características texturales, principalmente. En este trabajo se utilizó la geoelectrónica, debido a que con esta técnica se pueden identificar cambios de resistividades con facilidad, y ha sido utilizada por varios autores con fines hidrogeológicos (Taylor y Flemming, 1988, Busby, 2000, INGEOMINAS, 2010, entre otros). Por lo tanto, el objetivo central de este proyecto es comparar la

anisotropía de la resistividad del miembro superior de la Formación Los Santos en zonas aledañas en una falla normal y una inversa para estimar su escala, y la dirección de la anisotropía de resistividad para las diferentes estructuras en los sectores determinados de La Mesa de Los Santos.

Esta comparación se realizó con el fin de evaluar las implicaciones hidrogeológicas de las diferentes estructuras en los sectores norte y central de La Mesa de Los Santos, a través de técnicas como los sondeos eléctricos azimutales, colineales, tomografías de resistividad eléctricas y técnica de multicanal de registros de campo - MASW. Para este fin, se desarrollaron cuatro capítulos en los cuales se describen el problema, los antecedentes, los datos adquiridos, el procesamiento efectuado y los resultados encontrados.

El primer capítulo corresponde al marco problemático, donde se establece el principal problema de investigación que consiste en determinar si existe una dirección preferencial de anomalía de resistividad pronosticada a partir del análisis estructural de las fallas que aparecen en el mapa geológico realizado por INGEOMINAS – UIS (2007), y los interrogantes menores que surgen, a saber: establecer qué tipo de falla geológica favorece más el flujo de aguas subterráneas, y cuál es el rango de valores de resistividad del subsuelo, de diferentes zonas fracturadas, que permiten estimar una alta saturación de agua subterránea en el miembro superior de la Formación Los Santos para la zona de estudio.

En el segundo capítulo se presenta el marco teórico donde se muestra la geología de la zona de trabajo, y los principales trabajos de investigación que se han llevado a cabo en la zona, relacionados con el método de la geoeléctrica. Aquí se define cuáles han sido los valores promedio de resistividades que son asociadas a las aguas subterráneas, también se identifican los pozos perforados para concesiones de aguas subterráneas de la CAS, (2016) en la zona y la descripción de las litologías

presentes, además de la relación de las unidades hidrogeológicas descritas en otros trabajos.

En el tercer capítulo se describe el marco metodológico para la obtención de los modelos directos de resistividad de manera preliminar en dos modelos generalizados de la zona. De igual modo se describe el proceso de adquisición de los datos y su debido procesamiento con el software de inversión. Los datos fueron adquiridos con diferentes técnicas geoeléctricas: sondeos eléctricos azimutales (los cuales son una variación de la técnica de los sondeos eléctricos co-lineales) empleados para determinar la anisotropía de resistividad de rocas, sondeos eléctricos co-lineales, utilizados para identificar la profundidad del nivel freático y la correlación de las rocas en profundidad, y tomografías de resistividad eléctrica para la identificación de zonas saturadas de agua. Además, se realizó la adquisición con la técnica sísmica Multichannel Analysis of Surface Waves - MASW en el sector El Bosque, para determinar a partir de las velocidades de las ondas S, un modelo de capas en profundidad correlacionable con los perfiles geológicos obtenidos de los pozos de perforación.

Finalmente, en el cuarto capítulo se presentan los diferentes resultados obtenidos de las visitas de campo que se llevaron a cabo para el procesamiento y la obtención de los modelos directos y la adquisición geofísica. Primero se muestran los puntos del recorrido que se hizo para lograr identificar otras zonas cercanas a fallas principales donde se pudieran realizar las adquisiciones geofísicas y también para identificar las características de las litologías en estos lugares. Luego se muestran los resultados de los modelos directos en los que se evalúan los valores de resistividad que se esperan encontrar para dos situaciones generalizadas de la zona de estudio y los resultados geofísicos de los sondeos eléctricos azimutales, co-lineales, tomografías de resistividad eléctrica y MASW.

MARCO PROBLEMÁTICO

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El agua es un factor que se encuentra presente en la agenda científica y política de todos los países del mundo por ser un recurso imprescindible para la sostenibilidad humana. De acuerdo con el trabajo de Davis y Wiest (1971) el 0.33% de agua dulce en el mundo se encuentra como aguas subterráneas. Gran parte del conocimiento necesario para el correcto aprovechamiento de este recurso se genera a través de modelos, entre ellos los hidrogeológicos conceptuales. Estos modelos integran una evaluación geológica, geofísica, hidrológica, hidrogeológica, hidrogeoquímica e hidráulica (IDEAM, 2014). La evaluación geofísica de las áreas de estudio se hace comúnmente con el uso de la geoeléctrica, disciplina que a partir de datos de resistividades (propiedad física que depende principalmente de la saturación de agua del subsuelo, además de otras características) permite la exploración de acuíferos pues facilita la identificación de zonas saturadas de agua.

Las fallas geológicas son elementos de escala regional que pueden llegar a tener decenas de kilómetros de longitud, que pueden favorecer o no el flujo de aguas subterráneas y además, la recarga de los acuíferos al crear porosidad adicional a la de la roca que permite infiltración (INGEOMINAS - UIS, 2007 en Díaz *et al.*, 2009, Sarpong, Gyasi y Fofie, 2015; Guzmán Romero, 2014). La porosidad secundaria generada en zonas de falla, en areniscas, puede involucrar una “banda de falla” (de algunos mm o m de ancho) o una zona de bandas de falla, con extensiones del orden de los metros o decenas de metros (Antonellini y Aydin, 1995; Rawling, Goodwin, y Wilson, 2001). De acuerdo con Gudmundson (2011) las zonas de falla tienen dos principales componentes: el núcleo de la falla y la zona de daño, la orientación de las zonas de falla puede ir paralelas, oblicuas o perpendiculares al esfuerzo principal, dependiendo de cómo se acomode la deformación, además la

zona de mayor deformación generalmente corresponde a la zona donde hay mayor desplazamiento. En el caso de rocas estratificadas las zonas de falla pueden seguir el plano de estratificación (Martínez Catalán, 2002) o generar rampas que cortan estos planos. Al generar contrastes de porosidad y permeabilidad que pueden o no presentar saturación de aguas, las fracturas asociadas a las zonas de falla pueden generar anisotropías de resistividad cuya orientación depende de la orientación de la zona de falla (Caine, 1996).

En área rural del municipio de Los Santos se ha identificado que las precipitaciones son uno de los mecanismos de recarga de las aguas subterráneas (INGEOMINAS, 1970); sin embargo, de acuerdo con el Esquema de Ordenamiento Territorial (EOT) del municipio de Los Santos, (2003) estas son escasas. Sin tener zonas de mayor precipitación, y con la necesidad de identificar zonas exactas de recarga de los acuíferos de explotación, se desconoce si estas zonas pueden ser favorecidas por las fallas y las fracturas presentes haciendo que cada litología presente en los sectores estudiados en esta investigación se comporte como un acuífero fracturado, libre, confinado o acuitardo.

De acuerdo con el trabajo de INGEOMINAS – UIS, (2007) es el miembro superior de la Formación los Santos el que presenta el mayor interés hidrogeológico en la zona de interés debido a su porosidad primaria y secundaria (alta densidad de fracturamiento) comportándose como acuífero libre y fracturado en zonas cercanas a las fallas).

Los valores de anisotropía de resistividad dependen de factores geológicos como los cambios litológicos y la presencia de fracturas, lo que hace de la resistividad una potencial herramienta para la estimación de la dirección preferencial de estos rasgos a profundidad. Adicionalmente, la disponibilidad de mediciones publicadas en casos de estudio permite calibrar los valores de resistividad para identificar posibles saturaciones de agua, lo que facilita la determinación de los sistemas de

fracturas con mayor posibilidad de existencia de infiltración y flujo de agua a partir de mediciones geoléticas.

Es para el miembro superior de la Formación Los Santos, en zonas cercanas a fallas del tipo inversa y normal en los sectores central y norte de La Mesa, donde se presenta mayor interés de estudio de este trabajo. Además, esta zona es donde se encuentran la mayor cantidad de concesiones de aguas subterráneas según CAS 2016.

1.1.1 Pregunta de investigación. Aunque son múltiples las preguntas que se generan, hacemos énfasis en dos de ellas: ¿Existe una dirección preferencial de anomalía de resistividad para cada tipo de falla que permita pronosticar su escala y una dirección de fracturamiento a partir de las medidas de resistividad en campo? y ¿Cuáles son las semejanzas y diferencias de la anisotropía de resistividad del subsuelo fracturado en zonas aledañas a diferentes tipos de estructuras?

1.1.2 Hipótesis. De acuerdo con trabajos anteriores las litologías en la zona de interés y los registros litológicos de las concesiones de aguas solicitadas a la CAS (profundidades entre los 80 y 90 m) corresponden a la Formación Los Santos, cuyas capas son subparalelas, y donde los acuíferos ocurren en capas de areniscas con alternancias de arcillolitas, cuyo espesor de las alternancias es de 2 y 3 m de espesor. A partir de esta descripción se plantean las siguientes hipótesis:

- En zonas donde la densidad de fracturas es media y baja, los valores bajos de resistividad permitirán identificar las zonas de mejor conectividad entre fracturas y si se encuentra circulación y/o almacenamiento de agua.
- Si el tensor actual de esfuerzo máximo compresional regional presenta una dirección NS, como lo ha documentado Vargas, (2008) y que la zona se encuentra influenciada por la falla Bucaramanga, la cual en su extremo sur tiene una dirección de esuerzo NW de acuerdo con Velandia (2017) se

espera que la dirección de las fracturas abiertas sea la misma para los tipos de falla evaluadas en la zona de estudio, posiblemente NW.

- En zonas cercanas a las fallas con componente de rumbo, donde se encuentra mayor conectividad de las fracturas según el modelo de Riedel, se encontrarán los valores más bajos de resistividades en las TRE y en los SEV.

1.1.3 Objetivos

1.1.3.1 Objetivo General. Comparar la anisotropía de la resistividad del miembro superior de la Formación Los Santos en zonas aledañas a una falla normal y una inversa, para estimar su escala y la dirección de la anisotropía de resistividad para las diferentes estructuras en los sectores determinados de La Mesa de Los Santos.

1.1.3.2 Objetivos específicos:

- Caracterizar geológicamente el terreno mediante descripciones litológicas de los pozos de explotación y geología estructural a partir de trabajos previos.
- Evaluar a través de un modelo directo las direcciones de las anomalías y valores teóricos de resistividad que se esperan encontrar en los puntos de interés.
- Identificar cuál de las fallas de mayor importancia geológica en la región favorece más el flujo de aguas subterráneas en el sector.

MARCO TEÓRICO

1.2 MARCO GEOLÓGICO

La zona de interés se encuentra localizada en el nororiente de Colombia sobre la Cordillera Oriental en el departamento de Santander y corresponde al área rural del municipio de Los Santos. Se encuentra limitada hacia el norte por los municipios de Girón y Piedecuesta, y hacia el sur por el río Sogamoso y Río Chicamocha. En el área afloran rocas con edades desde el pre-Devónico hasta el Cuaternario del tipo ígneas, metamórficas, sedimentarias y depósitos sedimentarios. La Mesa presenta una topografía casi horizontal, hacia el NE se presentan las topografías más altas aproximadamente 1700 msnm y hacia el SW las más bajas promedio 1200 msnm como se identifica en la **Figura 1**, y además los estratos presentan un buzamiento muy suave menor a 20° hacia el SW.

Estructuralmente el área se encuentra limitada por las fallas principales así: al W por la Falla del Suárez (inversa de alto ángulo - (INGEOMINAS - UIS, 2007), al E por la Falla de Bucaramanga (de rumbo sinextral con desplazamiento entre 18 y 30 km hacia el sur de Bucaramanga, y con dirección del tensor de esfuerzo máximo en dirección NW-SE (Velandia, 2017)) y al N la falla Los Montes (de tipo inversa con desplazamiento dextral, (Vargas, 2008). Además, se presentan fallas con tres direcciones principales así: NW casi paralelas, NE y fallas menores EW. Los patrones de diaclasamiento condicionan la porosidad secundaria y consecuentemente, según su permeabilidad, la dirección del flujo. Estas estructuras permiten la recarga de acuíferos si las fracturas se encuentran interconectadas y llegan hasta superficie (INGEOMINAS - UIS, 2007) en Díaz *et al*, 2009). (ver **Figura 1**)

En concordancia con el trabajo de Díaz *et al.*, (2009) a continuación se describen las unidades litológicas mostradas en la **Figura 1** y sus características hidrogeológicas, determinadas y relacionadas a partir de la composición, textura, porosidad y permeabilidad, y se relacionan en la **Figura 2**.

✓ Rocas metamórficas:

Formación Silgará: compuesta por esquistos micáceos cloríticos con granate y textura lepidoblástica. Presenta bajo fracturamiento y baja porosidad primaria asociada a los planos de esquistocidad.

✓ Rocas ígneas:

Granito de Pescadero: constituido por rocas de composición granítica, con textura porfirítica a afanítica y por pegmatitas. Se puede dividir en dos regiones según su porosidad secundaria: al NE con una densidad alta de fracturas asociadas a tectónica, y la segunda al SE con baja porosidad secundaria.

✓ Rocas sedimentarias

Siguiendo el trabajo de Díaz *et al.*, (2009), se encuentra que las rocas sedimentarias presentes en el área de trabajo son las siguientes descritas de base a techo por estos autores así:

Formación Jordán: presenta dos zonas con litologías definidas, la primera al NE constituida por limolitas con contenido de carbonatos, alternadas con areniscas limosas de grano fino y conglomerados líticos hacia la base, su porosidad primaria intra - partícula es baja, pero su porosidad secundaria es alta debido a las fracturas abiertas con dirección NW-SE. La segunda zona ubicada al SE, está constituida por limolitas con contenido de carbonatos, alternadas con areniscas limosas a arcillosas

de grano fino muy cementadas. Presenta un grado alto de fracturamiento, pero la mayoría de las diaclasas se encuentran cerradas y llenas de carbonatos (Díaz *et al.*, 2009).

Formación Girón: Aflora hacia el norte de la Mesa de Los Santos, constituida por areniscas conglomeráticas y conglomerados de color gris amarillento a pardo rojizo, masivos y lenticulares. Presenta alta porosidad primaria en los niveles conglomeráticos y altamente fracturada (INGEOMINAS - UIS, 2007).

Formación Los Santos: corresponde a la formación de mayor extensión en el área. Generalmente se constituye de base a techo por conglomerados y areniscas conglomeráticas alternadas con areniscas finas y limolitas, limolitas y arcillolitas alternadas con areniscas de grano fino a muy fino con delgadas capas de limolitas y arcillolitas hacia el techo. Esta formación se subdivide en tres miembros así, y es descrita de acuerdo con la columna estratigráfica detallada de la vereda El Carrizal realizada por (INGEOMINAS - UIS, 2007) y se muestra en el anexo A del presente trabajo:

- Miembro inferior: tiene un espesor de 50 m en el sector de la columna levantada en El Carrizal. Hacia la base se encuentran alternancias de conglomerados arcillo arenosos con areniscas conglomeráticas arcillo arenosas. Hacia el tope se observan areniscas de grano fino a muy grueso con alternancias de areniscas conglomeráticas y conglomerados. Este miembro presenta alto contenido de matriz arcillo arenosa de composición lítica que disminuye su porosidad y permeabilidad primaria. Este miembro presenta un cambio facial hacia el SW de La Mesa donde se compone de areniscas cuarzosas de grano medio a muy grueso (INGEOMINAS - UIS, 2007).
- Miembro medio: espesor de 47 m en el sector de la columna levantada en El Carrizal. Constituido por areniscas de grano muy fino a fino, alternadas con

capas de arcillolita a limolita con illita. Hacia el tope se encuentran areniscas de grano fino a muy fino con capas medias de arcillolita.

- Miembro superior: espesor de 33 m en el sector de la columna levantada en El Carrizal. Hacia la base se constituye por capas medias de areniscas de grano fino, con algunas alternancias de areniscas de grano grueso. Hacia el techo hay ocurrencia de capas medias de areniscas de grano medio alternadas con capas finas de areniscas de grano fino. La disminución de la permeabilidad de esta formación hacia el N, se asocia al contenido de arcilla en la matriz; hacia el E y W presenta permeabilidad media, y porosidad secundaria asociada al fracturamiento.

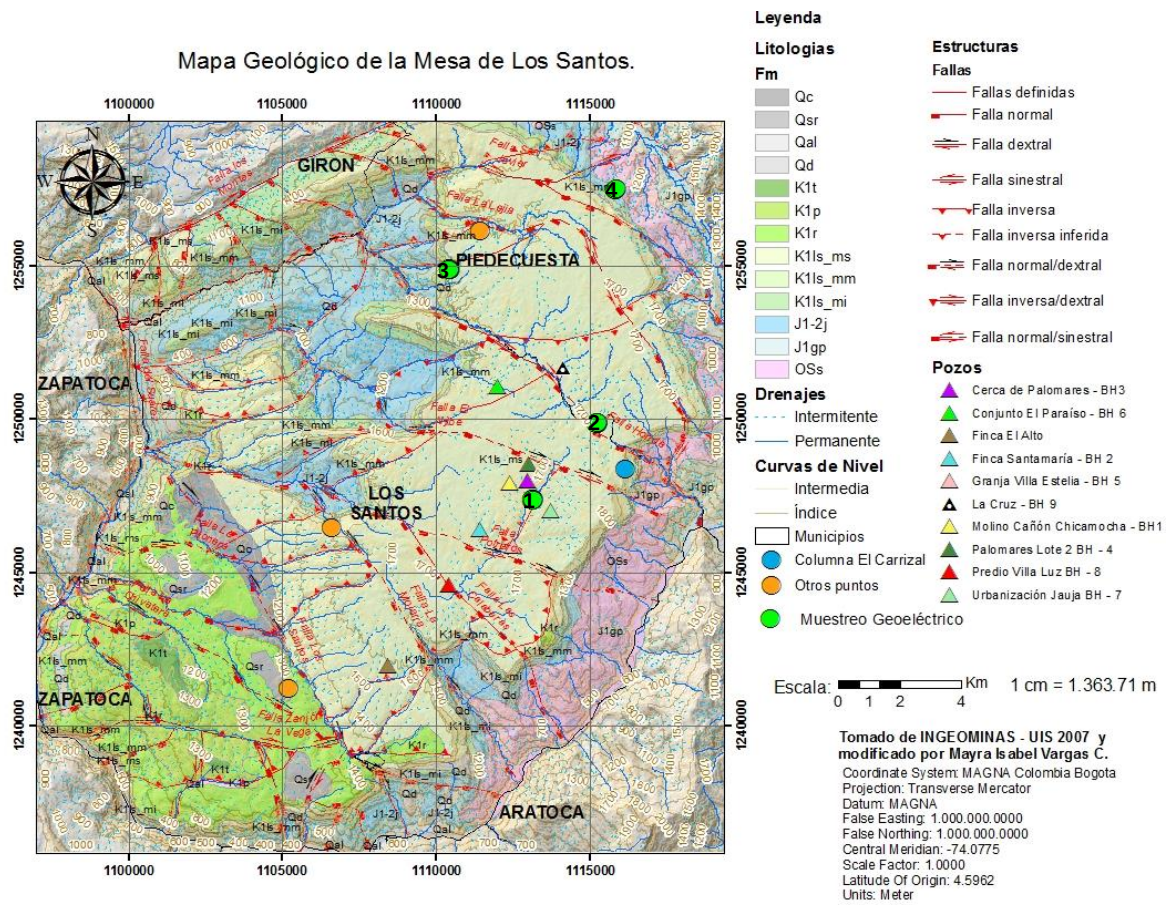
El espesor de esta formación es de más de 200m hacia el oeste, y de 120m hacia el este, y además es variable en todo el sector de La Mesa (INGEOMINAS - UIS, 2007).

Díaz (2008) relaciona el potencial hidrogeológico con las características litoestratigráficas definidas a partir del levantamiento de columnas estratigráficas, análisis petrográficos de las unidades presentes en la zona de trabajo, e interpretación de Difracción de Rayos X y microscopía de barrido SEM para los tres miembros de la Formación Los Santos. Indica que el miembro superior de la Formación Los Santos es el de mayor extensión areal, aflora en las regiones topográficamente más altas (ver **Figura 1**) y hacia el suroeste en las regiones de menor altura del sector de estudio, y es el que presenta mayor potencial hidrogeológico debido a su porosidad primaria y fracturamiento producto de la tectónica local y regional, comparado con las demás formaciones aflorantes en el área. También reporta que, aunque el miembro inferior presente porosidad primaria baja, su permeabilidad aumenta por fracturamiento de la roca. Esta autora define el miembro medio de la Formación Los Santos, además de las Formaciones Paja y Tablazo sin interés hidrogeológico debido a su baja porosidad y permeabilidad.

Formación Rosablanca: Se encuentra constituida de base a techo por capas muy gruesas de calizas con capas delgadas a medias de limolitas calcáreas, capas medias de limolitas calcáreas con calizas y capas gruesas de arenisca de grano fino a medio ferruginosas, alternadas con capas delgadas a medias de calizas, y capas delgadas a medias de arcillolitas calcáreas. La porosidad primaria de las areniscas de esta formación es baja debido a que está rellena de arcilla. Su porosidad por fracturamiento es baja, de manera similar las calizas presentan porosidades secundarias bajas (Díaz *et al*, 2009).

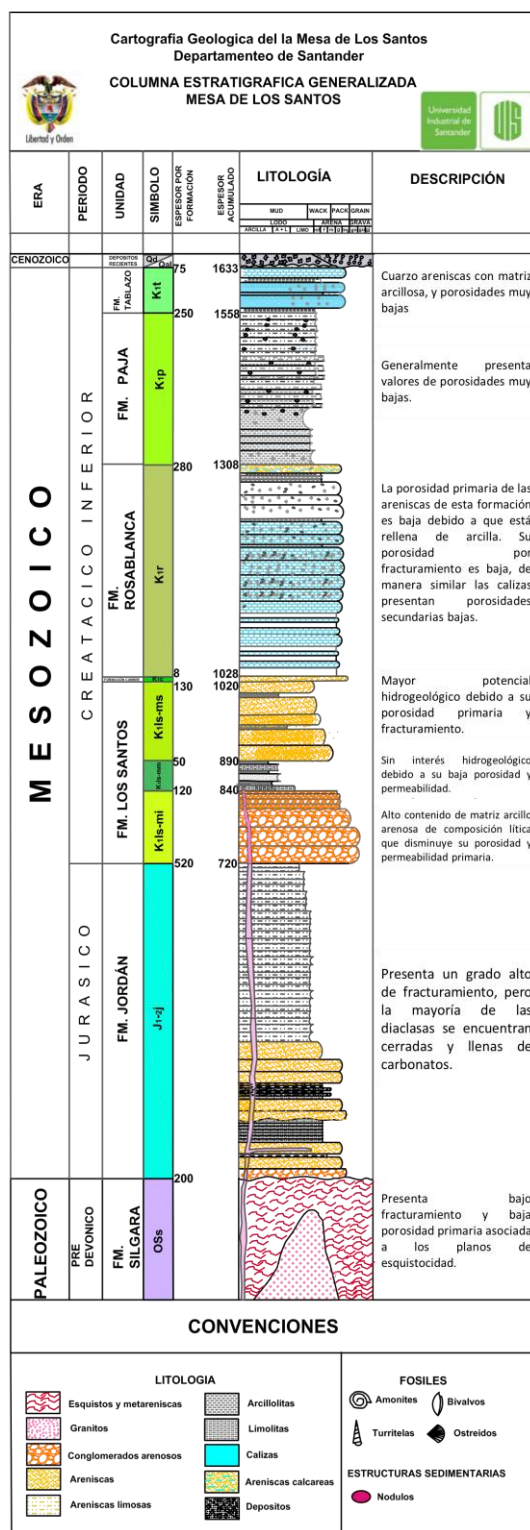
Depósitos Cuaternarios: se encuentran representados por terrazas a lo largo de los principales ríos, y se constituyen por limos asociados a la Formación Jordán y cantos y bloques de la formación Los Santos (Díaz *et al*, 2009), además de depósitos coluviales

Figura 1: Mapa geológico con los puntos de adquisición de geoelectrica para el presente trabajo de investigación. 1 Condominio El Bosque, 2 Lago Casa de campo, 3 Finca La Esperanza, 4 San Martín y con los datos de los pozos profundos presentados ante la CAS BH1 Cañón Chicamocha, BH 2 Santa María, BH 3 Cerca de Palomares, BH 4 Palomares lote 2, BH 5 Villa Estelia, BH 6 El paraíso, BH 7 Jauja, BH 8 Villa Luz, y BH 9 La Cruz, y en azul se ubican los otros puntos muestreados geológicamente. Litologías: Qc: Cuaternario coluvial Qal: Cuaternario aluvial, Qd: cuaternario derrubio, K1t: Formación Tablazo, K1p: Formación Paja, K1r: Formación Rosablanca, K1ls_ms: Formación Los Santos miembro superior, K1ls_mm: Formación Los Santos miembro medio, K1ls_mi: Formación Los Santos miembro inferior, J1-2j: Formación Jordan, J1gp: Granito de Pescadero, OSs: Formación Silgará.



Fuente: Tomado y modificado de (INGEOMINAS - UIS, 2007) y. Esquema de Ordenamiento Territorial de Los Santos – EOT (2018)

Figura 2: Columna estratigráfica generalizada de La Mesa de Los Santos.



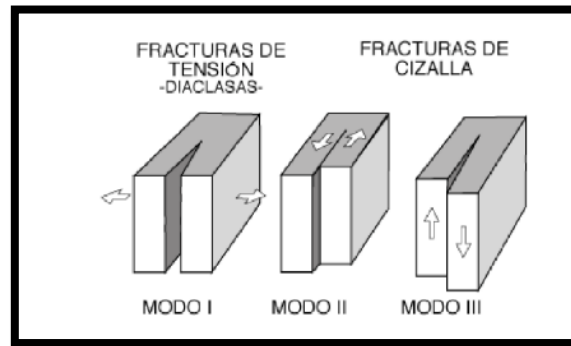
Fuente: tomada y modificada de Vargas, (2008).

1.3 ANTECEDENTES

Regionalmente se han realizado varios estudios que relacionan el potencial hidrogeológico de las rocas en el área, y recientemente algunos que relacionan datos de adquisición geofísica y modelos de resistividades.

En principio, se ha sugerido generalmente que las fracturas son generadas dentro del campo de esfuerzos activo siendo comunes en la corteza. Los esfuerzos que pueden generar fracturas son normales y de cizalla (ver **Figura 3**). Las fracturas de tensión abiertas (modo I) ocurren en dirección perpendicular al máximo esfuerzo tensional a profundidades menores de 1 km (Martínez, 2002 y Gudmundsson, 2011). En estas fracturas puede o no haber fluidos hidrotermales que acompañen el proceso de formación de estas. Por otro lado, las fracturas de cizalla (modos II y III) permiten un desplazamiento en dirección paralela al plano de fractura. De acuerdo con Martínez (2002) el tipo de fractura de cizalla más conocida son los distintos tipos de fallas y estas pueden generarse a cualquier profundidad en la corteza. En el manto, en cambio, reciben el nombre de fallas sismogénicas y son relacionadas con los terremotos (Gudmundsson, 2011). La clasificación de las fallas depende de la dirección del movimiento de los bloques que esta pone en contacto (Gudmundsson, 2011). De acuerdo con la orientación de los planos de falla con respecto a los esfuerzos principales pueden generarse fallas normales, inversas y de rumbo que cortan verticalmente la corteza (Martínez, 2002; Caine *et al.*, 1996)

Figura 3: Tipos de fracturas según movimiento relativo de los bloques

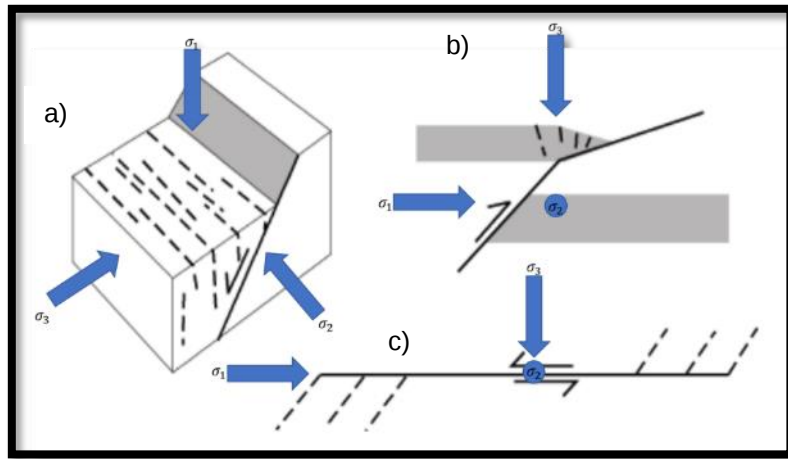


Fuente: Tomado de Martínez, 2002.

De acuerdo con Gudmundsson, (2011) los esfuerzos principales son denotados como σ_1 , σ_2 y σ_3 donde σ_1 es el máximo esfuerzo compresivo y σ_3 el mínimo compresivo y el máximo tensional, así: $\sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3$. Para las fallas normales el campo de esfuerzo sugiere que en los planos inclinados en los que hay movimiento de los bloques, el esfuerzo principal tensional σ_3 es horizontal y el fracturamiento paralelo a este plano es abierto. En cambio, para las fallas inversas, el campo de esfuerzos sugiere que horizontalmente el esfuerzo compresivo es mayor, y en este caso, el fracturamiento es cerrado, con excepción de variaciones locales de esfuerzos p.e. en la charnela de un pliegue. Por último, las fallas de rumbo existen en un campo de esfuerzos en el que el esfuerzo máximo y mínimo son horizontales (Ver **Fuente:** Tomado de Martínez, (2002).

). En este campo de esfuerzos se ha observado la ocurrencia de fracturas secundarias, que se propagan a una corta distancia a partir del plano de falla, sincrónicamente, denominadas fracturas de Riedel. Al ser fracturas de cizalla y tensión estas fracturas pueden ser abiertas y altamente conectadas (Gudmundsson, 2011 y Martínez, 2002).

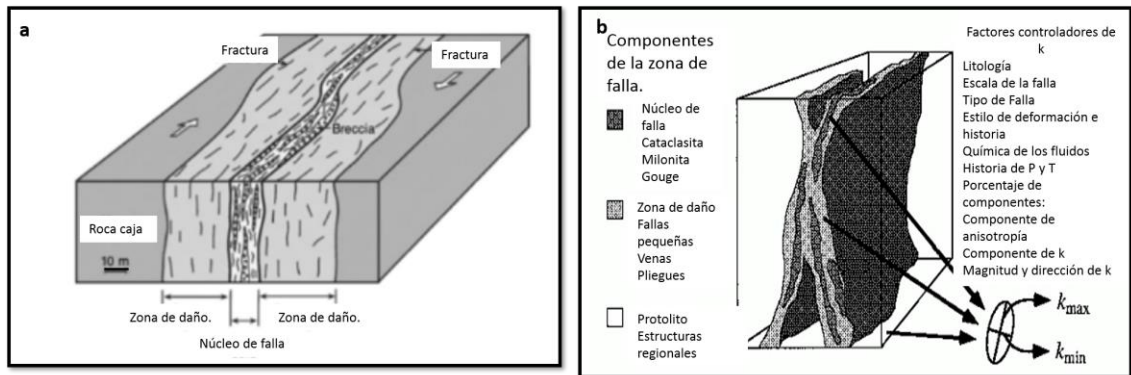
Figura 4: Relación de las diaclasas (líneas punteadas) con a) fallas normales, b) fallas inversas vista de perfil y c) fallas de rumbo en vista en planta.



Fuente: Tomado de Martínez, (2002).

Además de las fracturas que acompañan las fallas, cuando estas zonas de deformación se estudian de manera regional, se puede definir una zona de falla, la cual es litológicamente heterogénea y estructuralmente anisotrópica – ya que concentran fracturas con variadas o no variadas orientaciones, sobre la corteza terrestre. Las zonas de falla están compuestas por un núcleo donde el mayor desplazamiento ocurre, y una zona de daño aledaña, relacionada con el crecimiento de la zona de falla. En este escenario la permeabilidad variará dependiendo del tipo y escala de la falla, la litología en la que se desarrolla la zona de daño, entre otros (ver **Figura 5**) (Caine *et al.*, 1996). Algunos trabajos han sugerido que son las fallas las que posibilitan el flujo de aguas subterráneas resaltando su importancia hidrogeológica ya que forman parte de un mecanismo para el flujo de fluidos como el agua, y que muchos reservorios económicamente importantes como de agua o hidrocarburo se encuentran limitados por estos sistemas de fallas (Sarpong *et al.*, 2015).

Figura 5: a) Ejemplo de zona de falla para una falla de rumbo sinextral (Gudmundsson, 2011). b) Ejemplo de deformación en una zona de falla. La elipse muestra la magnitud y orientación del tensor de permeabilidades que puede ser asociado a cada componente de zona de falla



Fuente: Tomado y modificado de Caine et al., 1996.

1.3.1 Anisotropía de Resistividad Eléctrica.

1.3.1.1 Anisotropía Geofísica: Sondeos Eléctricos Azimutales. Debido a que la anisotropía corresponde a la variación del valor medido de una propiedad física en diferentes direcciones (Taylor y Flemming, 1988), y que la resistividad es una propiedad física que depende de la saturación de fluidos en la roca, la homogeneidad de esta, y litología, permite que características como las fracturas y los planos de estratificación, tengan la capacidad de generar anisotropía de resistividad eléctrica (Watson y Barker, 1999).

En este sentido, la anisotropía de resistividad es un indicador de la presencia de rasgos geológicos como fracturas, fallas y familias de diaclasas pues estos rasgos

modifican la relación entre los valores de resistividad transversal y longitudinal en una roca, (Habberjam G. M., 1967, 1972 y 1975; Watson y Barker, 1999, Busby, 2000, Rawling, Goodwin, y Wilson, 2001, Ramanujam, 2006, Ravindran, 2012, Zhody, *et al.*, 1974, Udosen y George, 2018).

En la práctica la cuantificación de la anisotropía de resistividad se hace por rotación de un arreglo de electrodos sobre un punto medio (Moreira *et al.*, 2019). Las medidas para cada azimut (Udosen y George, 2018), se pueden realizar a través de arreglos azimutales cuadrados donde los electrodos de corriente y de potencial se disponen para realizar medidas de resistividad en diferentes azimut y con diferentes espaciamientos entre ellos; o con arreglos colineales en los que los electrodos se disponen en línea recta, realizando medidas de resistividad con cada espaciamiento de los electrodos, de modo que el arreglo cuadrado tiene menor susceptibilidad a la heterogeneidad del terreno que los colineales (Watson y Barker, 1999; Sarpong *et al.*, 2015; Guzmán, 2014; Massoud, *et al.*, 2009; Udosen y George, 2018). El método más común entre los colineales es el Wenner, en el que, como en el arreglo cuadrado, el espaciamiento de los electrodos se define de acuerdo a la profundidad de interés, a la separación de las fracturas, y condiciones del terreno elegido para realizar la adquisición (Massoud, *et al.*, 2009; Udosen y George, 2018).

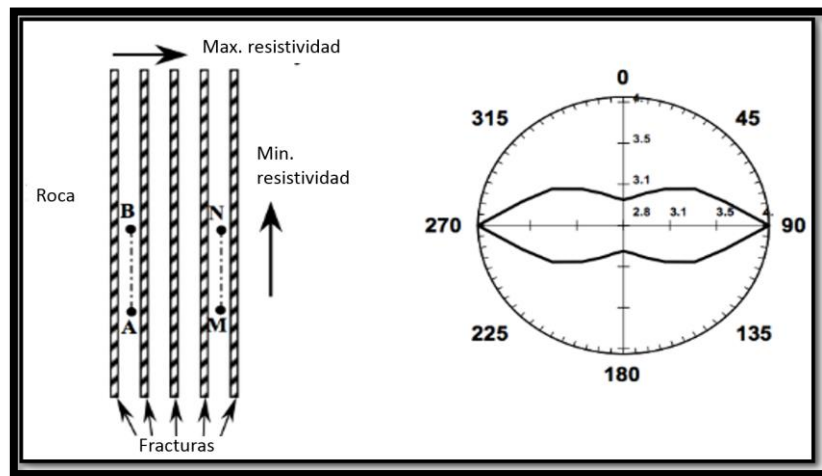
Las medidas de resistividad aparente son mostradas en coordenadas polares en función del azimut. Los diagramas que resulten circulares no evidencian anisotropía, debido a la ausencia de fracturas en el cuerpo de roca, o que el volumen de roca investigado es muy pequeño para la anisotropía que pudiera existir. En cambio, si los diagramas son elípticos, una anisotropía es evidente y deberá interpretarse con la presencia de algún rasgo de anisotropía geológica. En los arreglos colineales se presenta lo que se denomina paradoja anisotrópica que consiste en que el eje mayor de la elipse de **resistividad aparente** indica el rumbo de la fractura, mientras que el eje menor de la resistividad aparente indica la resistividad real paralela a las

fracturas (Watson y Barker, 1999). En presencia de fracturas verticales y si la medida se realiza paralela al rumbo de estas, el valor de la resistividad aparente será igual a lo que se denomina resistividad media de la formación; si la medida se realiza perpendicular la resistividad aparente será igual a la resistividad longitudinal o paralela al rumbo de las fracturas (Keller and Frischknecht, 1966 en Udosen y George, 2018; Watson y Barker, 1999).

En contraste, los arreglos cuadrados no se encuentran afectados por la paradoja anisotrópica: Los valores de resistividad medidos en dirección paralela a la fractura, son representativos de la saturación de fluidos de la fractura. En cambio, las mediciones perpendiculares, muestran la resistividad aparente de la roca, que en la mayoría de los casos corresponde con el eje mayor de la elipse es decir, a la mayor resistividad (ver **Figura 6**).

Respecto del diagrama polar, la escala de este puede ajustarse para definir las direcciones de los valores más altos (eje mayor) y más bajos (eje menor). Los valores graficados sólo consideran un espaciamiento de los electrodos, es decir que para diferentes espaciamientos – o diferentes profundidades de medición, los diagramas pueden crearse independientemente.

Figura 6: Medida de la resistividad para una familia de diaclasas paralelas a partir de un arreglo cuadrado, que cuando es rotado se forma una elipse de resistividad aparente.

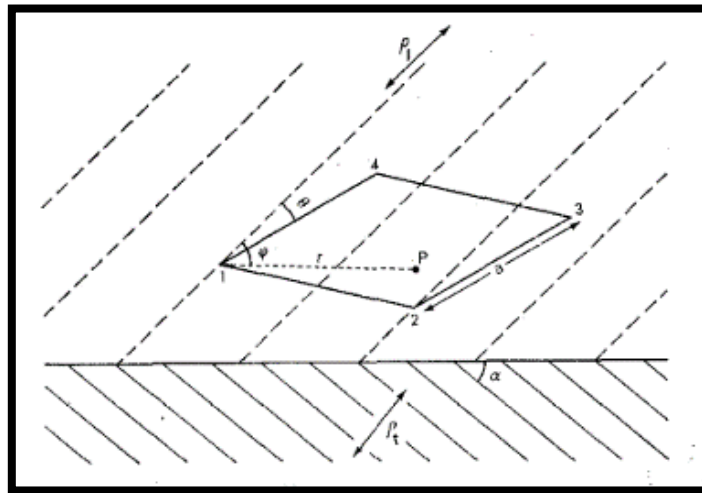


Fuente: Tomado y modificado de Kirsch., 2009.

Con respecto a la separación de los electrodos vs fracturas, Watson y Barker, (1999) indican que pueden presentarse dos situaciones: la primera que la longitud de diaclasas/fracturas sea más larga que el espaciamiento de los electrodos cuando la adquisición es paralela a su orientación, entonces la elipse formada será similar a la teórica con un eje mayor paralelo al rumbo de las fracturas en el caso de adquirir datos con arreglos colineares, o el eje menor en el caso de hacerlo con arreglos cuadrados. Si hay dos o más familias de diaclasas cuya longitud es más larga que el espaciamiento de los electrodos, en las adquisiciones paralelas a sus orientaciones se generarán picos cuya longitud en el diagrama polar será proporcional a la frecuencia de las diaclasas, indicando direcciones preferenciales de anisotropía paralelas a las direcciones de mayor frecuencia de fracturamiento. En cambio, si la longitud de las fracturas es más corta que el espaciamiento de los electrodos, o la orientación preferencial es poco desarrollada, el eje mayor de la elipse de anisotropía observada en el diagrama polar mostrará la mejor dirección de conectividad de las juntas. Estos autores indican que el método tiene utilidad para estudios hidrogeológicos a profundidades de 70 m o menos por que da una medida in situ de la anisotropía y naturaleza de sistemas de fracturas verticales.

La variación de resistividad en dos direcciones se ha cuantificado y expresado en un parámetro denominado *coeficiente de anisotropía* (λ), que en el caso de un medio isotrópico será igual a 1, y para un medio anisotrópico varía entre 1 y 2 (Watson y Barker, 1999). A partir del análisis de esta variable es posible identificar la dirección de fracturamiento predominante en el subsuelo (Habberjam, 1975, Sarpong *et al.*, 2015; Guzmán, 2014), y además la porosidad secundaria. Este parámetro se define como $\sqrt{\rho^t/\rho_l}$ donde ρ_l es la resistividad paralela al rumbo de las capas o de las fracturas y ρ_t es la resistividad perpendicular al rumbo de estas (ver **Figura 7**).

Figura 7: Arreglo cuadrado sobre una superficie de un medio anisotrópico.



Fuente: Tomado de Habberjam (1972).

Este autor define la anisotropía *prolata* cuando el valor de ρ_t es más grande que ρ_l e indica que suele encontrarse en medios estratificados, y su definición opuesta es la anisotropía *oblata* donde el valor de λ es menor que 1.

Existen otros parámetros de anisotropía como índice de homogeneidad (Busby, 2000) y porcentaje de anisotropía calculados a partir de las resistividades aparentes ρ_α y ρ_β . El índice de homogeneidad se expresa por el cociente de la ecuación 1 donde el numerador es la desviación estándar (como medida de anisotropía) y el denominador (como medida de dispersión causada por la inhomogeneidad) puede ser la desviación estándar del valor absoluto de la diferencia de las medidas o la desviación media de los valores de resistividad (la cual de acuerdo con Busby (2000) es un criterio para diferenciar la anisotropía). Este autor indica que para que la roca sea considerada anisotrópica y homogénea la medida de anisotropía denominada por él por la desviación estándar $\sigma(\rho_{\alpha,\beta})$ debe exceder la medida de dispersión causada por la inhomogeneidad determinada por la desviación media de las dos medidas de resistividad:

$$\sqrt{\text{valor medio}[(\rho_\alpha - \rho_\beta)^2]} \quad (1)$$

El coeficiente se expresa por el cociente:

$$\frac{\sigma(\rho_{\alpha,\beta})}{\sqrt{\text{valor medio}[(\rho_\alpha - \rho_\beta)^2]}} \quad (2)$$

Si los valores de este cociente son:

- Igual que 1, la medida de anisotropía y de dispersión son iguales, la variación debido a la anisotropía es igual que a la inhomogeneidad,
- Mayor que 1, la variación debido a la anisotropía es más grande que la debido a la inhomogeneidad, es decir sería una roca anisotrópica homogénea, la variación de la anisotropía no se atribuye a la heterogeneidad de la roca.
- Menor que 1, la variación debido a la inhomogeneidad es más grande para que se identifiquen los efectos anisotrópicos homogéneos, es decir sería anisotrópica heterogénea.

Si la roca es homogénea ρ_α y ρ_β serían iguales y el índice en el denominador sería cero, haciendo que el índice de homogeneidad sea infinito.

El porcentaje de anisotropía de acuerdo con Busby y Peart, (1997) y Busby (2000) corresponde a una cuantificación de la anisotropía mostrando la variación del porcentaje sobre el valor medio de las medidas de resistividad, mostradas en el diagrama polar:

$$\pm 0.5 * \left[\frac{\rho_{max} - \rho_{min}}{\rho_{average}} \right] * 100\% \quad (3)$$

Habberjam (1972) indica que con el arreglo cuadrado se pueden determinar dos parámetros: la *resistividad media* $\bar{\rho} = (\rho_\alpha + \rho_\beta)/2$ y la *Relación de Inhomogeneidad Azimutal – AIR*, que cuantifica la heterogeneidad de la resistividad con respecto a la orientación de los electrodos, siendo los valores mayores a 1 cuando las variaciones laterales son significativas y se encuentra dado por la siguiente ecuación:

$$AIR = \frac{2R_\gamma}{R_\alpha + R_\beta} = \frac{2(R_\alpha - R_\beta)}{R_\alpha + R_\beta} \quad (4)$$

Indica además que los valores de las resistividades para este arreglo pueden obtenerse de la siguiente ecuación:

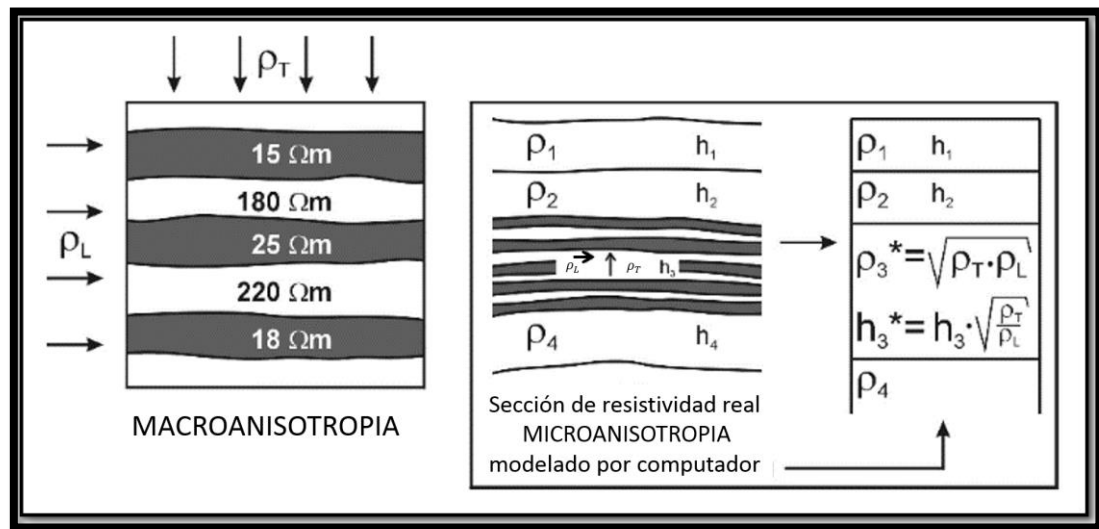
$$\rho_\alpha = \frac{2\pi a}{2 - \sqrt{2}} * R_\alpha \quad (5)$$

Habberjam (1972) presenta dos casos: en presencia de fallas verticales y cuando hay estratos con buzamiento. En el primer caso, el valor de $\bar{\rho}$ es menos sensible a la orientación, mientras que el AIR presenta grandes variaciones (mayores que 1). En el segundo caso los estratos pueden ser anisotrópicos y se pueden presentar grandes valores de AIR si los lados del arreglo son orientados con el rumbo y buzamiento de las formaciones.

Habberjam, (1975) indica que la técnica de sondeos cuadrados azimutales permite tener conocimiento de las amplias variaciones de la resistividad del subsuelo anisotrópico. Con estos análisis anisotrópicos se pueden obtener curvas de sondeos de resistividad, anisotropía y rumbo, al variar el espaciamiento y orientación de los electrodos. Este autor expone que en zonas donde los buzamientos de las estructuras no son tan grandes puede emplearse la técnica de sondeo cuadrado, sin embargo, si el terreno presenta una anisotropía fuerte y buzamientos grandes, puede emplearse una modificación de la técnica: sondeos cuadrados cruzados - dos cuadrados puestos a 45° uno del otro - y obtenerse un valor de resistividad media, más estable con la orientación del arreglo.

1.3.1.2 Anisotropía Geológica. En este sentido, la anisotropía puede considerarse en dos escalas: micro y macro (Sauck y Zabik, 1992, en Watson y Barker, 1999). La primera se encuentra relacionada con las variaciones de resistividad con la dirección dentro de una capa o litología, los cambios de litologías, común en depósitos fluviales, glaciares, deltaicos y clásticos de lagos, o también asociada a la creación de minerales elongados y micro fábricas. La segunda es atribuida a la alternancia de capas o capas de rocas delgadas (ver **Figura 8**). Una buena descripción de las características de las rocas en campo y la medida del rumbo y buzamiento de las capas permitirá diferenciar las variaciones azimutales de resistividad aparente producidas por otros elementos diferentes a las fracturas como estratigrafía inclinada y otros cambios laterales en la resistividad de formación (Watson y Barker, 1999; Udosen y George, 2018).

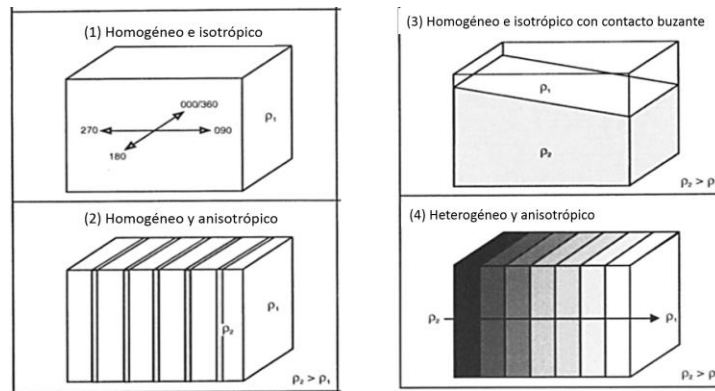
Figura 8: Tipos de anisotropía eléctrica en el subsuelo a diferentes escalas con resistividades transversales ρ_T y longitudinales ρ_L .



Fuente: Tomado y modificado de Kirsch., 2009.

Adicionalmente, Watson y Barker (1999) indican que pueden presentarse las siguientes situaciones: (1) un medio homogéneo e isotrópico donde los valores de resistividades son iguales en todos los ángulos y λ es igual a 1; (2) homogéneo y anisotrópico donde λ se encuentra entre 1 y 2, (3) dos capas homogéneas e isotrópicas con contacto buzante, y (4) un medio con incremento o disminución lateral de la resistividad (ver **Figura 9**).

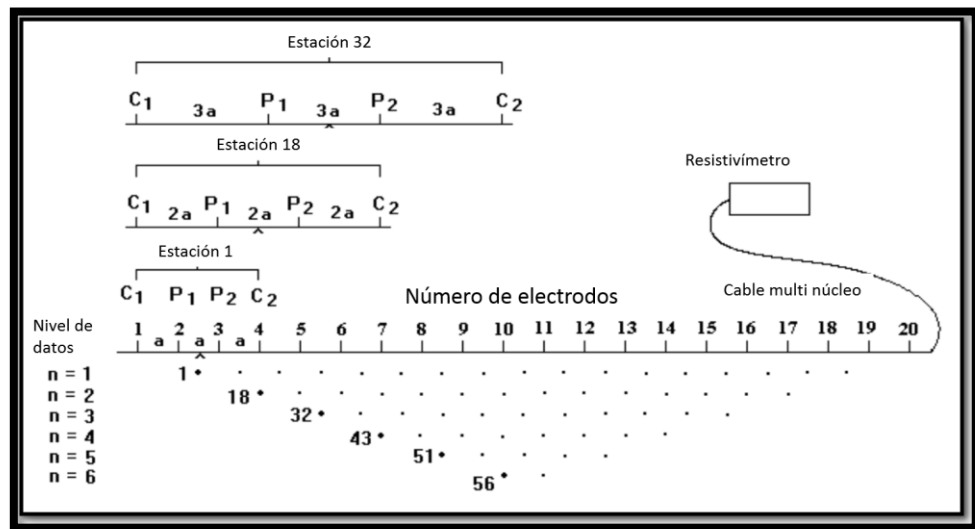
Figura 9: Modelos de isotropía y homogeneidad del terreno



Fuente: tomado de Watson y Barker, (1999)

1.3.1.3 Tomografía de resistividad Eléctrica TRE: De acuerdo con Loke, (2012) el método consiste en realizar medidas de resistividad del subsuelo a través de un número de electrodos conectados a un cable multinúcleo en línea recta separados a una distancia constante, un resistivímetro con un microprocesador que selecciona los electrodos para cada medida. La **Figura 10** muestra una posible secuencia para un arreglo Wenner con 20 electrodos, espaciados a una distancia a . Para una primera medida se utilizan los primeros cuatro electrodos de manera que el primero es usado como el electrodo de corriente C1, el segundo como el primero de potencial P1, el tercero como el segundo de potencial P2, y el cuarto como el segundo de corriente C2. Para una segunda medida son empleados los electrodos 2, 3, 4 y 5 como C1, P1, P2, y C2, y así se repite hasta los cuatro últimos electrodos.

Figura 10: Esquema del arreglo de los electrodos relacionado con un modelo 2D y secuencia de las medidas para la construcción de un pseudoperfil.

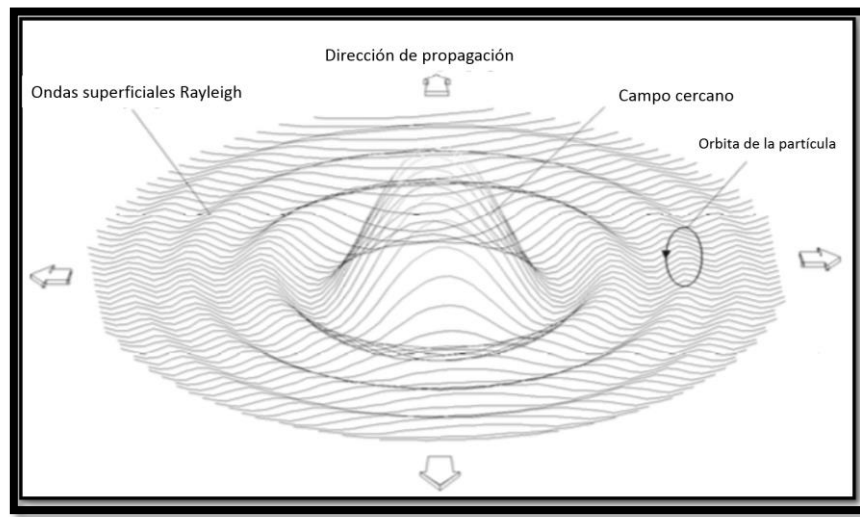


Fuente: Tomado y modificado de Loke, (2012)

Musset y Khan (2000) indican que la resolución y la profundidad de la prospección depende del espaciamiento de los electrodos y debe tenerse en cuenta que a mayor espaciamiento mayor es la profundidad pero menor es la resolución horizontal y verticalmente y no es propio para detectar un cuerpo de dimensiones reducidas a profundidad.

1.3.1.4 Multichannel Analysis of Surface Waves – MASW: Es una técnica no invasiva que utiliza las ondas sísmicas superficiales (Rayleigh) de bajas frecuencias (entre 1 y 30 Hz) para explorar el subsuelo a profundidades someras, mucho más que la reflexión y refracción sísmica. La escala de las ondas superficiales puede ser milimétrica como las ondas ultrasónicas usadas para identificar defectos de materiales, kilométrica como las ondas superficiales generadas por terremotos para estudiar la estructura de la tierra como a corteza y manto externo, ó intermedia con fines geotécnicos. La velocidad de estas ondas se encuentra determinada por la velocidad de las ondas S - V_s que depende del módulo de cizalla y de los cambios de densidad del medio. La influencia de los fluidos intersticiales es insignificante en la velocidad de propagación de la onda S, ya que estos no presentan resistencia a la cizalla. Este método se basa en la solución del problema inverso de la propagación de las ondas Rayleigh cuyo movimiento de las partículas es elíptico retrógrado (ver **Figura 11**), para estimar el perfil de velocidades de ondas de cizalla del subsuelo (Foti *et al.*, 2015).

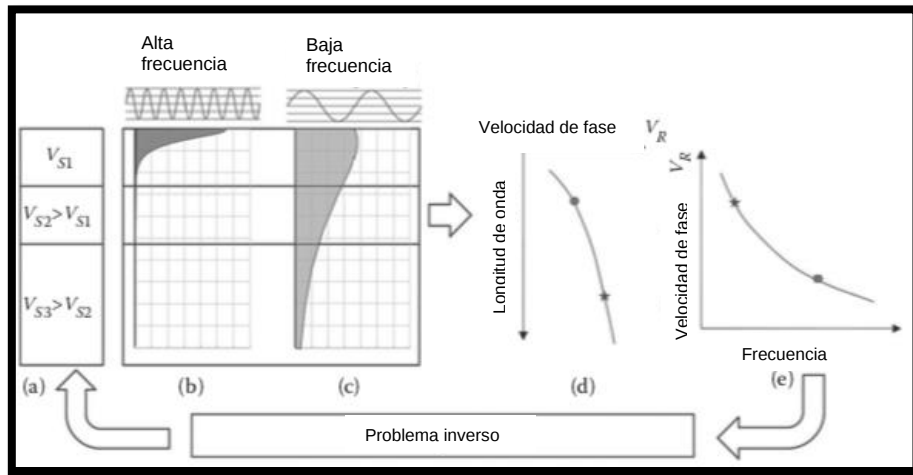
Figura 11: Patrón de radiación 2D de las ondas Rayleigh generadas por una fuente puntual vertical.



Fuente: Tomado y modificado de Foti, et al., 2015.

Si el medio es homogéneo, isotrópico, y elástico lineal, estas ondas no son dispersivas, es decir que la velocidad de propagación es función de las propiedades mecánicas del medio y no de su frecuencia. En cambio, en un medio verticalmente heterogéneo se desarrolla la dispersión, fenómeno en el que la velocidad de fase depende de la frecuencia, de tal manera que la profundidad de exploración es proporcional a la longitud de onda. Para un medio estratificado donde aumenta con la profundidad su rigidez (ver **Figura 12a**), una onda Rayleigh de alta frecuencia (corta longitud de onda) (**Figura 12b**) tiene una velocidad de propagación lenta comparada con una onda de baja frecuencia (larga longitud de onda) (**Figura 13c**). El gráfico de velocidad de fase vs frecuencia es conocido como curva de dispersión (**Figura 14 d y e**). Esta curva es utilizada para perfilar la velocidad de la onda s Vs en profundidad 1D o en profundidad y longitud 2D (Park *et al.*, 2007). Este gráfico permite definir el espectro de frecuencias dispersado por el medio, información usada en el proceso de inversión para definir las velocidades de las capas que conforman ese medio.

Figura 12: Identificación de parámetros con base en la dispersión geométrica.



Fuente: Tomado y modificado de Foti et al., 2015.

En la **Tabla 1** se muestran los valores de las velocidades de onda p y s para distintos tipos de rocas.

Tabla 1: Valores típicos de V_p y V_s para distintos tipos de rocas a profundidades someras.

Geomaterial	V_p (m/s)	V_s (m/s)
Rocas cristalinas	4000-6500	2500-3500
Rocas fracturadas y calcáreas	1600-3000	1000-1500
Rocas blandas y gravas muy densas	800-2000	500-1000
Gravas medias a densas	650-1500	400-800

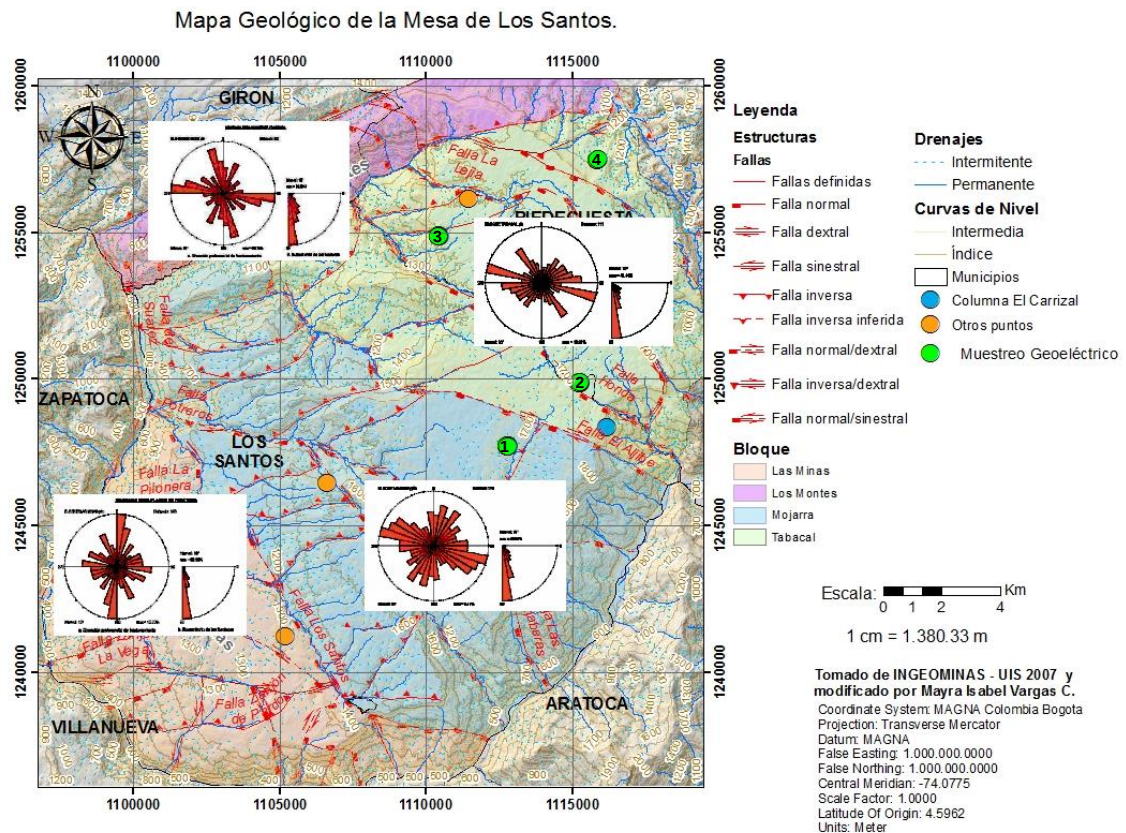
Arenas medias a densas	350-750	200-400
Arcillas y limos	250-500	150-300
Arcillas muy blandas	80-200	50-100

Fuente: Foti et al., 2015.

1.3.2 Resistividades en la zona de estudio. Trabajos previos muestran los tipos de fallas que se presentan en Los Santos, como el realizado por Vargas (2008) quien indica una zona de dominio tectónico de tipo transcurrente activo, en un sistema de esfuerzos compresivo en dirección aproximada N-S y distensivo en dirección aproximada E-W, a partir de una interpretación fotogeológica a escala 1:25000 de la Mesa de Los Santos, y un análisis geo estadístico de 439 datos de diacласas compilados en campo para realizar el análisis estructural. Este autor indica que las fallas principales son normales con componente dextral en dirección NW, de alta penetratividad, y las fallas secundarias son inversas con longitudes entre los km y decenas de km, subordinadas, en dirección NE en relación de corte por fallas normales. Se presentan fracturas asociadas a cada tipo de falla que permite distribuir el sector llamado La Mesa de los Santos entre 4 bloques estructurales denominados así: Montes, Tabacal, Mojarra y Mina los cuales presentan direcciones preferenciales de fracturamiento coherentes con las fallas principales de cada bloque. Para el caso del bloque Montes se presentan dos direcciones marcadas de fracturamiento N80-90W asociadas a fracturas sintéticas de las fallas inversas o antitéticas de las fallas normales del bloque. El bloque Tabacal y Mojarra presentan dirección preferencial de fracturamiento N70-80W, donde esta dirección se encuentra asociada a fracturas sintéticas de fallas normales o antitéticas de las inversas. También presenta una dirección N10-20W asociada a fracturas sintéticas de fallas normales o antitéticas de las fallas inversas de bloque con buzamientos muy altos entre 80° y 90°. Para el bloque Minas la dirección

preferencial de las diaclasas es N10E asociadas a fracturas sintéticas de las fallas normales. (ver **Figura 13**)

Figura 13: Mapa de bloques estructurales con los diagramas de rosa de las fracturas medidas.

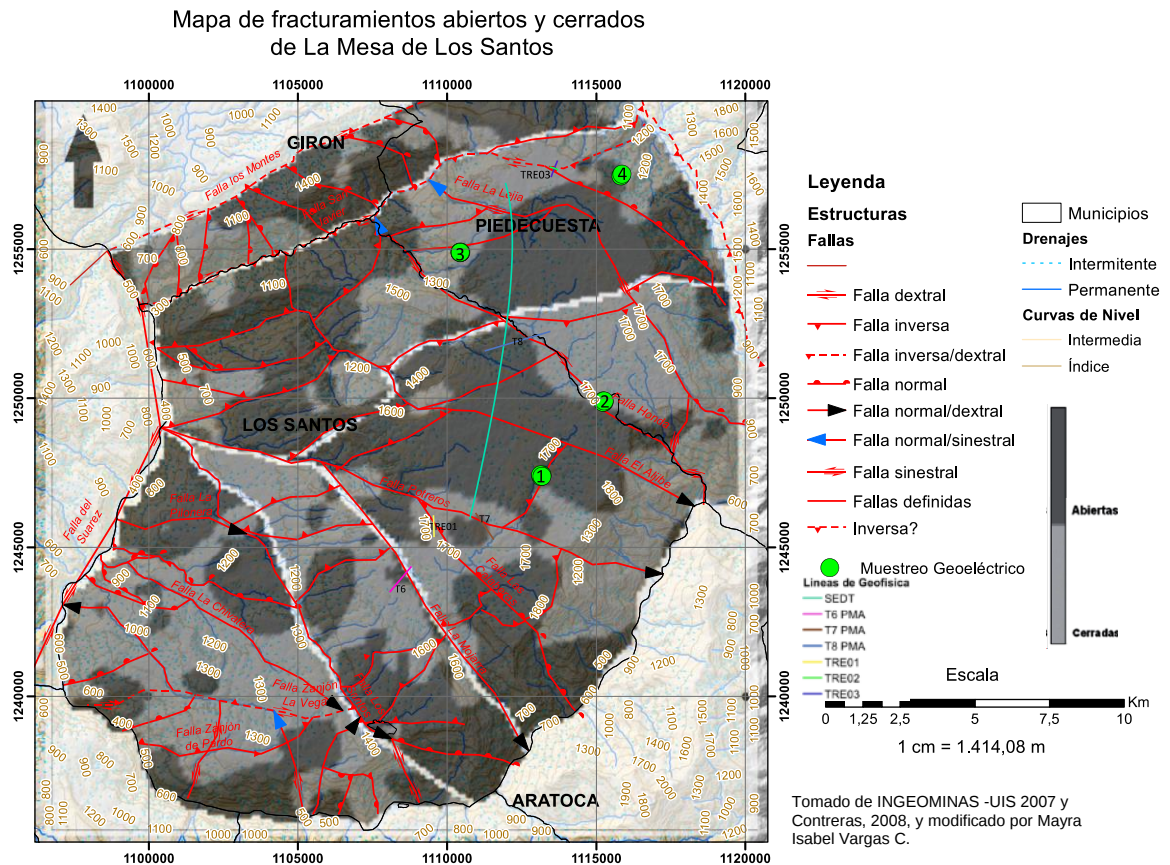


Fuente: Tomado y modificado de Vargas, 2008 e INGEOMINAS – UIS 2007.

Contreras (2008) realiza un análisis del fracturamiento a partir de 767 datos de fracturas y diaclasas en toda la zona de Los Santos. Discrimina tres zonas que posiblemente permiten la infiltración, circulación de agua y recarga de un acuífero: sector SE, centro y sector NW, donde el segundo sector es asociado a un acuífero

fracturado en la formación Los Santos definido a partir de la descripción del fracturamiento de la roca y la profundidad de los pozos perforados y previamente inventariados por INGEOMINAS - UIS (2007), donde la mayoría de ellos se ubica sobre áreas de fracturamientos abiertos y cerrados. Contreras (2008) presenta tres mapas: localización de diaclasas abiertas/cerradas, densidad de fracturas y ángulo de buzamiento señalando que las áreas con diaclasas abiertas son de mayor importancia hidrogeológica debido a la mejor infiltración y flujo de agua, que las zonas de diaclasas cerradas donde el flujo de agua es lento. Estas zonas de diaclasas abiertas se encuentran hacia el noreste, centro y en los escarpes de la mesa; mientras que las diaclasas cerradas se presentan al suroeste y al este de la zona (ver **Figura 14**). Las altas densidades de fracturas se encuentran en los escarpes hacia el este de la zona de estudio sobre las cuencas de la quebrada Potreros y de la vereda La Purnia (ver **Figura 15**). Se indica también que la mayoría de las diaclasas presentan un buzamiento entre 70° y 90°, y algunas entre los 40 y 70° (ver **Figura 16**).

Figura 14: Mapa de distribución de diaclasas abiertas y cerradas.

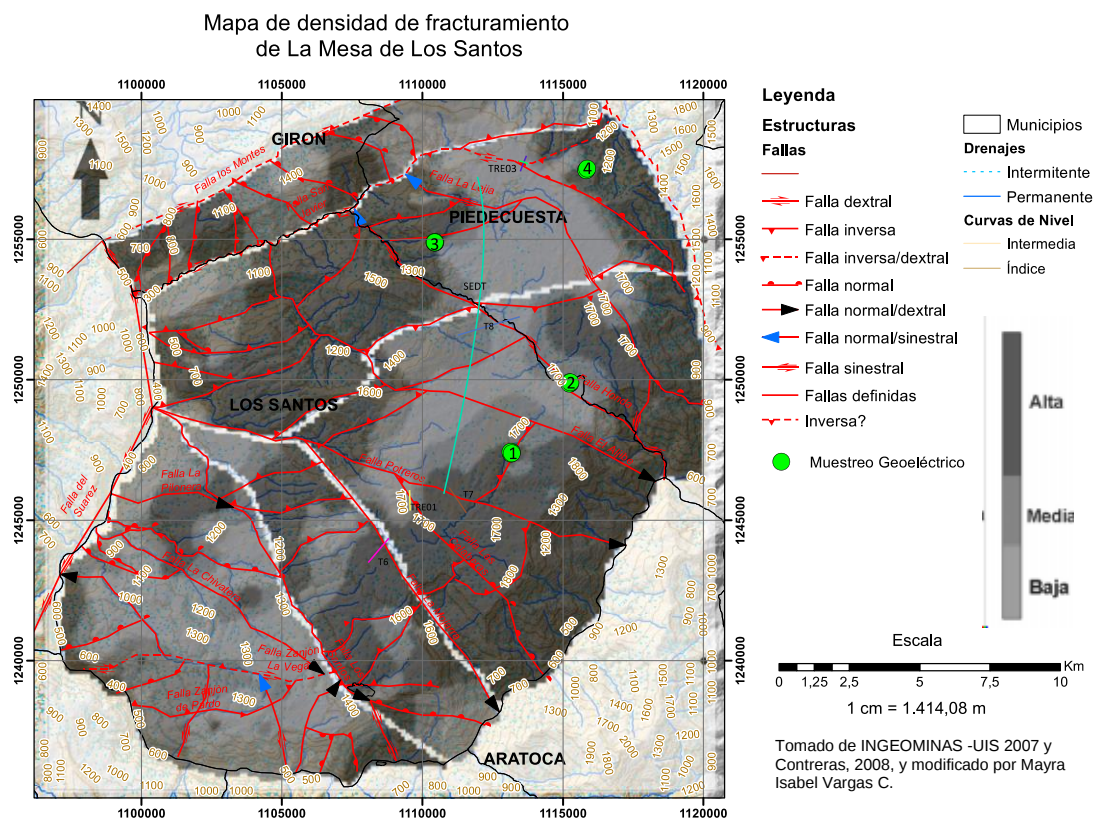


Fuente: Tomado y modificado de INGEOMINAS - UIS 2007 y Contreras (2008).

INGEOMINAS - UIS (2007) define ocho unidades hidro-litológicas a partir del estudio estratigráfico de las unidades aflorantes en la zona, clasificadas por el grado de permeabilidad y su capacidad de almacenar y transmitir agua, parámetros cuantificables por la porosidad eficaz de la roca, el volumen de agua que puede ser liberado de ellas, por la permeabilidad y por el espesor de la formación. Estas unidades son: Formación Silgará, Granito de Pescadero, Formación Jordán, Formación Girón, Formación Los Santos, Formación Rosablanca, Formación Paja, Formación Tablazo. Este trabajo especifica que las fracturas presentes en el área tienden a ser paralelas o perpendiculares a los sistemas fallamiento local, y que es la Formación Los Santos la que mayor densidad de fracturas presenta. Además,

sus diaclasas abiertas permiten la infiltración y flujo de agua en las zonas cercanas a las diferentes fallas, lo que sugiere que el miembro inferior de la formación se recarga a través de las fracturas y diaclasas abiertas especialmente en el sector norte. Allí la recarga se evidencia por la mayor pluviosidad de la zona, la alta vegetación, y la gran cantidad de puntos de agua (el sector norte es la región con mayor cantidad de puntos de agua).

Figura 15: Mapa de densidad de fracturas



Fuente: tomado y modificado de INGEOMINAS – UIS, (2007) y Contreras (2008).

Díaz, *et al.*, (2009) presentan una evaluación hidrogeológica preliminar de las formaciones que afloran en el sector conocido como La Mesa de Los Santos con base en la cartografía geológica, estratigrafía e inventario de puntos de agua complementados con el análisis de la porosidad primaria y secundaria asociada a las fracturas de cada formación, su apertura, separación entre planos de roca, su interconexión y buzamiento (magnitud y dirección). Este trabajo describe el miembro inferior de la Formación Los Santos generalmente como un acuitardo debido al alto contenido de matriz arcillo arenosa que reduce su porosidad primaria y permeabilidad. Hacia los sectores este y oeste del área se considera como un acuífero fracturado debido a que se encontró que la porosidad primaria es del 5% y la secundaria es del 10% asociada a la alta densidad microfracturas y diaclasas abiertas de dirección NW-SE. Hacia el sur a pesar de que aumenta su cementación y compactación también aumenta la permeabilidad producida por las fracturas, indicando un alto potencial hidrogeológico hacia este sector. Además, allí se encontraron manantiales con caudales entre 0.02-0.20 l/s. El miembro medio de esta formación es descrito como un posible acuitardo por su baja porosidad primaria debido a su alto contenido de matriz arcillosa, sin embargo, hacia el este y oeste del área la describen como un posible acuífero fracturado. El miembro superior lo describen como un acuífero hacia el norte con porosidades primarias entre 6 y 8% y secundaria entre 4 y 6%, donde la densidad de fracturas aumenta hacia los escarpes; en este sector se reportan 29 pozos, 98 aljibes y 73 manantiales. En el sector centro esta unidad presenta una porosidad primaria del 15%, y secundaria asociada a zonas de densidad media a baja de fracturas y diaclasas en dirección N20-50E. En esta zona se encuentran 5 pozos, 36 aljibes y 12 manantiales. La unidad se clasifica como un acuífero fracturado hacia el sur por su alto fracturamiento y diaclasas abiertas en dirección N-S, donde se encuentran 9 pozos, 23 aljibes y 36 manantiales.

Posteriormente García y Gómez, (2015) realizaron la toma de datos para tres Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE 02 y TRE 03) en el sector norte donde

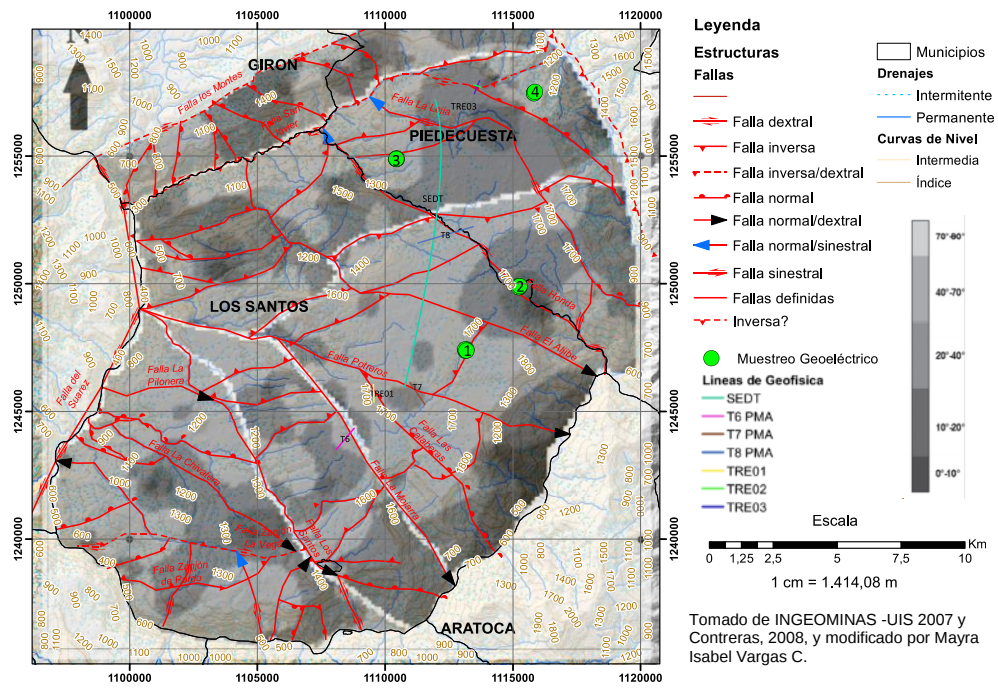
la topografía de La Mesa es más elevada (1700 msnm aproximadamente) y (TRE01) en el sector sur de La Mesa donde la topografía se hace menos elevada. 6 Sondeos Electromagnéticos en Dominio del Tiempo (SEDT) fueron adquiridos de norte a sur. Los autores elaboran un corte geológico para cada una de las TRE teniendo en cuenta los espesores de capas horizontales de resistividad obtenidos a partir de los SEDT y columnas estratigráficas levantadas en trabajos anteriores. De estos perfiles identifican que las TRE 01 y TRE 03 registran los 3 miembros de la formación Los Santos, mientras que la TRE02 sólo registra el miembro superior. A partir de las TRE 02 y TRE 03 elaboran un modelo 3D donde identifican 4 zonas de diferentes resistividades asociadas cambios de saturación de agua clasificadas así: de 500 a 700 ohm*m, de 700 a 900 ohm*m, de 900 a 1600 ohm*m, y mayores a 1600 ohm*m. Indican que en el cruce de las dos TRE se presenta una zona de valores de resistividades entre 500 y 700 ohm*m, el cual se encuentra cercano y en dirección NE, a una intersección de una falla normal con una inversa con componente de rumbo. Zona que fue interpretada como recarga de acuíferos, a través de dos facturas, de las que no se determina su escala pero que tienen contacto con la superficie. Para los SEDT los valores promedio de resistividades para cada uno de los miembros fueron: miembro superior de 1813.83 ohm*m, miembro medio valores menores a 70 ohm*m, asociados a la presencia de capas medias arcillosas, y miembro inferior valores de resistividades inferiores y cercanos a los 500 ohm*m. El modelo hidro-geofísico presentado muestra zonas con alta saturación de agua, que en las TRE presentan valores de resistividades inferiores a 1000 ohm*m, estas zonas son asociadas a los miembros medio (por fracturamiento, más que por litología) e inferior. Las líneas de adquisición de resistividad se ubican sobre los bloques estructurales Los Montes, Tabacal y Mojarra (ver **Figura 13**) sobre una zona de diaclasas abiertas (ver **Figura 14**), donde la densidad de fracturamiento es de bajo a medio (ver **Figura 15**) y los buzamientos de las fracturas muestra valores mayores a los 40° (ver **Figura 16**), condiciones que pueden facilitar la infiltración de aguas lluvias al subsuelo especialmente en dirección del buzamiento preferencial hacia el NW.

Adicionalmente, se identificó que la Formación Los Santos puede presentar acumulación de agua moderada en toda su extensión, especialmente en porosidades secundarias para los miembros superior y medio generadas por fracturas, y el comportamiento de las fracturas, sin mencionar que por lo menos para el miembro superior algunos autores indican que la porosidad primaria es alta (15%) en el sector central de la zona de estudio

CAS - INGEOEXPLORACIONES, (2016) realizan un Plan de Manejo de Aguas Subterráneas para el sector La Mesa del municipio de Los Santos, segunda fase, teniendo en cuenta el alto número de captaciones de aguas subterráneas (162 puntos) a través de pozos profundos. Realizan 3 TRE (ver **Figura 14** a **Figura 16**) ubicadas en los sectores norte y sur, las cuales fueron de aproximadamente 1120 m de longitud alcanzando una profundidad entre 300 y 350 m aproximadamente, usando el arreglo de gradiente, para registrar los tres miembros de la Formación Los Santos y la Formación Girón. Muestran que los valores de resistividad que se encuentran entre los 70 ohm*m y los 500 ohm*m son asociados únicamente a la presencia de fracturas y saturación de las dos formaciones, mientras que los valores de resistividades mayores de 500 ohm*m los asocian a rocas de menor conductividad eléctrica, menor fracturamiento, y poca o nada saturación.

Figura 16: Mapa de distribución de rangos de buzamiento de las diaclasas

Mapa de distribución espacial de los rangos de buzamiento de las diaclasas en la Mesa de Los Santos.



Fuente Tomado y modificado de INGEOMINAS – UIS (2007) y Contreras (2008)

MARCO METODOLÓGICO

La metodología utilizada se basó en el desarrollo de una serie de procedimientos necesarios para obtener la información requerida por el objetivo de estudio.

1.4 DISEÑO DE INVESTIGACIÓN

Como etapa preliminar se realizó el análisis, búsqueda y síntesis de toda la información existente por medio de diferentes fuentes, principalmente de los informes de perforaciones de pozos que han sido entregados a la CAS para solicitud de Concesión de Aguas Subterráneas cercanos a las estructuras geológicas como fallas y fracturas de interés. Para determinar la configuración geológica de la zona de estudio se tuvieron en cuenta los trabajos de investigación de pregrado previamente desarrollados por la UIS y el Servicio Geológico Colombiano, publicados en artículos de revistas científicas, publicaciones especiales, informes y tesis afines al proyecto; dispuestas en diferentes bases de datos pertenecientes a la Corporación Autónoma Regional de Santander, la Universidad Industrial de Santander y la Universidad Nacional de Colombia, junto con diversas fuentes electrónicas. De la misma manera fue necesaria la búsqueda de información relacionada con la aplicación del método geoelectrico de Tomografía de Resistividad Eléctrica y Sondeos Eléctricos Azimutales, esta última siendo la menos común. Con lo anterior se obtuvieron una base de datos y 5 mapas de la región donde se compiló la información encontrada.

De manera previa se generaron dos modelos directos hipotéticos, es decir una simulación de un modelo de inversión de resistividad predicho a partir de un modelo de resistividad real. Fueron obtenidos a partir de los valores de resistividad de las capas que se encuentran en la zona y se utilizó la herramienta SEER - Scenario Evaluator for Electrical Resistivity, desarrollada por el USGS (2017). Esta, permite ajustar o modificar diferentes parámetros de acuerdo con la información relevante

que se busque: definición de un escenario de los cuerpos que producen cambios en los valores de resistividades reales: modelo de bloques, plumas de contaminante densa: Dense Non-Aqueous Phase Liquid (DNAPL), pluma de contaminante ligero: Light Non-Aqueous Phase Liquid (LNAPL) y tanques de almacenamiento enterrados, espaciamiento de los electrodos 1 m, tipo de arreglo: Wenner, dipolo - dipolo o combinado, y error medido: 1, 5 o 10%.

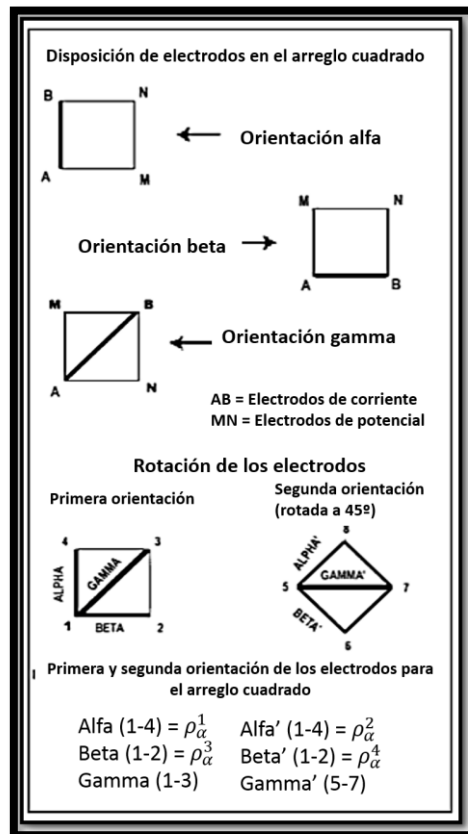
1.4.1 Adquisición de Datos Geofísicos. El objetivo de la fase de campo fue el de definir los valores de las resistividades eléctricas aparentes del subsuelo, mediante Sondeos Eléctricos Azimutales para identificar direcciones de anisotropía de resistividad que sugirieran las direcciones de fracturas, y Sondeos Eléctricos Verticales con perfiles de resistividad eléctrica para determinar en profundidad las variaciones de las resistividades. El cálculo de las resistividades reales del subsuelo se realizó a través de la inversión de datos de las TRE.

Se adquirieron datos en dos sectores de La Mesa: el primero el Club Lago Casa de Campo, el cual se encuentra cercano a la Falla La Honda, del tipo normal sinextral, y el segundo en el Condominio El Bosque cercano a una falla sin denominar de tipo inversa. Se escogieron estos dos lugares debido a que son los que presentaban terreno con topografía suave, no presentaban líneas de tensión eléctrica (esta característica es muy común en la Mesa, por ser un sector densamente poblado), se contaba con la autorización para acceder a los predios, existen datos del registro geológico de perforación de pozos cercanos que permitirían hacer una comparación y evaluación de las anisotropías de resistividades encontradas, y la saturación de agua que pueden presentarse en estos lugares. Además, no había presencia de vacunos que pudieran entorpecer las actividades de campo.

También se realizó una adquisición, en un punto denominado Finca La Esperanza, donde los datos de TRE y SEV fueron tomados en un sector donde se presentaba una línea de alta tensión a aproximadamente a 200m, lo que hace los datos poco útiles por el ruido que contienen, pero que se muestran para indicar la variación de los datos de resistividad en este tipo de zonas.

Los sondeos eléctricos azimutales fueron realizados con un lado del cuadrado de 40 m y rotados 0°, 30°, 45° y 60° desde el punto central del cuadrado, donde se ubicó la consola. Se tomaron los valores de las resistividades para las orientaciones alfa, beta y gamma como lo muestra la **Figura 17**:

Figura 17: Esquema del arreglo para los Sondeos Azimutales y su rotación.



Fuente Tomado y modificado de Ramanujam, 2006.

Para determinar la profundidad de exploración, Udossen (2018) indica que la profundidad de exploración para el arreglo cuadrado es de 0,451 veces la longitud

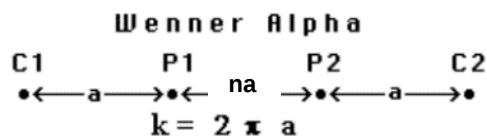
del lado del cuadrado, es decir que para el punto 1 y para el punto 2 (ver **Tabla 2**) se calcularon:

Tabla 2: Relación del largo del centro del arreglo a los electrodos VS profundidad de adquisición para el punto 1 y 2.

Centro del arreglo al electrodo (m)	Lado cuadrado (m)	Profundidad (m)
≈ 35.5	40	≈ 18

Se realizaron dos sondeos eléctricos co – lineales adquiridos con el arreglo Wenner alfa, con la modificación de una distancia $n = Z^2$ central entre los electrodos de potencial, siendo n el número de medidas y Z una distancia inicial de 50 cm es decir se adquirieron 11 datos para cada línea **Figura 18**:

Figura 18: Esquema de la configuración Wenner alfa para la adquisición de los datos de los sondeos eléctricos co - lineales



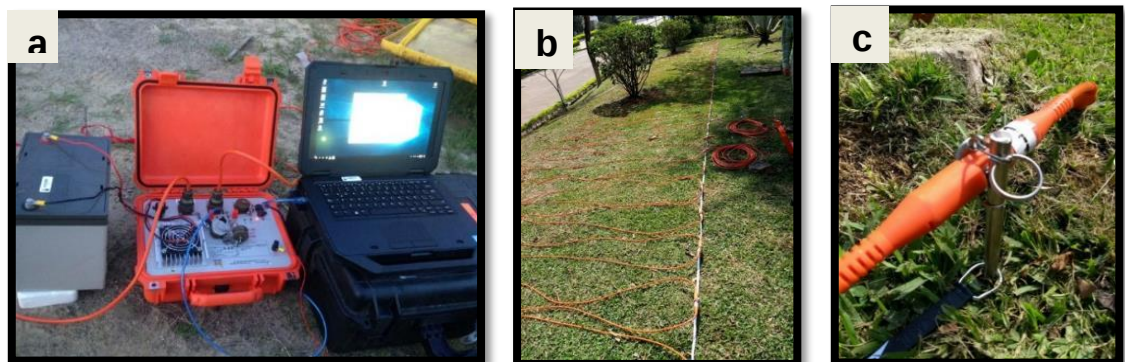
Fuente: Tomado y modificado de Loke, 2012.

Se realizaron dos líneas de Tomografías de Resistividad Eléctrica – TRE por cada punto de adquisición, con el arreglo ZZ que trae el equipo, el cual, según el manual, puede tomar 256 pares AB (C1C2) para cada par de 64 canales, es decir puede tomar 15616 datos en poco tiempo. Comparado con las adquisiciones realizadas

con los métodos convencionales que pueden demorar hasta 4 horas, este realiza el trabajo en media hora, pero la profundidad de exploración es reducida. También se realizó una adquisición con el método gradiente el cual ofrece una combinación entre los arreglos Wenner – Schlumberger y además garantiza una buena relación señal ruido (AGI - Advanced Geoscience, Inc. USA, 2020).

El equipo que se utilizó para la adquisición de datos de los sondeos colineales y azimutales fue el equipo de Sondeo Eléctrico Vertical SEV ABEM Terrameter SAS 1000, y las tomografías eléctricas fueron adquiridas con el tomógrafo FlashRES – Universal96: Resistivity/IP meter de la Escuela de Física de la Universidad Industrial de Santander, el cual consta de 93 canales y 96 electrodos y el software de inversión 2.5D que el mismo equipo proporciona (ver **Figura 19**).

Figura 19: Equipo para la toma de datos de geoelectrica en campo: a) consola del Tomógrafo Flash-RES UNIVERSAL 96, b) tendido del cableado del tomógrafo y c) electrodos de corriente y de potencial, d) consola del equipo de los sondeos eléctricos ABEM Terrameter SAS 1000 y e) cableado, pinzas y electrodos del ABEM y f) Terralog de ABEM para adquisición de datos sísmicos MASW

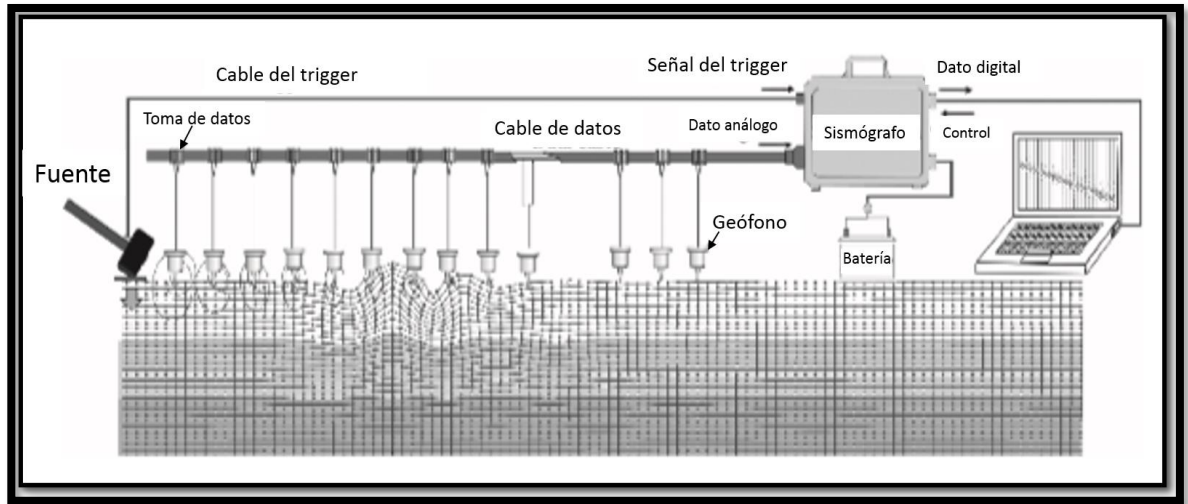




Fuente: fotografías propias y tomadas de recurso en línea
<https://www.guidelinegeo.com/>

La adquisición multicanal de registros de campo - MASW, se realizó en el predio del Bosque, con el equipo Terraloc de Abem, que cuenta con 48 geófonos de 4 Hz, y un martillo como fuente (**Figura 20**). Los parámetros de adquisición del muestreo fueron los siguientes: la separación de los geófonos fue de 3 m, con una separación de golpe entre geófonos de 6 m, con tiempo de muestreo entre 2.48 y 1.2 ms y el tiempo de adquisición fue de aproximadamente hora y media y tres stacks. El objetivo de esta adquisición fue la de obtener las curvas de dispersión de cada registro, para con la inversión de estas curvas obtener un perfil 1D o 2D de velocidades que permita asociar la saturación de agua en la zona, sugerida por los métodos eléctricos.

Figura 20: vista esquemática de un equipo de campo, geófonos, fuente sísmica, sismógrafo y onda Rayleigh propagándose



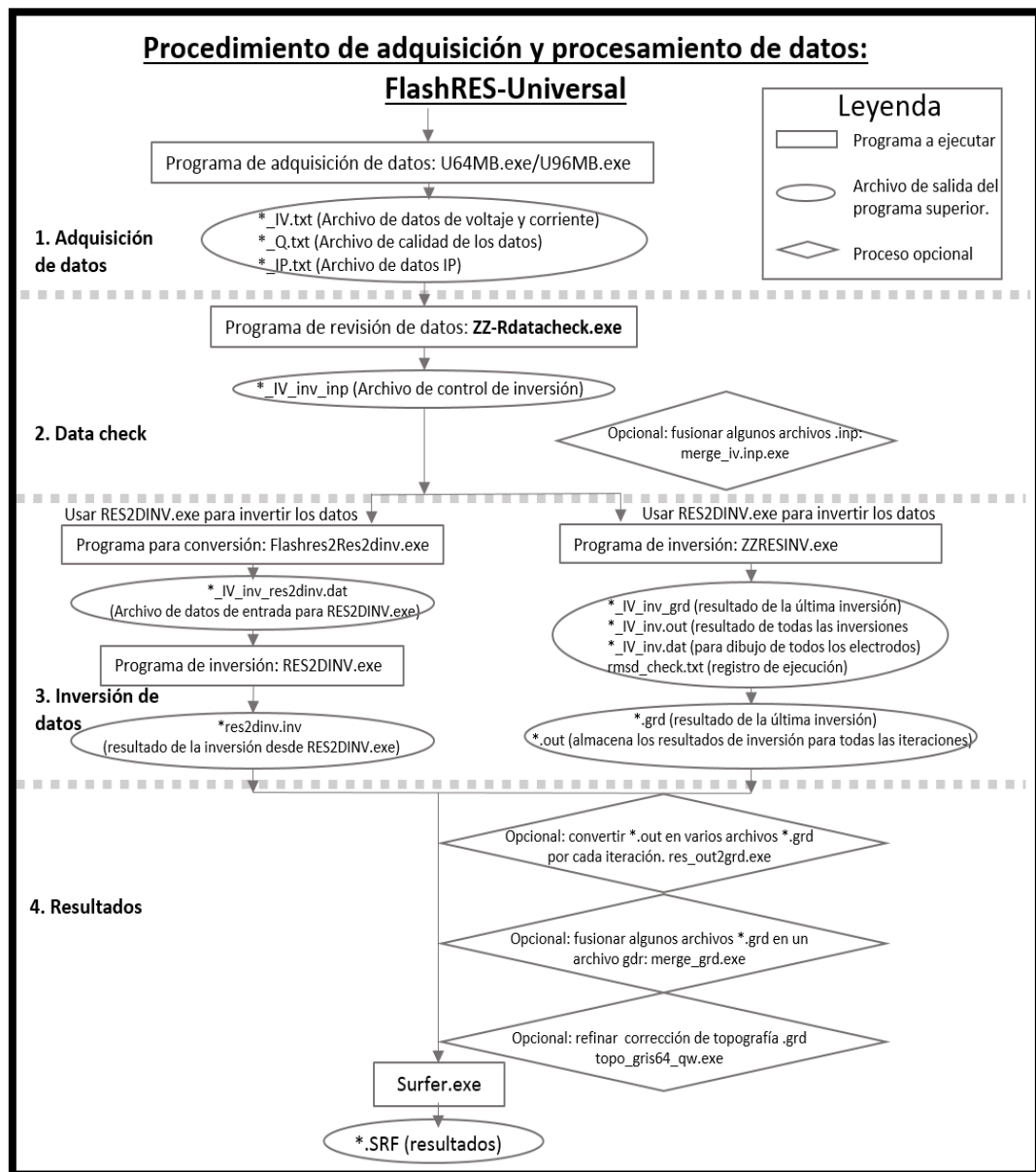
Fuente: Tomado y modificado de Foti, et al.,2015.

1.5 TRATAMIENTO DE LOS DATOS

1.5.1 Técnicas de procesamiento y análisis. Se utilizó el software de inversión IP2WIN (free version) para calcular los valores de resistividad reales en profundidad de los SEV co - lineales, mientras que los datos de resistividad azimutales fueron visualizados a partir de un diagrama polar graficado con el software Grapher, para determinar la dirección de anisotropía localmente. Las TRE fueron invertidas con el software Flash ZZRESINV.exe con el objetivo de obtener las resistividades eléctricas reales del subsuelo o de los materiales que lo constituyen. En la **Figura 21** se muestra el esquema del proceso realizado desde la adquisición de los datos hasta su inversión. Inicialmente de los datos adquiridos en campo se generan tres archivos, los cuales tienen información de corriente, voltaje, calidad de los datos, y uno opcional con los datos de polarización inducida IP. Con el software Data Check

se revisan todos los datos tomados y la calidad de los mismos, eliminando los datos erróneos para realizar la inversión con datos cuyo error sea reducido, y se genera un archivo de control .inp, con el cual se genera la inversión.

Figura 21: Esquema de adquisición y procesamiento de los datos de TRE

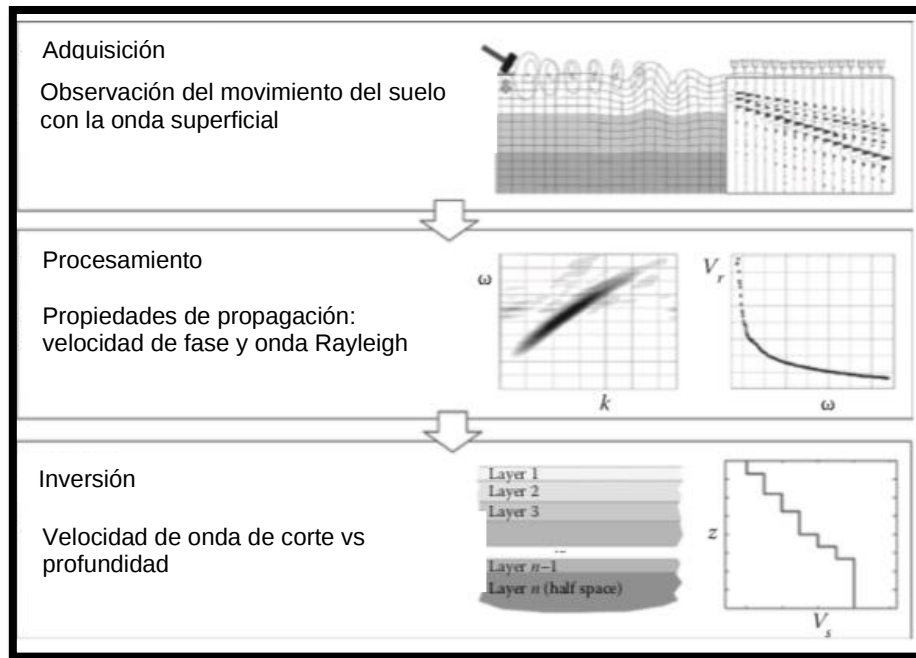


Fuente: Tomado y modificado de ZZ Resistivity Imaging Pty Ltd.

De acuerdo con Loke, (2012) la inversión de los datos muestra un modelo o una representación matemática del subsuelo, que se constituye de parámetros (cantidades físicas) que se desean obtener de los datos observados. La inversión tuvo en cuenta un análisis estadístico que permitió relacionar la información (geológica y geofísica) compilada en oficina y complementada en campo. En este caso, los parámetros de inversión son varios y se encuentran en el archivo de control .inp, los más relevantes corresponden a los valores de: LAMDA el cual es un parámetro de regularización entre la función de error de datos y función de error del modelo, máximo número de iteraciones, correcciones de los valores de resistividad y parámetros de suavizado de la inversión. En este archivo también se encuentran los datos de campo, es decir los valores de corriente I y voltaje V, el cociente V/I y las posiciones de los electrodos. Como lo indica Loke, (2012) en la mayoría de los casos, el proceso de inversión se encuentra relacionado con el proceso matemático denominado diferencias o elementos finitos, donde se relacionan los parámetros del modelo con el modelo de respuesta, y se busca que el error entre los datos observados y el modelo de respuesta sea reducido. Al finalizar el proceso de la inversión se generan 4 archivos más, los cuales contienen la información del error generado, un archivo con los datos de la inversión .inv, un archivo inv.grp el cual contiene información de última iteración que realiza el programa, y el archivo .grd para mostrar el diagrama 2D con el software SURFER.

El procesamiento de la técnica MASW se realizó con el software de refracción SeisImager 2D el cual inicialmente requiere de una revisión de los archivos que se generan por cada disparo de la fuente verificando la posición del punto de tiro y la de cada geófono para verificar el comportamiento de las ondas en el subsuelo. El programa permite identificar las propiedades de propagación de las ondas a través de la velocidad de fase de las ondas Rayleigh, para obtener un modelo de capas con las velocidades de las ondas de cizalla en profundidad (**Figura 22**).

Figura 22: Procedimiento de adquisición, procesamiento e inversión de los datos de MASW



Fuente: Tomado y modificado de Foti, et al., 2015.

1.5.2 Interpretación, integración y análisis de los modelos obtenidos.

Finalmente se muestra cuáles son las características geofísicas de las zonas muestreadas, para aportar con la determinación del potencial o no, de captación de agua de los rasgos estructurales, de acuerdo a la distribución de la resistividad, velocidad de onda s , a los valores bibliográficamente recopilados, que incluyen observaciones geológicas e hidrogeológicas hechas en pozos y nacimientos de agua identificados, con el fin de caracterizar la anisotropía y posible dirección de fracturas en el sector.

RESULTADOS

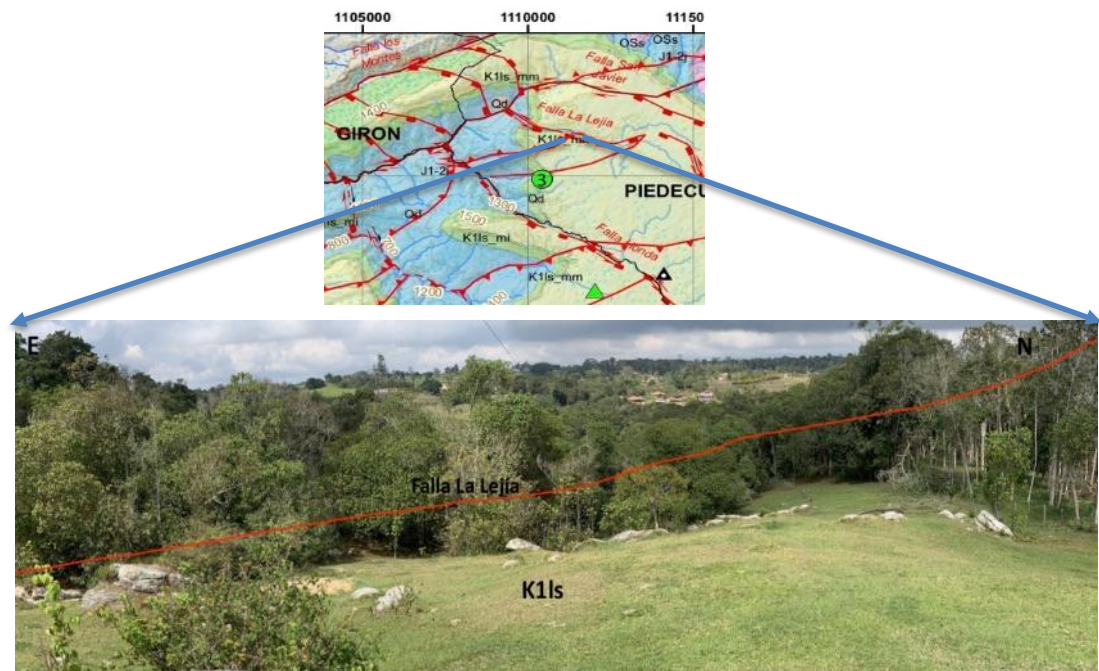
1.6 RESULTADOS GEOLÓGICOS

Los afloramientos presentes en La Mesa se encuentran hacia los escarpes, y no permiten tener un conocimiento de mayor detalle del comportamiento y distribución de las litologías en los sectores muestreados geofísicamente de esta investigación. Es por esto que se exponen a continuación en los siguientes apartados, el reconocimiento de campo realizado para esta investigación de los sectores aledaños a zonas de fallas, el resultado de la digitalización de los archivos físicos con la información de los pozos de las concesiones de aguas de la CAS al año 2016, y el reconocimiento geológico de los puntos en donde se realizaron las adquisiciones geofísicas.

1.6.1 Reconocimiento de sectores aledaños a zonas de fallas. Seguidamente se presentan las evidencias, en zonas cercanas a las fallas, de elementos que sustentan el potencial hidrogeológico de las fracturas, es decir que favorezcan zonas de saturación de agua en las rocas presentes. Por ejemplo, la zona norte de la Mesa presenta abundante vegetación, árboles y zonas boscosas, cascadas y suelos cubiertos por vegetación; en contraste en la zona sur se presenta poca vegetación y los terrenos son áridos, con suelos desprotegidos, de color amarillo naranja y arcillosos. Las anteriores características pueden ser evidenciadas en los siguientes párrafos.

Al norte de la zona de estudio, cerca de la falla La Lejía (**Figura 1**) cuyo trazo se presenta por la quebrada del mismo nombre, acompañado de una abundante vegetación y pendientes abruptas (ver **Figura 23**), se presentan areniscas cuarzosas de tamaño de grano medio, bien cementadas, con porosidad primaria baja (ver **Figura 24**).

Figura 23: Vista panorámica del trazo de la falla La Lejía, al norte de la zona de estudio. K1ls: Formación Los Santos, fragmento de mapa tomado de la Figura 1.



Fuente: Elaboración propia.

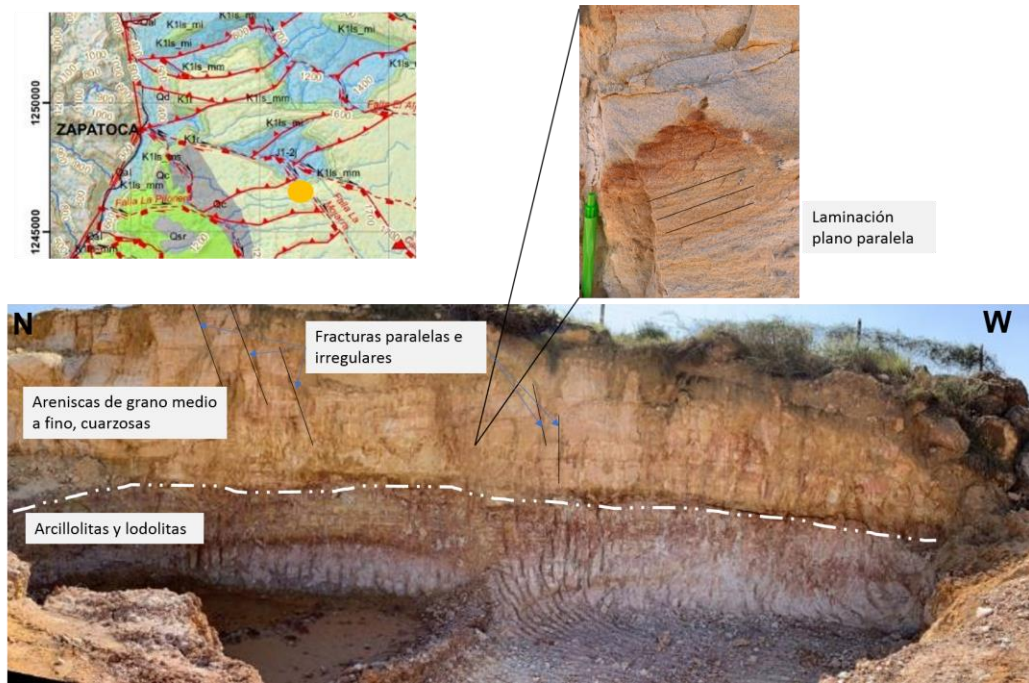
Figura 24: Areniscas cuarzosas de grano medio al norte de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Al sur de la zona de estudio cerca a la falla La Mojarra, se presentan areniscas cuarzosas de color amarillo, y es posible identificar algunos niveles arcillosos de poco espesor (ver **Figura 25**). Se presenta poca vegetación hacia esta región, las laderas son de altas pendientes y están limitadas por el trazo de las fallas Mojarra y Potrereros (ver **Figura 26** y **Figura 27**).

Figura 25: Areniscas del miembro superior de la Formación Los Santos hacia el sur de la zona de estudio fragmento del mapa geológico de la figura 1.



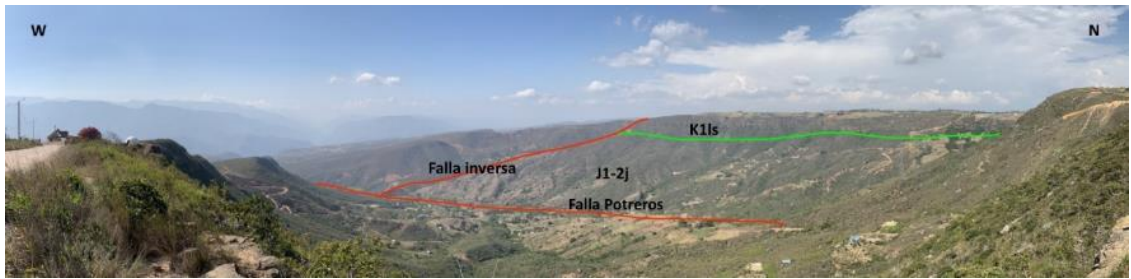
Fuente: Elaboración propia.

Figura 26: Panorámica de la falla La Mojarra, al sur de La Mesa de Los Santos. J1-2j formación Jordán, K1ls formación Los Santos.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 27: Panorámica de la falla Potrerillos (normal dextral) hacia el sur de la zona de estudio



Fuente: Elaboración propia.

1.6.2 Concesiones de aguas subterráneas CAS (2016): descripciones litológicas. Para la correlación geológica con los resultados geofísicos, se utilizaron las concesiones de aguas subterráneas solicitadas a la CAS al año 2016, las cuales muestran las descripciones geológicas de los pozos de explotación dentro de cada solicitud. Se resalta que la información obtenida no se halla digitalizada originalmente, sino reposa en archivos físicos, además las descripciones litológicas se encuentran incompletas y en algunos casos son repetitivas. Por lo general resaltan solo el tipo de litología encontrada de acuerdo con su dureza y diferenciando en algunos casos areniscas de arcillas, o a veces solo indicando si se trata o no de roca fracturada. En todos los pozos el espesor del suelo es menor a 5 metros y de acuerdo con los reportes de las pruebas de bombeo de algunos de ellos, indican que el nivel freático se presenta a profundidades variables que van desde los 1.9 m hasta los 23 m. Sin embargo, para el sector de Palomares 2 (BH - 4 cerca del punto del Bosque) los registros indican dos acuíferos: uno superior ubicado entre 5 y 26 m y otro inferior de 44 a 79 m. Los datos de los pozos profundos presentados ante la CAS para concesiones de aguas subterráneas se muestran en la **Figura 1** y en la **Tabla 3**.

Tabla 3: Nombres de los pozos para concesiones de aguas subterráneas con descripciones de pozos disponibles.

Nombre	Pozo	Este	Norte	Desde (m)	Hasta (m)
Molino Cañón del Chicamocha	BH 1	1112409	1247907	0	82
Santa María	BH 2	1111426	1246400	0	85
Cerca de Palomares	BH 3	1113000	1248000	0	90
Palomares Lote 2	BH 4	1113039	1248537	0	90.5
Villa Estelia	BH 5	1112526	1245878	0	120
El Paraíso	BH 6	1112031	1251051	0	80
Jauja	BH 7	1113748	1247006	0	100.5
Villa Luz	BH 8	1110422	1244593	0	133.33
La Cruz	BH 9	1114130	1251667	0	49

Fuente: Elaboración propia.

En este punto afloran los tres miembros de la formación Los Santos, los cuales según la columna estratigráfica levantada en la vereda El Carrizal por INGEOMINAS - UIS (2007) presentan espesores entre los 30 y 50 m. Sin embargo, las descripciones de los pozos no permiten identificar correctamente cada uno de los miembros de la formación Los Santos; solamente indican, en algunos casos, que los tamaños de grano varían y que se presentan niveles de areniscas conglomeráticas hacia el final de algunos pozos asociadas a la base del miembro medio y, base y techo del miembro inferior de la Formación Los Santos. Las litologías predominantes en los pozos muestreados son areniscas cuarzo feldespáticas de color blanco, alternancias de areniscas con arcillas rojizas y algunos niveles de lodolitas y arcillolitas de poco espesor (menor de 1 m).

Tabla 4: Descripción de los pozos para concesiones de aguas tomadas de la CAS al 2016.

Pozo	Desde (m)	Hasta (m)	Descripción litológica	Nivel freático (m)
BH 1	0	2	Material areno arcilloso de color negro con materia orgánica	17 m
	2	10	Areniscas cuarzo feldespáticas blanco crema	
	10	10.2	Arcillolitas de color rojo	
	10.2	12	Areniscas arcillosas violeta	
	12	18	Areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
	18	28	Areniscas de grano medio cuarzo feldespáticas. color violeta	
	28	30	Areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
	30	45	Areniscas de grano medio. arcillosas. de color rojo a violeta	
	45	48	Areniscas de grano medio cuarzo feldespáticas. color crema	
	48	66	Areniscas de grano medio. color violeta	
	66	69	Areniscas desmenuzables de color violeta	
	69	70	Areniscas de grano medio conglomeráticas de color violeta	

	70	82	Areniscas de grano medio. color violeta	
	0	2	Suelo	
	2	10	Areniscas cuarzo feldespáticas blanco crema	
	10	12	Areniscas arcillosas de color violeta	
	12	18	Areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
	18	28	Areniscas de grano medio cuarzo feldespáticas de color violeta	
	28	30	Areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
BH 2	30	45	Areniscas de grano medio, arcillosas, de color rojo a violeta	No se reportan
	45	48	Areniscas de grano medio cuarzo feldespáticas de color crema	
	48	66	Areniscas de grano medio color violeta	
	66	69	Areniscas desmenuzables de color violeta	
	69	71	Areniscas conglomeráticas, de color violeta.	
	71	85	Areniscas de grano medio color violeta	
BH 3	0	3	Suelo	No se reportan
	3	5	Arcillolitas rojizas	

	5	8	Areniscas cuarzo feldespáticas blanco crema	
	8	20	Areniscas arcillosas violeta	
	20	23	Arcillolitas de color rojo	
	23	30	Areniscas arcillosas de color rojo	
	30	35	Areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
	35	48	Areniscas de grano medio arcillosas de color rojo a violeta	
	48	63	Areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
	63	66	Arcillolitas de color crema	
	66	79	Arcillolitas de color rojo	
	79	82	Areniscas de grano medio. de color rojo a violeta	
	82	87	Areniscas compactas de color crema	
	87	90	Areniscas de grano medio de color rojo a violeta.	
	0	4	Suelo. arenisca fina bien meteorizada	
	4	5.3	Arcillolita violeta clara	
BH 4	5.3	26.1	Arenisca de cuarzo de grano fino y medio cementadas de color blanco localmente con líticos de milolitas con diámetros de 1 a 5 cm laminación plano paralela	22

	26.1	28.25	Intercalaciones de arcillolitas violetas con areniscas de cuarzo de grano muy fino	
	28.25	34.55	Areniscas de cuarzo de grano medio cementadas con moscovita de color blanco	
	34.55	37.9	Limolita parda cementada	
	37.9	42.7	Arenisca de cuarzo de grano fino y medio cementadas. con algo de moscovita. estratificación plano paralela	
	42.7	44.8	Limolita arcillosa de color pardo	
	44.8	79.7	Arenisca de grano medio y fino cementada de color blanco con algo de moscovita estratificación plano paralela	
	79.7	89.7	Arenisca de cuarzo de grano fino y medio cementada color blanco grisáceo y pardo con algo de moscovita. Estratificación plano paralela.	
	89.7	90.5	Arenisca de cuarzo de grano medio y grueso cementada de color rojizo perteneciente al techo de la formación Girón	
BH 5	0	4.1	Segmento limoso arcilloso color naranja ligeramente meteorizado con ligeras impregnaciones de óxido de Fe	11

4.1	7.5	Intercalación de limolitas color gris y lodolitas gris oscuro bandeadas ocasionales impregnaciones de óxido de Fe
7.5	31	Paquete compacto de areniscas cuarzosas de grano medio a fino color gris claro con frecuente fracturamiento abierto relleno de óxidos de Fe y ocasionales niveles de hasta 10cm de lodolita gris oscura.
31	32.8	Intervalo de alternancias de lodolita color gris y arenisca cuarzosa color gris claro con impregnaciones de óxidos de Fe. Frecuentes fracturas y un nivel de 30 cm de material brechado
32.8	38.6	Arenisca cuarzosa compacta gris claro, ocasionales impregnaciones de óxido de Fe
38.6	41.5	Intercalación de arenisca cuarzosa de grano medio color gris claro con frecuentes bandeamientos de lodolita color marrón claro con frecuentes impregnaciones de óxidos de Fe
41.5	52.5	Intercalación de arenisca cuarzosa de grano medio color gris claro con frecuentes

		bandeamientos de lodolita color marrón claro con frecuentes impregnaciones de óxidos de Fe
52.5	54.1	Intercalación de arenisca cuarzosa color gris claro y niveles de limolita color naranja con fuertes impregnaciones de óxido de Fe
54.1	57.1	Intercalaciones de areniscas cuarzosas color gris claro y lentejones amorfos de arenisca color rojizo con ocasionales impregnaciones de óxidos de hierro
57.1	63.6	Arenisca cuarzosa color gris claro con frecuentes laminaciones de arenisca lodosa de tonalidades rojizas.
63.6	65.6	Areniscas rojizas con ocasionales lentejones amorfos de arenisca cuarzosa color gris claro
65.6	68.6	Arenisca color gris claro con frecuentes fragmentos amorfos de arenisca de grano fino de tonalidades rojizas ocasionales impregnaciones de óxidos de Fe.
68.6	72.3	Arenisca cuarzosa color gris claro con frecuentes bandeamientos

		de arenisca lodosa color gris oscuro.
72.3	78.1	Arenisca cuarzosa de grano medio a fino de tonalidades rojizas con fragmentos amorfos de arenisca cuarzosa y ocasionales bandeamientos de arenisca cuarzosa de color gris claro.
78.1	86	Intercalaciones de arenisca cuarzosa de color gris claro con contacto transicional a arenisca cuarzosa de tonalidades rojizas con fragmentos amorfos de arenisca color gris claro
86	91	Arenisca de tonalidades rojizas con frecuentes cuerpos y lentejones amorfos de arenisca cuarzosa de grano fino color gris.
91	112	Intercalaciones de arenisca cuarzosa color gris con frecuentes bandas de arenisca de grano fino ligeramente lodosa de tonalidades rojizas con fragmentos amorfos embebidos dentro de la matriz silíceas.
112	120	Arenisca de tonalidades rojizas con intercalaciones de arenisca

			cuarzosa color gris claro con impregnaciones de óxido de Fe.	
BH 6	0	2	Material areno arcilloso de color negro con materia orgánica	1.9
	2	10	Arenisca cuarzo feldespáticas de color blanco crema	
	10	10.2	Arcillolitas de color rojo	
	10.2	12	Areniscas arcillosas de color violeta	
	12	18	Areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
	18	28	Areniscas de grano medio cuarzo feldespáticas. color violeta	
	28	30	areniscas de grano fino cuarzo feldespáticas de color crema	
	30	45	Areniscas de grano medio arcillosas de color rojo a violeta	
	45	80	Areniscas de grano medio cuarzo feldespáticas. color crema	
BH 7	0	5.1	Suelo areno-arcilloso de color marrón amarillento	No se reportan
	5.1	13	Arenisca gris claro grano fino a muy fino consolidada muy fracturada las fracturas tiene una tonalidad amarillenta debido a la presencia de material arcilloso amarillento.	

13	17.5	Limolita roja moderadamente firme ligeramente arenosa moderadamente arenosa moderadamente consolidada muy fracturada con pequeñas con pequeñas incrustaciones de material arenoso color gris claro de grano fino a muy fino.
17.5	19.7	Arenisca gris medio a gris claro. menor gris amarillento. grano fino a muy fino. consolidada. fracturada. ocasionalmente las fracturas están rellenas de arcilla marrón amarillento.
19.7	23.5	Arenisca color rojo claro. grano fino. consolidada. ligeramente fracturada
23.5	73.6	Arenisca gris claro menor gris medio. ocasional gris amarillento. predomina grano medio. menor grano fino. ocasional grano muy fino. local grano grueso (conglomerático); consolidada. en partes muy fracturada. algunas fracturas se encuentran de material arcilloso amarillo. algo plástico. intercalada con algunos bandeamientos de material limoso color rojizo

debido a la presencia de óxidos de Fe.

	73.6	77.5	Arenisca gris verdoso. menor gris claro. grano medio. menor grano fino. ocasional grano grueso. consolidada. poco fracturada	
	77.5	89.5	Arenisca gris claro. menor gris rojizo. grano fino. menor grano medio. consolidada. moderadamente fracturada. con bandeamiento color rojizo debido a limonitas color rojizo y oxidaciones de Fe	
	89.5	94.2	Arenisca gris medio. color gris verdoso. ocasional gris claro. grano medio a fino. consolidada. fracturamiento moderado. las facturas rellenas de materia orgánica	
	94.2	100.5	Arenisca gris color rojizo. menor gris claro. grano medio a fino. en partes arenisca conglomerática. consolidada. fracturamiento moderado. con intercalaciones de limolitas rojizas ferruginosas. se nota en partes estratificación paralela.	
BH 8	0	1.2	Suelo arcillo-arenoso seco	No se reportan
	1.2	5	Areniscas arcillosas secas	

	5	38.7	Areniscas cuarzo feldespáticas fracturadas con niveles de arcillolitas	
	38.7	133.33	Areniscas fracturadas cuarzo feldespáticas.	
	0	4	Suelo meteorizado	
	4	11.2	Areniscas de cuarzo grano fino a medio. cemento silíceo. con moscovita y algo de óxidos de hierro. Estratificación plano paralela y cruzada.	
	11.2	14.1	Arcillolita arenosa color verdoso con laminación plano paralela. intercaladas con areniscas de cuarzo grano fino a medio. cemento silíceo. con moscovita y óxidos de hierro.	
BH 9				No se reportan
	14.1	37.3	Areniscas de cuarzo grano fino a medio. de color amarillo claro y grisáceo con moscovita y óxidos de hierro. Estratificación plano paralela y cruzada. Manchas de óxidos de hierro en las fracturas y planos de estratificación debido al flujo de agua	
	37.3	39.8	Arcillolita parda rojiza	
	39.8	49	Areniscas de cuarzo grano fino y medio. de color amarillo muy	

claro cemento silíceo.

Estratificación plano paralela.

Fuente: Digitalización de las concesiones de aguas subterráneas entregadas a la CAS, al 2016.

De las zonas muestreadas no se evidenció presencia de manantiales o sectores donde el nivel freático se encuentre en superficie, sin embargo, el INGEOMINAS y la UIS realizaron un inventario de puntos de agua en el 2007 en el que se indica que en toda la zona de La Mesa se presentan 325 puntos, cuyas localizaciones no se encuentran registradas en el presente trabajo.

1.6.3 Condominio El Bosque. Este punto de adquisición se muestra en la **Figura 28** y es cercano a 4 pozos profundos de aguas subterráneas: Palomares (BH 3), Palomares 2 (BH 4), Urbanización Jauja (BH 7) y Molino Cañón del Chicamocha (BH 1). Geológicamente se ubica en cercanías a una falla inversa sin denominar (marcada por el curso de una quebrada local) y a la falla El Aljibe (normal dextral), y estratigráficamente sobre la formación Los Santos. La zona se presenta en un sector con topografía suave, donde la vegetación que se presenta arbustos y árboles a lo largo del cuerpo de agua presente.

Figura 28: Punto de adquisición geofísica para el sector El Bosque.



Fuente: tomado y modificado de Google Earth, fecha de las imágenes año 2017.

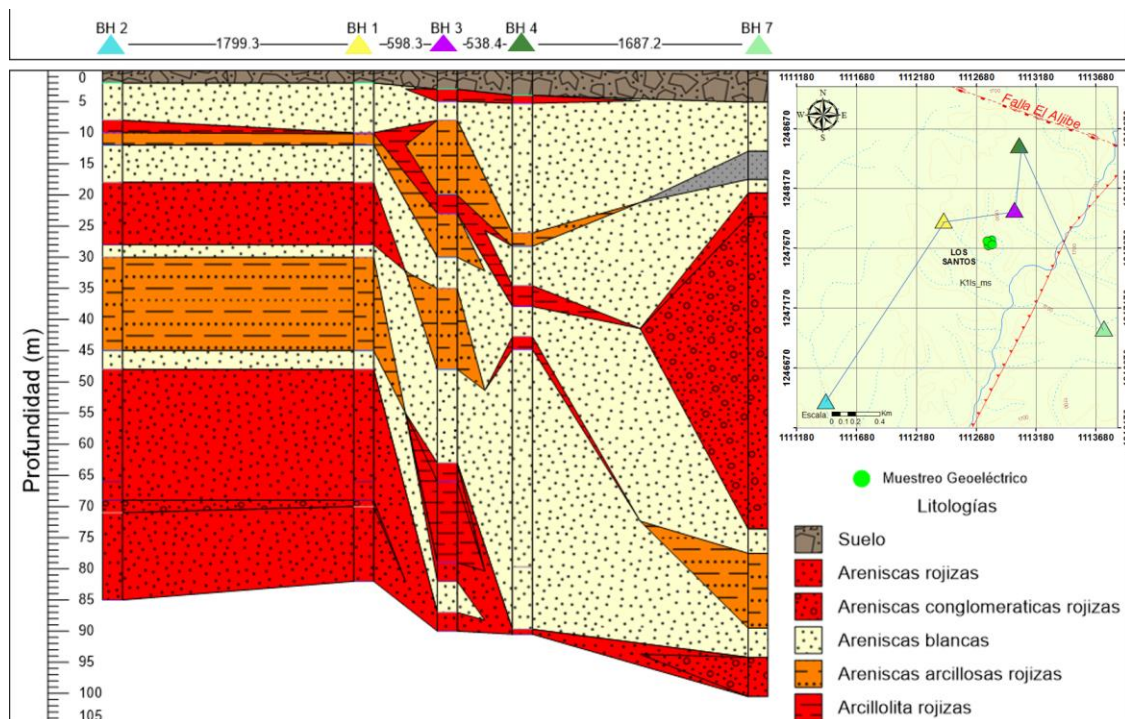
Las descripciones litológicas de los pozos de explotación en este sector, describen los tres miembros de la formación Los Santos, indican que el espesor del suelo varía de 1 a 4 m, con tamaños de grano principalmente areno-arcilloso. Durante la adquisición se evidenció que se presentan suelos arcillosos de color amarillo, matriz soportado, mostrando surcos de erosión característicos de estas litologías (**Figura 29**). Para los pozos BH 1 y BH 4 (ambos a aproximadamente 800 metros aproximadamente del punto) el nivel freático se encuentra entre los 17 y 21 m de profundidad respectivamente. Los espesores y las litologías son muy variados, compuestos principalmente de areniscas de grano fino, cuarzo feldespáticas con presencia de líticos y de algunos niveles de arcillolitas como se muestra en la **Figura 30**.

Figura 29: a) Perfil del suelo arcilloso erosionado, con presencia de surcos, b) escala de la erosión del suelo principalmente arcilloso.



Fuente: Elaboración propia.

Figura 30: Correlación litológica de pozos perforados de concesiones de aguas cercanos al sector El Bosque.



Fuente: Elaboración propia.

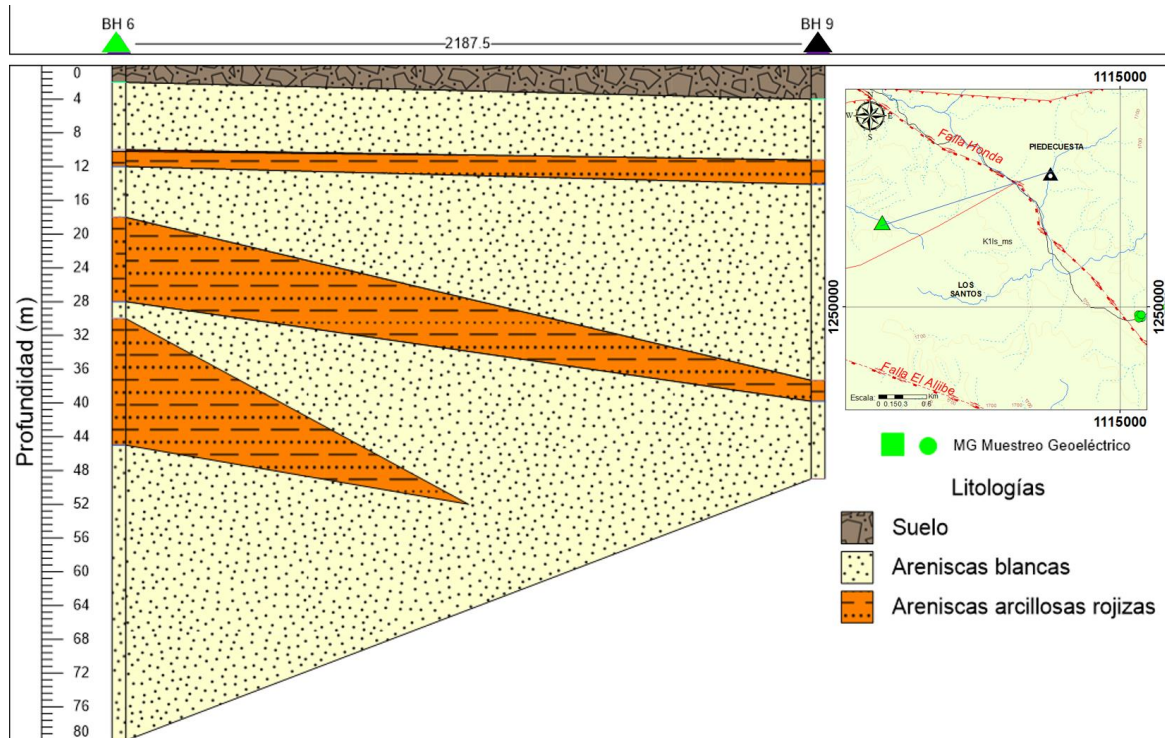
1.6.4 Lago Casa de Campo. Este punto de adquisición se muestra en la Figura 31 y se encuentra a una distancia de 3 km aproximadamente de dos de los pozos de explotación de aguas La Cruz BH 9 y del conjunto El Paraíso BH 6. Geológicamente se encuentra cercano a la falla La Honda (normal sinextral) y estratigráficamente sobre la formación Los Santos. La zona se presenta sobre un terreno de topografía plana, con vegetación tipo pastos, y presencia de árboles en cercanía al trazo de la falla principal. Para el pozo BH 6 el nivel freático se encuentra aproximadamente a 2 m de profundidad. Las descripciones litológicas de los pozos muestran que el espesor del suelo varía de 4 a 2 metros, y de manera general se presentan niveles de areniscas cuarzosas de tamaño de grano fino a medio, algunos niveles de arcillas, y areniscas arcillosas (**Figura 32**). La correlación entre los dos pozos BH 6 y BH 9 se encuentra entre los dos planos de falla presentes, por lo cual se sugiere que los cambios de espesores, y acuíferos de las litologías puedan deberse a esta causa, además de los cambios horizontales de las características de las rocas relacionados con los ambientes de depósito o facies un acuífero de las capas en dirección E.

Figura 31: Punto de adquisición geofísica para el sector Lago casa de campo.



Fuente: Tomado y modificado de Google Earth, fecha de las imágenes año 2017.

Figura 32: Correlación litológica de pozos para el punto casa de campo.

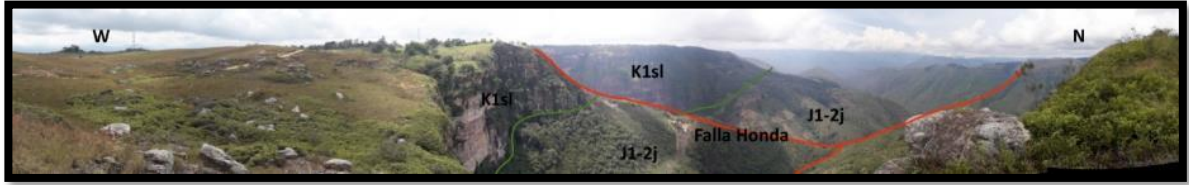


Fuente: Elaboración propia.

1.6.5 Finca La Esperanza. Geológicamente se encuentra sobre el bloque El Tabacal descrito por Vargas (2008) el cual presenta una topografía más o menos plana, limitada al norte por una falla de rumbo marcada por la quebrada El Barbón, y estratigráficamente se encuentra sobre la formación Los Santos (ver **Figura 33**). En este sector se encuentra una torre de alta tensión aproximadamente a 200 metros del punto de adquisición.

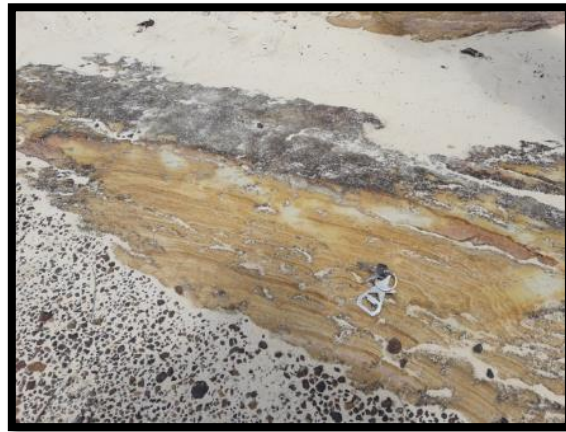
Debido a que no se lograron obtener datos litológicos de pozos profundos para esta zona, se recorrió el sector y se identificó que las rocas se encuentran constituidas por areniscas cuarzosas amarillentas, de tamaño de grano fino a medio, en laminación plano paralela, con presencia de óxidos (**Figura 34**).

Figura 33: Vista panorámica desde el extremo E de la quebrada El Barbón hacia el sur del punto de adquisición



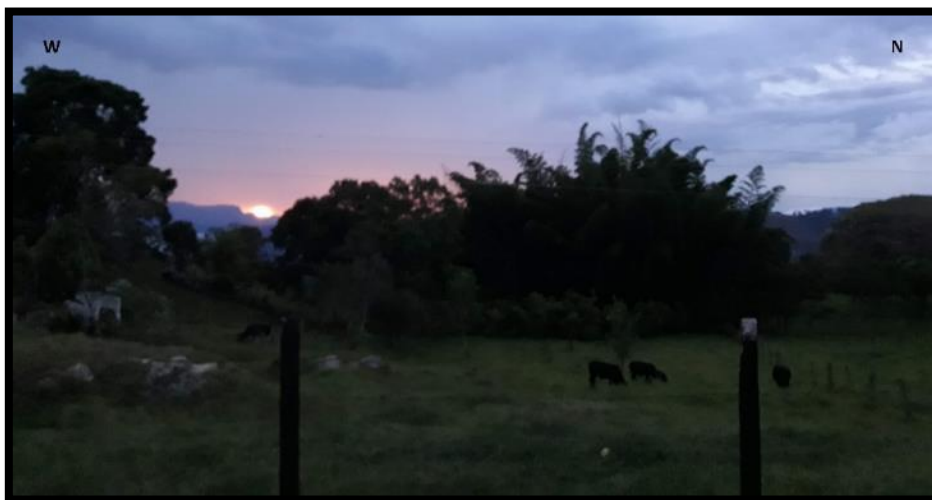
Fuente: Elaboración propia.

Figura 34: Areniscas cuarzosas con presencia de óxidos, en laminación plano paralela.



Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Vista al NW del punto de adquisición La Esperanza



Fuente: Elaboración propia.

1.7 RESULTADOS GEOFÍSICOS

1.7.1 Modelos directos. Se realizaron dos modelos directos hipotéticos y generalizados, el primero para un modelo de capas horizontales, y el segundo para capas horizontales con zonas fracturadas y saturadas. Lo anterior teniendo en cuenta que, en la zona de estudio, las capas no presentan buzamiento, y se presentan zonas de fracturas documentadas por Vargas, (2008). Se tuvieron en cuenta los cambios litológicos en profundidad, junto con las variaciones de resistividad tanto para zonas saturadas y no saturadas. Con esto también se quiso evaluar la susceptibilidad del software para identificar la anisotropía del subsuelo.

Para comprender mejor la información en la **Tabla 5** descrita a continuación, es necesario que se tenga en cuenta la columna estratigráfica detallada, levantada por INGEOMINAS - UIS (2007) en la vereda El Carrizal explicada anteriormente en el marco teórico de este trabajo. Debido a que en ese punto las litologías no son mayormente contrastantes, se modificó y se utilizó junto con la descripción del pozo BH 9, para observar las respuestas del modelo inverso predicho. Los valores de las

resistividades fueron establecidos de acuerdo con Loke (2012) y los valores de las velocidades de onda S de acuerdo con Foti, *et al.*, (2015), esto teniendo en cuenta que estos autores indican valores estándar para los tipos de roca.

De acuerdo con la profundidad del modelo directo (40 m), se obtienen resultados para el espesor del suelo (señalado en las descripciones de los pozos de explotación de 4 m) para el miembro superior de la formación Los Santos (espesor de 33 m) y parte del miembro medio de la misma (3 m)

Tabla 5: Secuencia estratigráfica utilizada para la generación de los modelos directos.

Profundidad (m)	Descripción litológica	Resistividad real ρ (Ohm*m)	Velocidades de onda S (m/s)
0-4	Suelo meteorizado y saturado	100	50
4-10	Arcillolitas alternadas con limolitas	250	100
10-15	Arcillolita arenosa color verdoso con laminación plano paralela, intercaladas con areniscas de cuarzo grano fino a medio, cemento silíceo, con moscovita y óxidos de hierro.	500	250

15-20	Limolitas	250	100
20-25	Areniscas de cuarzo grano fino y medio, de color amarillo muy claro cemento silíceo. Estratificación plano paralela.	600	350
25-30	Arcillolita	250	250
30-40	Areniscas de cuarzo grano fino a medio, de color amarillo claro y grisáceo con moscovita y óxidos de hierro. Estratificación plano paralela y cruzada. Manchas de óxidos de hierro en las fracturas y planos de estratificación debido al flujo de agua	500	400

Fuente: Tomado y modificado de Corporación Autónoma Regional de Santander - CAS., 2016.

Se muestra en la **Figura 36** los parámetros utilizados para el cálculo y diseño de los modelos directos con el SEER:

Figura 36: Parámetros empleados de cálculo del modelo inverso

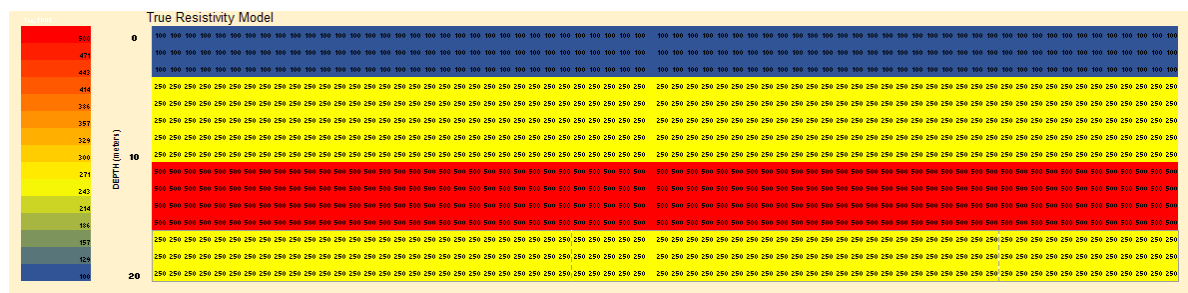
Scenario: BLOCKS	
using CUSTOM scenario ☐	
Options	Selection
Electrode spacing (m)	1
Geometry type	Wenner
Measurement error (%)	10
Borehole electrodes?	no

Simulate

Fuente: Tomado y modificado de Terry, *et al.*, 2017

Con los anteriores datos se creó el modelo numérico teórico de resistividades reales, que en el primer caso se realizó para un modelo de capas horizontales, sin fracturar y este se muestra en la **Figura 37**. Este diagrama presenta los valores de resistividades más bajas asociadas al suelo, y las más altas a las rocas silíceas de acuerdo con las litologías descritas en la tabla 5.

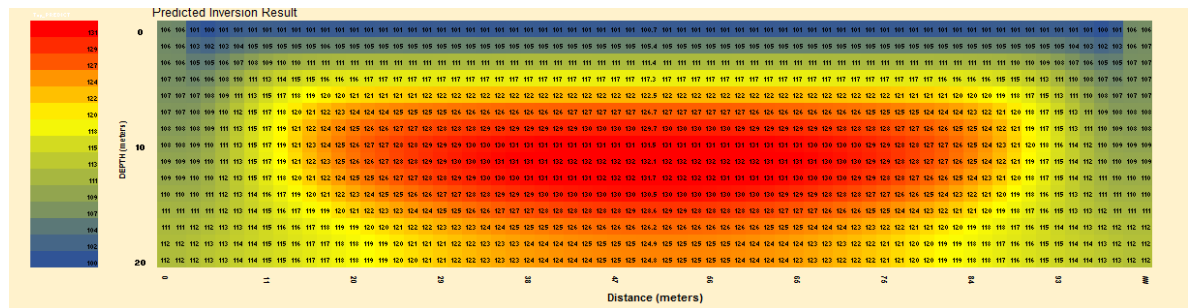
Figura 37: Modelo conceptual de capas horizontales



Fuente: Elaboración propia

El resultado de la inversión predicha para el caso donde no se presentan fracturas, y es un medio heterogéneo muestra valores de resistividades contrastantes y corresponden con las litologías indicadas en la **Tabla 5**. Se identifica que se conserva la horizontalidad de las capas, pero los valores de las resistividades altas se muestran hacia el centro, y no hacia los extremos del modelo. Esta inversión muestra los cambios de resistividad de manera gradual conforme lo que se espera que suceda para un modelo que no presenta fracturas (ver **Figura 38**):

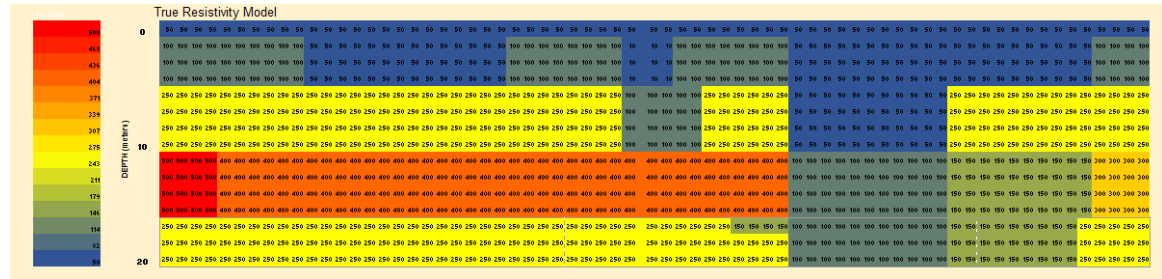
Figura 38: inversión del modelo conceptual obtenido.



Fuente: Elaboración propia.

El segundo caso hipotético se presenta para una zona con cambios de resistividades debidos a las litologías como en el anterior caso, pero se incluyen fracturas y cambios de resistividades debidas a estas. Se muestra en la **Figura 39** el modelo conceptual para un medio heterogéneo, con zonas fracturadas y saturadas, el cual sería el caso hipotético representativo para identificar como es la respuesta de la predicción de zonas fracturadas. Lo anterior teniendo en cuenta que las zonas muestreadas geo eléctricamente presentan estas características documentadas por Vargas, (2008), y que son fracturas casi perpendiculares.

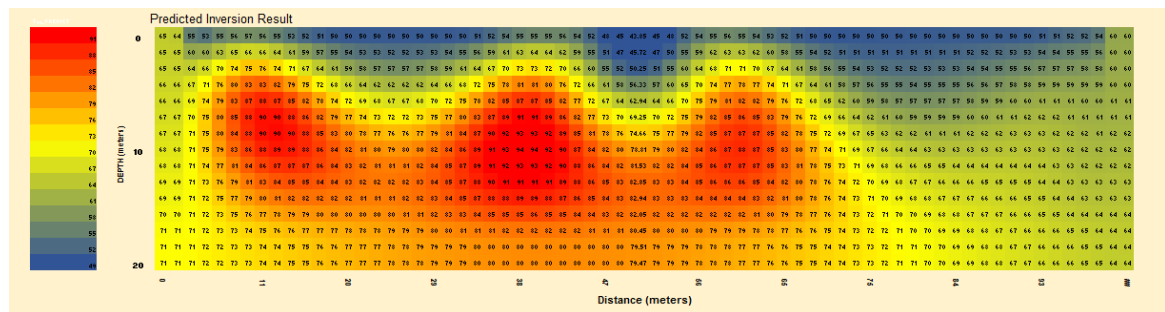
Figura 39: Modelo conceptual para un caso de zonas fracturadas de diferentes resistividades



Fuente: Elaboración propia.

La **Figura 40** muestra el resultado de la inversión predicha para el caso descrito anteriormente, en este punto se identificó que el programa no es lo suficientemente sensible a la presencia de zonas que varíen poco en sus valores de resistividades, pues se deben indicar resistividades teóricas muy contrastantes para que el modelo inverso muestre una variación significativa.

Figura 40: Modelo de la inversión generada para el caso de un medio heterogéneo y anisotrópico.

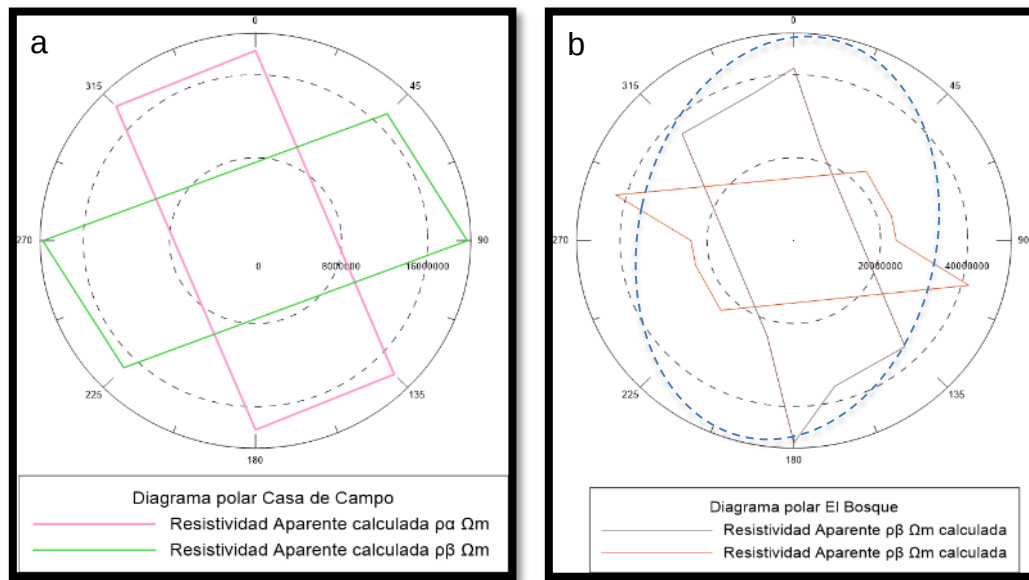


Fuente: Elaboración propia.

También se calcularon los valores de resistividades teóricos de acuerdo con la ecuación (5) teniendo en cuenta el lado del cuadrado y las resistencias medidas por los equipos en campo, en dirección paralela, perpendicular y oblicua a las zonas de las fallas. Este cálculo se realizó con el fin de verificar y comparar la variación entre los datos de resistividades teóricas y los adquiridos en campo (ver **Figura 41**).

Debido a que la zona de estudio es estratificada horizontalmente, y presenta fracturas en zonas cercanas a las fallas, los valores de resistividades calculados teóricamente, muestran una geometría prolata de la resistividad. Es decir que los menores valores de resistividades se encuentran en la misma dirección que las facturas y que esta es concordante con el eje menor de las elipses generadas marcadas en líneas punteadas de la **Figura 41**. En este sentido para el caso de El Bosque se espera que las fracturas tengan una dirección NW, mientras que para el caso del sector Lago casa de Campo no se tendría una dirección de fracturamiento predominante.

Figura 41: Diagramas polares con los valores de resistividades calculados para el punto Lago casa de campo (a) y Bosque (b)



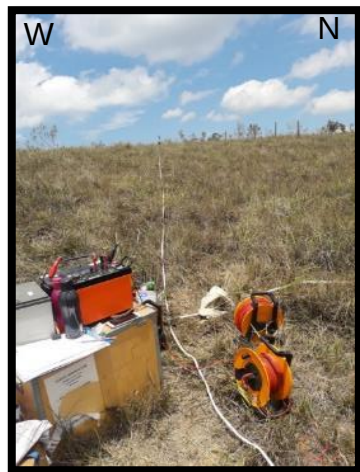
Fuente: Elaboración propia.

1.7.2 Adquisición geofísica. Cuatro sectores fueron muestreados y son mostrados en la **Figura 1**. Se realizaron 2 adquisiciones en dos puntos denominados Lago Casa de Campo y Condominio El Bosque. En cada punto se realizaron 2 Tomografías de Resistividad Eléctrica - TRE ortogonales entre sí; 2 Sondeos Eléctricos colineales - SEV, sondeos eléctricos azimutales y un MASW. Además, se realizaron dos adquisiciones más, en dos puntos denominados Finca La Esperanza y San Martín. Sin embargo, en el primero los datos de TRE y SEV fueron tomados en un sector donde se presentaba una línea de alta tensión; y la adquisición realizada en el último punto – una toma de azimutal y un colineal - no pudo ser completada por avería en el equipo de SEV. Estos datos son mostrados para resaltar el efecto de fuentes de energía externas sobre este tipo de medidas, y para mostrar los datos de resistividad hacia el sector más norte. A pesar de no poder ser concluida la campaña, los datos pueden ser útiles para comparar con futuras adquisiciones. De acuerdo con la consulta de los informes de perforación de pozos para la explotación de aguas subterráneas en las concesiones de aguas

presentadas ante la CAS, los registros indican que los niveles saturados de aguas se encuentran en el miembro superior de la Formación Los Santos.

1.7.2.1 Condominio El Bosque (punto de adquisición1). Este punto de adquisición se realizó en una zona de parcelaciones donde se proyecta la construcción de viviendas, pero hasta el momento en ese punto no se encuentran estructuras que pudieran alterar las medidas de resistividad, como el caso de torres de tensión, o tubos de drenaje (ver **Figura 42** y **Figura 43**).

Figura 42: Centro de la consola del equipo SEV para el arreglo cuadrado.



Fuente: Elaboración propia.

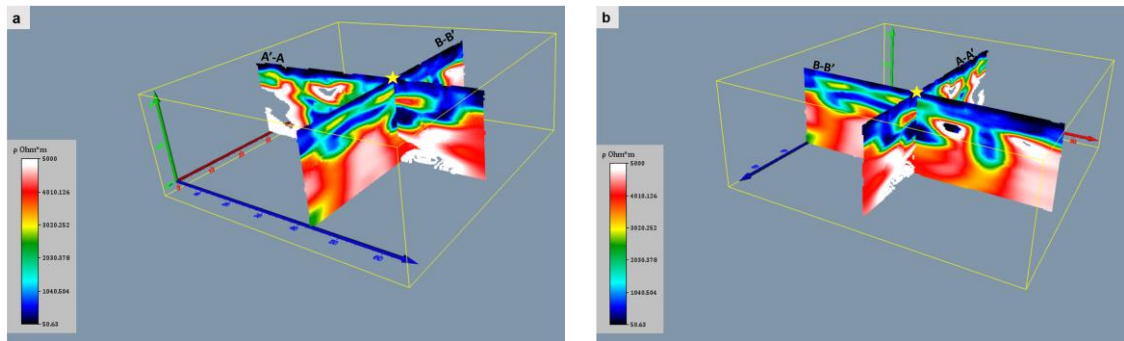
Figura 43: Imagen TIF del punto El Bosque.



Fuente: fotografía TIFF tomada con un Drone Dji inspire 1, y mapa elaborado por la autora.

En este punto se muestran las TRE ortogonales adquiridas con el arreglo ZZ A-A' en dirección paralela a la falla inversa y B-B' ambas con la misma escala de resistividades, sobre la primera tomografía también se realizó una línea sísmica MASW denominada A-A'. Estos resultados muestran variaciones de resistividades lateralmente y en profundidad, indicando las zonas de bajas resistividades superficialmente y a poca profundidad 7 m (aproximadamente), y las más altas resistividades se muestran casi en continuidad lateral a profundidades mayores de 10 m (**Figura 44**).

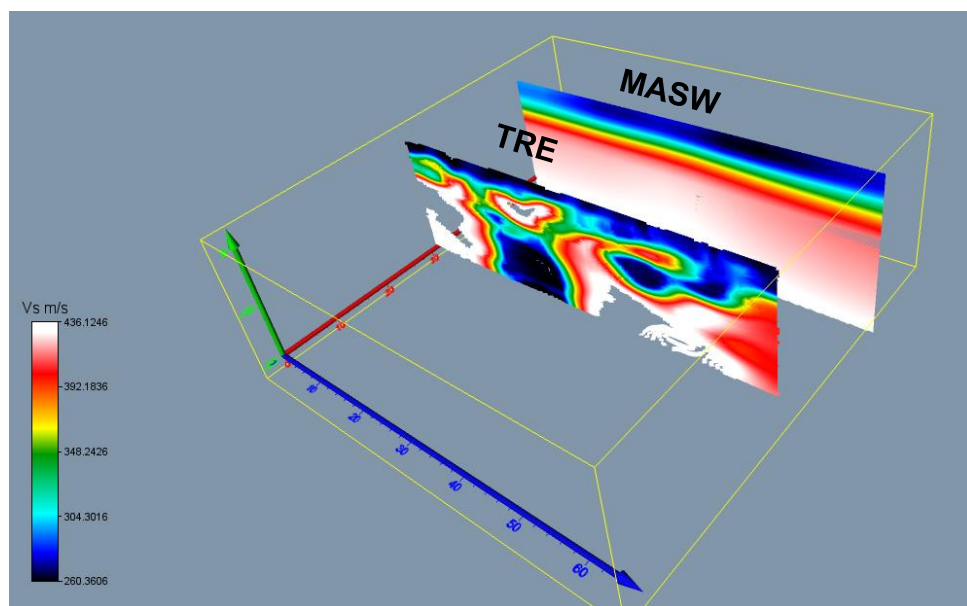
Figura 44: TRE A-A' paralela y B-B' perpendicular a la falla inversa a) vista en dirección N y b) vista en dirección NE la estrella indica la posición de sondeo azimuthal cuadrado y co – lineal, donde la línea roja del eje de coordenadas indica el norte



Fuente: Elaboración propia.

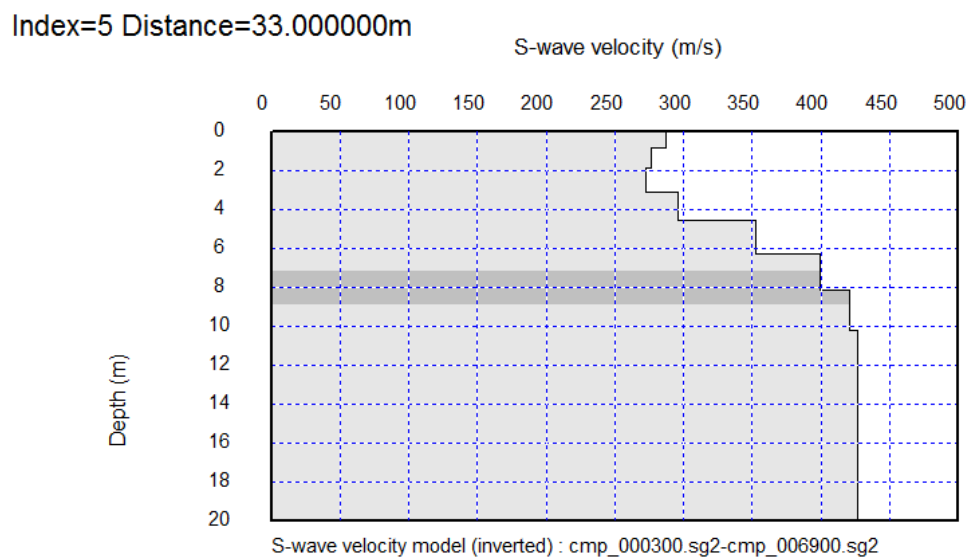
Se compara la TRE y el perfil MASW con la escala de colores que representan las velocidades de las ondas s V_s . Los resultados muestran que hay cierta similitud entre las dos inversiones, donde las resistividades bajas superficiales a menos de 4 m de profundidad, tienen respuesta de velocidad más bajas, mientras que las resistividades más altas casi a más de 10 m de profundidad tienen respuesta de velocidad más altas (**Figura 45**). El perfil 1D para una distancia de golpe de 33 m desde el primer geófono muestra resultados concordantes con los mostrados en las TRE, con un incremento de las velocidades de onda en profundidad (ver **Figura 46**). Los valores de las velocidades de las ondas bajas del MASW podrían asociarse a los niveles más superficiales y menos compactos del subsuelo, y a capas de arcillas/limos, sin embargo, no se evidencian cambios laterales como en la TRE.

Figura 45: Perfil 2D MASW en dirección de la TRE A-A'



Fuente: Elaboración propia

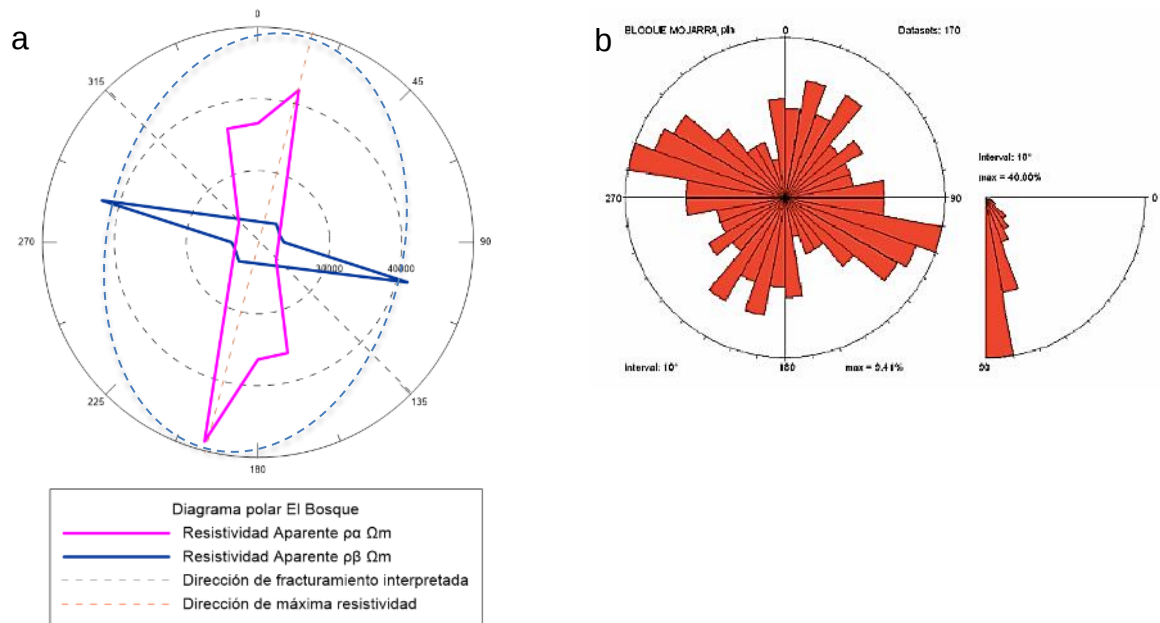
Figura 46: Perfil MASW 1D obtenido para una distancia de 33 metros.



Fuente: Elaboración propia

Los resultados de los valores de las resistividades aparentes mostrados en el diagrama polar de la **Figura 47a**, relacionan el eje menor de la elipse generada con la dirección preferencial de fracturamiento al NW del diagrama de rosetas realizado por Vargas, (2008) para el bloque estructural Mojarra **Figura 47b**. Lo anterior en concordancia como es indicado por Habberjam, (1967) y Busby, (2000) la dirección de fracturamiento es perpendicular a la dirección de máxima resistividad aparente.

Figura 47: Diagrama Polar vs diagrama de rosetas realizado por Vargas (2008) para el sector El Bosque.



Fuente: Elaboración propia

Se realizó el cálculo de los parámetros de anisotropía: coeficiente de anisotropía, Índice de Homogeneidad (Busby, 2000) y porcentaje de anisotropía calculados a partir de las resistividades aparentes ρ_{α} y ρ_{β} . El índice de Homogeneidad se calculó teniendo en cuenta la desviación estándar $\sigma(\rho_{\alpha, \beta})$ y desviación media

$\sqrt{\text{valor medio}[(\rho_{\alpha} - \rho_{\beta})^2]}$ de estos valores, el cual de acuerdo con Busby (2000) es un criterio fuerte para determinar la anisotropía y heterogeneidad de la roca. Los anteriores valores son mostrados en la siguiente tabla, y son descritos en la sección de análisis de resultados:

Tabla 6: Parámetros de anisotropía y homogeneidad para el punto El Bosque.

λ	% Anisotropía	$\sigma(\rho_{\alpha,\beta})$	$\sqrt{\text{valor medio}[(\rho_{\alpha} - \rho_{\beta})^2]}$	Índice de Homogeneidad (Busby, 2000)
1.03	0.03	16864.12	1990789081.50	0.00015

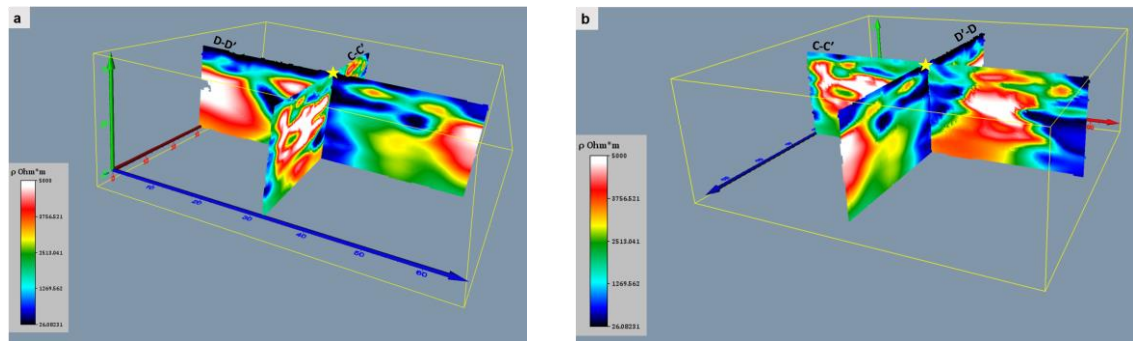
Estos datos sugieren que para ese sector las rocas presentes son anisotrópicas heterogéneas pues la medida de anisotropía difiere de cero, la dispersión causada por inhomogeneidad es más grande que la primera medida mencionada, el coeficiente de anisotropía es un valor mayor a 1, y el índice de homogeneidad es un valor menor que 1.

1.7.2.2 Lago casa de campo (punto de adquisición 2). Los datos adquiridos en este sector se encuentran sobre el Bloque Tabacal (Vargas 2008), y son cercanos a la Falla Honda del tipo normal – sinextral. Se presenta en la **Figura 48** la TRE C-C' perpendicular a la falla, adquirida con el método de Gradiente, y la TRE D-D' paralela a la falla con el método ZZ.

De acuerdo con lo anteriormente descrito, los bajos valores de las resistividades (0 a 1000 Ωm), se encuentran a menos 5 m de profundidad y se puede correlacionar con el suelo permeable y saturado, además de zonas muy fracturadas en profundidad que permiten la infiltración y saturación. Los valores de las

resistividades altas ($>1000\Omega m$) pueden asociarse a niveles de areniscas cuarzosas cementadas sin fracturar.

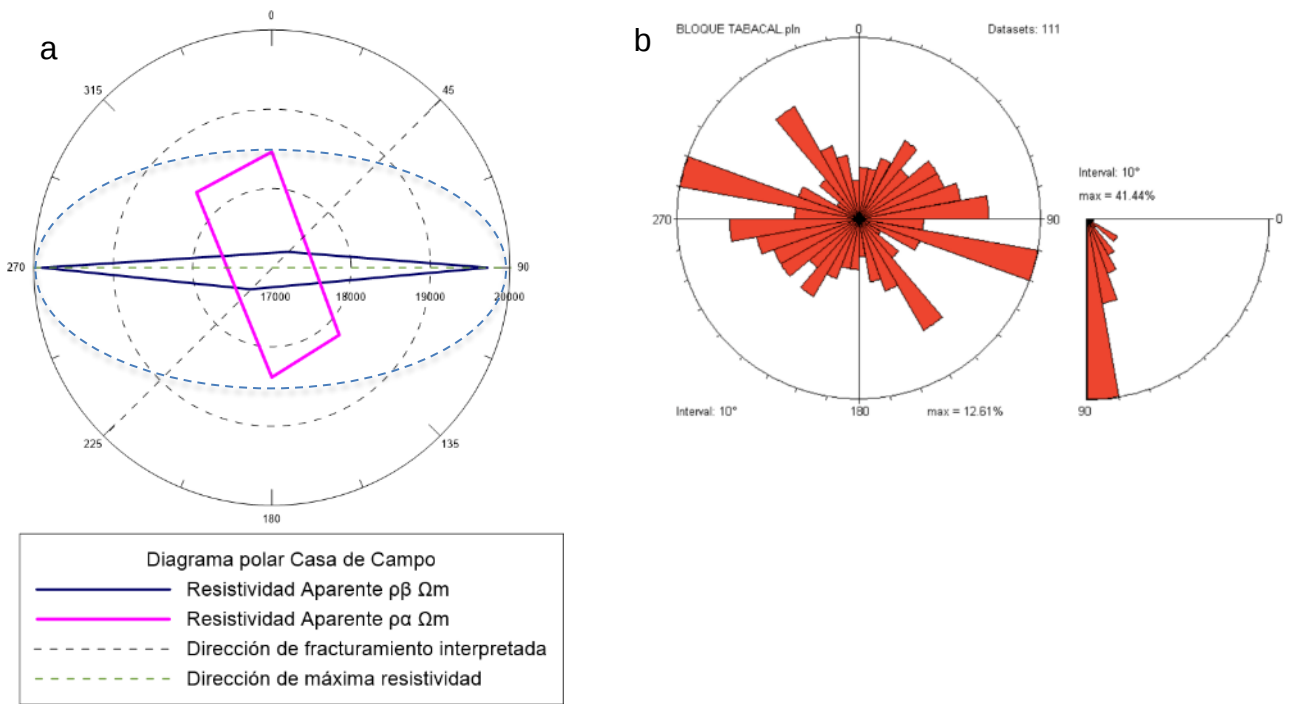
Figura 48: TRE C-C' perpendicular y D-D' paralela a la falla normal, la estrella indica la posición del centro del arreglo cuadrado y SEV.



Fuente: Elaboración propia.

Los resultados de los valores de las resistividades aparentes mostrados en el diagrama polar de la **Figura 49a**, muestran que los valores menores de resistividades se encuentran en una dirección al NE. Sin embargo, el eje menor de la elipse de resistividad, indica que, para ese espaciamiento del arreglo cuadrado (50m) la dirección de las fracturas sería NS como lo indican Habberjam, (1967) y Busby, (2000): la dirección de fracturamiento es perpendicular a la dirección de máxima resistividad aparente. Este resultado difiere con el diagrama de rosetas del bloque estructural Tabacal denominado por Vargas (2008) quien indica que las facturas tienen una dirección NW, mostrado en la **Figura 49b**.

Figura 49 Sondeo eléctrico azimuthal punto Lago Casa de Campo vs diagrama de rosetas obtenido por Vargas, (2008).



Fuente: Elaboración propia y tomado de Vargas, (2008).

Se realizó el cálculo de los parámetros de anisotropía: coeficiente de anisotropía, Índice de Homogeneidad (Busby, 2000) y porcentaje de anisotropía calculados a partir de las resistividades aparentes ρ_α y ρ_β . Los anteriores valores son mostrados en la siguiente tabla y son descritos en la sección de análisis de resultados:

Tabla 7: Parámetros de anisotropía y homogeneidad para el punto Lago Casa de Campo.

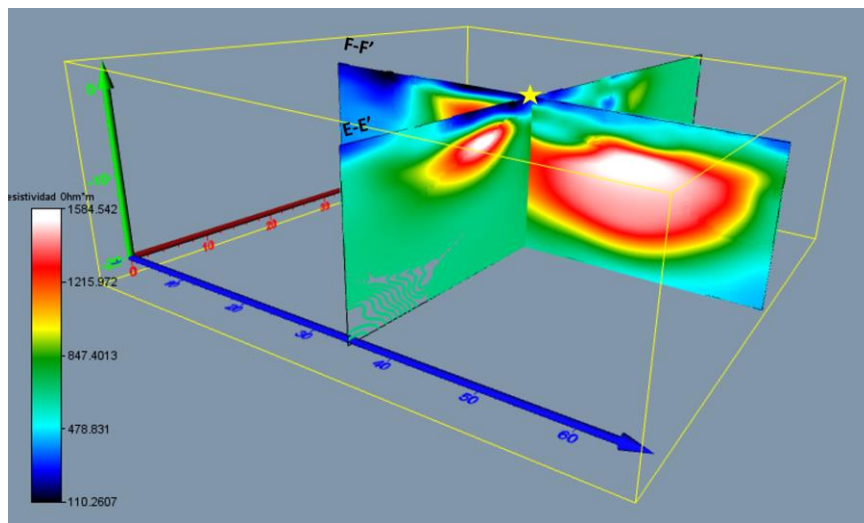
λ	% Anisotropía	$\sigma(\rho_{\alpha,\beta})$	$\sqrt{\text{valor medio}[(\rho_\alpha - \rho_\beta)^2]}$	Índice de Homogeneidad (Busby, 2000)
1.03	0.003	947.11	6279175.88	0.00015

Los anteriores resultados sugieren que las rocas presentes en este punto son anisotrópicas heterogéneas, pues los valores calculados se encuentran dentro de los rangos que autores como Busby, (2000) y Habberjam (1972 y 1975) sugieren para estas características.

1.7.2.3 Finca La Esperanza (punto de adquisición 3). Adicionalmente se realizó una adquisición más, pese a, los datos presentan algunas irregularidades:

A pesar de estar cerca de una línea de tensión, que generalmente tienen un polo a tierra, que inyecta corrientes no deseadas, interfiriendo en la medida de los voltajes, se realizó la inversión de los datos con el software FlashRES y los resultados son mostrados en la **Figura 50**. El resultado de la inversión muestra valores de resistividades anómalos y corresponden a los valores mayores de 1200 ohm*m, y estos se encuentran mayormente distribuidos en dirección F-F', paralela a la falla.

Figura 50: TRE E-E' y F-F' en dirección paralela a la falla El Barbón.



Fuente: Elaboración propia.

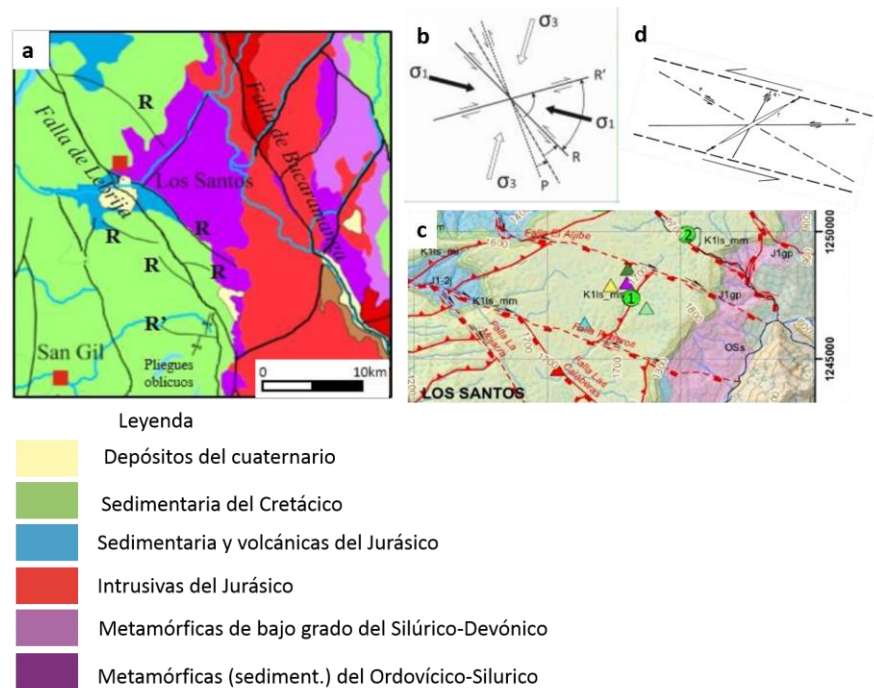
Los datos que fueron tomados por el equipo fueron reducidos debido a que automáticamente este, eliminó los valores negativos y poco confiables. De esta manera las tomografías obtenidas en este punto no muestran gran confiabilidad comparadas con las de los anteriores puntos, en los cuales los puntos adquiridos fueron entre 10-14 mil y los procesados fueron cerca de los 9 mil, mientras que para este punto el programa procesó sólo casi 800 datos.

1.8 ANALISIS DE LOS RESULTADOS

De las descripciones litológicas disponibles en las perforaciones (80 a 100 m de profundidad) presentadas ante la CAS para los permisos de concesiones de aguas subterráneas, y de los datos de campo se obtuvo que las rocas que predominan en los sectores muestreados central, norte y sur, corresponden a areniscas cuarzosas de granos medio y fino con presencia de niveles de areniscas arcillosas, limolitas y arcillolitas de espesores variables. De acuerdo con estos datos, y siguiendo la descripción de INGEOMINAS – UIS (2007) se verificó que el miembro superior de la Formación Los Santos se encuentra constituido generalmente por areniscas cuarzosas de color blanco crema, tiene un espesor variable, mientras que el miembro medio se encuentra constituido por una alternancia de areniscas cuarzosas, areniscas arcillosas, con arcillolitas y limolitas. Estas variaciones litológicas generan diversas respuestas en las adquisiciones realizadas, sin embargo, los contrastes en cada sección evidencian que la presencia de zonas fracturadas altera los valores de resistividad, haciéndolos más bajos, que en zonas donde podría haber pocas fracturas. De acuerdo con lo anterior, los bajos valores de las resistividades (0 a 1000 Ω m) identificados en las TRE, pueden asociarse a suelos altamente permeables y saturados cuyo espesor es menor a los 5 m, y además a areniscas fracturadas y saturadas, y algunos niveles de arcillas y limos presentes en la zona.

Para el sector del Bosque (punto 1 en la **Figura 51**) se presentan dos fallas de rumbo principales: Falla El Aljibe (dextral) y Falla Potreros (sinextral) como se muestra en el mapa geológico de la **Figura 1**, las cuales al ser paralelas y de rumbo pueden tener una cinemática similar bajo el mismo campo de esfuerzos. Además, se presenta una falla inversa menor cerca del punto de adquisición. Asimismo, en esta zona se presentan fracturas abiertas (**Figura 14**) y una densidad de fracturamiento alto (**Figura 15**) documentadas por Contreras, (2008).

Figura 51: a) Sección de la falla de Bucaramanga (Ward et al. (1977b), Pulido (1985), y Gómez et al. (2015) en Velandia (2017)), (b) dirección de los esfuerzos a escala regional (Woodcock y Shubert (1994) en Davis et al. (2012), citados en Velandia, (2017), c) Ubicación del punto El Bosque (punto 1) y Casa de Campo (punto 2) tomado del mapa geológico de la figura 1, y d) orientación de las fracturas para una falla de rumbo, para el caso de la adquisición del punto 2 tomado de Martínez, 2002.

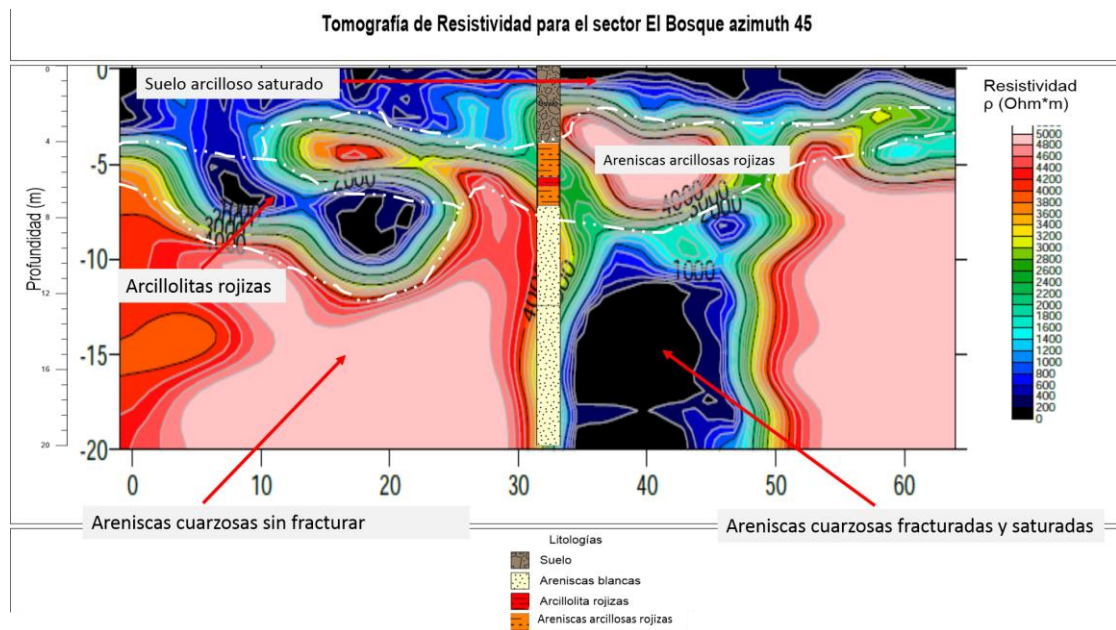


Fuente: Tomado y modificado de Ward et al. (1977b), Pulido (1985), y Gómez et al. (2015), Woodcock y Shubert (1994) en Davis et al. (2012) citados en Velandia, 2017.

Los valores de resistividades encontrados en ambos sectores van desde casi 0 hasta aproximadamente 4000 Ωm donde las zonas con valores de resistividades hasta los 1000 Ωm se asocian a litologías como arcillas y limos, y a sectores saturados donde las fracturas presentan mejor conectividad. Se verifica que, en el punto 1 cercano a una zona de influencia de dos fallas normales con componente de rumbo, los valores de resistividad coinciden con una zona de fracturamiento alta y abierta. Lo anterior, dado que el esfuerzo principal regional compresivo documentado por Vargas, (2008), se encuentra en dirección aproximada NS, el cual puede generar fracturas abiertas en dirección paralela a las fallas normales (Gudmundsson, 2011). INGEOMINAS, (2010) sugiere que debido a la dirección NS del esfuerzo principal en la zona de estudio, la zona puede ser influenciada por la cinemática de la falla de Bucaramanga, para la cual Velandia, (2017) indica que el tensor de esfuerzo actual en la parte sur de esta es en dirección NW.

Esta situación puede evidenciarse en la TRE A-A' de la **Figura 52** la cual va en dirección paralela a una zona de falla inversa en el sector El Bosque (falla que posiblemente fue desplazada por el movimiento del bloque hacia la derecha) y que muestra zonas de resistividades menores a 1000 $\text{ohm}\cdot\text{m}$, en geometrías que sugieren variaciones verticales, asociados a fracturamiento de la roca y otras horizontales asociados a cambios faciales entre areniscas, arcillas y limos característicos de la zona.

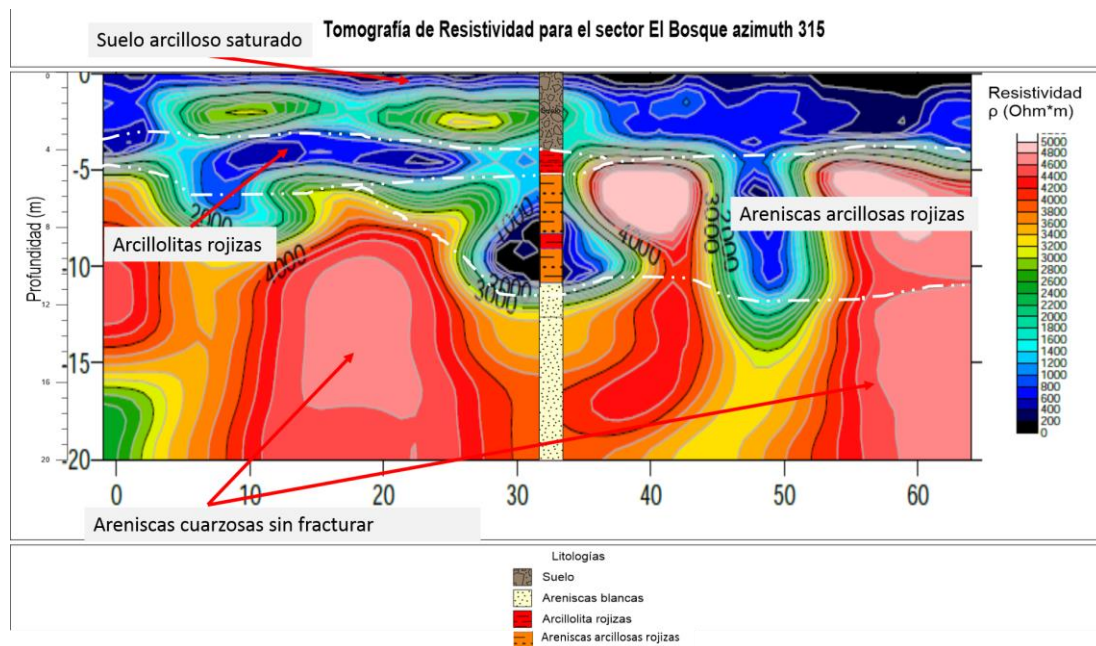
Figura 52: Correlación de la TRE A-A' con las litologías presentes en la zona



Fuente: Elaboración propia.

Los valores de las resistividades más altas (mayores a los 1000 Ωm) se asocian a areniscas arcillosas/limosas muy cementadas con muy baja porosidad secundaria y permeabilidad. Estos se encuentran en mayor proporción en la TRE B-B' perpendicular a la zona de falla inversa mostrada en la **Figura 53**, dirección en la cual las variaciones de resistividad en este caso podrían deberse a cambios faciales entre areniscas y cuerpos de lodolitas acuñados.

Figura 53: Correlación de la TRE B-B' con las litologías presentes en la zona.

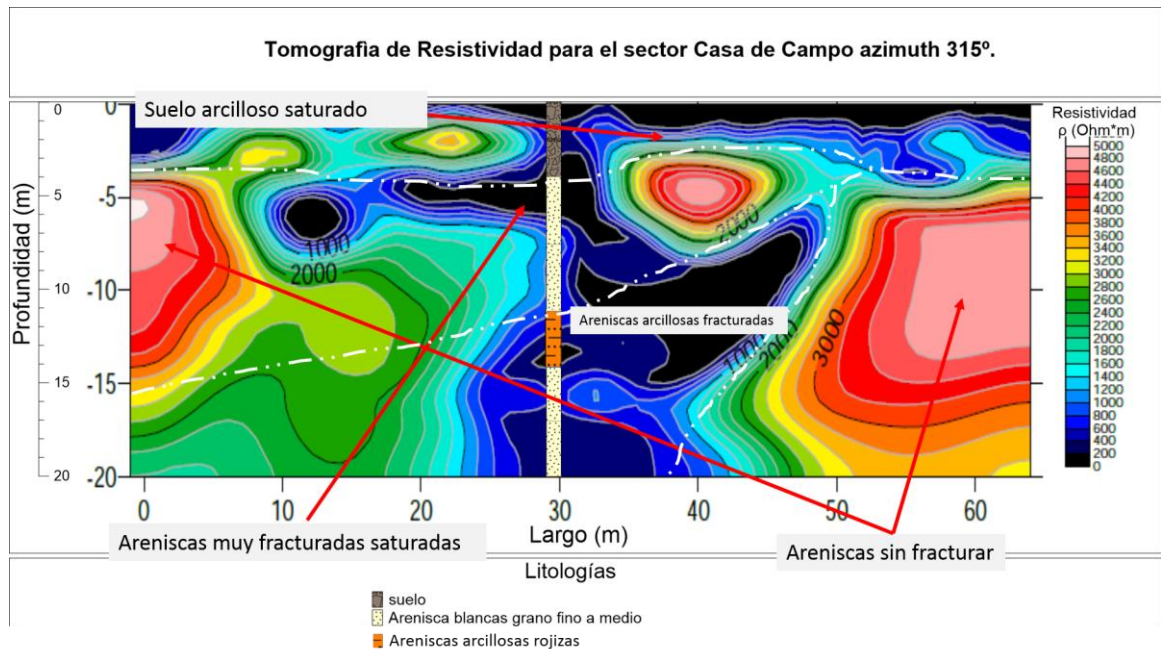


Fuente: Elaboración propia.

En el sector Lago Casa de Campo (punto 2 de la **Figura 1**) se presenta la Falla La Honda, (normal sinextral) y se encuentra sobre una zona de fracturas cerradas (**Figura 14**), y una zona de fracturamiento alta según Vargas (2008) (**Figura 15**). En este caso, las facturas presentes son asociadas al modelo de Riedel, las cuales pueden ser abiertas y altamente conectadas como lo indican Gudmundson, (2011) y Martínez, (2002).

Esta situación se evidencia en la TRE D-D' de la **Figura 54** paralela a la zona de falla normal – dextral que muestra valores bajos de resistividades menores a 1000 ohm*m asociados a roca fracturada, y a cambios faciales entre areniscas oxidadas, arcillas y limos.

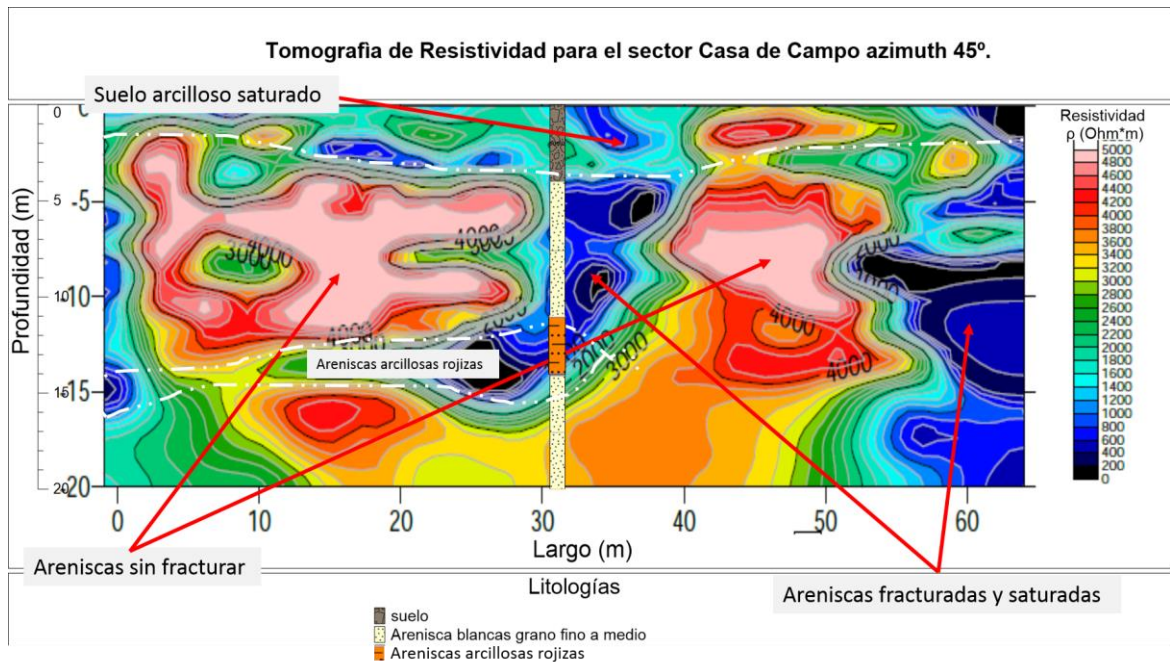
Figura 54: Correlación de la TRE D-D' con las litologías presentes en la zona



Fuente: Elaboración propia.

Los valores mayores a 1000 Ωm se presentan en mayor proporción en la TRE C-C' de la **Figura 55** perpendicular a la falla normal del punto Lago casa de campo.

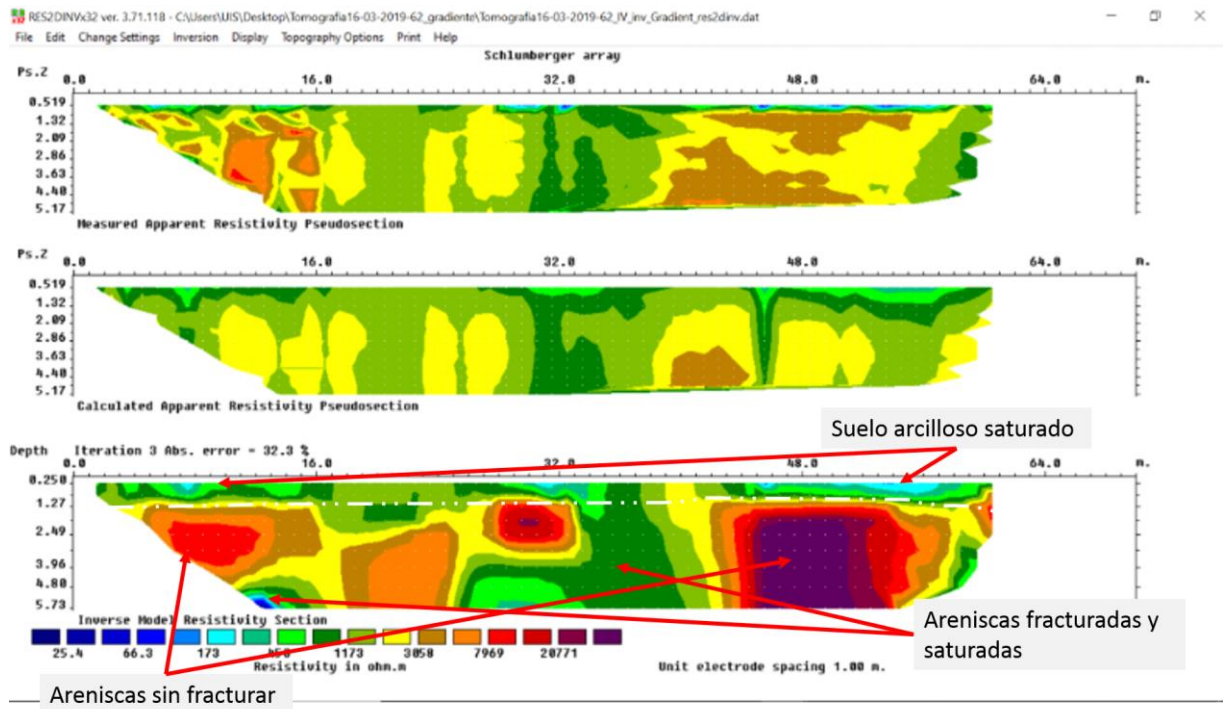
Figura 55: Correlación de la TRE C-C' con las litologías presentes en la zona.



Fuente: Elaboración propia

La **Figura 56** muestra la conversión de la TRE C-C' adquirida con el método de gradiente y convertida al método Schlumberger con el software Res2Dinv. Al comparar las dos TRE, se tiene que, al menos para las zonas de menores resistividades (entre 0 y 1100 ohm*m) se encuentran distribuidas espacialmente de manera similar. Caso contrario ocurre con las zonas de altas resistividades (mayores de 1100 ohm*m) que se encuentran en los extremos y en la parte central de la adquirida con el gradiente no se encuentran presentes en el arreglo Schlumberger.

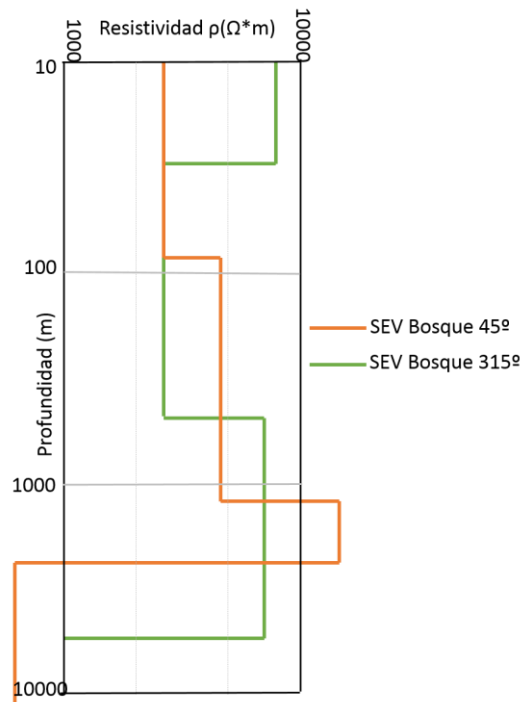
Figura 56: Inversión de la TRE C-C' con el software Res2Dinv convertida a Schlumberger



Fuente: Elaboración propia.

Para el punto del Bosque se presentan las curvas de los SEV ortogonales en la **Figura 57**. Se identifica que las medidas de resistividad de los arreglos varían de acuerdo con la dirección en la que se realizaron y son mayores de 1000 ohm*m. Una posible interpretación es que los sondeos realizan una medida en profundidad por cada espaciamiento, y dependiendo del tipo de roca o material que se encuentre, mide un promedio de los valores de resistividad aparentes. Así, las variaciones litológicas laterales corresponden a heterogeneidades de la zona muestreada que pueden indicar variaciones de resistividades laterales en direcciones diferentes.

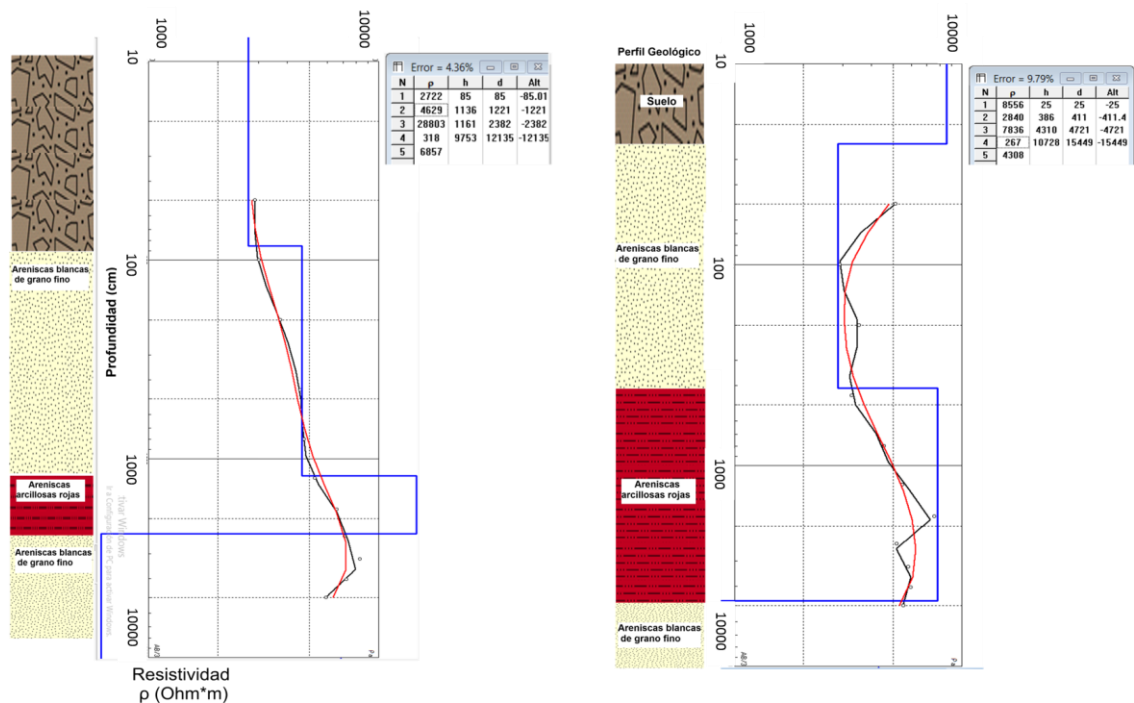
Figura 57: SEV ortogonales para el sector del Bosque



Fuente: Elaboración propia.

En este sentido, se presenta la interpretación de cada curva en la **Figura 58** donde los datos de los valores de resistividades que se encuentran a profundidades cercanas a los 5 m se asocian al suelo, mientras las mayores resistividades se encuentran a aproximadamente 10 m de profundidad y se asocian a capas de areniscas cuarzosas y arcillosas sin fracturar. La inversión muestra una variación de espesores en las diferentes direcciones, sugiriendo que la heterogeneidad es debida a variación litológica lateral.

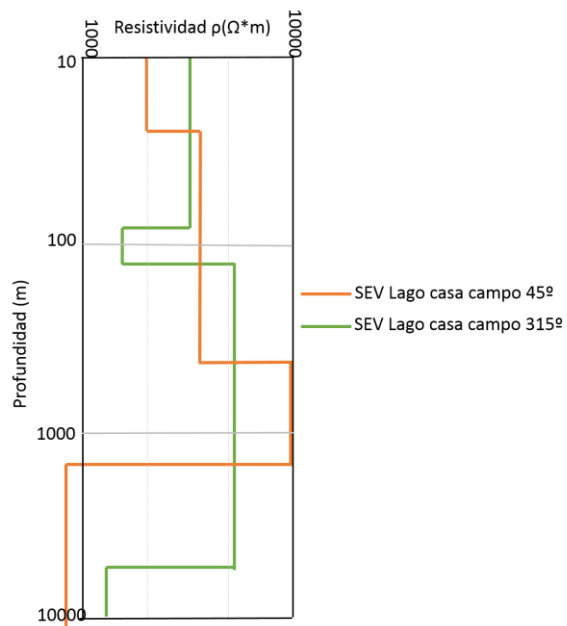
Figura 58: Interpretación del SEV para el punto El Bosque azimuth 45° (izquierda) y 315° (derecha).



Fuente: Elaboración propia.

Para el punto Lago casa de campo se presentan los SEV ortogonales en donde se muestra, al igual que en el sector Lago casa de campo, que se presentan variaciones en las medidas del valor de la resistividad, las cuales están sobre los 1000 ohm*m (**Figura 59**). Estas variaciones pueden deberse a cambios litológicos laterales medidos por los sondeos en diferentes direcciones, es decir que las diferencias entre las curvas de ambos sondeos pueden sugerir una heterogeneidad del subsuelo.

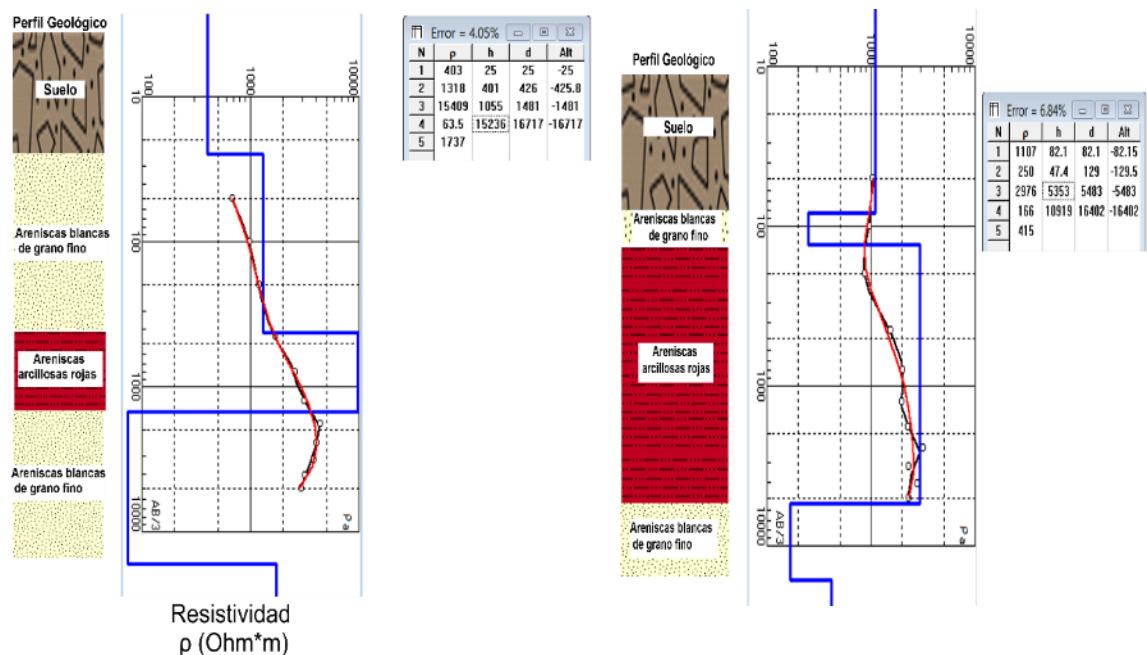
Figura 59: SEV ortogonales para el sector Lago casa de campo



Fuente: Elaboración propia

De igual manera se presenta la correlación litológica en la **Figura 60**, donde los valores de resistividades más bajos pueden asociarse al suelo y a capas de areniscas fracturadas y saturadas, y los más altos a las areniscas cuarzosas arcillosas sin fracturar.

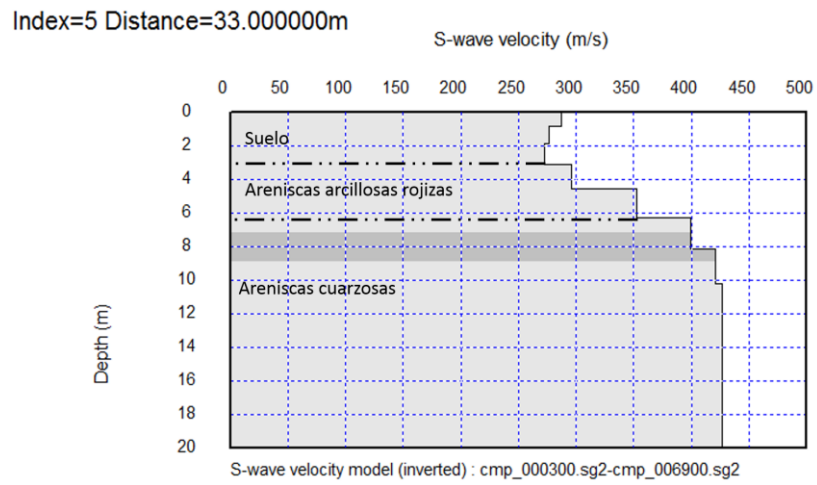
Figura 60: SEV para el punto Lago casa de campo azimuth 45° (izquierda) y 315 (derecha)



Fuente: Elaboración propia.

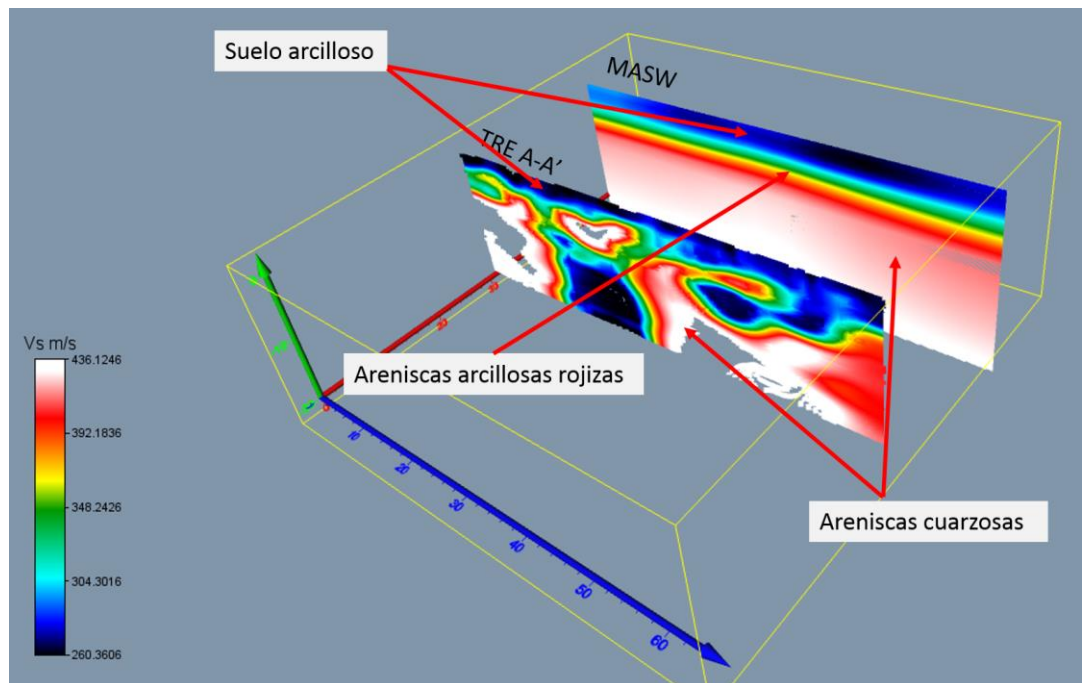
Del perfil 2D MASW pueden verificarse las capas horizontales del miembro superior de la Formación Los Santos, cuyas velocidades de onda más bajas (entre 0 – 271 m/s) pueden asociarse al espesor del suelo que sería de 4 m aproximadamente, y las más altas a alternancias de areniscas arcillosas y arcillas y limos (**Figura 61** y **Figura 62**).

Figura 61: Perfil MASW 1D A-A'



Fuente: Elaboración propia

Figura 62: Correlación de los perfiles de MASW y TRE A-A' de acuerdo con las litologías presentes.



Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo con los parámetros de anisotropía calculados, y de acuerdo con lo que indican Busby, (2000) y Habberjam (1972 y 1975) se obtiene que las zonas muestreadas geoelectricamente reportan resultados concordantes con los valores propuestos por estos autores para medios anisotrópicos heterogéneos. Las resistividades mostradas en los diagramas polares son contrastantes en los diferentes azimuts, y lo suficientemente diferentes para indicar una variación de esta propiedad con la dirección (anisotropía).

DISCUSIÓN

Los valores de resistividades de las TRE en los puntos adquiridos van desde valores menores de 1000 ohm*m hasta casi 5000 ohm*m, donde los más bajos se asocian a zonas de saturación de aguas además de cambios litológicos como arcillas y limos, mientras los valores más altos a zonas de areniscas cuarzosas, y además sin fracturar. Los primeros valores son concordantes con los que reportan García y Gómez (2015), quienes indican que las resistividades más bajas se encuentran asociadas a zonas fracturadas más que por litología. Respecto de las resistividades altas, estos autores no referencian ninguna zona con valores similares. Esta situación podría deberse a la diferencia de la ubicación geográfica entre las tomografías del presente trabajo y las realizadas por los anteriores autores.

De acuerdo con las descripciones de los pozos, y con la profundidad de cada uno de ellos, se presentan los tres miembros de la formación Los Santos, sin embargo, las descripciones realizadas por las empresas perforadoras no permiten evidenciar claramente cada uno de los miembros de la Formación Los Santos. Los registros litológicos muestran que se presentan cambios faciales entre los miembros de la formación Los Santos, los cuales se evidencian con las tomografías de resistividad realizadas en este trabajo con los cambios de resistividades laterales y en profundidad. Estos cambios faciales también se evidencian como heterogeneidades vistos como cambios de resistividades en los SEV ortogonales en los puntos adquiridos.

Los resultados obtenidos de los parámetros de anisotropía a partir de los sondeos azimutales cuadrados en los puntos adquiridos refuerzan los hallazgos de las tomografías y los sondeos verticales, respecto de la anisotropía y heterogeneidad del terreno en zonas cercanas a las fallas estudiadas. Estas características podrían estar relacionadas con los cambios litológicos de los miembros de la Formación Los

Santos, y además con la presencia de las zonas fracturadas reportadas por otros autores.

Los datos obtenidos de los valores de resistividades bajos en las TRE, indican que el flujo de aguas subterráneas puede ser favorecido por las fallas normales con componente de rumbo, esto, mostrado en el sector del Bosque, donde los datos fueron tomados cerca de una zona de falla inversa, pero limitada por dos fallas normales con componente de rumbo, y en el sector de Lago Casa de Campo zona cercana a una falla normal – sinextral. Lo anterior teniendo en cuenta que la dirección del tensor de esfuerzos es NS indicado por Vargas (2008) y además Velandia (2017) sugiere que estas fallas normales al ser paralelas y de rumbo, pueden tener una cinemática similar para el mismo campo de esfuerzos

Pese a, no realizar medidas con espaciamientos cada vez mayores para los sondeos azimutales, los cuales podrían mostrar una tendencia más clara de la anisotropía a profundidad debido al fracturamiento de las rocas, es evidente que en los lugares muestreados se presentan variaciones de las medidas de resistividad en diferentes direcciones. Estas son concordantes en el caso de los sondeos adquiridos con el arreglo cuadrado con la dirección medida de fracturamiento en campo, y en el caso de la adquisición con arreglo colineal ortogonal, posiblemente definido por variación de espesores y cambios litológicos laterales en el subsuelo. Sin embargo, para el sector Lago Casa de Campo el diagrama polar de resistividades no muestra una tendencia del fracturamiento similar al diagrama de rosetas del bloque estructural realizado por Vargas, (2008). Esta situación puede deberse a que el largo del cuadrado y la cantidad de puntos adquiridos, no permitieron evaluar a una profundidad progresiva el fracturamiento del subsuelo, el cual se esperaría que fuera concordante con el diagrama de rosas al NW. Para el punto de El bosque el diagrama polar de resistividades si es concordante con lo que se espera encontrar de acuerdo con el diagrama de rosetas es decir al NW. Se

calcularon los parámetros de anisotropía para cada uno de estos lugares y se reportan valores válidos de anisotropía para un subsuelo anisotrópico heterogéneo.

Debido a que se realizaron adquisiciones de las TRE con el arreglo ZZ y con el arreglo gradiente para el sector de Lago Casa de Campo, las zonas que muestran baja resistividad muestran poca correlación entre las inversiones mostradas. La conversión de la tomografía adquirida con el arreglo gradiente a Schlumberger muestra una tendencia de altas resistividades en los extremos de las tomografías concordante con la inversión del arreglo de gradiente, pero diferente en la distribución de las bajas resistividades. En este caso, las variaciones reportadas en las tomografías eléctricas se interpretaron identificando tendencias de 20 metros de ancho a profundidades de 5 a 20 m, que posiblemente corresponden a zonas de fracturamiento, relacionado con el sistema de Riedel. La escala de medición de estas tomografías es mayor a la de los sondeos azimutales, y también menos confiable (ya que la distribución de las anomalías depende de la inversión ejecutada también). Con esta sugerencia de baja confiabilidad se identifican zonas verticales de 20 m de ancho con alta saturación de agua en dirección paralela a las fallas de rumbo principales, las cuales tienen conexión desde la superficie del suelo.

Del punto de adquisición cercano a una torre de tensión, pese a, estar cerca de una línea de tensión, que generalmente tienen un polo a tierra, que inyecta corrientes no deseadas, interfiriendo en la medida de los voltajes, se realizó la inversión de los datos con el software FlashRES. Estos datos fueron reducidos debido a que automáticamente este, eliminó los valores negativos y poco confiables, de esta manera las tomografías obtenidas en este punto no muestran gran confiabilidad comparadas con las de los anteriores puntos, en los cuales los puntos adquiridos fueron entre 10-14 mil y los procesados fueron cerca de los 9 mil, mientras que para este punto el programa procesó sólo casi 800 datos. Sin embargo, vale la pena indicar que para este sector norte de La Mesa se presentan resistividades de las rocas más bajas que los dos anteriores sitios, y van desde los 0 a 2000 ohm*m. Se

puede asociar los valores más bajos de resistividades 0 a 500 ohm*m al espesor del suelo saturado, y los más altos a capas de areniscas sin fracturar.

CONCLUSIONES

La anisotropía de resistividad para el miembro superior de la Formación Los Santos se encuentra fuertemente influenciada por la presencia de zonas fracturadas en cercanía de las distintas fallas presentes en toda la zona. A partir de los datos de tomografías de resistividad, sondeos eléctricos cuadrados se identifican zonas de bajas resistividades, con valores entre los 0 y 1000 Ωm y zonas con valores menores a los 4000 Ωm , y además variación de valores de resistividad con el azimut, es decir se presenta una anisotropía de resistividad lateral y verticalmente.

Se identificó en las tomografías de resistividad que las variaciones de resistividad pueden estar asociadas a cambios faciales que se identificaron en las descripciones de los pozos. También pueden deberse a zonas de roca fracturada que puede estar saturada de agua, que, al estarlo, los valores de resistividad cambian drásticamente. Es importante señalar que en las TRE que se adquirieron paralelas a las zonas de falla, hay zonas de resistividades bajas (menores de 1000 $\text{ohm}\cdot\text{m}$) importantes, en contraste con las TRE perpendiculares a las fallas. Esta situación puede deberse a que ambos puntos fueron adquiridos en zonas cercanas a fallas de rumbo, cada una a diferente escala, en la cual de acuerdo con el modelo de Riedel las fracturas pueden ser abiertas y tener alta conectividad.

Los sondeos co lineales muestran una variación de las medidas de resistividad en las dos direcciones que se realizaron para los dos puntos de adquisición. Esta variación puede deberse a la heterogeneidad del subsuelo lateral y verticalmente.

Los resultados de los sondeos cuadrados, muestran que las resistividades del subsuelo varían con la orientación del arreglo, pero a diferencia de los sondeos co lineales, en una dirección coherente con la dirección de diaclasamiento reportado

para la zona. Estos resultados sugieren que el arreglo cuadrado es menos susceptible a las heterogeneidades, y por lo tanto mejor para medir la anisotropía.

Es posible que las fallas con mayor importancia hidrogeológica en la región sean del tipo normales, con componente de rumbo, pues al parecer, favorecen en gran magnitud el flujo de fluidos como las aguas subterráneas, como es mostrado en el sector del Bosque, donde los datos fueron adquiridos cerca de una zona de falla inversa, pero limitada por dos fallas normales con componente de rumbo, y en el sector de Lago Casa de Campo zona cercana a una falla normal – sinextral. En ambos sectores se presentan zonas de bajas resistividades asociadas a la saturación de las rocas debido a la conectividad de las fracturas.

Se muestra que los co lineales, son sensibles a las heterogeneidades, en cambio, el arreglo cuadrado, parece ser menos susceptible y mejor para medir anisotropías.

RECOMENDACIONES

Debe realizarse la adquisición de los sondeos eléctricos cuadrados en diferentes azimuts, preferiblemente a 15° , para que los datos adquiridos se correlacionen con la metodología de sondeos cuadrados cruzados que establece Habberjam, (1972) y a diferentes espaciamientos para la verificación en profundidad de la anisotropía de resistividad, y los demás parámetros que establece este autor.

La cercanía de torres de electricidad en los puntos de adquisición, pueden alterar los datos de resistividad. Una verificación posible en campo de la calidad de los datos, puede ser la presencia de valores de resistividad negativos posiblemente generados por la descarga del polo a tierra de la torre. El filtro de estos datos podría permitir una solución, de menor confiabilidad que si la medición se realizara en un sitio sin torres cercanas.

Realizar datos de adquisición con los sondeos eléctricos cuadrados sobre los sectores norte y sur de La Mesa de Los Santos, para que a través de un estudio estructural se pueda ayudar a estimar la dirección preferencial de los fluidos, y dar un aporte en el conocimiento del comportamiento de las aguas subterráneas, para su buena gestión y manejo dentro de la comunidad.

BIBLIOGRAFIA

AGI - ADVANCED GEOSCIENCE, Inc. USA. Una mirada general a los estudios de resistividad eléctrica. Webinar. 2020. Disponible en <https://agiusa.wistia.com/medias/bjs87erf8c>.

ALCALDÍA MUNICIPAL DE LOS SANTOS, SANTANDER. EOT - Esquema de Ordenamiento Territorial. Los Santos, Santander. Anexo cartográfico. 2018 1p.

ALCALDÍA MUNICIPAL DE LOS SANTOS, SANTANDER. Esquema de ordenamiento Territorial. Los Santos, Santander. 2003. pp 34-75.

ANTONELLI, Marco y AYDIN, Atilla. Effect of faulting on fluid flow in porous sandstones: geometry and spatial distribution. *AAPG Bulletin*.1995, nro 79, pp 642-671.

BUSBY, J. The effectiveness of azimuthal apparent resistivity measurements as a method for determining fracture strike orientations. *Geophysical prospecting*. 2000, nro 48, pp 677-695.

CADENA, Wilmer. Caracterización geoeléctrica del subsuelo para la prospección de agua subterránea en el área de Menzuly Campestre, Piedecuesta, Santander. Trabajo de grado Geologo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de geología. Facultad de ingenierías Fisico - Químicas. 2015. 98p.

CAINE, Jonathan Saul, *et al*. Fault zone architecture and permeability structure. *Geology*. 1996, vol 24 nro 11, pp 1025-1028.

CONTRETRAS, Maria Nathalia. Análisis del fracturamiento presente en la Formación Los Santos al noreste y centro de La Mesa de Los Santos, departamento

de Santander. Trabajo de grado geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de geología. Facultad de Ingenierías Físico - Químicas. 2008. 27p.

CORPORACIÓN AUTONOMA REGIONAL DE SANTANDER - CAS. Mapa de localización de concesiones de aguas subterráneas en el municipio de los Santos. Escala 1:100000. San Gil. 2016. 1p.

DAVIS, S, y Wiest, R. Hidrogeología. Barcelona: Ediciones Ariel. 1971. 562p

DIAZ ALVAREZ, Eliana Jimena. Análisis preliminar del potencial hidrogeológico en la Mesa de los Santos, Región Central del departamento de Santander. Trabajo de grado geóloga. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico - Químicas. Escuela de geología, 2008. 36p.

DIAZ, Eliana Jimena *et al.* Evaluación hidrogeológica preliminar de las unidades geológicas de la Mesa de los Santos, Santander. *Boletín de Geología*. 2009, vol. 31, pp. 61-70.

FOTI, S., *et al.* Surface Wave Methods of Near-Surface Site Characterization. New York: CRC Press. Taylor and Francis Group. A Spon Press Book. 2015. 482p

GARCIA ARIAS, Sergio Andrés y GOMEZ GARCÍA, Emilio Andrés. Modelo conceptual hidrogeofísico para evaluar el potencial hidrogeológico de la Formación Los Santos en la Mesa de Los Santos – Santander, Colombia. Trabajo de grado geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico - Químicas. Escuela de geología. 2015. 143p.

GUDMUNDSON, August. Rock Fractures in Geological Processes. New York: Cambridge University Press. 2011. 593p.

GUZMAN ROMERO, Maira Alejandra. Caracterización de la heterogeneidad y anisotropía de un medio fracturado y sus implicaciones hidrogeológicas usando

prospección geoelectrica e información RQD. Trabajo geólogo. Bogotá: Universidad Nacional. Facultad de Minas. Posgrado de aprovechamiento de recursos hidráulicos. 2014. 139p.

HABBERJAM G. M., W. G. The use of a square configuration in resistivity prospecting. *Twenty-Ninth Meeting of the European Association of Exploration Geophysicists*, held in Stockholm. 1967, junio, pp. 445-467.

HABBERJAM, G. M. The effects of the anisotropy on square array resistivity measurements. *Geophysical Prospecting*. 1972, pp 249-266.

HABBERJAM, G. M. Apparent resistivity, anisotropy and strike measurements. *Geophysical Prospecting*. 1975, pp 211-247.

INGEOEXPLORACIONES SAS - CORPORACIÓN AUTÓNOMA REGIONAL DE SANTANDER CAS. Elaboración y formulación del plan de manejo de aguas subterráneas en el sector de La Mesa, municipio de Los Santos. Fase II. Original tomo I. San Gil. 2016. 263p

INGEOMINAS - UIS. Proyecto de investigación geológica e hidrogeológica en La Mesa de los Santos, sector noeste de Curiti y borde occidental del Macizo de Santander, departamento de Santander. Bucaramanga. 2007. 145p

INGEOMINAS. Abastecimiento de aguas subterráneas para el municipio de Los Santos (Santander). Informe 1555. Bogotá. 1970. 35p

INGEOMINAS. Informe Hidrogeológico de La Mesa de Los Santos. Bogotá. 2009. 75p

INGEOMINAS. Integración geológica e hidrogeológica del centro de Santander. Memoria. Bogotá. 2010. 117p

INGEOMINAS. Prospección geoelectrica en la Mesa de Los Santos (Santander) Procesamiento e interpretación de Sondeos Eléctricos Verticales. Bogotá. 2010. 50p.

KIRSCH., R. Groundwater Geophysics. A tool for hydrogeology. Berlin: Springer. 2009. 556p.

LOKE, M. Tutorial 2D y 3D Electrical Imaging Surveys. 2012. 173p

MARTÍNEZ CATALAN, Jose Ramon. Geología estructural y dinámica global. Salamanca: Departamento de geología. Universidad de Salamanca. 2002. 431p

MASSOUD, Usama, *et al.* Delineation of Shallow Subsurface Structure by Azimuthal Resistivity Sounding and Joint Inversion of VES-TEM Data: Case Study near Lake Qaroun, El Fayoum, Egypt. *Pure and applied Geophysics*. 2009 pp 701-719.

MOREIRA, S., BACELAR, L., y P.R.A, A. A comparative evaluation of vertical fractures using different azimuthal electrical resistivity survey arrays. *Near surface Geophysics*. 2019, pp 345-357.

MUSSETT, A., y KHAN, A. Looking into the Earth. Illustrations by Sue Button. 2000. 470p.

PARK, C. B., MILLER, R. D., XIA, J., y IVANOV, J. Multichannel Analysis of surface waves (MASW) - active and passive methods. *The Leading Edge - Society of Exploration Geophysicists*. 2007, pp 60-64.

RAMANUJAM Nr, R. A. Azimuthal square array resistivity studies to infer active fault zones in the areas of known seismicity, Kottayam District, Kerala - A case study. *Journal of Indian Geophysical Union*. 2006, pp 197-208.

RAVINDRAN, A. Azimuthal square array method and potential zone in hard rock area in Thoothukudi District. Tamilnadu. *Archives of applied Science Research*. 2012, pp 971-979.

RAWLING, G., GOODWIN, L., y WILSON, J. Internal architecture, permeability structure, and hydrologic significance of contrasting fault-zone types. *Geology*. 2001, pp 43-46.

SARPONG, Van-Dycke, GYASI, Emmanuel, y BISMARCK, Fofie Okyere. Azimuthal Resistivity Sounding with the Symmetric Schlumberger and the Alpha Wenner Arrays to study subsurface electrical anisotropy variation with depth. *International Journal of Scientific and Research Publications*. 2015, Volumen 5, nro 5, pp 1-11.

TAYLOR, Robert, y FLEMMING, Anthony. Characterizing joined system by azimuthal resistivity surveys. *Ground Water*. 1988, vol. 26, nro 4, pp 464 - 474.

UDOSEN, I., y GEORGE, J. Characterization of electrical anisotropy in North Yorkshire, England using square arrays and electrical resistivity tomography. *Geomechanics and Geophysics for Geo-Energy and Geo-Resources*. 2018, mayo, 19p.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY USGS - TERRY, Neil, *et al.* Scenario Evaluator for Electrical Resistivity Survey Pre-modeling Tool: Groundwater. 2017. Disponible en <http://dx.doi.org/10.1111/gwat.12522>.

VARGAS JEREZ, Claudia Yaneth. Cartografía geológica a escala 1:25000 de La Mesa de Los Santos, Departamento de Santander. Trabajo de grado geólogo. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de ingenierías Físico - Químicas. Escuela de geología. 2008. 59p

VELANDIA PATIÑO, Francisco. Cinemática de las fallas mayores del Macizo de Santander - énfasis en el modelo estructural y temporalidad al sur de la falla de

Bucaramanga. Tesis doctorado en geociencias. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de ciencias. 2017. 222p.

WATSON, Kathryn, y BARKER, Ron. Differentiating anisotropy and lateral effects using azimuthal resistivity offset Wenner soundings. *Geophysics*. 1999, vol. 64 nro 3, pp 739-745.

ZHODY, A., G.P., E., y R., M. D. Chapter D1: Applications of surface geophysics to ground water investigations. En: *Technics of water resources investigations of the United States of Geological Survey*. U.S. Dept. of the Interior, Geological Survey: U.S. Govt. Print. Off., 1974, pp 66.

ZZ RESISTIVITY IMAGING PTY LTD, A. (S.F.). User Manual for FlashRES-UNIVERSAL 64-96 The Full-channel configuration. Resistivity/IP Exploration System. Obtenido de ZZ Resistivity Imagin Pty Ltd. Disponible en: <http://www.zzgeo.com>

ANEXOS

A: COLUMNA ESTRATIGRÁFICA VEREDA EL CARRIZAL A ESCALA 1:100,
REALIZADA POR (INGEOMINAS - UIS, 2007).



Zona Mesa de Los Santos

[illegible]