

## **Proyecto de Grado**

“Identificación de anomalías resistivas asociadas a cavidades y/o conductos subterráneos poco profundos en el Pseudokarst de Santa Elena, vereda El Plan”

### **Estudiante**

Angélica Ortega Agudelo

[aortega3@eafit.edu.co](mailto:aortega3@eafit.edu.co)

### **Asesor**

PhD. Marcela Jaramillo Uribe

[majaram9@eafit.edu.co](mailto:majaram9@eafit.edu.co)

### **Co-asesor**

Juan Felipe Paschke Castaño

[jpaschke@eafit.edu.co](mailto:jpaschke@eafit.edu.co)

Departamento de Ciencias de la Tierra.

Universidad EAFIT

Medellín – Colombia

2019

## **AGRADECIMIENTOS**

En primer lugar, agradezco a la Universidad EAFIT por guiarme siempre con conocimiento y sabiduría a lo largo de la carrera universitaria y por instaurar objetivamente la base fundamental de mi desarrollo profesional. Así mismo, deseo transmitir gratitud a mi asesora, la profesora Marcela Jaramillo Uribe, por guiar el proyecto bajo los lineamientos de su experiencia y al ingeniero Juan Felipe Paschke por influir en mi formación personal y académica, por transmitir su conocimiento y pasión por la geofísica, y por supervisar y guiar el desarrollo del proyecto hasta su entera ejecución.

Por otra parte, quiero destacar a todas las personas que nos acogieron en la vereda El Plan del corregimiento de Santa Elena, ya que fueron esenciales para poder realizar cada una de las actividades del proyecto. Por esta razón, agradezco enormemente a Lina Boja Niní y su esposo, a Alejandro Hernández y a John Mejía.

Para finalizar, reservo mis últimos agradecimientos para amigos, colegas y colaboradores Mateo Ramírez y Juan Sebastián Tejada por proporcionar las fotografías aéreas presentadas en el presente proyecto a partir de drones. A Rossemberg Bermúdez y a Sandra Patiño su acompañamiento y confianza.

## TABLA DE CONTENIDO

<b>Resumen.....</b>	<b>7</b>
<b>1. Introducción .....</b>	<b>8</b>
<b>2. Generalidades.....</b>	<b>10</b>
2.1. Pregunta de investigación .....	10
2.2. Hipótesis .....	10
2.3. Objetivo General .....	10
2.4. Objetivos Específicos.....	10
<b>3. Metodología .....</b>	<b>11</b>
3.1. Estado del Arte .....	11
3.2. Planeación de la Campaña de Adquisición .....	12
3.3. Adquisición de Datos.....	13
3.4. Procesamiento e inversión de datos .....	13
<b>4. Zona de estudio .....</b>	<b>16</b>
4.1. Localización y vías de acceso .....	16
4.2. Geología.....	18
4.2.1. Geología Regional .....	18
4.2.2. Geología Estructural .....	21
4.2.2.1. Estructuras Regionales.....	21
4.2.2.2. Estructuras Locales.....	21
4.2.3. Geología Local - Dunita de Medellín .....	25
4.3. Geomorfología .....	26
<b>5. Métodos Geoeléctricos .....</b>	<b>28</b>
5.1. Adquisición.....	28
5.1.1. Técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D .....	28
5.1.2. Técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D .....	29
5.1.3. Configuración Electrónica .....	30
5.2. Procesamiento.....	31
5.2.1. Introducción a la teoría de inversión .....	31
5.2.2. Procesamiento de datos Res2Dinv.....	33
5.2.3. Rangos de resistividad del modelo .....	36
5.2.4. Procesamiento de datos Res3Dinv.....	37

5.2.5.	Interpolación de resistividad.....	40
<b>6.</b>	<b>Resultados.....</b>	<b>41</b>
6.1.	Modelos 2D.....	42
6.2.	Modelos 3D.....	43
6.2.1.	Vista en planta a 0.80m a 3 m de profundidad.....	44
6.2.2.	Vista en planta a 3m a 6m de profundidad.....	45
6.2.3.	Vista en planta a >6m de profundidad.....	46
<b>7.</b>	<b>Discusión.....</b>	<b>47</b>
<b>8.</b>	<b>Conclusiones.....</b>	<b>50</b>
<b>9.</b>	<b>recomendaciones.....</b>	<b>51</b>
<b>10.</b>	<b>Bibliografía.....</b>	<b>52</b>
<b>11.</b>	<b>Anexos.....</b>	<b>54</b>

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Localización esquemática de la Vereda El Plan, corregimiento de Santa Elena, municipio de Medellín – Antioquia. Elaboración propia.....	16
<b>Figura 2.</b> El dibujo muestra la relación hidro-geológica entre las geoformas kársticas de la vereda El Plan y los depósitos de Vertiente localizados en las laderas Orientales de Medellín. Tomado y modificado de Rodríguez (1989). .....	27
<b>Figura 3.</b> Representación esquemática de la secuencia de medida en el software GeoTest, para adquisición de Tomografías de resistividad Eléctrica 2D.....	29
<b>Figura 4.</b> Representación esquemática de la secuencia de medida en el software GeoTest, para adquisición de Tomografías de resistividad Eléctrica 3D.....	29
<b>Figura 5.</b> Representación esquemática de los datos de medida, para un dispositivo Wenner – Schlumberger, para varios niveles de adquisición. Elaboración propia. ....	30
<b>Figura 6.</b> Representación esquemática de los datos de medida, para un dispositivo Square, para varios niveles de adquisición. Elaboración propia.....	31
<b>Figura 7.</b> Proceso de inversión de datos geoelectricos. Elaboración Propia.....	32
<b>Figura 8.</b> Representación de los datos ruidosos señalado con una flecha roja de la línea 1, Dipolo-Dipolo en la ventana de edición del programa Res2DInv. ....	34
<b>Figura 9.</b> histogramas del error RMS se observan la distribución de puntos ruido del perfil 1 para el dispositivo Dipolo – Dipolo “aleatorio”, para este caso se desplazó “la barra verde” hasta 50% de los datos en la gráfica de barras. ....	34
<b>Figura 10.</b> Representación de la opción “Modelo de discretización” para el “perfil 1”. Estimando un modelo de bloques mayor al número de datos y además se usa un modelo extendido. ....	36
<b>Figura 11.</b> Histograma de frecuencia de los datos resistivos adquiridos .....	36
<b>Figura 12.</b> Inversión para el “perfil 1” para la configuración Wenner-Schlumberger <b>(a)</b> . sin análisis estadístico. <b>(b)</b> . con análisis estadístico. ....	37
<b>Figura 13.</b> Modelo empleado para interpretar los conjuntos de datos con el RES3DINV (Loke y Barker, 1996). ....	38
<b>Figura 14.</b> Despliegue de secciones en RES3DINV para 7 intervalos de profundidad en secciones horizontales “x” y “y”, para la adquisición “Mapping 1”.....	39
<b>Figura 15.</b> Despliegue de secciones en RES3DINV para 7 intervalos de profundidad en rebanadas horizontales “x” y “y”, para la adquisición “Mapping 2”.....	39
<b>Figura 16.</b> Resultados de inversión del “Perfil 2” con orientación N30W. Dispositivo “Wenner-Schlumberger”. ....	42
<b>Figura 17.</b> Resultados de inversión del “Perfil 2” con orientación N85E. Dispositivo “Wenner-Schlumberger”. ....	43

<b>Figura 18.</b> Visualización del modelo geoelectrico 3D obtenido para la adquisición. A. Mapping 1. B. Mapping 2” .....	44
<b>Figura 19.</b> Visualización del modelo geoelectrico 3D en software Voxler, obtenido para la adquisición “Mapping 1”. Vista en planta y a profundidad de las resistividades obtenidas. A) Profundidad de -3m. B) Profundidad de – 4m.C) Profundidad de -6m. D) Profundidad de -8m. 45	45
<b>Figura 20.</b> Visualización del modelo geoelectrico 3D en software Voxler, obtenido para la adquisición “Mapping 2”. A) Profundidad de -2m. B) Profundidad de – 3m. C) Profundidad de -6m. D) Profundidad de -7m. ....	46
<b>Figura 21.</b> Representación esquemática de las Tomografías Eléctricas 2D en el área de estudio. ....	48

### LISTA DE TABLA

<b>Tabla 1.</b> Unidades litológicas del corregimiento de Santa Elena. Plancha 147III B Medellín Oriental. Tomado de AMVA (2007). ....	23
<b>Tabla 2.</b> Perfil de Meteorización Dunita de Medellín. Altiplano de Santa Elena. Tomado de AMVA (2007).....	26
<b>Tabla 3</b> Tabla 5 de colores para la clasificación de los materiales presentes en la zona de estudio. ....	41

## RESUMEN

Se realiza un estudio geoelectrico como aplicación geofísica en aguas subterráneas para un sistema pseudokárstico, localizado al oriente de Medellín en la vereda El Plan corregimiento de Santa Elena, Antioquia, Colombia, con el objetivo de aplicar Tomografías de Resistividad Eléctrica (TER) para identificar anomalías de resistividad asociadas a cavidades subterráneas saturadas de agua y/o colmatadas de materiales finos, utilizando técnicas de mediciones en dos y tres dimensiones. Para el desarrollo de este objetivo se analizaron dos Tomografías Eléctricas 2D de configuración electródica Wenner – Schlumberger, con una longitud 120 m y un alcance de 21 m en profundidad de teórica. Además, se analizaron dos Tomografías Eléctricas 3D de configuración electródica Square, alcanzando áreas de 512 y 1200 m<sup>2</sup>, y una profundidad de 8 y 12 m, respectivamente. Para determinar con precisión la distribución de resistividad real en las TER 2D y 3D se utilizó un modelo de inversión basado en la optimización de mínimos cuadrados con restricción de suavidad, comúnmente llamado modelo robusto o norma L1. En general, se observó un contraste en la resistividad eléctrica entre las cavidades saturadas (baja resistividad) y el lecho de roca (resistividad alta). Finalmente, se pudo concluir a partir de los resultados obtenidos en Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D y 3D que la propiedad física de resistividad eléctrica de la Dunita de Medellín depende en gran medida grado de fracturación, saturación contenida en las fracturas y meteorización química. Además, los modelos 2D y 3D proporcionan información útil para estimar un área de influencia y profundidad de las cavidades o conductos de agua subterránea en ambientes pseudokarsticos.

## 1. INTRODUCCIÓN

Los métodos geofísicos pueden proporcionar información útil sobre el subsuelo y son de uso común para la detección de diferentes geoformas subterráneas, cavidades, conductos de tubificación - tunelización, cuevas y otros. Estas cavidades pueden estar vacías, saturadas o parcialmente saturadas por materiales finos (Chalikakis, 2011)

Se han empleado diferentes técnicas de prospección geofísica para detectar cavidades subterráneas. Sin embargo, investigadores de todo el mundo han obtenido resultados prometedores durante las últimas dos décadas empleando resistividad eléctrica en terrenos kársticos (Van Schoor, 2002; Zhou et al., 2002; Putiška, 2012 y Ortega et al., 2012). Estas investigaciones han demostrado la eficacia del método de resistividad eléctrica con respecto al mapeo de estructuras kársticas debido al gran contraste en la resistividad eléctrica entre las cavidades saturadas (baja resistividad) y el lecho de roca (resistividad alta).

Con el nombre de Karst o Carso definen a un terreno que se caracteriza principalmente por depresiones superficiales a varias escalas, originados por procesos de disolución que principalmente fueron conocidos en rocas calizas. Últimamente han sido reportados varios casos en las rocas cristalinas originados por el proceso de disolución, algunos autores prefieren utilizar la palabra “*Pseudokarst*” en estos casos.

Todos los minerales que componen a una roca son susceptibles a ser alterados, unos minerales siendo más susceptibles que otros. Por otro lado, la meteorización química es la descomposición y remoción de los minerales por procesos conocidos como hidratación e hidrólisis. La unidad litológica conocida como Dunita de Medellín es susceptible a la disolución de minerales de magnesio a condiciones atmosféricas con la precipitación de soluciones que contiene magnesio y CO<sub>2</sub> disuelto (Aristizábal, 2005) En consecuencia, la vereda El Plan presenta diversos grados de serpentinización y meteorización, generando un paisaje “*Pseudokarstico*” .

El estudio que se presenta en este informe se llevó a cabo al oriente del municipio Medellín, en la vereda El Plan, extremo occidental del corregimiento de Santa Elena. En esta zona ha sido ampliamente estudiada por Herrera (2003); Vásquez (1993); Rodríguez (1989) y Álvarez (1982) quienes reportaron la existencia de un sistema pseudokárstico, caracterizado por geoformas kársticas, asociado al cuerpo ultramáfico Dunita de Medellín, donde la disolución de la roca a

través de planos de debilidad (como fracturas y fallas) ha creado un sistema de conductos subterráneos.

Además, los investigadores determinaron que las cuencas hidrográficas del pseudokarst de Santa Elena poseen un claro control estructural en el flujo superficial y subterráneo, cuyas corrientes ingresan al ambiente subterráneo donde migran buscando una orientación NNW. (Herrera, 2003; Vásquez, 1993; Rodríguez, 1989). Las corrientes superficiales que desaparecen en la cuenca de la quebrada El Bizarro, por ejemplo, son descargadas en forma de manantiales (quebradas La Espadera y Media Agua), sobre los depósitos vertiente que cubren las laderas donde está ubicado el barrio Ocho de Marzo correspondientes a la comuna nueve sector de Buenos Aires, municipio de Medellín.(Herrera, 2003; Vásquez, 1993; Rodríguez, 1989).

Por otro lado, es de conocimiento público que el área estudiada se encuentra afectada parcialmente por el retiro de 15m de la quebrada La Espadera y El Bizarro, para los cuales el Acuerdo 48 de 2014, por medio del cual se adopta la revisión y ajuste a largo plazo del Plan de Ordenamiento Territorial del Municipio de Medellín y establecido en el artículo 26. Se entiende por zonas de retiro, las franjas laterales del terreno a ambos lados de las corrientes, paralelas a las líneas de máxima inundación o a los bordes del canal natural o artificial; que tienen como finalidades, entre otras, la de servir como franja de protección contra inundaciones y desbordamientos y conservar el recurso hidrológico. Agregado a esto el mencionado artículo indica, en el párrafo 1. No se permite la intervención del retiro, solo se permite su uso hasta el límite de la mancha de inundación para un periodo de retorno de 100 años, además no se podrá alterar la dinámica natural del agua

Con la intención de estudiar la respuesta geoelectrica en el área de confluencia subterránea de las quebradas La Espadera y El Bizarro, se emplean Tomografías de Resistividad Eléctrica (TER) para identificar anomalías de resistividad asociadas a cavidades subterráneas saturadas de agua y/o colmatadas de materiales finos, utilizando técnicas de mediciones en dos y tres dimensiones. Además, se evaluó la respuesta geoelectrica para estimar las propiedades geológicas e hidrogeológicas en el cuerpo sur de la Dunita de Medellín.

## 2. GENERALIDADES

### 2.1. Pregunta de investigación

¿Es posible identificar anomalías resistivas asociadas a cavidades subterráneas en el pseudokarst de Santa Elena, mediante Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D y 3D?

### 2.2. Hipótesis

El contraste de resistividad entre la cavidad y la roca caja (Dunita de Medellín) depende en gran medida del grado de fracturación y alteración por la humedad contenida.

### 2.3. Objetivo General

Aplicar las técnicas de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TER 2D y 3D) para identificar anomalías resistivas asociadas a cavidades subterráneas poco profundas en el Pseudokarst de Santa Elena, vereda El Plan, Medellín.

### 2.4. Objetivos Específicos

- Revisar antecedentes bibliográficos para la geología de la Dunita de Medellín, los sistemas kársticos desarrollados en rocas no carbonatadas, sistema acuífero del Valle de Aburrá y geoelectrica aplicada a los sistemas kársticos.
- Realizar campañas de campo con la finalidad de recopilar información primaria de geología, geomorfología y geoelectrica.
- Organizar y analizar la información obtenida en campo, para finalmente llevar a cabo el procesamiento e inversión de los datos geoelectricos.
- Obtener e interpretar los perfiles 2D e imágenes 3D de la distribución espacial de las anomalías geoelectricas del pseudokarst de Santa Elena en la vereda El Plan.

### **3. METODOLOGÍA**

La metodología que fue implementada se basó en una extensa revisión bibliográfica y un minucioso trabajo de campo que consistió en un proceso de investigación desarrollado en cinco etapas. Cada etapa corresponde a los pasos realizados para alcanzar los objetivos propuestos, orientados a la aplicación de Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D y 3D como método de análisis de conductos de agua subterránea en el cuerpo ultramáfico Dunita de Medellín y sus implicaciones en el flujo del agua subterránea. Las cuatro etapas de investigación fueron:

Etapas 1: Recopilación y análisis de información secundaria.

Etapas 2: Planeación de la Campaña de Adquisición.

Etapas 3: Adquisición de Datos.

Etapas 4: Procesamiento de Datos.

A continuación, cada una de estas etapas de investigación será explicada en los apartados siguientes.

#### **3.1. Estado del Arte**

La etapa básica de la investigación se inicia recopilando el material bibliográfico más relevante, donde se registran tópicos geológicos, geomorfológicos, hidrogeológicos, geoeléctricos y cartográficos relacionados con el área de estudio o en un ámbito nacional e internacional, donde los métodos geoeléctricos hayan sido la respuesta a problemas ambientales relacionados al análisis de conductos de agua subterránea o cavidades en medios kársticos o Pseudokársticos. Esta recopilación de precedentes teórico - prácticos, brinda claridad en los parámetros necesarios para el inicio, desarrollo y cumplimiento del proyecto propuesto. Se presentan de manera concreta a continuación.

Las bases cartográficas fueron extraídas de las planchas topográficas 147IIIB a escala 1:5000, se compone de la base cartográfica suministrada por el Área Metropolitana del Valle de Aburrá, proveniente de los archivos almacenados en la GeoDatabase Ambiental y Plan Ordenamiento Territorial de dicha institución y la cartografía del proyecto SIGMA. Esta cartografía contiene temas de vías, catastro, hidrografía, topografía y curvas de nivel, que fueron empleados para generar los diferentes mapas de este estudio.

La cartografía geológica ha estado referenciada por el Instituto Colombiano de Geología y Minería (INGEOMIAS), a partir de la cartografía 1:100.000 de la Plancha 147 zona IIIB Medellín Oriental, realizada en el año 2005. Adicionalmente, se utilizó la geodatabase de AMVA (2007) del estudio de microzonificación sísmica del Valle de Aburrá, escala 1:10.000.

Los antecedentes geomorfológicos fueron reportados por Rodríguez (1989), durante un estudio de deslizamientos asociados con aguas subterráneas. En Vásquez (1993) describió las geoformas Kársticas, el desarrollo y evolución del paisaje Kárstico colapsado de un sistema de cavernas pre-existentes. Hoyos (2000) definió el campo de dolinas de Santa Elena. Otros informes técnicos realizados por Álvarez (1982)

Los antecedentes hidrogeológicos que guardan relación con la Dunita como zona de recarga del sistema acuífero del Valle de Aburrá ha sido objeto de estudio en dos tesis de maestría, la primera de ellas “Carso de alta montaña en Santa Elena; implicaciones hidrogeológicas e hidrológicas en el Valle de Aburrá” (Herrera, 2003) y por último “ la identificación de la presencia de Flujos regionales en el sistema hidrogeológico del Valle de Aburrá a partir de un caso de estudio en una zona piloto” (Cano, 2015).

### **3.2. Planeación de la Campaña de Adquisición**

En esta etapa del proyecto se realizó el diseño de la adquisición y ubicación de Tomografías de Resistividad Eléctrica basada en la obtención de perfiles 2D y 3D de la resistividad del subsuelo. Para lo que se debe analizar los posibles factores que influyen en la zona de estudio como las condiciones del terreno, drenajes principales, geoformas kársticas y el área para realizar el estudio geoelectrico, las cuales fueron previstas en la salida de campo de reconocimiento de la zona de estudio y documentada en el Anexo 1. Por otro lado, los aspectos más relevantes que fueron tomados en cuenta a la hora de la planeación de la campaña de adquisición de campo son los que se describen a continuación y se encuentran especificados a detalle en el Anexo 1:

- Delimitar el objetivo (resolución de la pseudosección requerida).
- El número de perfiles a realizar y su ubicación.
- Dispositivo electrónico, longitud total de los perfiles, número de electrodos, separación entre electrodos y niveles de profundidad.

- Profundidad máxima de investigación

### 3.3. Adquisición de Datos

En esta etapa del proyecto se realiza el reconocimiento de campo, validación de la información recopilada y finalmente la toma de datos. Dicho procedimiento permite realizar una serie de procesos que implican la caracterización, evaluación y el análisis de la información obtenida mediante el estudio geoelectrico.

En la primera salida se realizó el reconocimiento de la zona de estudio (Mapa 1), se analizó el estado de las vías y los afloramientos presentes, se definieron los sitios para la realización de las Tomografías de Resistividad Eléctricas 2D y 3D. Adicionalmente, se hizo un levantamiento de la línea base, consistente en la descripción de afloramientos, perfiles de meteorización y geomorfología para ser digitalizada (el informe de la salida de campo Anexo 1

En la segunda y tercera salida se llevó a cabo la adquisición de datos. En primer lugar, se realizó una campaña de adquisición focalizada en la toma de datos mediante la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica en dos dimensiones (2D), en el cual se tomaron 2 perfiles planteados, con arreglo Wenner-Schlumberger y Dipolo - Dipolo, con separación de 2 m entre los electrodos permitiendo tener una sensibilidad vertical como lateral y adquiriendo una profundidad de investigación de 21m. Finalmente, se realizó una campaña de adquisición para la toma de datos mediante la técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica en tres dimensiones (ETR 3D), con arreglo Wenner Alpha, Wenner Beta y Square en la cual se tomaron 2 mediciones en la modalidad “Mapping” , alcanzando áreas de 512 m<sup>2</sup> y 1200 m<sup>2</sup>, y una profundidad de 8 y 12 m, respectivamente.

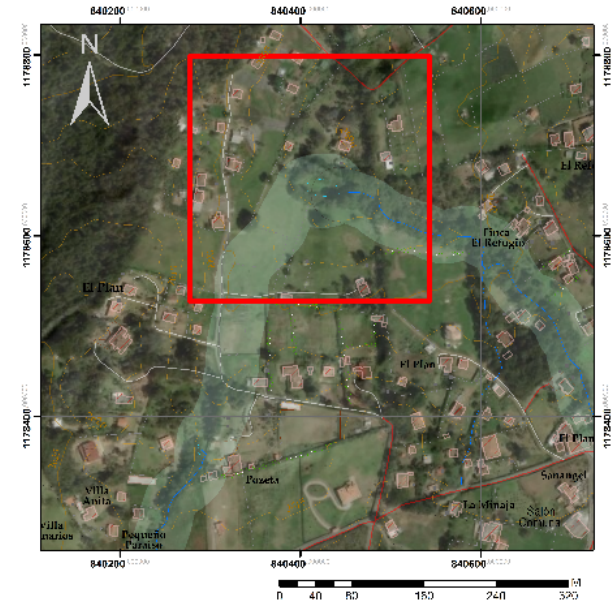
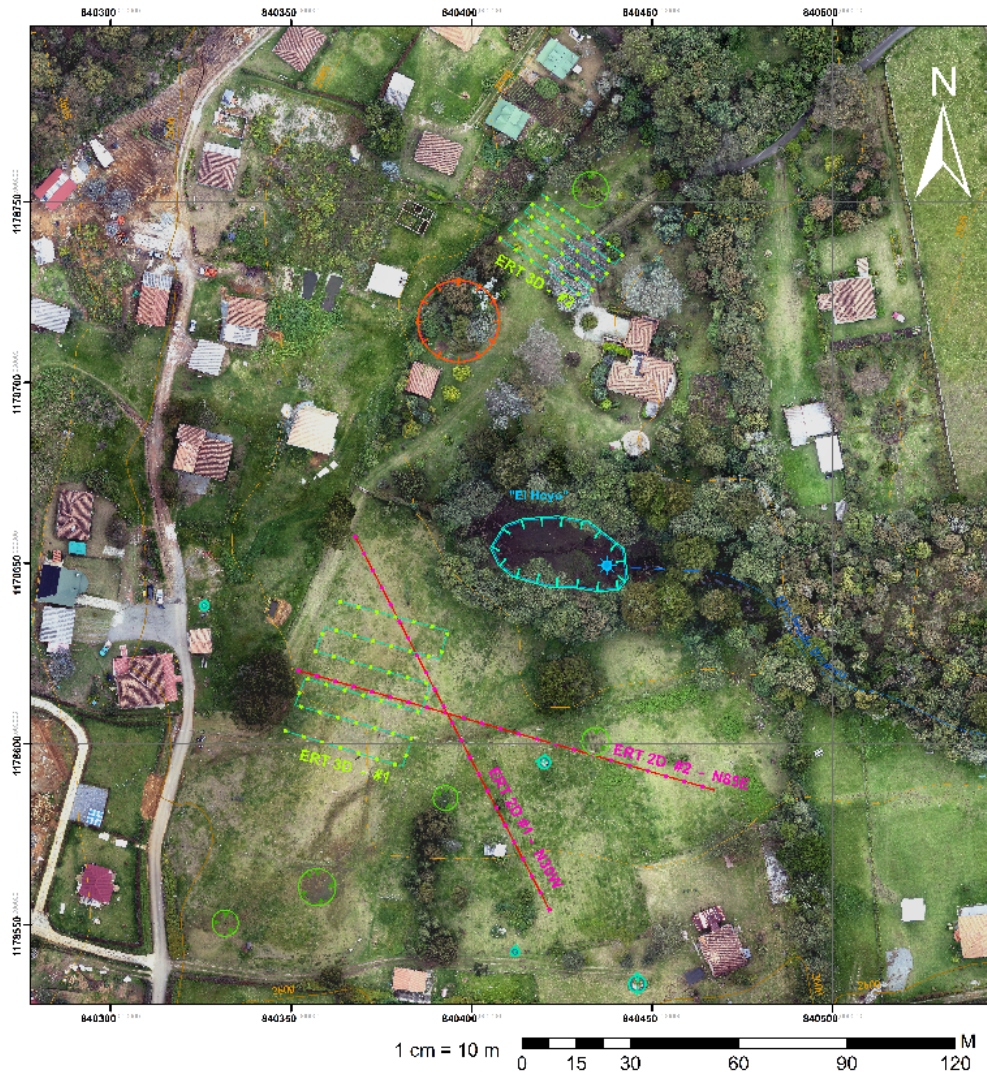
Principalmente las Tomografías de Resistividad Eléctrica fueron ubicadas teniendo en cuenta la dirección preferencial de los lineamientos estructurales de las quebradas principales de la zona (Quebrada, La Espadera y Quebrada El Bizarro). Se orientó el arreglo de electrodos siguiendo la dirección (N80E y N30W), debido a las condiciones del terreno no se pudo realizar más líneas geoelectricas. Anexo 1.

### 3.4. Procesamiento e inversión de datos

Una vez realizada la adquisición de datos, el resistivímetro Lippmann Point Light 10 W mediante el software GeoTest, guarda automáticamente los resultados de cada “*Profile*” y “*Mapping*” realizada en archivos de texto “. *Dat*”. Posteriormente, éste archivo se utiliza para crear el modelo directo y un modelo inverso con la ayuda del software Res2Dinv y Res3Dinv.

Las Tomografías Eléctricas han sido tratados con el programa especializado Res2dinv y Res3Dinv (Geotomo Software Inc.) con la licencia suministrada por la Universidad EAFIT. El software obtiene los modelos bidimensionales de resistividad para el subsuelo en los arreglos Wenner – Schlumberger y modelos tridimensionales de resistividad para el subsuelo en los arreglos Square. Para mayor información de las metodologías del procesamiento leer la sección 5.2.1

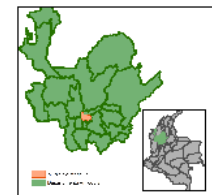
Adicional al procesamiento de los datos, se realizó la presentación gráfica para las Tomografías Eléctricas 3D con programa comercial (Voxler V.3; Golden Inc.), y digitalización de los mapas levantados en campo como geomorfología y ubicación de las Tomografías Eléctricas 2D y 3D empleando el software Arcgis 10.5.



**Área de Prospección Geofísica  
Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D y 3D  
Vereda El Plan**

**Leyenda**

- |  |   |
|--|---|
| <p><b>Geomorfología Exokarstica</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Dolinas Colapso</li> <li> Dolinas de Subcuenca</li> <li> Dolinas de Colapso "Recarga"</li> <li> Dolina de Colapso "Descarga"</li> <li> Ponor</li> </ul> <p><b>Tomografías de Resistividad Eléctrica (ERT)</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> ERT 3D</li> <li> ERT 2D</li> </ul> <p><b>Estructura Ecológica</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Sistema Hicográfico</li> </ul> | <p><b>Via</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Camino, Sendero</li> <li> Límite de Vía Fección</li> <li> Vía Pavimentada</li> </ul> <p><b>Drenajes</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> Intermitente, SI</li> <li> Permanente, SI</li> <li> Canal Sencillo</li> <li> Manantial</li> </ul> <p><b>Curvas de Nivel</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li> 100 m</li> <li> 10 m</li> </ul> |
|--|---|



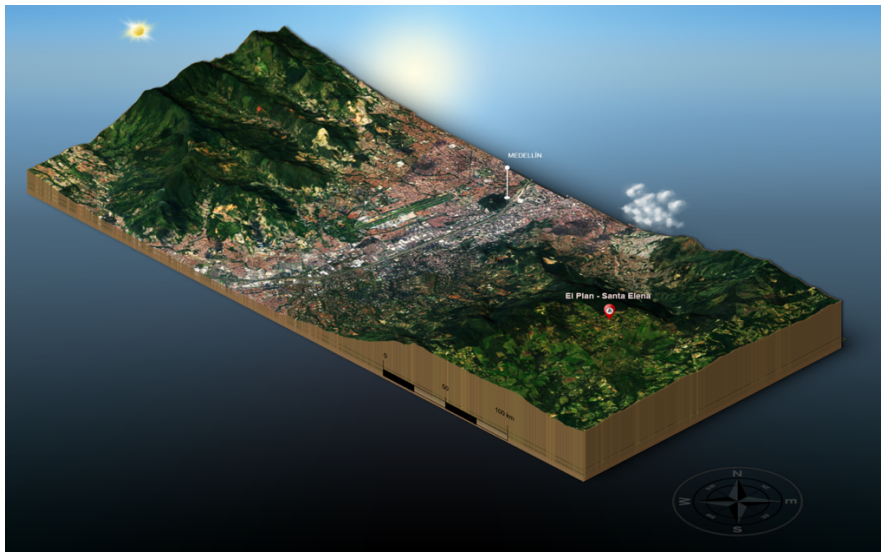
Doc. Inic. Sist. de POS K=30, 1:100,000  
Proyecto de Tomografía Geofísica  
Escuela de Ingeniería Geológica  
Facultad de Ciencias Exactas  
Instituto Tecnológico de Bolívar  
Lectores: Dr. Juan Carlos  
Mora, A.M.

**Mapa 1.** Área de prospección geofísica mediante Tomografías de resistividad eléctrica 2D y 3D. ubicación de drenajes principales y geformas kársticas en el área de estudio.

## 4. ZONA DE ESTUDIO

### 4.1. Localización y vías de acceso

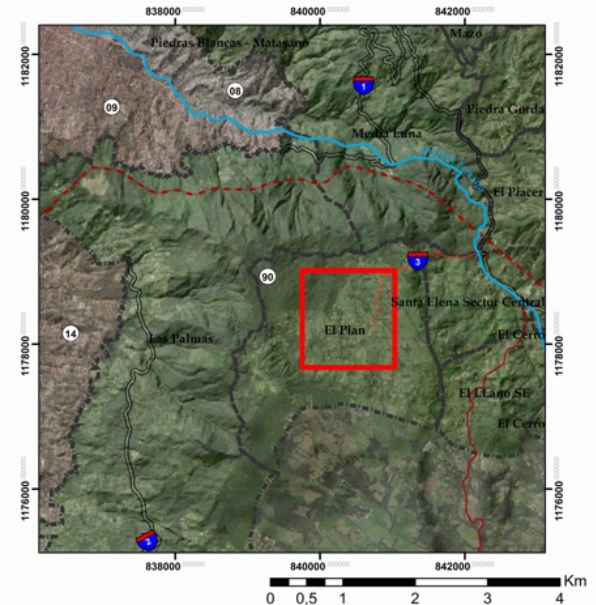
Santa Elena es uno de los cinco corregimientos del municipio de Medellín. Se localiza en la ladera oriental de la ciudad de Medellín y, a su vez, coincide con la parte alta de la cuenca del río Aburrá – Medellín (ver Figura 1).



**Figura 1** Localización esquemática de la Vereda El Plan, corregimiento de Santa Elena, municipio de Medellín – Antioquia. Elaboración propia.

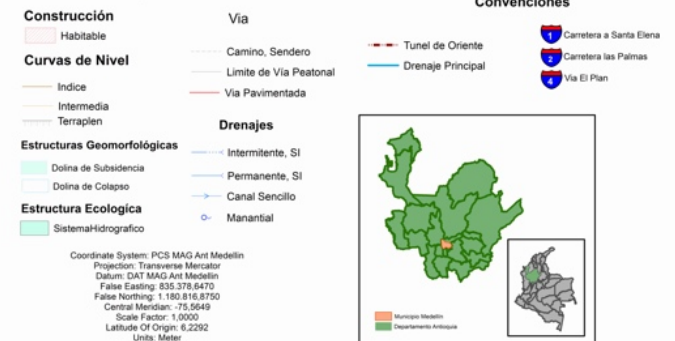
La zona de estudio se localiza en la Vereda El Plan, sobre el extremo occidental del Alto de Santa Elena. El área de influencia kárstica se encuentra en inmediaciones de las confluencias las corrientes principales (quebradas El Bizarro y La Espadera) del sistema de drenajes en la Vereda El Plan, que corresponde al sumidero “maestro”, representado por una macro-dolina de colapso denominada El Hoyo (ver Mapa 2).

El acceso desde Medellín se logra a través de dos carreteras: la carretera Medellín - Santa Elena o la avenida Las palmas. A la vereda El Plan se llega por la carretera de Santa Elena, tomando la desviación frente al restaurante La Montañita.



### Ubicación Vereda El Plan - Santa Elena ZONA ESTUDIO

#### Leyenda



Mapa 2. Localización Zona de Estudio para la adquisición de Tomografías de Resistividad Eléctrica señalado por el cuadro rojo. Elaboración propia.

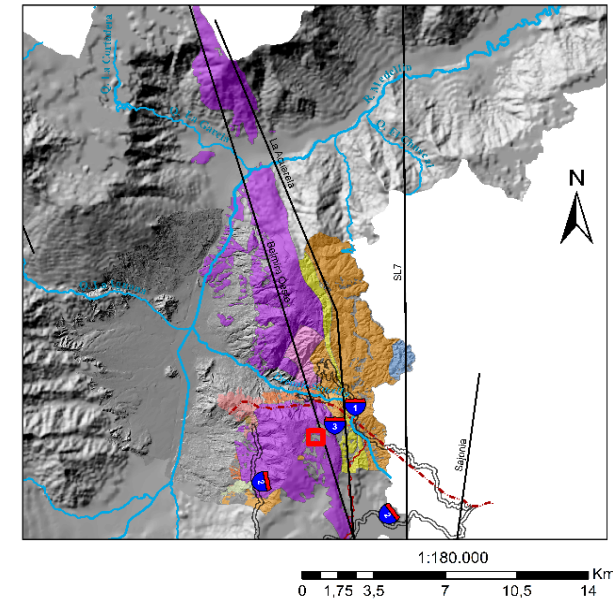
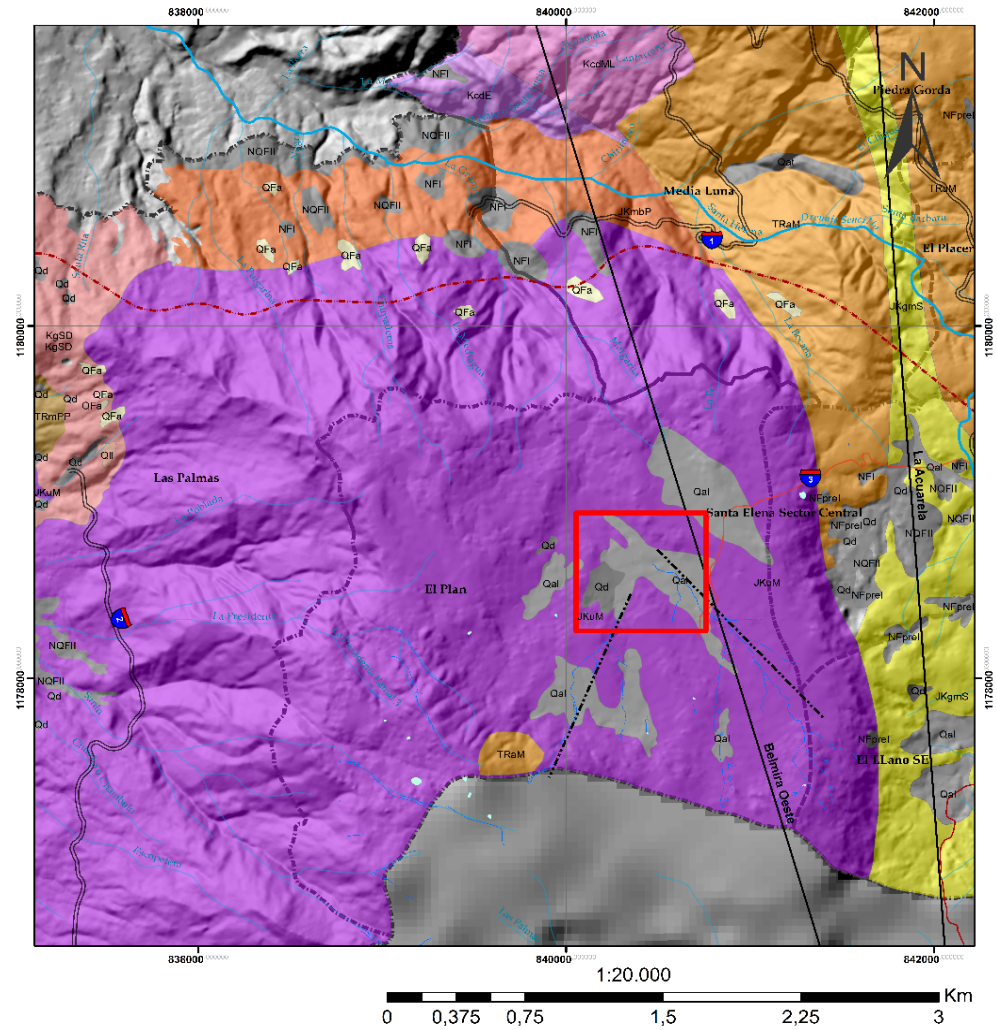
## **4.2. Geología**

### **4.2.1. Geología Regional**

Según la Microzonificación Sísmica Detallada de los Municipios Barbosa, Girardota, Copacabana, Sabaneta, La Estrella, Caldas y Envigado (AMVA, 2007), estudio que se retoma en esta investigación. El área de estudio comprende geológicamente por el corregimiento de Santa Elena, donde afloran variadas unidades litológicas que incluyen rocas de diferente edad, origen y composición (Mapa 3). En relación con las edades, estas van desde rocas permotriásicas del grupo el retiro hasta los depósitos cuaternarios. En cuanto a su origen y composición se tienen rocas metamórficas como esquistos, anfíbolitas, migmatitas y gneises; rocas ígneas como granodioritas, dunitas, gabros y basaltos y los depósitos de origen aluvial y de vertiente, además de los llenos de origen antrópico.

El complejo Ofiolítico del Valle de Aburrá, propuesta por Correa y Martens (2000), comprende a la Dunita de Medellín y las Metabasitas del Picacho, donde se incluyen anfíbolitas y metagabros, los cuales se plantea, hacen parte de la misma ofiolita. conformados por cuerpos ultramáficos discontinuos, limitados por fallas, con una orientación preferencial norte – sur en formas lenticulares, las unidades rocosas corresponden a metabasitas, dunitas, peridotitas (Cano, 2015; AMVA, 2007).

La Dunita de Medellín presente en la zona de estudio, Se trata de una roca compuesta esencialmente por olivino, con contenidos menores de cromita y magnetita; con alteraciones parciales a minerales del grupo de la serpentinita. Adicionalmente, debe mencionarse que gracias al fuerte efecto tectónico y la posibilidad de disolución de los materiales allí presentes, existen zonas pseudokársticas con drenajes subterráneos, como se presenta hacia la zona del altiplano en terrenos del corregimiento de Santa Elena (Cano, 2015; AMVA, 2007).



**Unidades Geológicas Plancha 147  
Santa Elena - El Plan**

**GEOLOGÍA**

KodE, Stock de Las Estancias	QFIII, Depósitos de flujos de escormentos y/o lodos
KodML, Stock de Media Luna	QFa, Depósitos de flujos de escormentos y/o lodos
KgSD, Gabbro de San Diego	NFprel, Depósitos de flujos de escormentos y/o lodos
JKmBP, Metabasitas del Picocho	Qal, Depósitos aluviales
JKmS, Gneis Nilonico de Sajonia	Qat, Depósitos aluvio-torrenciales
JKuM, Dunitas de Medellín	Qd, Depósitos de deslizamiento
TRaM, Anfibolitas de Medellín	NFI, Depósitos de flujos de escormentos y/o lodos
TRgLC, Gneis de La Ceja	NQFI, Depósitos de flujos de escormentos y/o lodos
TRmPP, Migmatitas de Puenia Poléez	QII, Llenos antropicos

**Convenciones**

Lineamiento Q. El Bizano	Tunnel de Oriente	Carretera a Santa Elena
Lineamiento Q. La Espadera	Drenaje Principal	Carretera las Palmas
Falla Acurela		Via El Plan
Falla Belmiria Oeste		

Coordenadas: Sistema PCS 1983-A11 Modificado  
 Proyección: Transverso de Mercator  
 Fuente: SMT 100000, San Medellín, m.  
 Fecha Edición: 2015-04-19  
 Tabla No. 147, 1:60,000, 2015  
 Control Modificado: 2015-04-19  
 Escala: 1:180,000  
 Lámina: 147, 1:180,000  
 UTM: 18QDE

Mapa 3. Mapa geológico de la plancha 147IIIB Medellín oriental a escala 1:20.000 elaboración propia. Unidades geológicas tomadas de la base de datos del estudio Microzonificación sísmica del Valle de Aburra (AMVA & UdeA, 2012).



**Tabla 1.** Se presenta la secuencia estratigráfica de las unidades litológicas que afloran en El Corregimiento de Santa Elena según la edad, desde la más reciente hasta la más antigua.

## **4.2.2. Geología Estructural**

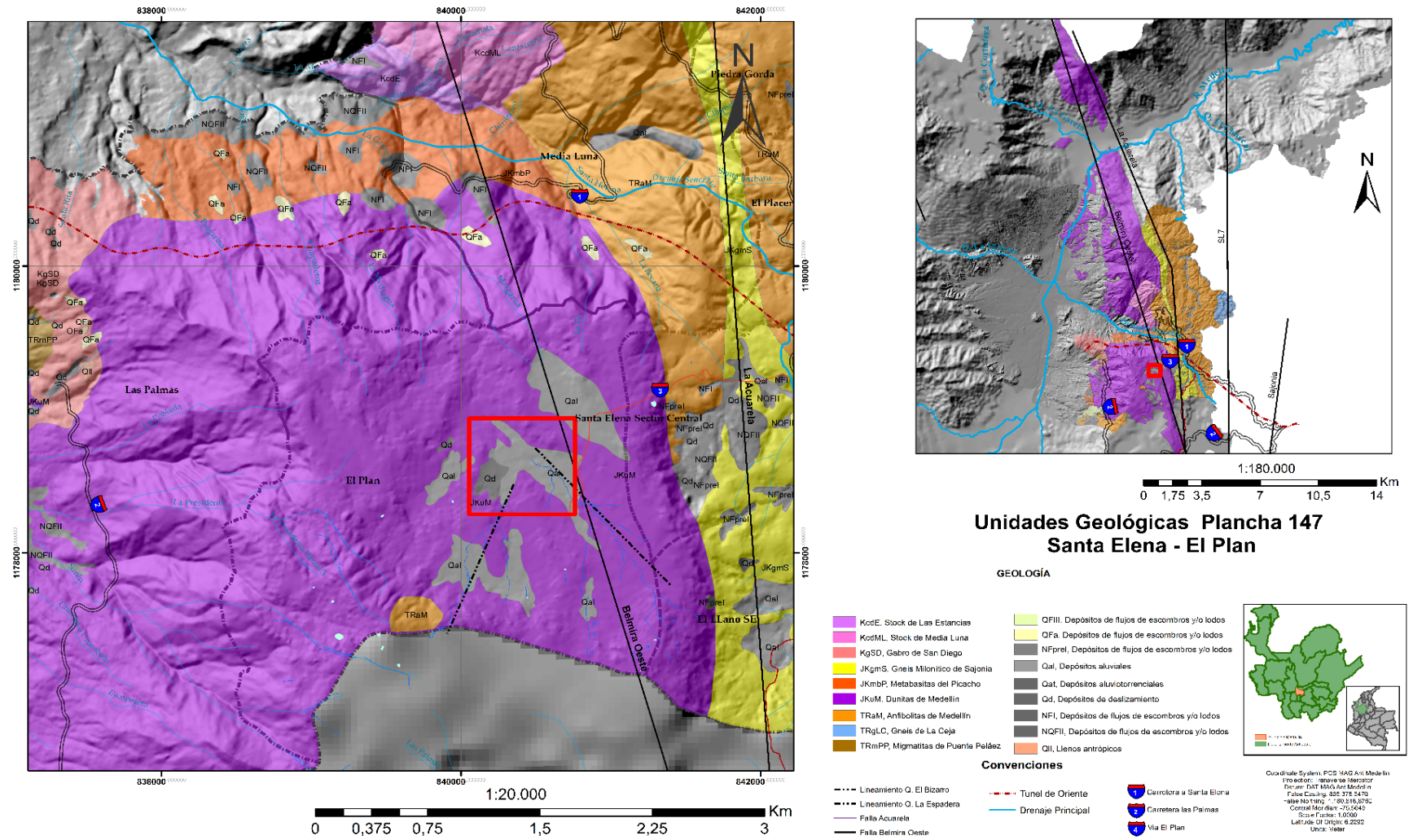
### **4.2.2.1. Estructuras Regionales**

El extremo oeste del Altiplano Santa Elena conforma las laderas orientales del Valle de Aburrá, cuya compleja historia geológica ha sido definida por dos dominios estructurales diferentes: el sistema de fallas Cauca-Romeral y el sistema de fallas que afectan el Oriente Antioqueño (Salinas & Hermelin, 1988).

El marco estructural regional del Altiplano de Santa Elena se encuentra bajo el dominio del sistema de fallas del Oriente Antioqueño, para el que se han detectado tres tendencias estructurales principales en direcciones NW (fallas Miraflores, Calderas y Balseadero), NNE (fallas Espíritu Santo, Cocorná y El Morro) y en EW (fallas Cisneros y Río Chico). (Vásquez, 1989; Parra, 1984).

### **4.2.2.2. Estructuras Locales**

Con base en fotointerpretación a escala aproximada 1:1.000 realizada mediante Fotometría aérea no tripulada con drones de alta resolución realizada en este estudio y análisis de mapas topográficos a escala 1:5.000, se identificó en el área de trabajo la influencia de tres tendencias estructurales con direcciones NS-NNE, NW-NNW y EW, cuyo control es evidente en la configuración del drenaje sub-superficial y en sus manifestaciones superficiales (ver Mapa 3). Se determinaron los controles estructurales en la zona de estudio que presentan direcciones de N30°W controlando la dirección de la quebrada La Espadera y de N40°E controlando la quebrada El Bizarro.



**Mapa 3.** Mapa geológico de la plancha 147IIIB Medellín oriental a escala 1:20.000 elaboración propia. Unidades geológicas tomadas de la base de datos del estudio Microzonificación sísmica del Valle de Aburrá (AMVA & UdeA, 2012).

**Tabla 1.** Unidades litológicas del corregimiento de Santa Elena. Plancha 147IIIB Medellín Oriental. Tomado de AMVA (2007).

Unidad Litológica	Sigla	Nombre	Descripción
Depósitos Antrópicos	QII	Llenos antrópicos	Están distribuidos de manera heterogénea a lo largo del Corregimiento de Santa Elena y están comprendidos por botaderos de escombros, material de construcción, tierra movida y material proveniente del río Aburrá. (AMVA, 2007)
Depósitos Aluviales	Qal	Depósitos aluviales	Se presentan sobre los fondos de los valles del río Aburrá y sus afluentes principales, en las llanuras de inundación, como materiales de desborde; y en terrazas aluviales de diferentes niveles. Desarrollan geoformas de superficies suaves, prácticamente planas, dispuestos en franjas irregulares que siguen las principales corrientes que drenan el río Aburrá. (AMVA, 2007)
	Qat	Depósitos aluviotorrenciales	Bajo esta denominación se agrupan los depósitos que generan algunas corrientes durante avenidas torrenciales, en las cuales la alta energía del agua permite arrastrar materiales de granulometría heterogénea, que incluyen desde bloques rocosos de tamaño variable hasta arenas finas, limos y arcillas. (AMVA, 2007)
Depósitos de vertiente	Qd	Depósitos de deslizamiento	Son el producto de fenómenos de inestabilidad o movimientos de masa ocurridos en los terrenos inclinados o vertientes, que fueron generados por una combinación de factores como la gravedad, el agua y la intervención humana, entre otras. (AMVA, 2007)
	Qfa	Depósitos de flujos de escombros y lodos	Están constituidos por flujos de varias generaciones, cuyos clastos presentan diferentes grados de meteorización. Son generados al producirse hacia las partes altas de las vertientes una saturación y pérdida de resistencia, lo que hace más vulnerables a fenómenos tales como las altas precipitaciones o los movimientos sísmicos. Estos eventos en caso de ocurrir, les confieren a los suelos un carácter viscoso, debido a la mezcla del agua con los suelos arcillosos y limosos, de forma que pueden descender más o menos controlados por los cauces de las corrientes, arrastrando nuevos materiales y mezclándose caóticamente hasta encontrar unas condiciones de baja pendiente que permitan su depositación. (AMVA, 2007)
	QFIV	Depósitos de flujos de escombros y lodos	
	QFIII	Depósitos de flujos de escombros y lodos	
	NQFII	Depósitos de flujos de escombros y lodos	
	NFI	Depósitos de flujos de escombros y lodos	
Intrusivos Cretáceos	KcdE	Stock de Las Estancias	Presentan características litológicas, mineralógicas y texturales similares y una posición que hace suponer una relación genética con el Batolito Antioqueño. Este cuerpo aflora hacia la comuna nororiental, margen derecha de la quebrada La Castro, parte baja del Cerro Pan de Azúcar. (AMVA, 2007)
	KcdML	Stock de Media Luna	Hace parte de las rocas del Batolito Antioqueño. Se encuentra aflorando en la vereda Media Luna, sobre la vía principal que de Santa Elena conduce a Medellín. Presenta, al igual que el Batolito Antioqueño, una composición cuarzodiorítica de textura fanerítica. (AMVA, 2007)

Unidad Litológica	Sigla	Nombre	Descripción
	KgSD	Stock de San Diego	Descrito por Botero (1963) quien lo consideró como una cúpula menor del Batolito Antioqueño. Posteriormente Restrepo y Toussaint (1984) lo definen como un cuerpo plutónico constituido por rocas ígneas básicas que varían composicionalmente desde dioritas hasta gabros. Aflora en cercanías al Seminario Mayor de Medellín. (AMVA, 2007)
Complejo Ofiolítico de Aburrá	JKmbP	Metabasitas del Picacho	Corresponde a metagabros con textura ígnea, gabros miloníticos y anfibolitas de varios tipos asociados a una secuencia de piso oceánico (ofiolita) que incluye las Dunitas de Medellín. Afloran en el sector de la quebrada La Espadera al oriente del valle y en cercanías al cerro El Picacho. (AMVA, 2007)
	JKuM	Dunitas de Medellín	Aflora en el corregimiento de Santa Elena en las veredas El Plan, Media luna, piedras blancas matazano, y las palmas y conforma un cuerpo desmembrado y alargado en dirección norte – sur. (AMVA, 2007)
	JKgmS	Gneis Milonítico de Sajonia	Estas rocas se observaron en el corregimiento de Santa Elena, en la vereda Barro Blanco, cerca de la parroquia Virgen del Carmen; vía a la vereda El Plan y sobre la vía principal Medellín-Santa Elena, cerca de Los Arrayanes, El Refugio; finca Paisandú; en la vereda El Llano; vía a Rionegro (sector El Cartucho). (AMVA, 2007)
Grupo El Retiro	TRaM	Anfibolitas de Medellín	Aflora en el corregimiento de Santa Elena y conforma un cuerpo alargado en dirección norte-sur. Los afloramientos de mayor importancia pueden observarse en las veredas Pericos, límite con el municipio de Envigado; El Placer, vía principal, cerca la unidad básica; Barro Blanco, cerca de la unidad básica; en la entrada a la finca Paysandú; vereda el Llano; sector El Tambo, camino del Zango y vía a La Ojona; parque ecológico Piedras Blancas; vereda Media Luna, cerca al hotel La Montaña Mágica, finca Los Cerezos; vereda El Rosario, y en la vereda Las Palmas. (AMVA, 2007)
	TRmPP	Migmatitas de Puente Peláez	Aflora en la vía Las Palmas en límites con el municipio de Envigado, donde aparecen cuerpos porfídicos, de grano fino, que intruyen esta unidad. Estos diques de textura porfídica, presentan dimensiones considerables con una marcada meteorización esferoidal. (AMVA, 2007)
	TRgLC	Gneis de La Ceja	Hacen parte del Grupo El Retiro; se trata de una roca gnésica compuesta esencialmente por cuarzo, feldespato y biotita. Este cuerpo corresponde a una parte de la franja delgada, que aflora en la vertiente noroccidental del río Aburrá, con dirección N30 W. (AMVA, 2007)

### **4.2.3. Geología Local - Dunita de Medellín**

Esta unidad, definida por Restrepo y Toussaint (1984), está compuesta por una faja de rocas ultramáficas con dirección NNW, 35 km de extensión aproximada, 6 km de amplitud máxima en el sector de Las Palmas, 200 m de amplitud mínima en su parte septentrional, municipio de San Pedro, y 60 km<sup>2</sup> de área (Álvarez, 1982).

La faja se divide en tres cuerpos, dos de ellos, al parecer conectados bajo el aluvión del río Medellín, han sido estudiados ampliamente (Botero, 1963; Restrepo y Toussaint, 1973, 1974 y 1984; Jaramillo et al., 1973; Álvarez, 1982 y Monsalve, 1996). Mientras que el cuerpo sur, separado del central por la quebrada Santa Elena y donde se localiza el área estudiada, sólo ha sido mencionado brevemente en los trabajos citados excepto en Álvarez (1982) donde se describen algunas de sus características mineralógicas y petrográficas.

Este cuerpo ultramáfico es considerado como la base de una secuencia ofiolítica emplazada tectónicamente, como parece indicarlo la ausencia de aureola de contacto, siendo probable un cabalgamiento como mecanismo de emplazamiento (Restrepo & Toussaint, 1973, - 1974; Alvarez, 1982).

La dunita es uniforme en composición, altamente magnésica y con grados variables de serpentinización. Con base en el método de difracción de rayos X, Álvarez en 1982 obtuvo un promedio de 92% de forsterita ([SiO<sub>4</sub>]Mg<sub>2</sub>) y 8% de fayalita ([SiO<sub>4</sub>]Fe<sub>2</sub>), reportando un nivel de confiabilidad del método del 95%. La brucita es un hidróxido de magnesio (Mg[OH]<sub>2</sub>) de común ocurrencia en rocas ultrabásicas serpentinizadas como resultado de la hidratación de silicatos de magnesio, como la forsterita, y en calizas cristalinas. La presencia de este mineral es importante en el interior de las cavernas de El Plan donde se puede reconocer como costras botroidales que recubren las paredes de la Dunita.

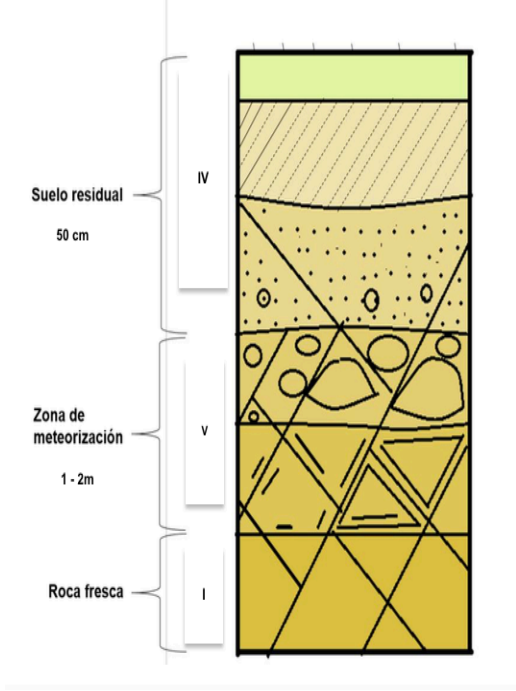
#### **Perfil de Meteorización**

El perfil de meteorización desarrollado en la dunita en el sector del altiplano es de bajo espesor, con salientes rocosas frecuentes y alta presencia de geformas de disolución que dan lugar a dolinas, macrodolinas y valles kársticos. (AMVA, 2007).

El perfil característico en el altiplano se compone básicamente de los horizontes VI, V y el horizonte I (Tabla 2). Perfiles representativos se encuentran en los sectores aledaños a la parte alta

de la vereda Perico, El Plan y hacia la parte alta de la cuenca de la quebrada Las Palmas. (AMVA, 2007).

**Tabla 2.** Perfil de Meteorización Dunita de Medellín. Altiplano de Santa Elena. Tomado de AMVA (2007).

<b>Horizonte VI</b>	El suelo residual se caracteriza por una textura limosa, color pardo amarilloso.	
<b>Horizonte V</b>	Corresponde al horizonte de alteración, incrementando un poco en las zonas de alto fracturamiento de la roca, con presencia de minerales arcillosos de serpentinita de color verde.	
<b>Horizonte I</b>	Estos horizontes se diferencian entre sí por el grado de serpentización y fracturamiento que presentes. El color de la roca es negro con alteraciones verdosas.	

### 4.3. Geomorfología

La vereda El Plan fue caracterizada en el trabajo de Herrera (2003) como una unidad geomorfológica definida por características similares de relieve, red de drenaje, pendientes y procesos morfodinámicos, donde predominan pendientes menores a 10°. Este altiplano se encuentra ligeramente inclinado hacia el Norte. Además, la unidad geomorfológica El Plan se caracteriza por tener un paisaje kárstico donde se pueden apreciar depresiones superficiales en varias escalas, drenajes subterráneos, puentes naturales y cavernas.

En el Mapa 3 topográfico que se muestra en la se alcanza a observar un sistema drenaje con corrientes sub-paralelas y confluencias ortogonales, que evidencian el control tectónico. En la unidad geomorfológica El Plan existen dos corrientes superficiales: la corriente principal y con mayor extensión de la zona de estudio es la Quebrada el Bizarro, cuya microcuenca drena el sector oriental de la zona de estudio; y la quebrada La Espadera, cuya microcuenca drena el sector centro occidental de la zona de estudio (Herrera, 2003; Vasquez, 1993; Rodríguez, 1989).

Estudios hidrogeológicos e hidrogeoquímicos (Rodríguez, 1989) usando trazadores artificiales y análisis de isotopos estables ( $\delta H^2$  -  $\delta O^{18}$ ), mostraron que las aguas que son infiltradas por los sumideros (dolinas de colapso) de la quebrada La Espadera y la quebrada El Bizarro (El hoyo), son descargadas en formas de manantiales sobre las laderas orientales de Medellín hacia la Quebrada Santa Elena a través de las quebradas La Espadera y Media Agua, correspondientes a los barrios Ocho de Marzo y Juan Pablo II, Buenos Aires. Cano (2015) y Herrera (2003), determinaron que en menor un porcentaje mucho menor hacia las quebradas Las Palmas y La Presidenta, correspondientes al sector de las palmas (ver Figura 2).



**Figura 2.** El dibujo muestra la relación hidro-geológica entre las geformas kársticas de la vereda El Plan y los depósitos de Vertiente localizados en las laderas Orientales de Medellín. Tomado y modificado de Rodríguez (1989).

## 5. MÉTODOS GEOELÉCTRICOS

Para adquirir información sobre un parámetro físico característico como la resistividad se puede llevar a cabo diferentes técnicas de adquisición. Las cuales varían según la distribución que se requiera del parámetro físico. Por tanto, si se desea tener una resolución en un sentido unidimensional (1D), se usan los sondeos eléctricos verticales (SEV) y en sentido lateral se proponen las Calicatas Eléctricas. Si se desea tener una mejor resolución en sentido bidimensional (2D) tanto en la vertical como horizontal se presentan, las Tomografías Geoeléctricas 2D y en sentido y tridimensional (3D), las Tomografías Eléctricas 3D. Estas variaciones permiten abordar de una manera práctica propiedades eléctricas de las rocas que se vayan a estudiar.

Para las técnicas de Tomografías Eléctricas 2D y 3D emplea generalmente un gran número de electrodos a un cable multiconductor, colocados según un perfil. Un ordenador portátil, en el cual está programada la secuencia de medidas está conectado a una unidad de conmutación (*referencia Lippman 4 point lighth 10W*), que selecciona automáticamente los electrodos empleados para la inyección de corriente y la medida de potencial según la configuración electródica usada. La secuencia de medidas se lleva a cabo empleando el software Geo Test.

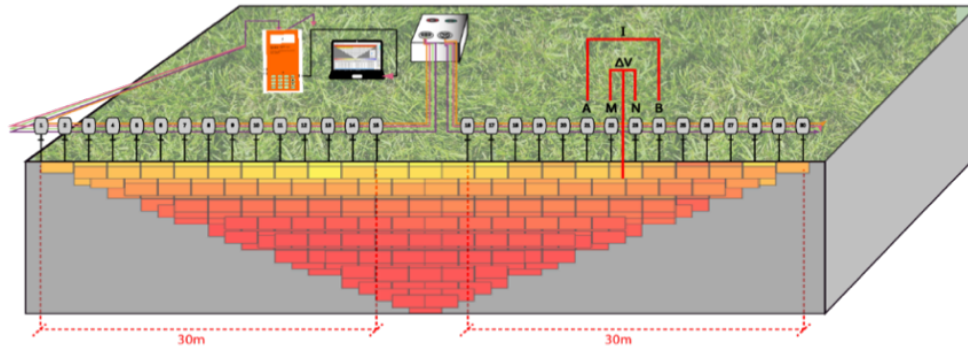
A continuación, se presenta un marco conceptual resumido de las técnicas de adquisición de la Tomografías de Resistividad Eléctrica, procesamiento y visualización de los resultados, empleados en el estudio.

### 5.1. Adquisición

#### 5.1.1. Técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D

La Tomografía de Resistividad eléctrica 2D es un método de resistividad multielectrodo (ver Figura 2), basado en el modelado bidimensional “X” y “Y” de valores de resistividad del subsuelo mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas). (Loke,2006)

Este método se puede considerar como una unión entre las técnicas de sondeo eléctrico vertical y la calicata eléctrica, ya que esta obtiene mediciones tanto verticales como horizontales a lo largo de la zona de estudio, para generar así la distribución real del subsuelo.

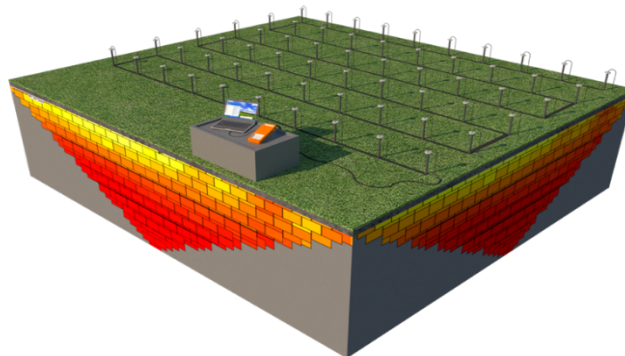


**Figura 3.** Representación esquemática de la secuencia de medida en el software GeoTest, para adquisición de Tomografías de resistividad Eléctrica 2D.

### 5.1.2. Técnica de Tomografía de Resistividad Eléctrica 3D

El método de tomografía de resistividad eléctrica 3D es desarrollado para conocer las variaciones de la resistividad de un material en sus tres dimensiones. Puesto que en la naturaleza todas las estructuras geológicas son tridimensionales. Urbietta 2001.

La teoría en la que se basa es la misma de los métodos eléctricos, la novedad del modelo 3D es que se pueden obtener más mediciones ajustando las configuraciones electrónicas se acuerdo a la geometría del objeto de estudio y así obtener puntos de resistividad que abarquen más volumen (**Figura 4**). La desventaja principal de este método son las áreas a investigar que deben ser suficientemente grandes (Hidalgo; Loke, 2010).

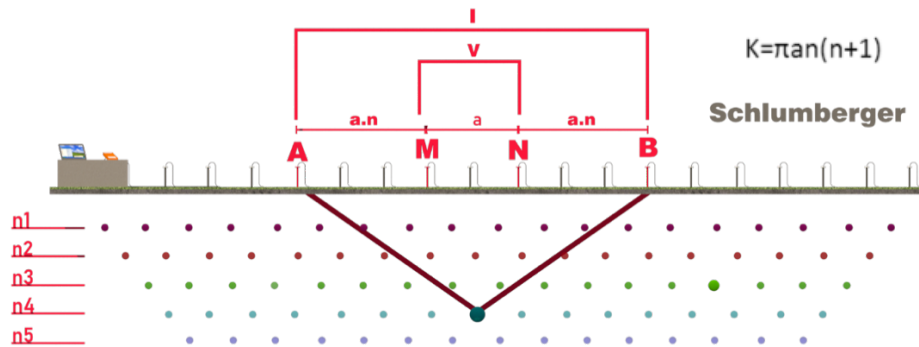


**Figura 4.** Representación esquemática de la secuencia de medida en el software GeoTest, para adquisición de Tomografías de resistividad Eléctrica 3D.

### 5.1.3. Configuración Electrónica

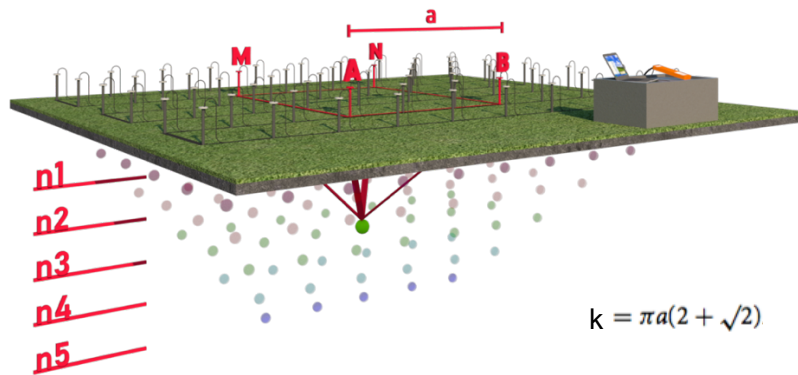
El método de tomografía de resistividad eléctrica utiliza un conjunto de cuatro electrodos recibe el nombre de “*dispositivo electródico o configuración electrodic*”. La medición del potencial eléctrico en un espacio homogéneo se hace mediante un dispositivo electródico o un arreglo geométrico de electrodos. Los electrodos, A y B son electrodos de corriente, positivo y negativo respectivamente, los electrodos de potencial M y N, entre los cuales se mide la diferencia de potencial del campo eléctrico creado entre estos.

El dispositivo utilizado en TER 2D es Schlumberger (Figura 5) donde la distancia de los electrodos MN será constante, mientras que las distancias AM y BN variarán en un factor “na” en cada estación; esto permitirá que a medida que se incremente “n” la profundidad de la tomografía aumente.



**Figura 5.** Representación esquemática de los datos de medida, para un dispositivo Wenner – Schlumberger, para varios niveles de adquisición. Elaboración propia.

El dispositivo utilizado en TER 3D es Square (Figura 6). En este arreglo la distancia entre MN y AB será de “a” en cada una de las estaciones, mientras que la distancia entre BN irá aumentando en cada una de las mismas en un factor de “na”.



**Figura 6.** Representación esquemática de los datos de medida, para un dispositivo Square, para varios niveles de adquisición. Elaboración propia

Otro método para colocar los puntos de medida sobre una posición vertical está basado en la profundidad media de investigación (Edwards, 1977), o seudoprofundidad, del dispositivo eléctrico empleado. Este valor de seudoprofundidad está basado en los valores de sensibilidad de la derivada de Frechet para un semi-espacio homogéneo (Loke, 2006), y puesto que este método parece tener una base matemática, es el método que se emplea para representar seudosecciones de los valores de resistividad aparente obtenidos en campo (ver Anexo 1).

## 5.2. Procesamiento

### 5.2.1. Introducción a la teoría de inversión

La finalidad de la tomografía eléctrica es la obtención de un modelo del subsuelo que muestre la distribución real de la resistividad, este método debe de ser compatible con los datos obtenidos en el trabajo de campo y correlacionarlo con la geología de la zona de estudio (Biosca, 2012). Los programas RES2DINV y RES3DINV, de Geotomo Software, empleados en este proyecto de grado, se basan en la aplicación del problema inverso (Geotomo software, 2017).

Conceptualmente, el problema inverso se puede describir como: “Dada alguna información sobre los valores de algunas cantidades medidas (definidos como datos experimentales o medidas de campo), se empleará una relación matemática para obtener los valores de los de parámetros que definen el modelo (variables que definen el subsuelo) y que reproducirán o explicarán las observaciones de campo”. (Hidalgo; Loke, 2010).

En el caso este proyecto de grado, el objetivo del problema inverso es obtener un modelo que sea capaz de dar respuesta a los valores de resistividad aparente medidos en campo por medio de los valores de resistividad aparente calculados del modelo. El problema inverso, a través de una serie de cálculos iterativos (algoritmos basados en el criterio de mínimos cuadrados), va ajustando el modelo de partida hasta conseguir que la diferencia, entre los valores de los parámetros del modelo y los datos medidos en campo, sea mínima, en función del criterio de error asignado al algoritmo.

A este proceso matemático iterativo se le denomina Inversión y el modelo resultante de este proceso es la pseudosección geoelectrica de valores de resistividad real y que representa, o modeliza, las características resistivas del subsuelo. Estos métodos específicos o *modelos (smoothness o robust)* relacionarán los *parámetros* con los *datos* (Hidalgo; Loke, 2010). El problema inverso contrasta con el problema directo, donde se predicen los *datos* a partir de los *parámetros* y de un *modelo*. En la Figura 7 se muestra esquemáticamente el procedimiento de inversión seguido para la obtención de una Tomografía Eléctrica.

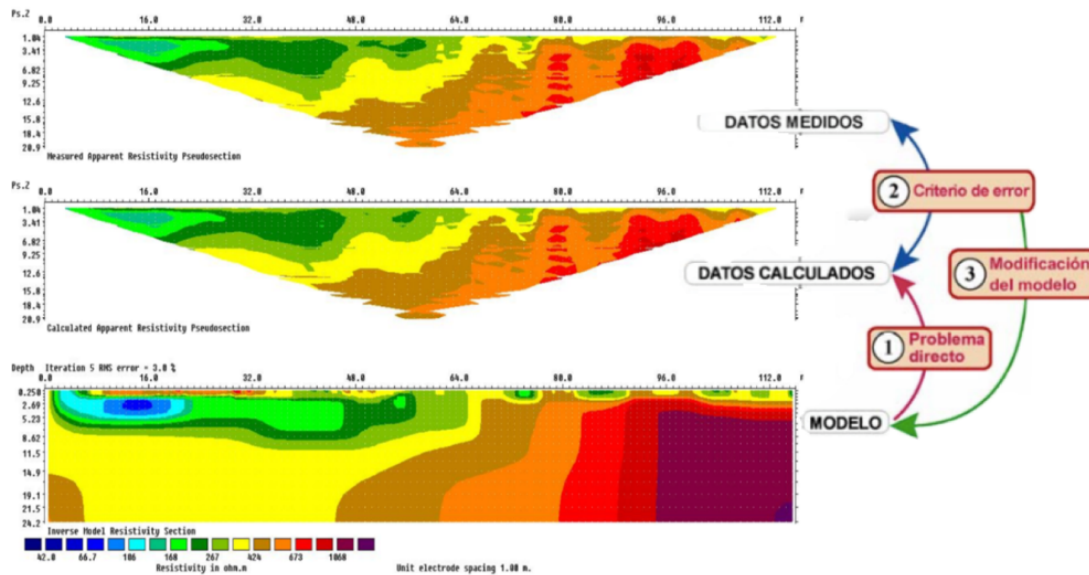


Figura 7. Proceso de inversión de datos geoelectricos. Elaboración Propia

La rutina de inversión, empleada por los dos programas anteriores, está basada en el método de mínimos cuadrados con restricciones de robusta. Técnicamente esto se conoce como el método de “inversión robusta” o “norma L1” (Loke y Barker, 1996). El método de mínimos cuadrados con restricciones robustas está basado en la siguiente ecuación:

Ecuación 1

$$(J^T J + \lambda F_R) \Delta \vec{q}_k = J^T R_d \vec{g} - \lambda F_R \vec{q}_k$$

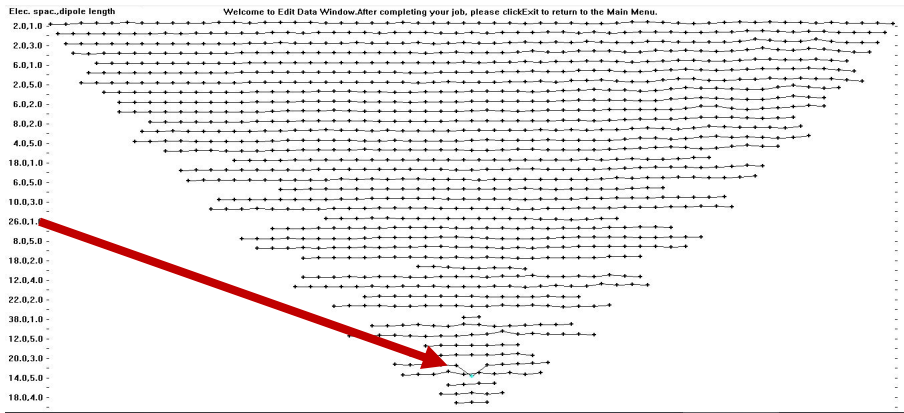
Siendo:

- $\Delta q$  el vector de cambios de los parámetros del modelo.
- $J$  la matriz Jacobiana ( $m \cdot n$ ) de derivadas parciales.
- $I$  es la matriz identidad
- $\lambda$  es el factor Marquardt o factor de amortiguamiento, que actúa limitando el rango de valores que puede tomar el vector de cambio de los parámetros del modelo.
  
- $R_d$  y  $F_R$  son matrices de ponderación que se introducen con el fin de que los diferentes elementos del desajuste entre los datos y los vectores más heterogéneos del modelo tengan pesos iguales en el proceso de inversión.

Para realizar el cálculo de los valores de resistividad se utiliza una subrutina de modelación directa, así como una técnica de optimización no lineal de mínimos cuadrados para la rutina de inversión (Loke y Barker, 1996). Durante el proceso de inversión se adopta como criterio de convergencia el valor del error cuadrático medio (RMS) entre los datos experimentales y la respuesta del modelo actualizado en cada iteración. Si el valor del RMS o su disminución relativa se sitúan por debajo de un valor predefinido se dice que la inversión ha convergido y el proceso se considera terminado.

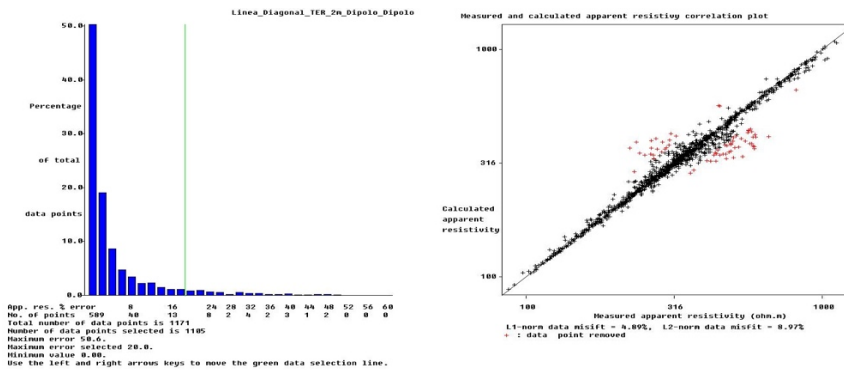
### 5.2.2. Procesamiento de datos Res2Dinv

Al revisar los puntos de medición ilustrado en la Figura 8 se observa varios de ellos con ruido "sistemático" los cuales se muestran como valores muy altos o bajos e inusuales en comparación con el resto de los datos. En el programa Res2Dinv, el análisis de ruido se lleva a cabo en la opción "*Exterminate bad datum points*", estos datos sean eliminados tras seleccionar los datos que se consideran ruido.



**Figura 8.** Representación de los datos ruidosos señalado con una flecha roja de la línea 1, Dipolo-Dipolo en la ventana de edición del programa Res2DInv.

Cuando el ruido es de naturaleza “aleatoria”, el mismo no es tan evidente. Para este caso en particular, primero se debe hacer una inversión preliminar con todo el conjunto de datos “*Carry out inversion*” se utiliza la dispersión de los puntos de datos llevando a cabo en la ventana ‘*Display*’ para echar un vistazo en el modelo. Después de que se elija las opciones de las “estadísticas de error RMS ” ‘*Editar datos*’ y luego se ajusta la línea verde para que el modelo resultante puede ajustarse mejor a los datos experimentales (ver Figura 9).



**Figura 9.** histogramas del error RMS se observan la distribución de puntos ruido del perfil 1 para el dispositivo Dipolo – Dipolo “aleatorio”, para este caso se desplazó “la barra verde” hasta 50% de los datos en la gráfica de barras.

Luego de eliminar los datos anómalos aplicando el filtro de la regresión lineal (Figura 9), se procede a generar el modelo de inversión con una serie de parámetros tales como el factor de amortiguamiento, rugosidad de filtros, tipo de solución ya sea numérico o analítico, entre otros. Una vez establecidos estos, se introduce el número de iteraciones necesarias con el fin de garantizar el mínimo error cuadrático medio que hay entre los valores de resistividad medidos y lo calculados.

Otro de los parámetros que se pueden variar es el valor del “**factor de amortiguamiento**” que asegurar la convergencia de la solución del modelo. Para la inversión de los datos el valor del factor de amortiguamiento inicial fue **0,20** que es el valor un poco más alto que el programa tiene predeterminado.

En este caso se realizó a partir de métodos estadísticos poner límites a los valores de resistividad, teniendo en cuenta la geología de la zona de estudio y las zonas de saturación, lo que se abordara en la próxima sección. Así mismo, se limitó los valores de la resistividad, llevado cabo con la opción “**Limit range of model resistivity**”. La resistividad se limita por medio de un factor inferior y uno superior, tomando como base la resistividad promedio a la resistividad en la primera iteración de la inversión.

La opción “**Forward modeling method settings**” establece parámetros utilizados en el modelo directo para calcular los valores de resistividad aparente, a través de la ecuación de “*diferencias finitas*”, algoritmo impuesto por no tener la presencia de la topografía. Para el procesamiento de los datos adquiridos en este estudio se utilizó 4 nodos por separación de los electrodos para el eje horizontal y la malla más fina para el eje vertical.

En la opción **Model discretization**, se muestra el patrón de bloques que se mencionó anteriormente en el apartado de teoría de inversión, así en la opción **Model blocks** (ver Figura 10) se puede observar como es la distribución de los puntos muestreados respecto a la distribución de los bloques, lo ideal es que en un bloque se cuente solo con un valor de resistividad, mediante el empleo de diferentes opciones como **Change thickness of layers, modify depths to layer**, etc, con la finalidad de que el programa “*Permita más número de bloque del modelo, supere el número de datos*”. En este menú también permite “**use the model extend**”.

Por último, los conjuntos de datos utilizados en este trabajo se han invertido utilizando el método de inversión “**Robust Inversion**” de **norma II** con filtro diagonal. Para el método de inversión de la **norma II**, es mejor usar un modelo en el que el número de celdas modelo exceda el número de puntos de datos (Loke, 2006). La inversión de la **norma II** con bloques anchos proporcionó imágenes con límites menos precisos (Putiska et al., 2012). Para su aplicación se eligió un factor que lo controle, proporcionando modelos con límites marcados en la distribución de la resistividad. Fue elegido un factor igual a **0.002**.

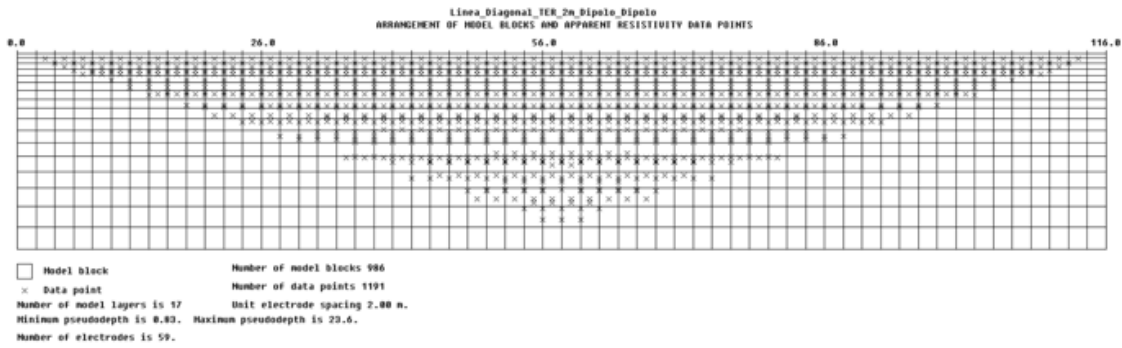


Figura 10. Representación de la opción “Modelo de discretización” para el “perfil 1”. Estimando un modelo de bloques mayor al número de datos y además se usa un modelo extendido.

### 5.2.3. Rangos de resistividad del modelo

En este apartado se exponen algunos criterios de optimización de los rangos de resistividad de acuerdo a los aspectos relativos a la representación de las imágenes de resistividad y la optimización de algunos criterios para esta investigación. Aunque no sean aspectos puramente técnicos, estos aspectos hacen de la visualización e interpretación sean más claros. (Biosca, 2012).

Este procedimiento se realiza mediante un análisis estadístico de los datos de resistividad aparente de todos los datos tomados en campo, que se encuentran con mas detalle en el archivo Excel del 11. Para la cual se realiza un histograma de frecuencia, representando la distribución de las resistividades por su frecuencia u ocurrencia, dividiendo las resistividades en 16 clases o intervalos de preferencia. El objetivo de este análisis es observar el mismo rango cromático para cada uno de las líneas realizadas para esta investigación y así hacer de estas una interpretación de la zona de estudio mucho más clara. (Biosca, 2012) (ver Figura 11).

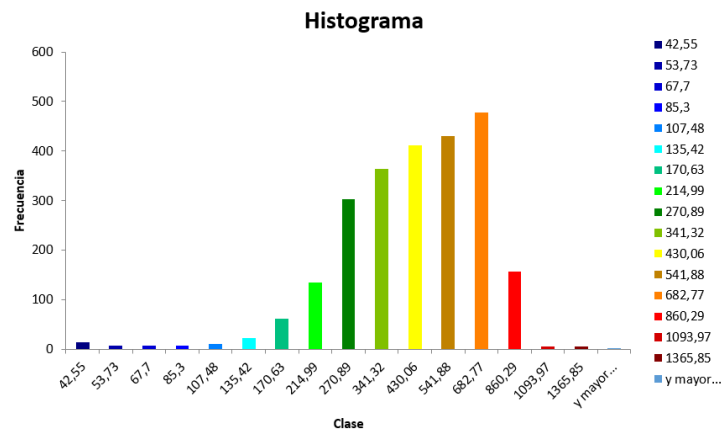
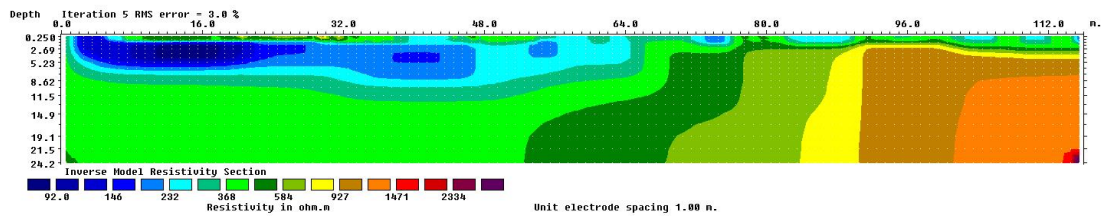


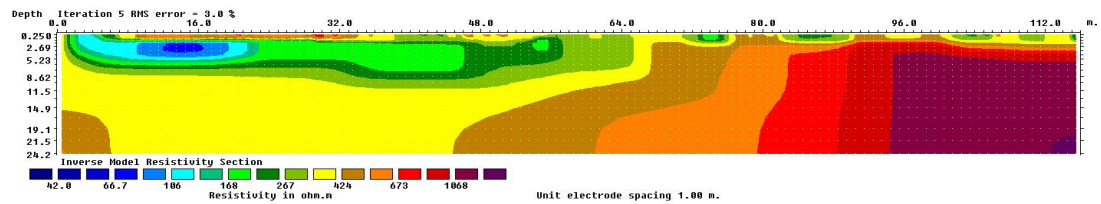
Figura 11. Histograma de frecuencia de los datos resistivos adquiridos

Existen dos escalas de representación dentro del Res2DInv los cuales son lineales y logarítmica. Para el análisis de los datos de esta investigación se utilizó una escala logarítmica donde los datos son divididos en intervalos cuyos logaritmos representan una diferencia constante. (Biosca, B. 2012). El software le permite al usuario la posibilidad de definir una escala totalmente personalizada, permitiendo establecer intervalos de resistividad que resultaron convenientes para este trabajo de investigación, debido a que las tomografías realizadas en la zona de estudio es representada por una misma litología denominada por Toussant y Restrepo 1998 como “Dunitas de Medellín”, por este motivo y para hacer de su interpretación más clara son representadas las pseudosecciones de resistividades definidas por el rango de colores como se puede observar en las siguientes Figura 12a – b.

(a)



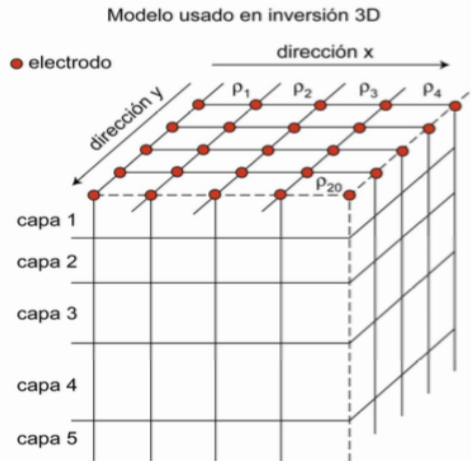
(b)



**Figura 12.** Inversión para el “perfil 1” para la configuración Wenner-Schlumberger (a). sin análisis estadístico. (b). con análisis estadístico.

#### 5.2.4. Procesamiento de datos Res3Dinv

El programa utiliza una rutina de inversión por el método mínimos cuadrados basado en una técnica de optimización quasi-Newton (Loke y Barker, 1996). Las restricciones en cuanto al suavizado se pueden aplicar en el modelo de valores de resistividad, por otro lado, el modelo robusto será mejor para cuerpos con bordes más angulosos; como en el caso 2D, el método de inversión seleccionado lo dará la naturaleza de lo que se busca. El método consiste en dividir el subsuelo, partiendo de un modelo homogéneo del mismo, en prismas rectangulares con el objetivo de determinar los valores de resistividad de los prismas y minimizar la diferencia entre la calculada y los valores de resistividad aparente observados (ver Figura 13).



**Figura 13.** Modelo empleado para interpretar los conjuntos de datos con el RES3DINV (Loke y Barker, 1996).

Se utiliza un factor inicial y otro final de amortiguamiento para el método de mínimos cuadrados; estos factores de amortiguamiento cambiarán con respecto al número de iteraciones, el cual se toma como valor de referencia para detener la inversión. La resistividad del modelo homogéneo es calculada tomando un promedio de los logaritmos de los valores de la resistividad aparente (Loke y Barker, 1996).

Los parámetros se introducen de manera similar al programa Res2Dinv, a diferencia que, al momento de generar los resultados finales, la presentación se muestra hasta de siete secciones en los planos de coordenadas (X, Y), (X, Z) y (Y, Z). Siendo el eje Z la profundidad.

Las secciones horizontales a profundidad obtenidos en los mapping 1 y 2 (ver Figura 14; Figura 15; Figura 19) por el programa de inversión Res3Dinv arrojan valores de resistividad real la cual está representada por colores para una mejor y fácil observación de las variaciones verticales y horizontales (ver Figura 11 ). Esta gama de colores representa los distintos valores de resistividad de las distintas unidades y/o estructuras geológicas analizadas y así poder establecer la posible presencia de cavidades o conductos subterráneos y alguna otra discontinuidad en el subsuelo del área de estudio

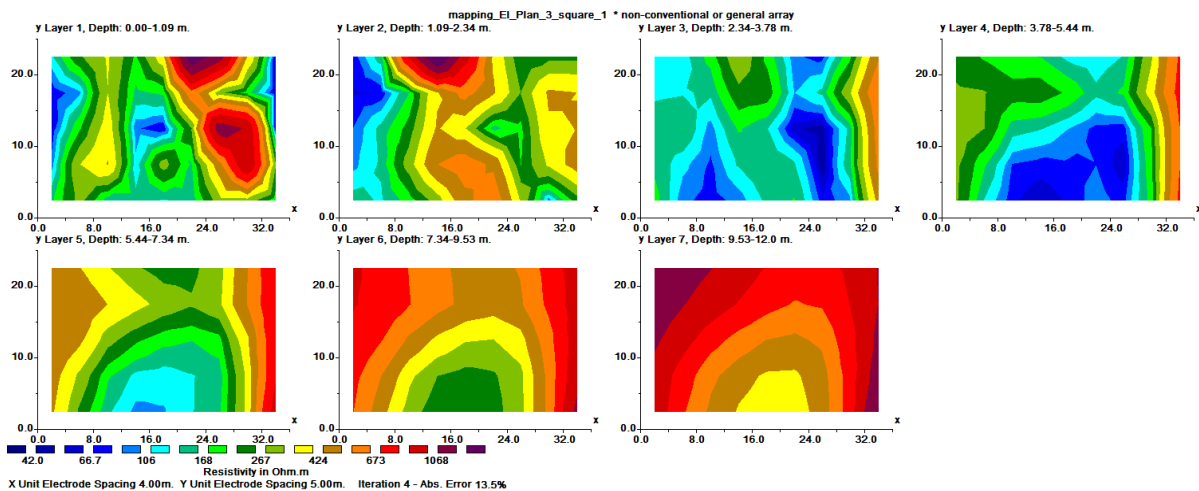


Figura 14. Despliegue de secciones en RES3DINV para 7 intervalos de profundidad en secciones horizontales “x” y “y”, para la adquisición “Mapping 1”.

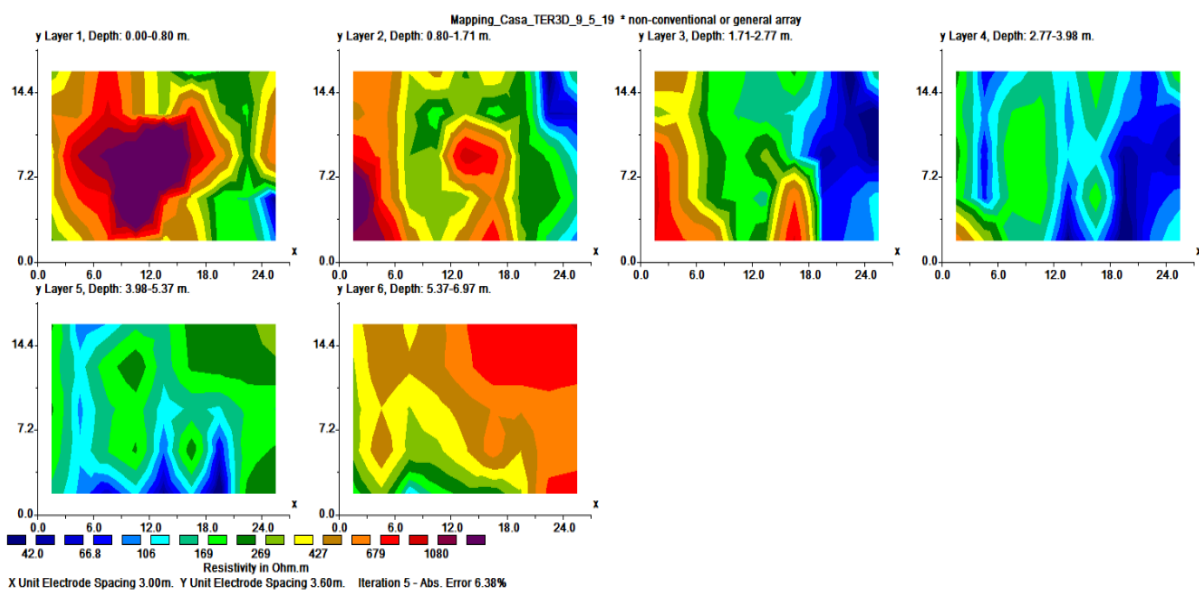


Figura 15. Despliegue de secciones en RES3DINV para 7 intervalos de profundidad en rebanadas horizontales “x” y “y”, para la adquisición “Mapping 2”.

También cuenta con la opción para exportar la información, la diferencia es que, para este caso, se exporta en \*.xyz, archivo en el cual se dan las coordenadas x, y, z, resistividad, conductividad y sensibilidad por columnas. Ordenando los datos se pueden desplegar posteriormente en algún otro programa de interpolación, como Voxler (Golden Software Inc).

### **5.2.5. Interpolación de resistividad**

Una vez que los modelos de distribución de resistividades fueron obtenidos mediante el software Res3Dinv, se procedió a la visualización de los resultados con el interpolador tridimensional Voxler (Golden software. Inc).

El programa interpola datos  $(X, Y, Z, C)$ , siendo  $X, Y$  y  $Z$  la posición en 3D y  $C$  la característica, para generar un arreglo en una, dos o tres dimensiones. Las opciones de interpolación son: inverso de la distancia, medida de los datos y polinomio local.

El método de inverso de la distancia es un interpolador del promedio de los pesos. Los datos son ponderados durante la interpolación, así que la influencia de cada punto se declina con la distancia al nodo de la malla. Cuando se calcula algún nodo de la malla, los pesos asignados a los datos son fracciones y la suma de los pesos es igual a 1. El método del polinomio local asigna valores a los nodos de la malla usando un ajuste de mínimos cuadrados con peso en un elipsoide de búsqueda.

Para el procesamiento de los datos se utilizó el método de inverso de la distancia, ya que después de hacer algunas pruebas con los diferentes métodos se observó que era el que se ajustaba a los datos.

## 6. RESULTADOS

A partir del procesamiento de los datos obtenidos en la zona de estudio, se generaron dos perfiles de resistividad (TER 2D) y dos mapeos de resistividad (TER 3D), cada uno correspondiente a una línea de estudio de acuerdo a la distribución en planta (ver Mapa 1) Los resultados y observaciones correspondientes a cada uno de los perfiles se presentan a continuación. Para la visualización de los perfiles fue necesario utilizar una escala de colores que representa de la mejor forma los contrastes de resistividades existentes en cada uno de los perfiles.

La interpretación de las secciones geoelectricas se realizó en términos de rangos de resistividad asociando dichos rangos a materiales con diversas características como son: grado de fracturamiento y alteración por acción del agua contenida. La clasificación de los materiales presentes en el subsuelo se presenta a continuación en la siguiente Tabla 3

**Tabla 3** Tabla de colores para la clasificación de los materiales presentes en la zona de estudio.

<i>Rango <math>\Omega.m</math></i>		<i>Interpretación</i>
<i>Clases</i>		<i>Perfil de meteorización</i>
42,65	53,73	Corresponden a geoformas endokársticas como cavidades o conductos colmatados de agua subterránea y/o arcillas, en el cuerpo ultramáfico Dunita de Medellín. suponen un alto grado de disolución y fracturamiento.
53,73	67,7	
67,7	85,3	
85,3	107,48	
107,48	135,42	
135,42	170,63	
170,63	214,99	
214,99	270,89	Roca parcialmente fracturada y meteorizada con presencia de minerales arcillosos y bloques de roca, que sugieren una zona de transición u horizonte de meteorización hacia el basamento cristalino
270,89	341,32	
341,32	430,06	
430,06	541,88	
541,88	682,77	Roca fresca escasamente fracturada y con poca presencia de meteorización.
682,77	860,29	
860,29	1083,97	
1083,97	1365,80	
1365,80		

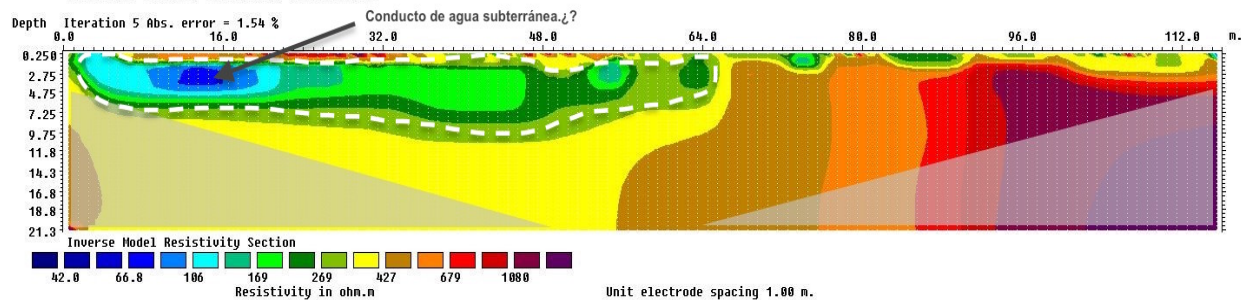
De forma general, todas las imágenes de inversión TER 2D y TER 3D interpretadas suministran una visión más clara de la distribución espacial del perfil del suelo, idealizado en 3 rangos de resistividades inherentes a las propiedades resistivas de la Dunita de Medellín.

## 6.1. Modelos 2D

En cada uno de los perfiles, se han aplicado dispositivos Schlumberger-Wenner y Dipolo-Dipolo. La mayoría de los perfiles presentan resultados similares para ambos dispositivos, aunque en algunos difieren sustancialmente, especialmente en aquellos en los que se incrementa la profundidad de prospección. En estos casos, el Dipolo-Dipolo mostró los errores más altos, con resistividades negativas. Sin embargo, los dispositivos Wenner – Schlumberger proporcionan imágenes más realistas y fiables, por lo que para la interpretación geofísica nos hemos basado principalmente en los datos aportados por este último dispositivo (Schlumberger - Wenner).

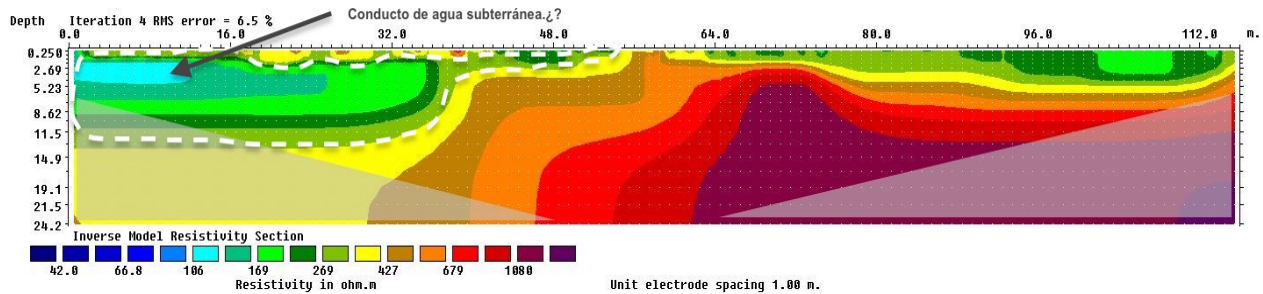
A continuación, se hace la descripción de los resultados obtenidos en los perfiles 1 y 2 con la configuración Schlumberger - Wenner elaborados en el área de estudio ubicado en inmediaciones de la dolina de colapso comúnmente conocida como “El Hoyo”.

Los perfiles TER 2D están representados típicamente por valores mínimos de resistividad de 42 – 270  $\Omega$ .m (Tabla 3), reflejadas en el lado izquierdo del perfiles (ver Figura 16; Figura 17) y abarcando una profundidad 2 – 8 m aprox. Asociados a cavidades o conductos colmatados de agua subterránea y/o arcillas, relacionado al drenaje subterráneo de la Quebrada La Espadera.



**Figura 16.**Resultados de inversión del “Perfil 2” con orientación N30W. Dispositivo “Wenner-Schlumberger”.

En la margen izquierda de los perfiles de TER 2D (Figura 16; Figura 17), se observan valores de resistividad de rango 270 - 430  $\Omega$ .m, subyaciendo a el material de conductividad baja (Tabla 3). La interpretación de los perfiles de resistividad sugiere una zona de transición u horizonte de meteorización.



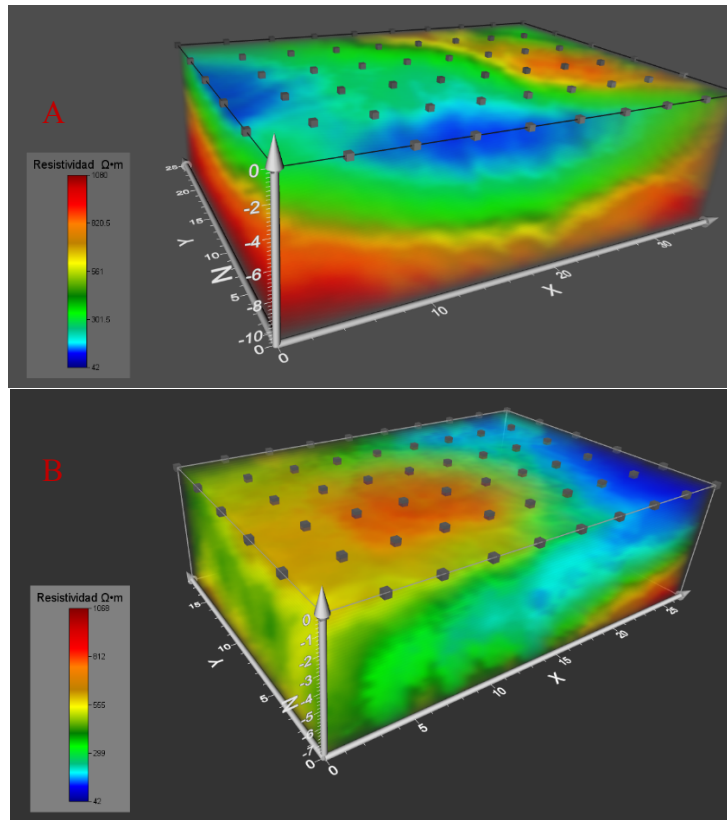
**Figura 17.** Resultados de inversión del “Perfil 2” con orientación N85E. Dispositivo “Wenner-Schlumberger”.

Además, el tramo de 48m a 120 m al lado derecho de los perfiles 1 y 2 (ver Figura 16; Figura 17) presentan típicamente valores altos de resistividad de  $>430 \Omega.m$ . asociados a roca fresca escasamente fracturada y con poca presencia de meteorización.

## 6.2. Modelos 3D

En cada uno de los perfiles se emplearon configuraciones electrónicas Wenner Alpha, Wenner Beta y Square. La mayoría de los perfiles presentan resultados similares para ambos dispositivos, aunque en algunos difieren sustancialmente. En estos casos, con los dispositivos Wenner Alpha y Wenner Beta se obtuvieron un menor número de mediciones. Sin embargo, los dispositivos Square proporcionaron un mayor número de datos y mayor profundidad de investigación, además de imágenes más aproximados a la realidad, por lo que para la interpretación geoelectrica me he basado principalmente en los datos aportados por este último dispositivo (Square).

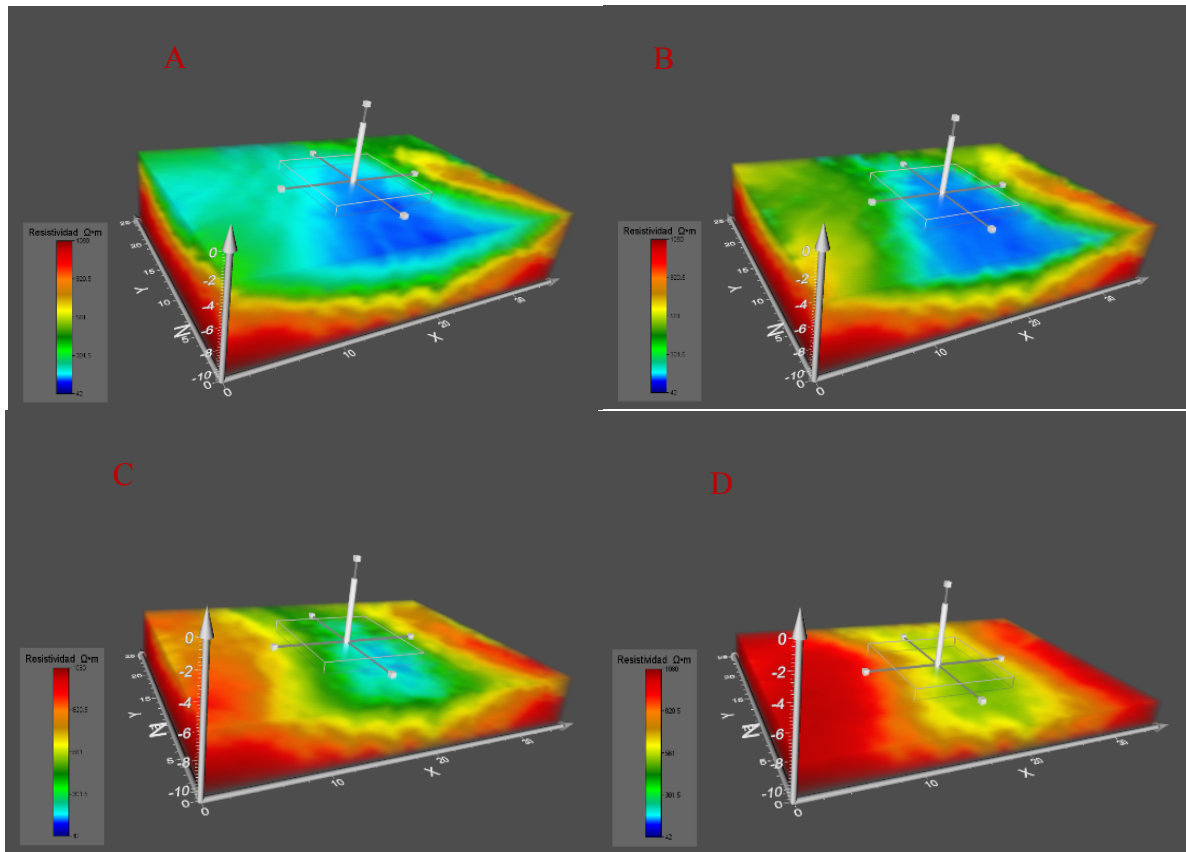
Las vistas en plantas (ver Figura 17; Figura 18) permiten correlacionar la resistividad de forma horizontal y vertical, para la visualización de los resultados de los Modelos 3D con el interpolador tridimensional Voxler como se puede observar en la Figura 18.



**Figura 18.** Visualización del modelo geoelectrico 3D obtenido para la adquisición. **A.** Mapping 1. **B.** Mapping 2''.

### 6.2.1. Vista en planta a 0.80m a 3 m de profundidad

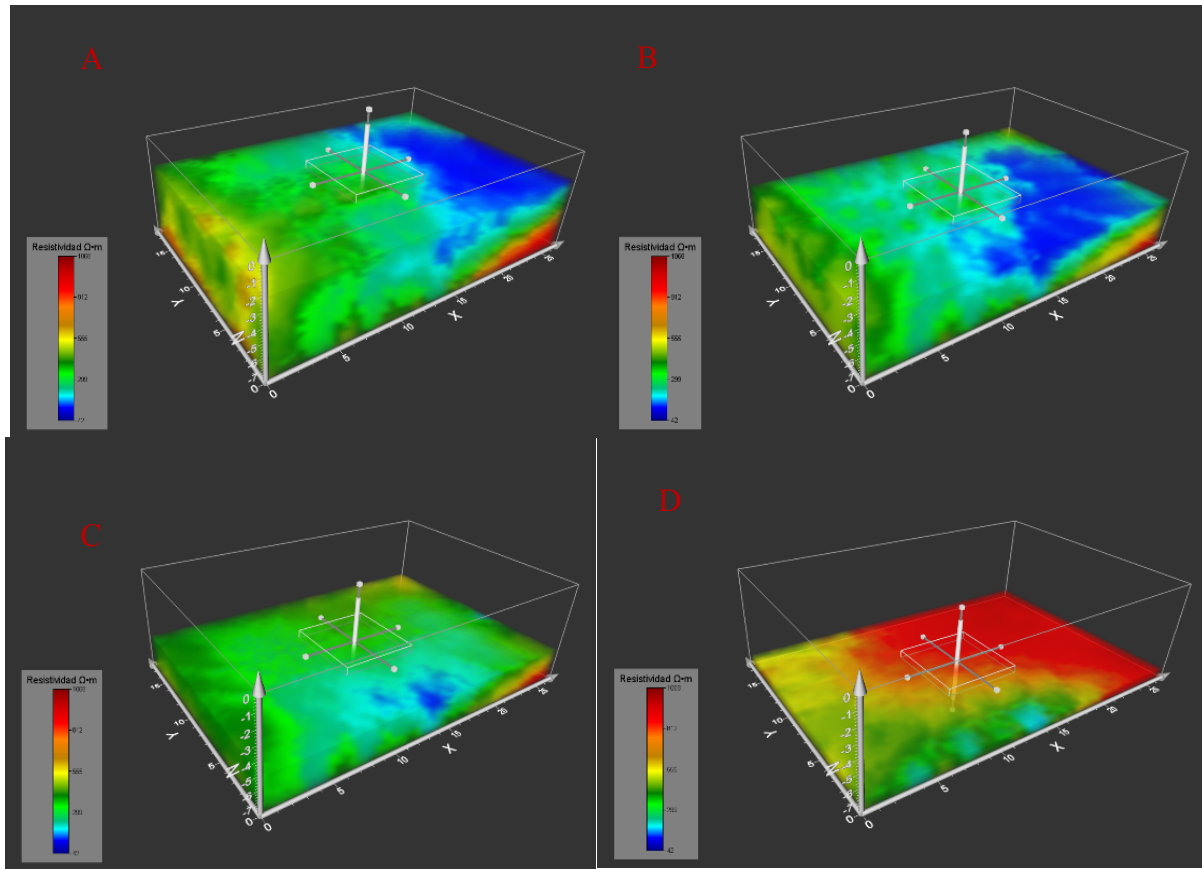
En esta secciones en planta (ver Figura 19; Figura 20, A-B) se puede observar que a una profundidad de 0,80m a 2.77m exhibe valores de resistividad altos en intervalos  $>270 \Omega$  (ver Tabla 3) sobre todo en la parte central del área de estudio. Esa anomalía puede explicarse en gran medida por el hecho tener un mal contacto electrodo – suelo, donde la resistencia de contacto se encuentra en intervalos de 3 a 5 kohm\*m en los para los electrodos 26 ,35 del “mapping 1” y 28, 34,54 para el “mapping 2” lo que sugiere ser raíces o bloques de roca muy someros, lo que podría explicar el porqué de los altos valores de resistividad. A demás, se pueden observar valores de resistividad que oscilan en valores 42-270  $\Omega$ .m. relacionados a materia orgánica húmeda.



**Figura 19.** Visualización del modelo geoelectrico 3D en software Voxler, obtenido para la adquisición “Mapping 1”. Vista en planta y a profundidad de las resistividades obtenidas. A) Profundidad de -3m. B) Profundidad de - 4m.C) Profundidad de -6m. D) Profundidad de -8m.

### 6.2.2. Vista en planta a 3m a 6m de profundidad

En estas secciones en planta (ver Figura 19; Figura 20, A-B) se puede observar que a una profundidad de 3m a 7m exhibe típicamente por valores mínimos de resistividad de 42 – 270  $\Omega \cdot m$  (Tabla 3). Interpretados como cavidades o conductos colmatados de agua subterránea y/o arcillas colmatadas donde la influencia del control estructural ejerce mayor control, decisivo en la fracturación, y por tanto, la disolución de la roca a lo largo de las diaclasas y fracturas en esta zona.



**Figura 20.** Visualización del modelo geoelectrico 3D en software Voxler, obtenido para la adquisición “Mapping 2”.  
 A) Profundidad de -2m. B) Profundidad de - 3m. C) Profundidad de -6m. D) Profundidad de -7m.

### 6.2.3. Vista en planta a >6m de profundidad

Las secciones en planta (ver Figura 19; Figura 20, C-D) de profundidad de 8m a exhibe valores de resistividad en intervalos 270 - 430  $\Omega\cdot m$  y >430  $\Omega\cdot m$  (ver Tabla 3). Se puede observar que a una profundidad de aproximadamente de 8m exhiben intervalos de resistividad entre 270 - 430  $\Omega\cdot m$  sugieren una zona de transición horizonte de motorización – Dunita de Medellín parcialmente fracturada. típicamente valores altos de resistividad en intervalos que superan >430  $\Omega\cdot m$ . Se pueden observar a profundidades >9m, representan roca fresca escasamente fracturada y con poca presencia de meteorización (ver Figura 19; Figura 20, C-D).

## 7. DISCUSIÓN

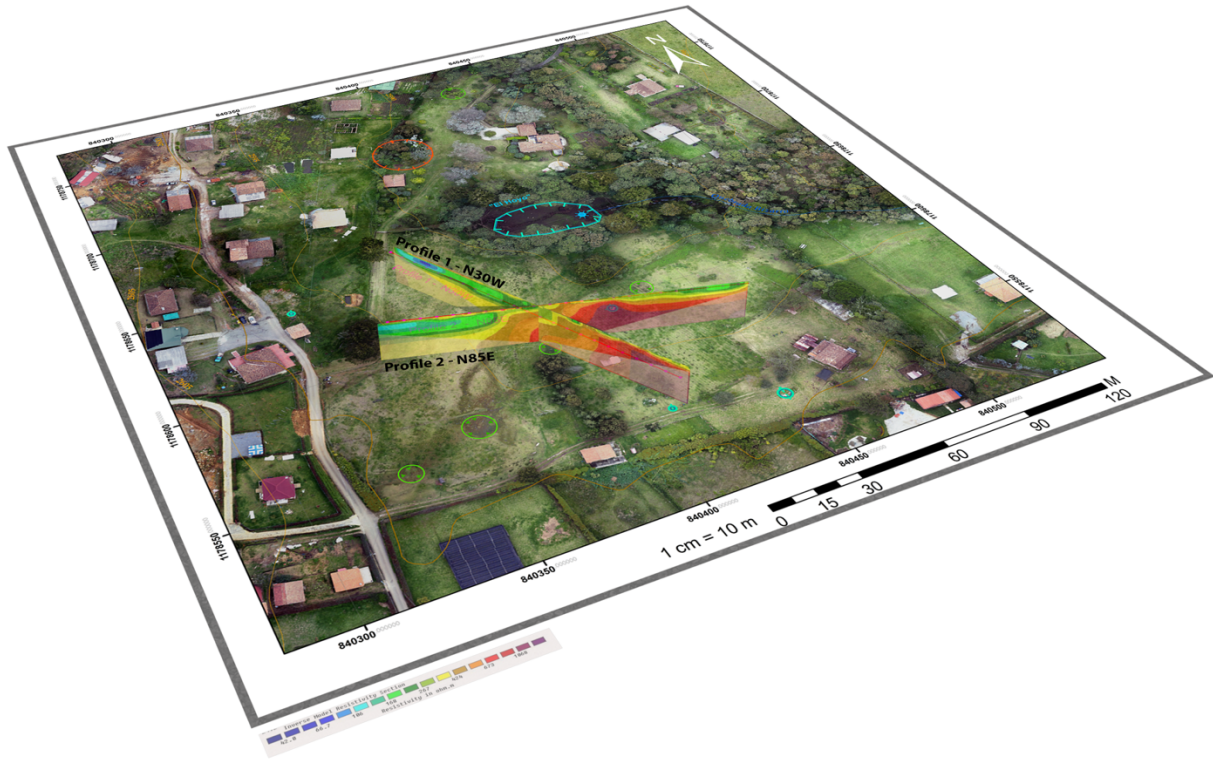
Este estudio utilizó la resistividad eléctrica como método de prospección geofísica, en la vereda El plan, corregimiento de Santa Elena, municipio de Medellín. Aplicando, técnicas de Tomografías Eléctricas 2D y 3D para identificar anomalías de baja resistividad asociadas a conductos de agua subterráneas.

A partir de los resultados obtenidos en las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TER) para las técnicas 2D y 3D, permiten confirmar la hipótesis propuesta en este estudio, que establece que el contraste de resistividad entre la cavidad y la roca caja (Dunita de Medellín) depende en gran medida del grado de fracturación y alteración por la humedad contenida.

Estos resultados guardan relación con los argumentos anteriormente propuestos por Ortega, 2017, Ahmed, et al. 2003 y Van Shoor et al. 2002, quienes investigaron sistemas kársticos en rocas calcáreas. Los autores señalan que las Tomografías de Resistividad Eléctrica revelan anomalías de baja resistividad, que sugieren la existencia de cavidades saturadas de agua subterráneas se localizan en zonas con alto grado de fracturamiento.

Sin embargo, en lo que no coincide el estudio de los autores referidos, con el presente trabajo, es que estos estudios fueron realizados en sistemas kársticos propiamente sobre rocas calcáreas. Sin embargo, así como las rocas calcáreas, la Dunita de Medellín se considera un material aislante o de alta resistividad. No obstante, se debe saber que todas las rocas presentan poros y/o fracturas que pueden estar saturados de agua (o de otro líquido). De modo que en el caso de suelos y rocas no conductores la conducción de la corriente eléctrica se realiza exclusivamente por conducción iónica. (Orellana, E. 1982).

Por lo expuesto anteriormente, la relación entre las anomalías de baja resistividad (42-270  $\Omega.m$ ) (ver Tabla 3). Con el grado de fracturación y meteorización de la roca, sumado a las manifestaciones topográficas, geomorfológicas y la relación espacial que guarda con el retiro de 15m de la quebrada La Espadera, sugieren un área de influencia de un conducto subterráneo saturado de agua y/o colmatado de materiales finos. En la Figura 21 se puede observar, que al lado izquierdo de los perfiles de Tomografía Eléctrica 2D las anomalías eléctricas de baja resistividad, suponen un alto grado de disolución por el agua contenida en las fracturas.



**Figura 21.** Representación esquemática de las Tomografías Eléctricas 2D en el área de estudio.

Así mismo, las resistividades entre 270 – 430  $\Omega$ .m (ver Tabla 3) interpretados como roca parcialmente fracturada y meteorizada con presencia de minerales arcillosos y bloques de roca, que sugieren una zona de transición u horizonte de meteorización hacia el basamento cristalino (Dunita de Medellín). Estos se evidencian al lado izquierdo de los perfiles 1 y 2 (Figura 21).

Finalmente, los valores altos de resistividad de  $>430$   $\Omega$ .m. (ver Tabla 3) interpretados como roca fresca escasamente fracturada. Estos se evidencian en el tramo de 48m a 120 m al lado derecho de los perfiles 1 y 2 (Figura 21).

Las Tomografías Eléctricas 2D y 3D pueden, en cualquier caso proporcionar información útil sobre la litología. Además son técnicas de prospección geofísica que permiten estimar un área de influencia y profundidad para las conductos subterráneos. Sin embargo, las Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D logran determinar con mayor precisión la variación debido al gran contraste en la resistividad eléctrica entre las cavidades saturadas (baja resistividad) y el lecho de roca (resistividad alta).

Las Tomografías Eléctricas 3D reflejan una clara continuidad espacial de las anomalías de resistividades bajas ( $42 - 170\Omega.m$ ) interpretadas como conductos subterráneos. aunque la profundidad de investigación se ve afectada directamente por el área que cubre dicha adquisición, en contraste con la profundidad adquirida en las Tomografías Eléctricas 2D.

Es importante aclarar que los resultados obtenidos para el Mapping 2 es una estimación de áreas de influencia de los conductos de agua subterránea son de carácter preliminar debido a la ausencia de información hidrogeológica. Sin embargo, dichos resultados dan cumplimiento al objetivo propuesto de aplicar las Tomografías de Resistividad Eléctricas para identificar anomalías de baja resistividad asociados a conductos o cavidades subterráneas, y reflejan una idea general de la influencia del sistema pseudokárstico en la vereda El Plan.

## 8. CONCLUSIONES

- Las propiedades físicas de resistividad en la Dunita de Medellín dependen en gran medida del grado de fracturación, y el porcentaje de las fracturas saturadas de agua subterránea. Estas características son condicionadas también por la meteorización “hidrólisis” que se presenta dentro de los planos de fracturas o fallas dispuestos en la roca, generando así una red de conductos de agua subterránea en la Dunita de Medellín.
- Los modelos 2D y 3D obtenidos mediante la técnica de Tomografías de Resistividad Eléctrica, además de las manifestaciones geomorfológicas, topográficas y estructurales propias de las quebrada La Espadera y El Bizarro, hacen suponer que las aguas infiltradas a través de los puntos de captación, recargan el sistema kárstico. En este sistema, el control estructural determina la posición de las aguas subterráneas y su movimiento a través de un sistema bien desarrollado de conductos subterráneos con una orientación preferencial NNW.
- La resistividad de las rocas depende de demasiados factores (composición, tipo de fluido, fracturación, etc.) para que se pueda atribuir un solo valor a cada tipo de roca. Pero dado que para el presente estudio se realizó una campaña geofísica acompañada de cierta información geológica, geomorfológica y estructural reduciendo el margen de incertidumbre y se puede asociar el comportamiento geoelectrico con los materiales del área de investigación.
- Tomografías Eléctricas 2D y 3D son técnicas de prospección geofísica permiten estimar un área de influencia, profundidad de las cavidades o conductos subterráneos. Sin embargo, las Tomografías de Resistividad Eléctrica 2D permiten tener una clara representación debido al gran contraste en la resistividad eléctrica entre las cavidades saturadas (baja resistividad) y el lecho de roca (resistividad alta).

## 9. RECOMENDACIONES

- Se recomienda implementar otras técnicas geofísicas para una medición más precisa especialmente para estudios detallados para detectar cavidades o conductos kársticos debajo de la superficie. Por ejemplo, existen métodos geofísicos que cubren grandes áreas en un corto período de tiempo y representan una forma eficiente de detectar heterogeneidades subsuperficiales, incluyendo cavidades y áreas de subsidencia (es decir, reflexión sísmica, microgravedad, radar de penetración de tierra y resistividad eléctrica). Todas estas técnicas han demostrado un gran potencial para mapear con precisión las condiciones del subsuelo.
- Se recomienda incorporar al equipo Tomógrafo Lippmann light point 10W de la Universidad EAFIT un GPS de alta precisión para realizar medidas con corrección topográfica.

## 10. BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, S., & Carpenter, P. J. (2003). Geophysical response of filled sinkholes, soil pipes and associated bedrock fractures in thinly mantled karst, east-central Illinois. *Environmental Geology*, 44(6), 705-716.
- ÁLVAREZ, J. (1982). Tectonitas dunitas de Medellín; Informe 1896. Boletín geológico. Vol. 28. No. 3. Ingeominas. Medellín. Pág. 11 – 43.
- AMVA, (2007). Microzonificación sísmica detallada de los municipios de Barbosa, Girardota, Copacabana, sabaneta, la estrella, caldas y envigado
- Aristizabal, E., Roser, B., & Yokota, S., 2005. Tropical chemical weathering of hillslope deposits and bedrock source in the Aburrá Valley, northern Colombian Andes. *Engineering Geology*. N. 81, p. 389406.
- Biosca Valiente, B. (2012). Optimización de los procesos de medida e interpretación de la tomografía geoelectrica en la prospección superficial (Doctoral dissertation, Minas).
- Botero, G. 1963. Contribución al conocimiento de la geología de la zona central de Antioquia. *Anales* No. 57. Facultad de Minas, Medellín. 101 p.
- Cano, T. (2015). Identificación de la presencia de flujos regionales en el sistema hidrogeológico del valle de aburrá a partir de un caso de estudio en una zona piloto. Tesis
- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R., & Bosch, F. P. (2011). Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. *Hydrogeology Journal*, 19(6), 1169.
- Edwards, L.S., (1977). A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 42, 1020-1036.
- Eraso, A. y Pulina, M. (2001). Cuevas en hielo y ríos bajo los glaciares. Segunda edición. Mc Graw-Hill. Madrid. 279 P.

Hoyos, F; Vélez, M., Múnera, C. y Arias, D. (2000). sistema hidrogeológico del altiplano de Rionegro y del valle de la unión en la zona central de Antioquia. en: xiv seminario de hidráulica e hidrología. sociedad colombiana de ingenieros. villa de Leyva, Boyacá.

Monsalve, B. (1996). Evaluación geológica de la cromitas al NNW de Medellín. Tesis de grado. Universidad Nacional de Colombia. Medellín. 91 P.

Loke, M. (2006). Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. Tutorial, 128

Loke, M.H., and Barker, R.D., (1996). Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method: *Geophysical Prospecting*: v. 44, p. 131–152. doi:10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x.

Orellana, E. (1982). *Prospección Geoeléctrica en corriente continua (Segunda ed.)*. Madrid: PARANINFO.

Ortega Martínez, A. I., Benito-Calvo, A., Porres Benito, J. A., Pérez-González, A., & Martín-Merino, M. Á. (2012). *Prospección geofísica por tomografía eléctrica en el karst de la Sierra de Atapuerca*.

Pereira, E., Ortiz, F., & Prichard, H. (2006). *Contribución al Conocimiento de las Anfibolitas y Dunitas de Medellín (Complejo Ofiolítico de Aburrá)*. Medellín.

Putiška, R., Nikolaj, M., Dostál, I., & Kušnirák, D. (2012). Determination of cavities using electrical resistivity tomography. *Contributions to Geophysics and Geodesy*, 42(2), 201-211.

Res2DInv, (2006). Geotomo Software, Manual V. 3.55, pp. 132.

Res3DInv, (2006). Geotomo Software, Manual V. 2.15, pp. 71.

Rodríguez, C. (1989). Control de deslizamientos con manejo del agua subterránea; I Simposio latinoamericano de deslizamientos. Paipa. Pp. 519 – 533.

Restrepo, J. y Toussaint, J. 1984. Unidades litológicas en los alrededores de Medellín. En: I Conferencia sobre riesgos geológicos del Valle de Aburrá. Medellín. 27 p.

Restrepo, J. y Toussaint, J. 1974 – 1973. Obducción Cretácea en el Occidente Colombiano. Anales No. 58. Facultad de Minas. Medellín. P. 73 – 105.

Tejero, A., Chávez, R. E., Urbieto, J. y Flores-Márquez, E. L., (2002). Cavity detection in the southwestern hilly portion of Mexico City by resistivity imaging, *Journal of Engineering and Environmental Geophysics*, 130-139.

Urbieto, J., (2001), La tomografía eléctrica en los métodos de corriente continua, Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, UNAM.

Van Shoor, M. (2002) Detection of sinkholes using 2D electrical resistivity imaging. *J Appl Geophys* 50:393–399

Vásquez, A. (1993). Geomorfología del Altiplano de Santa Elena. Anexo I: Geomorfología cársica en Santa Elena (vereda El Plan). Tesis. Universidad Eafit. Medellín. 98 p.

Zhou, W., Beck, B. F., & Adams, A. L. (2002). Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. *Environmental Geology*, 42(8), 922-928.

## **11. ANEXOS**

Anexo 1

Informe Planeación y Adquisición de datos geoelectricos. Archivo Word.

Anexo 2

Paisaje pseudokárstico de la Vereda El Plan, Santa Elena. Archivo Word.

Anexo 3

Estadística de datos de resistividad aparente. Archivo Excel.

Anexo 5

Mapas de ubicación de las Tomografías 2D y 3D.PNG

Anexo 6

Datos crudos TER Proyecto de Grado. Carpeta archivos .DAT.