

**PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA
COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA EN EL ÁREA DE GEOTECNIA PARA EL
LEVANTAMIENTO DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS 2D EN EL PROYECTO
"ESTUDIO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS
EN MASA DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ, DEPARTAMENTO DE SANTANDER"**

YUSETH SEBÁSTIAN GÓMEZ NEIRA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2014

**PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA
COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA EN EL ÁREA DE GEOTECNIA PARA EL
LEVANTAMIENTO DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS 2D EN EL PROYECTO
"ESTUDIO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS
EN MASA DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ, DEPARTAMENTO DE SANTANDER"**

YUSETH SEBÁSTIAN GÓMEZ NEIRA

Trabajo de Grado para optar al Título de Ingeniero Civil

Director:

Msc. HEBENLY CELIS LEGUIZAMO

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISICOMECAÑICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA

2014

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	10
1. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.....	11
1.1. PRINCIPIO DE MEDICIÓN	11
1.2. ARREGLOS ELECTRÓDICOS	12
2. EQUIPO DE MEDICIÓN	13
2.1. PUESTA EN MARCHA DEL EQUIPO DE MEDICIÓN	13
2.1.1. <i>Manual para el levantamiento de tomografías eléctricas 2D con el equipo SuperSting R8 con Wi-Fi.....</i>	<i>14</i>
2.1.2. <i>Proceso de levantamiento.....</i>	<i>15</i>
2.1.3. <i>Procesamiento de los datos.....</i>	<i>16</i>
2.1.3.1. Métodos de inversión.....	16
2.1.3.2. Adición de Topografía al modelo	16
2.1.3.3. Revisión estadística	16
2.1.3.4. Interpretación de los resultados	16
2.2. CALIBRACIÓN DEL EQUIPO.....	17
2.2.1. <i>Definición del sitio para la calibración</i>	<i>17</i>
2.2.2. <i>Levantamiento</i>	<i>18</i>
2.2.3. <i>Procesamiento de los datos.....</i>	<i>19</i>
2.2.4. <i>Resultados</i>	<i>20</i>
2.2.5. <i>Análisis de Resultados.....</i>	<i>21</i>
2.3. MANUAL PARA EL PROCESAMIENTO DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS 2D CON EL SOFTWARE EARTHIMAGER 2D	24
3. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA CON TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN EL MUNICIPIO DE VÉLEZ, DEPARTAMENTO DE SANTANDER	26
3.1. ZONA DE ESTUDIO	26
3.2. PLANEACIÓN DE LAS EXPLORACIONES	27
3.3. EJECUCIÓN DE LOS LEVANTAMIENTOS	28
3.4. ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE LOS DATOS	31
3.5. GENERACIÓN DE INFORMES:	35
4. CONCLUSIONES.....	36
BIBLIOGRAFÍA	38

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Valores de resistividad en diferentes materiales.....	17
Tabla 2 Correlaciones materiales de suelo - resistividad.....	23

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Principio de medición con tomografía eléctrica.....	11
Figura 2 Tomógrafo SuperSting R8 con Wi-Fi	13
Figura 3 Vista del Manual para el levantamiento de tomografías	14
Figura 4 Localización levantamientos Estudio Casa de Campo	18
Figura 5 Vista del levantamientoFuente: elaboración propia	18
Figura 6 Histograma para remoción de datos desajustados.....	20
Figura 7 Resultados calibración.....	21
Figura 8 Resultados perforación.....	22
Figura 9 Comparación gráficas de dispersión de resistividad aparente medida contra calculada.....	24
Figura 10 Vista del Manual para el procesamiento de tomografías	25
Figura 11 Áreas en estudio con geoelectrica.....	26
Figura 12 Localización de los levantamientos de la primera y segunda campaña de medición en el área Urbana de Vélez	29
Figura 13 Localización de los levantamientos de la campaña de medición en el centro poblado Alto Jordán	30
Figura 14 Vista Proceso de Campo	31
Figura 15 Diagrama de dispersión de Resistividad Aparente Medida vs Calculada	33
Figura 16 Análisis Tomografía AJ6	34

RESUMEN

TÍTULO: PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA EN EL ÁREA DE GEOTECNIA PARA EL LEVANTAMIENTO DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS 2D EN EL PROYECTO "ESTUDIO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ, DEPARTAMENTO DE SANTANDER"¹

AUTOR: Yuseth Sebastián Gómez Neira²

PALABRAS CLAVE: Tomografía Eléctrica, Medición de Resistividad, Práctica Empresarial, Geotecnia, Geofísica.

DESCRIPCIÓN:

En el presente documento se da a conocer el proceso llevado a cabo durante el desarrollo de la práctica empresarial en el *Grupo de Investigación GEOMÁTICA, Gestión y Optimización de Sistemas*, brindando apoyo en el área de Geotecnia y Prospección de Suelos con la puesta en marcha y calibración del equipo de tomografía eléctrica, la planeación y ejecución de los levantamientos durante la fase de exploración geotécnica con tomografía eléctrica 2D para el "ESTUDIO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ, DEPARTAMENTO DE SANTANDER", y el procesamiento de los datos de campo. La exploración con tomografía eléctrica permitió identificar de posibles filtraciones y concentraciones de agua subterránea y definir los sitios de perforación para ubicación de piezómetros del estudio. Adicional a la práctica y como aporte al grupo de investigación, se crearon dos manuales: el *Manual para el levantamiento de tomografías eléctricas 2D con el equipo SuperSting R8 con Wi-Fi*, el cual recopila observaciones prácticas para la ejecución de los levantamientos y explicaciones sobre los errores y sonidos de alerta, y el *Manual para el procesamiento de tomografías eléctricas 2D con el software AGI Earth Imager 2D*, donde se explican detalladamente los parámetros del proceso de generación de imágenes de resistividad del subsuelo.

¹ Trabajo de grado

² Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Msc Hebenly Celis Leguizamo.

ABSTRACT

TITLE: PRÁCTICA EMPRESARIAL EN EL GRUPO DE INVESTIGACIÓN GEOMÁTICA COMO AUXILIAR DE INGENIERÍA EN EL ÁREA DE GEOTECNIA PARA EL LEVANTAMIENTO DE TOMOGRAFÍAS ELÉCTRICAS 2D EN EL PROYECTO "ESTUDIO DE AMENAZA, VULNERABILIDAD Y RIESGO POR MOVIMIENTOS EN MASA DEL MUNICIPIO DE VÉLEZ, DEPARTAMENTO DE SANTANDER"³

AUTHOR: Yuseth Sebastián Gómez Neira⁴

KEYWORDS: Electrical Imaging, Resistivity Measurement, Internship, Geotechnics, Geophysics.

DESCRIPTION:

Herein is disclosed the process carried out during the development of the internship in the *Geomática, Gestión y Optimización de Sistemas Research Group*, by providing support in the area of *Geotechnics and Geophysical Survey* with commissioning and calibration of electrical imaging equipment *SuperSting R8*, survey planning and execution during the geotechnical investigation using 2D electrical imaging for the "STUDY OF MENACE, VULNERABILITY AND HAZARD DUE TO LANDSLIDES IN THE MUNICIPALITY OF VÉLEZ, SANTANDER", and processing of raw data. The electrical imaging surveys allowed the identification of possible flows and groundwater concentrations and definition of soil sampling sites and piezometers location for the study.

In addition to the internship process and as a contribution to the Research Group, two handbooks were created: the *Handbook for 2D electrical resistivity surveying using the SuperSting R8 with Wi-Fi*, which compiles practical advices for survey execution and explanations for error and alert sounds; and the *Handbook for the 2D electrical imaging with AGI's inversion software EarthImager 2D*, where the software parameters for electrical resistivity imaging of subsurface are fully explained.

³ Bachelor Thesis

⁴ Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Director: Msc Hebenly Celis Leguizamo.

INTRODUCCIÓN

El municipio de Vélez, localizado al sur del departamento de Santander, se caracteriza por su geología dominante en rocas lodosas, perfiles de meteorización avanzados y suelos coluviales, condiciones que sumadas a un promedio anual de precipitaciones de 1899 mm¹ para el año 2002, hacen de sus centros urbanos sitios susceptibles a movimientos de tierra. Ante esta problemática, la Unidad Nacional para la Gestión del Riesgo de Desastres, el Departamento de Santander y el Municipio de Vélez encargaron al grupo de Investigación Geomática de la Universidad Industrial de Santander el proyecto '*Estudio de amenaza, vulnerabilidad y riesgo por movimientos en masa del municipio de Vélez, departamento de Santander*' en busca de aunar esfuerzos multidisciplinares en Geología, Geomorfología, Geohidrología y Geotecnia para identificar las causas y factores detonantes de los movimientos en masa, que con la caracterización la capacidad estructural de las edificaciones e infraestructura expuesta, permitan determinar la vulnerabilidad, evaluar y formular estrategias para reducir el riesgo.

Esta práctica empresarial consistió en apoyar los trabajos de exploración geotécnica por medio de la manipulación y calibración del tomógrafo *SuperSting R8* y el procesamiento de datos de campo con el software *EarthImager 2D*. Para el estudio se usó la tomografía 2D, dada la rapidez de adquisición de datos del método. A continuación se explican los principios del método geoelectrico.

¹ Municipio de Vélez. (2004). Esquema de Ordenamiento Territorial. Acuerdo 004 de 2004.

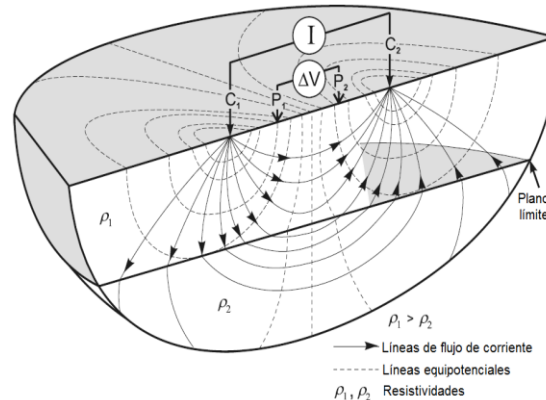
1. TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA

La tomografía eléctrica es una técnica para la exploración del subsuelo a partir de su resistividad eléctrica. De las mediciones se obtiene un mapa de la distribución de las resistividades en el subsuelo, la profundidad alcanzada, depende de la longitud de la línea de medición. De la cartografía de resistividad se hacen estudios posteriores.

1.1. Principio de medición

El método se basa en la medición de la resistividad, que es la dificultad que encuentra la corriente a su paso por un material. En el proceso, se usa un cable multi-núcleo conectado a una serie de estacas o electrodos metálicos hincados a lo largo de un alineamiento; mediante dos electrodos transmisores (C1, C2) se inyecta una corriente continua (I) en el suelo, generando en él un campo con líneas equipotenciales perpendiculares al flujo de corriente. En los límites geológicos y zonas con diferencias de conductividad aparece una refracción de las líneas de flujo, ésta se mide a través de electrodos receptores (P1, P2).

Figura 1 Principio de medición con tomografía eléctrica



Fuente: Knödel 2007

Los datos recolectados son un promedio ponderado de las resistividades reales de los materiales de suelo, al que se le denomina resistividad aparente (ρ_a), y está dado por la siguiente ecuación:

$$\rho_a = K * \frac{\Delta V}{I}$$

Donde (K) es un factor que depende de la distribución o arreglo de los electrodos.

Las resistividades aparentes se tratan con programas de inversión que a través de procesos numéricos permiten obtener el perfil de resistividades reales del suelo. La resistividad en los suelos depende de propiedades como la porosidad, saturación, y cantidad de electrolitos en el agua de los poros.

1.2. Arreglos electródicos

Para la generación y medición del campo eléctrico dentro del suelo, un sistema de conmutación alterna los electrodos emisores y receptores en ordenes preestablecidos, el orden usado recibe el nombre de arreglo electródico, éstos varían según su potencial para detectar mejor un tipo de estructuras de suelo u otro. Los más comunes son:

- *Wenner*: Bueno identificando estructuras horizontales, no tan bueno con estructuras verticales estrechas. Fuerte en señal, recomendable en zonas ruidosas. Profundidad de investigación moderada².
- *Wenner – Schlumberger*: Sensible a estructuras geológicas horizontales y verticales. Es usado en áreas en donde ambos tipos de estructuras son esperadas. Profundidad de investigación mayor a Wenner. Buena señal, puede usarse con confianza en zonas de alto ruido³.
- *Dipolo – Dipolo*: Útil en estructuras verticales tales como muros enterrados, cavidades. No muy bueno en estructuras horizontales como capas sedimentarias. Profundidad de investigación menor a Wenner. No recomendable en zonas con ruido².
- *Polo-Dipolo*: Buena cobertura horizontal y fuerte señal. Aconsejable en mediciones con un pequeño número de electrodos. Es un dispositivo asimétrico, lo que afecta los resultados obtenidos².
- *Polo-Polo*: Cobertura horizontal y profundidad de investigación amplias, sin embargo, tiene una resolución pobre. Alta profundidad de investigación. Poco usado, tiene grandes problemas de ruido por la amplia separación requerida entre electrodos receptores².

² Andrés López, Técnicas Prácticas para Investigación de Resistividad en Dos y Tres Dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D Y 3D), 2003

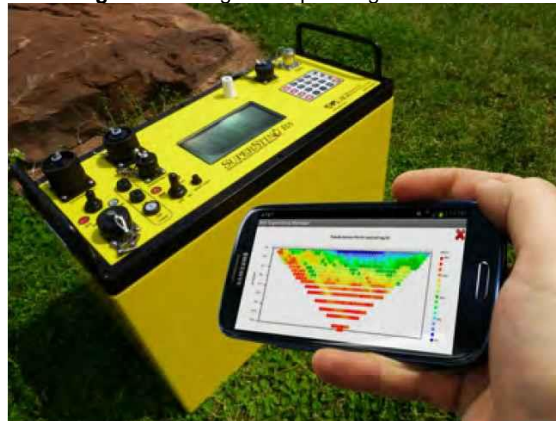
³ Laurent Marescot, Imagerie Electrique pour Geologues: acquisition, traitement, interprétation, 2008

2. EQUIPO DE MEDICIÓN

El equipo empleado para el desarrollo del proyecto fue el resistivímetro *SuperSting R8 con Wi-Fi*, el cual, dispone de 8 canales de medición, es decir, para cada inyección de corriente, la diferencia de potencial es medida en 8 electrodos de manera simultánea, lo que agiliza el proceso de medición. El aparato soporta las distribuciones de electrodos más comunes, éstas se cargan al dispositivo antes de la medición a través de archivos de comando.

Cuenta con 56 electrodos, 8 cables multi-núcleo de 70m cada uno, con contactos cada 10.25m y conectores en las puntas, una caja de conmutación y una antena Wi-Fi que le permite comunicarse con cualquier dispositivo tipo Android y ser manejado de manera remota; funciona con una batería de 12 V. La consola de mando luce como se ve en la *Figura 2*.

Figura 2 Tomógrafo SuperSting R8 con Wi-Fi



Fuente: AGI 2013

2.1. Puesta en marcha del equipo de medición

Para poner en funcionamiento el SuperSting se investigó respecto al método geoelectrico, sus principios y funcionamiento, además se leyeron e interpretaron los manuales de usuario del tomógrafo y su software de inversión: EarthImager 2D.

Durante esta etapa se hicieron levantamientos en el bosque de la UIS, ensayando las diferentes configuraciones de electrodos, y probando el funcionamiento de equipo.

Gracias a este proceso se entendieron los conceptos relativos al método tomográfico, se desarrollaron metodologías prácticas para el montaje y desmontaje del equipo, y se asimiló su funcionamiento, por lo que adicional a la práctica empresarial y como aporte al grupo de investigación se elaboró el *Manual para el levantamiento de tomografías eléctricas 2D con el equipo SuperSting R8*

con Wi-Fi, donde se recopilaron los principales consejos y recomendaciones para futuros usuarios del SuperSting. Éste se describe a continuación:

2.1.1. Manual para el levantamiento de tomografías eléctricas 2D con el equipo SuperSting R8 con Wi-Fi

Figura 3 Vista del Manual para el levantamiento de tomografías



Fuente: Elaboración propia

El manual describe el proceso de medición en dos secciones:

La primera, de Planeación, presenta las partes del equipo usadas para los levantamientos de tomografía, describe brevemente los arreglos de electrodos para que el usuario pueda escoger el más conveniente para su estudio, y explica detalladamente con pantallazos paso a paso cómo crear archivos de comando para el SuperSting.

La segunda, sobre la Ejecución, presenta recomendaciones para el montaje y desmontaje del equipo, explica como cargar y descargar archivos con el dispositivo Android, examina con detalle su configuración para la recolección de datos y explica los posibles errores y sonidos de alerta.

A continuación se describe brevemente el método de levantamiento tomográfico expuesto en el manual.

2.1.2. Proceso de levantamiento

2.1.2.1. Planificación

Se debe tener en cuenta:

- Los objetivos perseguidos, y a partir de ellos, definir la ubicación y cantidad de mediciones a ejecutar.
- La profundidad de investigación requerida. La profundidad alcanzada será en promedio una quinta parte de la longitud del alineamiento.
- El arreglo electródico a usar se escoge en función de las necesidades del proyecto, y se define en un archivo de comando creado con el software EarthImager 2D. Es recomendable para problemas ingenieriles que la separación entre electrodos no pase de $10m^4$.

2.1.2.2. Colocación del dispositivo y toma de datos.

Ya en campo, se traza el alineamiento y se clavan las estacas con el espaciamiento predefinido verificando que estén lo suficientemente enterradas para garantizar buen contacto con el suelo⁵, se extienden los cables según su numeración y se aseguran a los electrodos. El alineamiento debe ser en línea recta o en caso de tener desviaciones, éstas no deben superar ángulos de 15° .⁶

Se conectan los cables al conmutador (Swicht box), éste al SuperSting y por último se conecta la batería. Se ubica la señalización de advertencia de alto voltaje y se revisa que la línea de medición esté despejada.

Con el dispositivo Android, se transfiere por vía Wi-Fi al SuperSting el archivo de comando el cual indica al conmutador qué tipo de arreglo se usará y el orden en que se intercambiarán los electrodos⁵. Se verifica el correcto funcionamiento de las conexiones y se inicia la medición.

Una vez finalizado el proceso de medición se transfieren los resultados al dispositivo Android, de donde se pueden enviar a un ordenador y realizar la inversión de los datos.

2.1.2.3. Pseudosecciones y resultados

El resultado de la medición es una pseudosección de las resistividades aparentes del subsuelo, sin embargo, ésta no representa las resistividades reales del perfil y se entiende como una vista distorsionada del subsuelo, pues los contornos se verán altamente influenciados por el tipo de arreglo usado. Es una equivocación común asumir la pseudosección como una imagen final de la resistividad del subsuelo². La aplicación del dispositivo Android para el SuperSting permite ver en

⁴ Javier Serrano, Tomografía Eléctrica, Libro: Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo, Pag 14-30, 2003

⁵ Inc AGI, Instruction Manual for SuperSting Earth Resistivity, IP & SP System with Wi-Fi., 2013

⁶ Daniela Ravelo. (2007). Inversión e Interpretación de Datos de Resistividad Aparente 2D Adquiridos en Relieve Topográfico. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.

campo la pseudosección de una medición, ésta es procesada posteriormente en oficina para obtener el perfil de resistividad real.

2.1.3. Procesamiento de los datos

Los datos obtenidos con el equipo son tratados con el software AGI EarthImager 2D del mismo proveedor del SuperSting. El programa permite aplicar métodos de inversión a los datos de campo para generar el mapa de resistividades reales.

2.1.3.1. Métodos de inversión

Las técnicas de inversión consisten en procesos iterativos para encontrar el modelo de resistividades reales que generare una pseudosección de resistividades aparentes como la medida en campo⁷.

EarthImager 2D ofrece la oportunidad de elegir entre tres métodos de inversión para datos de tomografía eléctrica:

- Damped Least Squares, es un método rápido, pero ofrece una sección irregular y aproximada, debido a su falta de restricciones de rugosidad.
- Smooth Model Inversion, es un método estable y seguro, es recomendado para todo tipo de datos⁸.
- Robust Inversion, tiene buen desempeño en datos con ruido, y determina con efectividad los límites de resistividad⁸.

2.1.3.2. Adición de Topografía al modelo

El software ofrece herramientas para adicionar la topografía al modelo, éstas ajustan la malla del modelo de inversión según lo estipule el usuario. La variación de la sección con y sin topografía es más notoria en terrenos con crestas y valles.

2.1.3.3. Revisión estadística

Tras el proceso de inversión, se hace una revisión estadística del modelo generado, comparando las resistividades aparentes medidas y calculadas, el software presenta el desajuste de los datos en gráficas de dispersión. Es necesario remover los datos desajustados para garantizar la estabilidad del modelo. Una vez se remueven los datos desajustados, se hace un nuevo proceso de inversión y se revisa nuevamente el desajuste, este proceso se repite hasta alcanzar un porcentaje de error aceptable (3 a 10%)⁸.

2.1.3.4. Interpretación de los resultados

Tras obtener la imagen de resistividades reales, sigue el proceso de interpretación, que consiste en analizar las variaciones de resistividad y asociarlas con los materiales correspondientes a esos valores de resistividad. Sin embargo, debido a que la presencia de agua puede afectar considerablemente la resistividad

⁷ L'UFR Sciences de la Terre, de l'Environnement et des Planètes (STEP), <http://step.ipgp.fr/images/f/f9/FicheERT.pdf>, 2013

de un elemento y a la amplia variación de resistividades en un mismo material es necesario conocer previamente la geología del lugar o cotejar con sondeos u otro tipo de ensayos para corroborar la información de la distribución de resistividad. En la *Tabla 1* se muestran los valores de resistividad de diferentes materiales que pueden usarse para la interpretación de los resultados.

Tabla 1 Valores de resistividad en diferentes materiales

Material	Resistividad (Ωm)	
	mínima	máxima
Grava	50 (saturada de agua)	$>10^4$ (seca)
Arena	50 (saturada de agua)	$>10^4$ (seca)
Limo	20	50
Marga	30	100
Arcilla (mojada)	5	30
Arcila (seca)		>1000
Turbas, Fango	15	25
Arenisca	<50 (húmeda)	$>10^5$ (compacta)
Caliza	100 (húmeda)	$>10^5$ (compacta)
Esquisto	50 (húmeda)	$>10^5$ (compacta)
Roca ígnea y metamórfica	<100 (erosionada, húmeda)	$>10^6$ (compacta)
Sal de roca	30 (húmeda)	$>10^6$ (compacta)
Residuos domésticos e industriales	<1	>1000 (plástico)
Agua natural	10	300
Agua de mar (35% NaCl)	0,25	-
Salmuera	$<0,15$	-

Fuente (Knödel, 2007)

2.2. Calibración del equipo

Con el fin de verificar la precisión del método tomográfico, se planteó comparar las imágenes de resistividad obtenidas de los levantamientos con un perfil estratigráfico conocido, por ejemplo, con los resultados de un sondeo.

2.2.1. Definición del sitio para la calibración

Aprovechando la participación en el proyecto *Estudio Geotécnico Casa de Campo* desarrollado por el grupo de investigación, para el cual se requería entre otros, del levantamiento de perfiles con tomografía eléctrica y realización de perforaciones, se hizo una medición sobre uno de los puntos de perforación. La localización del estudio puede apreciarse en la *Figura 4*, la tomografía de la calibración corresponde al alineamiento T3.

Figura 4 Localización levantamientos Estudio Casa de Campo



Fuente: elaboración propia

2.2.2. Levantamiento

Para el levantamiento se usó el arreglo de electrodos Wenner-Schlumberger debido a su sensibilidad, con una separación de apenas 3m entre electrodo para tener una buena resolución de la imagen. Tras la medición se inició el sondeo sobre la abscisa 78m del alineamiento, garantizando que la variación entre las características del suelo fuera mínima. Dado que en los días anteriores a la medición no había llovido en la zona, el suelo se encontraba en condiciones aptas para medir su resistividad.

Figura 5 Vista del levantamiento



Fuente: elaboración propia

2.2.3. Procesamiento de los datos.

Los datos de resistividad fueron tratados con el software EarthImager 2D. Se usaron los siguientes parámetros para el proceso de inversión:

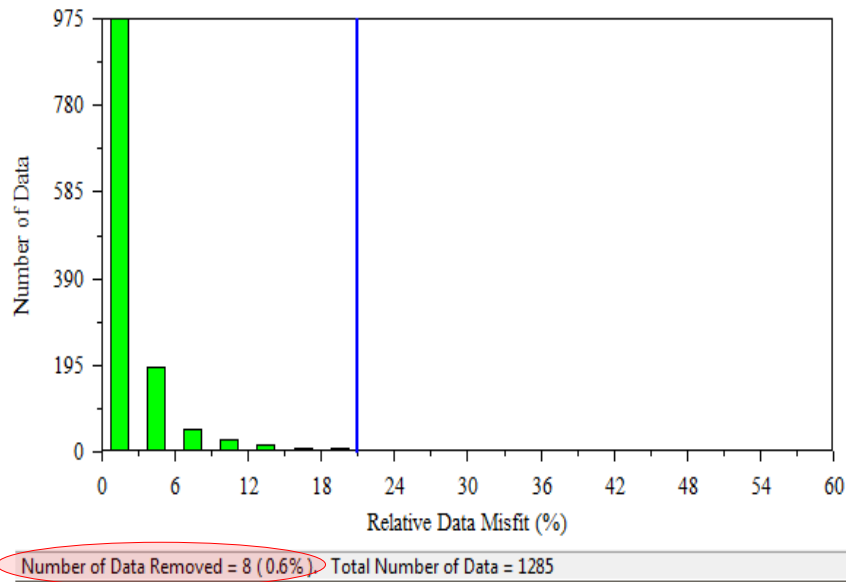
- Criterios para la remoción de datos iniciales: Voltaje mínimo 0.2 mV, mínima resistividad aparente: 1, máxima resistividad aparente 10000.
- Método de inversión: se usó el método *Smooth Model Inversion* pues ofrece una variación suave de las capas de resistividad.
- Criterios de finalización de iteración: Máximo de 8 iteraciones, error de desajuste entre los datos máximo de 3%, reducción de error entre iteraciones del 5%.
- Se estableció en 20 el punto de partida de la iteración con el método Cuasi-Newtoniano para evitar pérdida de sensibilidad en la matriz del modelo.
- Factores de suavización y amortiguamiento de 10
- Para tener en cuenta el efecto de la topografía se usó el método de transformación amortiguada de la malla del modelo.

De la inversión se obtuvo el Tomograma mostrado en la *parte superior de la Figura 7*. En él se aprecian capas de resistividad horizontales discontinuas con valores superiores a los 300 Ω -m. El modelo presenta un desajuste entre los datos del 4,49%.

2.2.3.1. Remoción de datos desajustados

Teniendo en cuenta que el objeto de esta medición era establecer correlaciones entre los valores de resistividad encontrados y los materiales de suelo de la zona, se hizo remoción de los datos desajustados hasta conseguir que el porcentaje de error entre los datos del modelo fuese menor o igual al 3% para conseguir un modelo más acurado. Para esto, se removieron 8 de un total de 1285 datos, es decir un 0,6% de los datos iniciales como se muestra en el histograma para remoción de datos desajustados, ver *Figura 6*.

Figura 6 Histograma para remoción de datos desajustados



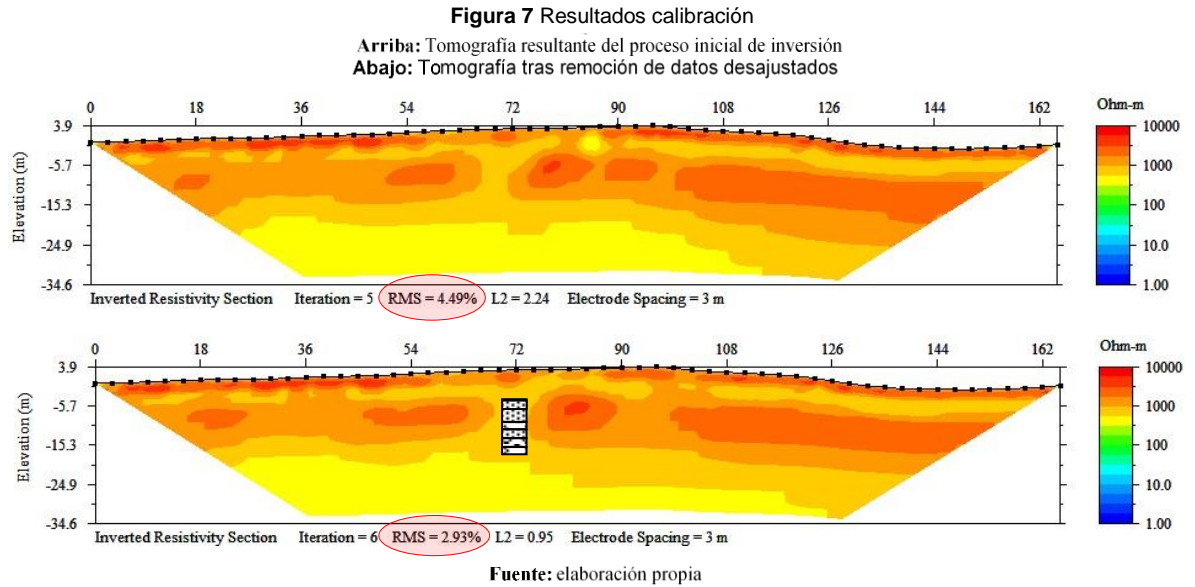
Fuente: elaboración propia

2.2.4. Resultados

Tras la remoción de datos se obtuvo el modelo que se aprecia en la *parte inferior de la Figura 7*, con un porcentaje de error del 2,93%. La variación entre los modelos antes y después del proceso de remoción es sutil debido a la poca cantidad de datos sustraídos para este modelo.

En el modelo se aprecia una distribución en capas horizontales de la resistividad del terreno, se aprecia una capa inicial superficial de resistividad entre los 1000-2000 Ω -m, bajo ésta, una segunda capa con resistividades entre los 500-1000 Ω -m, luego una tercera capa con valores entre los 1000-2000 Ω -m, una capa subsiguiente de valores entre los 2000-3000 Ω -m dentro de la cual se encuentran

zonas de mayor resistividad 2000-5000 Ω -m, bajo esta capa las resistividades de los materiales descienden hasta los 300 Ω -m.



2.2.5. Análisis de Resultados

La capa inicial que se muestra en el modelo se estima que corresponde al suelo superficial seco debido a la ausencia de lluvia los días anteriores de la medición, los contornos inferiores con mayor resistividad indican la presencia de una capa de material posiblemente denso, poco permeable, por esto su alta resistividad. Bajo ese material posiblemente se encuentra uno más permeable o más húmedo, por eso los rangos menores de resistividad. Los valores eléctricos encontrados en el modelo, y lo observado en campo sugieren que los materiales de suelo estudiados pertenecen a las areniscas.

Los resultados de la perforación (*Figura 8*) muestran un perfil de suelo un tanto homogéneo e indican que el suelo es fundamentalmente arenoso, con intercalaciones de material en estado seco y húmedo, poco permeable, de color rojo, seguido de una capa de suelo residual con bloques de roca de matriz areno limosa fina sobre una capa de arena limosa seca, lo que coincide con lo apreciado en el tomograma.

Figura 8 Resultados perforación

REGISTRO DE PERFORACION Y RESUMEN DE ENSAYOS DE LABORATORIO																
INGENIERÍA & SUELOS S.A.S										INGENIERIA Y SUELOS S.A.S						
NIT 900492967-1										NIT 900492967-1						
ingenieriaysuelos@gmail.com										ingenieriaysuelos@gmail.com						
Cel: 316-5281286 / 311-2341160										Cel: 316-5281286 / 311-2341160						
EMPRESA:		ING HERNAN PORRAS								FECHA:		12 de Agosto de 2014				
PROYECTO :		ESTUDIO GEOTECNICO CASA DE CAMPO DE LOS SANTOS MUNICIPIO DE PIEDECUESTAS								SONDEO:		1				
LOCALIZACION:		PARTE ALTA DEL LOTE								PROF:		0.00- 6.00 metros				
PROF. m		CLASIFICACION			DESCRIPCION DEL MATERIAL	W	GRANULOMETRIA			LIMITES			N			N
Inicio	Fin		USCS	% F			% S	% G	% L.L.	% L.P.	% I. P.	6"	12"	18"		
0.00	0.50		SM	Suelo Suelto compuesto por arena limosa, seca, poco permeable, algo resistente color rojo con algo de raíces.	9.8	33.4	60.0	6.6	45.5	30.4	15.1	4	6	8	14	
0.50	1.00											10	8	9	17	
1.00	1.50			Suelo Residual compuesto por arenas limosas húmedo, poco permeable, resistente color rojo con vetas café.								10	13	13	26	
1.50	2.00											18	17	18	35	
2.00	2.50											10	14	12	26	
2.50	3.00		SM		8.9	42.2	57.8	42.2	46.2	30.1	16.0	14	17	18	35	
3.00	3.50											10	10	11	21	
3.50	4.00											15	19	18	37	
4.00	4.50		SM	Suelo Residual compuesto arenas limosas, secos, resistentes con presencia de Bloques de Roca.								RT	RT	RT	RT	
4.50	5.00											RT	RT	RT	RT	
5.00	5.50											RT	RT	RT	RT	
5.50	6.00											RT	RT	RT	RT	
6.00	6.50			Suelo Residual compuesto por arena limosa húmedo, poco permeable, resistente color rojo.	6.8	42.4	57.6	0.0	31.7	23.3	8.4	9	12	12	24	
6.50	7.00		SM									15	20	22	42	
7.00	7.50		SS	Suelo Residual compuestas por bloques de roca de matriz areno limosa fina.								RT	RT	RT	RT	
7.50	8.00											RT	RT	RT	RT	
8.00	8.50											RT	RT	RT	RT	
8.50	9.00											RT	RT	RT	RT	
9.00	9.50											RT	RT	RT	RT	
9.50	10.00											RT	RT	RT	RT	
10.00	10.50											RT	RT	RT	RT	
10.50	11.00		SM	Suelo Residual compuesto por arena limosa seca, poco permeable, resistente color rojo.								19	19	24	43	
11.00	11.50											36	45	50	95	
11.50	12.00											33	35	37	72	

OBSERVACIONES:

CONVENCIONES: S.U.C.S. = Sistema Unificado de Clasificación de Suelos % F = Porcentaje de finos
 L.L.=Limite Líquido. % S = Porcentaje de arena
 L.P = Limite Plástico % G= Porcentaje de gravas
 I.P.= Indice Plástico W= humedad

ELABORO : ING. JOSE DAVID ESTEBAN REVISO : ING. JAVIER CABALLERO

ING. JAVIER CABALLERO ESTEBAN -MAT. 68202150761 STD

Fuente: elaboración propia

Al comparar los resultados con el perfil de resistividad se pudieron establecer las siguientes correlaciones:

Tabla 2 Correlaciones materiales de suelo - resistividad

Prof. [m]	Clasif. S.U.C.S.	Descripción	Resistividad [Ω -m]
1	SM	Arena limosa seca	1000-2000
4	SM	Arena limosa húmeda	500-1000
6	SM	Arena limosa seca	1000-2000
7	SM	Arena limosa húmeda	500-1000
10.5	SS	Roca meteorizada seca	2000-5000
12	SM	Arena limosa seca	1000-2000

Fuente Elaboración propia

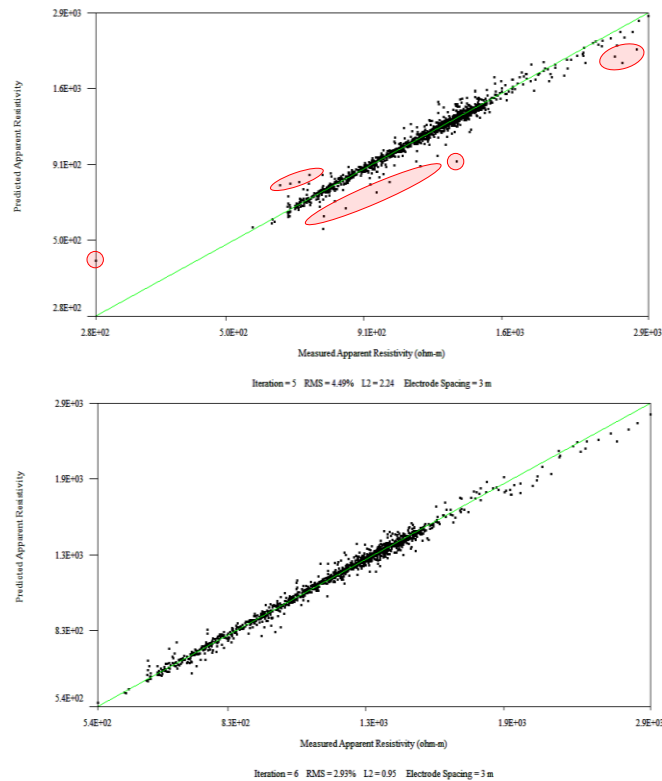
Es decir, para los suelos del lote *Casa de Campo*, se estima que las resistividades entre 500-1000 Ω -m corresponden a arena limosa (arenisca) en estado húmedo, las resistividades entre los 1000 y 2000 Ω -m corresponden al mismo material (arena limosa) en estado seco; entre 2000 y 5000 Ω -m se encuentra la roca meteorizada.

Los valores de resistividad encontrados para los materiales del perfil calibrado concuerdan con el rango de resistividad entre el que se pueden encontrar las areniscas según la *Tabla 1*, esto es, $< 50 \Omega$ -m en estado húmedo y hasta $>10^5 \Omega$ -m en estado compacto.

2.2.6. Confiabilidad de los modelos de resistividad

Antes de analizar los resultados se compararon los modelos generados durante el proceso de inversión de los datos de campo. La *Figura 9* muestra la disminución de la dispersión entre los datos del perfil calculado y el medido tras remover los puntos desajustados; como se puede apreciar, con remover pocos datos se consigue un modelo más preciso.

Figura 9 Comparación gráficas de dispersión de resistividad aparente medida contra calculada
Arriba: dispersión antes de la remoción de los datos.
Abajo: dispersión tras la remoción de datos desajustados



Fuente Elaboración propia

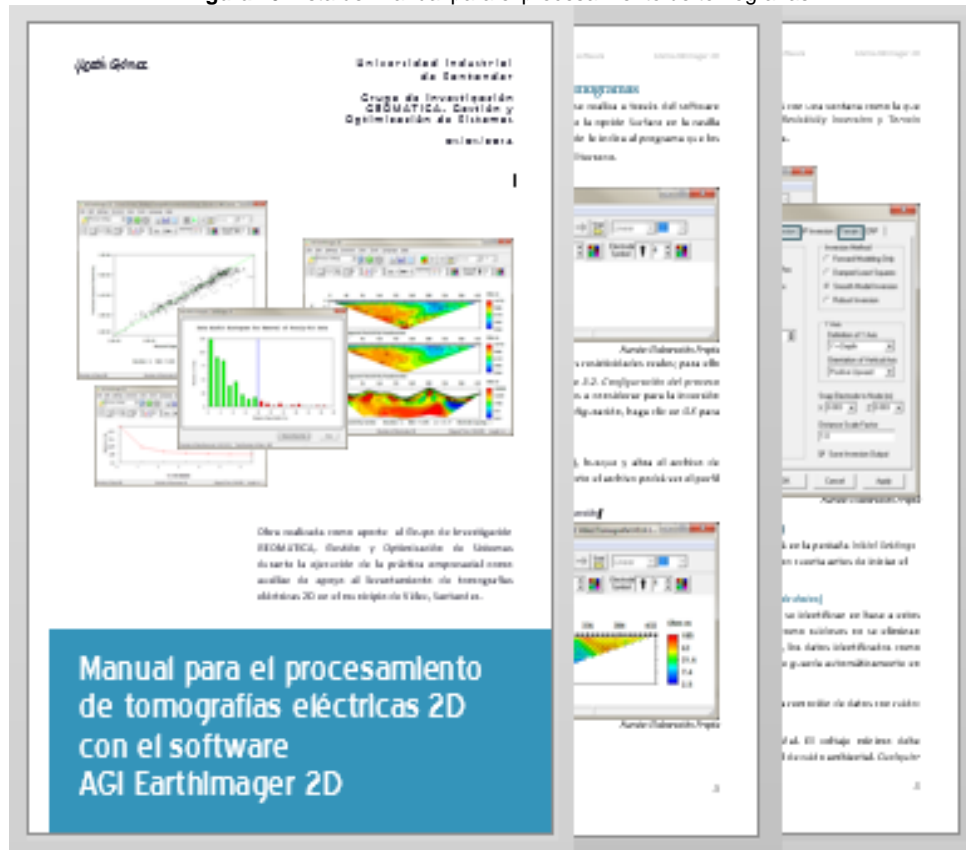
2.2.7. Recopilación del procesamiento

Durante la etapa de procesamiento, se estudiaron a profundidad las opciones y parámetros del software para la generación de tomogramas; gracias a esto, se elaboró como producto de la calibración y en aporte al grupo de investigación el *Manual para el procesamiento de tomografías eléctricas 2D con el software AGI EarthImager 2D*, sintetizando lo aprendido.

2.3. Manual para el procesamiento de tomografías eléctricas 2D con el software EarthImager 2D

Este manual se elaboró para facilitar el trabajo de futuros usuarios del software de inversión de resistividad *EarthImager 2D*, en él se presenta la interfaz de usuario, se expone paso a paso el proceso de configuración del programa para la inversión de datos de tomografía eléctrica, explicando de manera detallada los parámetros requeridos en cada fase, además, se presentan las herramientas para el análisis estadístico y la remoción de datos desajustados. Finalmente el manual muestra cómo agregar topografía a las imágenes, cambiar escalas, títulos y colores para generar el resultado final del proceso de inversión.

Figura 10 Vista del Manual para el procesamiento de tomografías



Fuente: elaboración propia

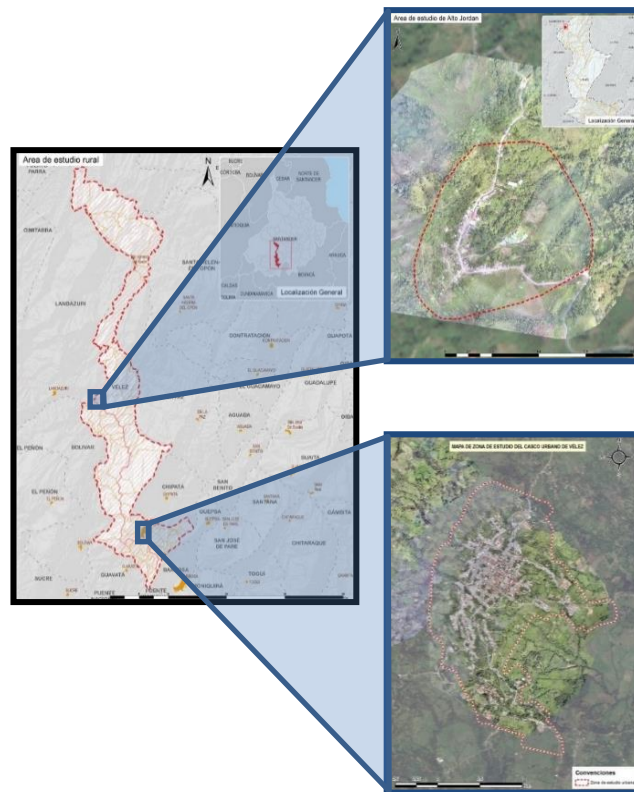
3. EXPLORACIÓN GEOTÉCNICA CON TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA EN EL MUNICIPIO DE VÉLEZ, SANTANDER

3.1. Zona de estudio

El proyecto abarca las áreas rurales y urbanas del municipio, sin embargo, las exploraciones con tomografía se concentraron en los asentamientos urbanos donde se habían reportado problemas de inestabilidad, en la *Figura 11* se aprecia la ubicación dentro del municipio de las áreas de estudio con tomografía eléctrica, arriba, el centro poblado Alto Jordán y abajo el área Urbana de Vélez.

Se estima que gran parte de los problemas de inestabilidad de los centros urbanos obedece a flujos de agua subterránea entre las diaclasas de la roca y entre el suelo meteorizado, esto sumado al mal manejo de aguas residuales por la deteriorada condición del alcantarillado actual. La exploración con tomografía se encamina, en este proyecto, a buscar los posibles flujos y/o concentraciones de agua subterránea que afectan la estabilidad del terreno.

Figura 11 Áreas en estudio con geoelectrica



Fuente elaboración propia con base en el Informe 1. Aprestamiento – Grupo de Investigación Geomática

3.2. Planeación de las exploraciones

3.2.1. Lugares

La definición de los lugares de medición obedeció a la necesidad de estimar la presencia de zonas con baja resistividad que indiquen posibles concentraciones de agua o zonas de humedad. Para esto, se hicieron visitas de reconocimiento, los sitios donde se identificaron deslizamientos y las zonas donde quebradas habían sido tapadas para la construcción del pueblo fueron prioridad en la definición de lugares para realizar levantamientos, adicionalmente, con el fin de verificar la existencia de flujos subterráneos se planteó hacer mediciones en la parte alta y en la parte baja del pueblo. La definición de los lugares estuvo asesorada por el profesional especialista en geo-hidrología del proyecto.

La mayoría de los levantamientos se plantearon en la periferia y no dentro del pueblo debido a que el método implica el hincado de estacas metálicas con separación constante en alineamientos largos, lo que implicaría romper el pavimento rígido de las calles para poder ejecutar la medición.

3.2.2. Longitud de los alineamientos

Para agilizar el proceso de medición en campo, se definieron previamente las longitudes de los alineamientos, lo que permitía llevar los archivos de comando precargados en el equipo. Para su definición se trazaron los posibles alineamientos sobre mapas del casco urbano en escala 1:2500, se manejaron longitudes de hasta 440m.

3.2.3. Arreglos electródicos:

La elección de la distribución de electrodos a usar en los levantamientos se basó en dos factores principales: la posible presencia de ruido en la medición debido a la cercanía de los alineamientos con el área urbana y sistemas de puesta a tierra y otros artefactos metálicos; y el tipo de suelo, pues debido a la poca variabilidad de los suelos Veleños se requería un arreglo de electrodos con buena resolución a cambios en la estructura del suelo.

Se decidió usar el arreglo Wenner – Schlumberger que por su sensibilidad permite apreciar tanto estructuras verticales como horizontales y por su fuerte señal permite obtener buenos resultados ante la presencia de ruido. Aunque la profundidad de investigación también jugaba un papel importante en el estudio, en la decisión primaron los criterios de ruido y sensibilidad.

Tanto los lugares de medición, como la longitud de los alineamientos se consideraron como susceptibles a modificaciones en campo según la dificultad de acceso a los sitios planteados, por la cobertura vegetal o la variación topográfica.

3.3. Ejecución de los levantamientos

3.3.1. Campañas:

Los levantamientos se llevaron a cabo en tres viajes al municipio de Vélez.

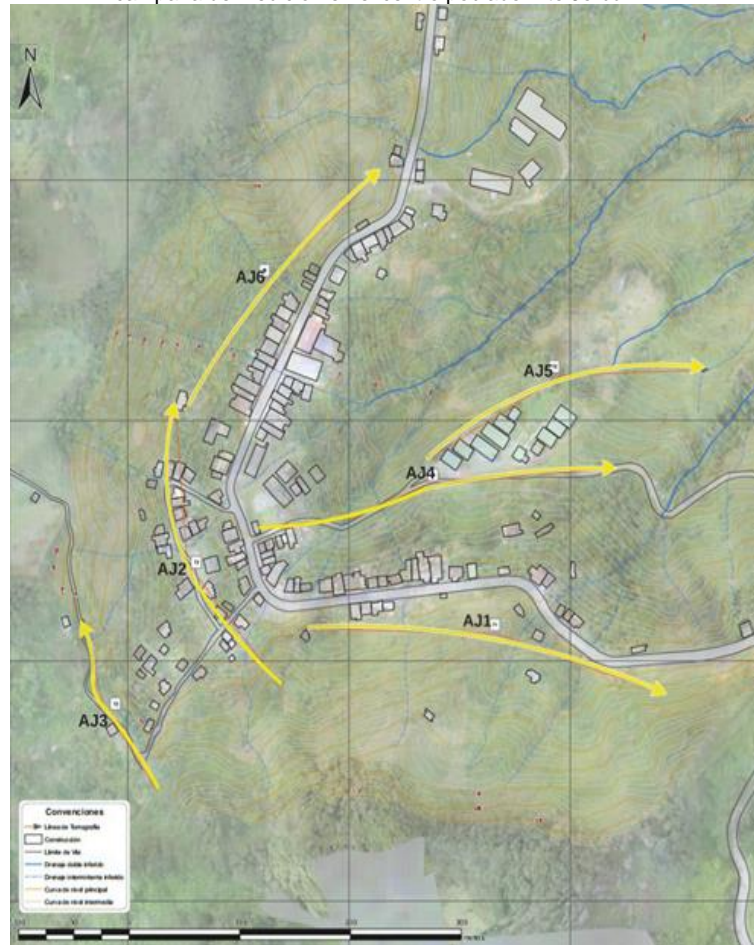
El primero con una duración de 7 días incluyó la realización de 9 mediciones al costado occidental del Área Urbana, la cantidad de levantamientos realizados en el viaje estuvo enmarcada por las condiciones climáticas, pues la medición no se puede ejecutar en condiciones de lluvia o tormentas eléctricas y durante ese viaje hubo precipitaciones todos los días.

El segundo viaje con duración de 7 días incluyó 12 mediciones al costado oriental del casco urbano con el fin de terminar la prospección general del Área Urbana de Vélez; ninguno de los días de ese viaje llovió.

El tercer viaje con una duración de 4 días al centro poblado Alto Jordán constó de 6 mediciones distribuidas a lo largo del asentamiento.

En las *Figuras 12 y 13* se muestran los mapas con la localización de los levantamientos en las diferentes campañas.

Figura 13 Localización de los levantamientos de la campaña de medición en el centro poblado Alto Jordán



Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Proceso de campo:

El proceso en campo para cada uno de los levantamientos se realizó en 4 fases:

- **Relocalización:** Se reubicaron las líneas proyectadas para las tomografías en base a las condiciones de vegetación y topografía que permitían o no seguir los trazados originales. Algunos alineamientos tuvieron que curvarse, procurando siempre de no hacer desvíos muy fuertes y superar los 15° para evitar errores geométricos en la medición.
- **Montaje de equipos y colecta de datos:** Se instalaron los aparatos de medición y se efectuó el levantamiento de las tomografías planeadas.
- **Georreferenciación de la línea de medición:** Para poder determinar la topografía del sitio de medición e incluirla en la tomografía. Además, se hizo un registro fotográfico del alineamiento y anotaciones sobre el área para facilitar la interpretación de los resultados.

- Desmontaje de equipos: Recolección del equipo de medición y limpieza del mismo.

Figura 14 Vista Proceso de Campo



Fuente: elaboración propia

3.4. Análisis y procesamiento de los datos

3.4.1. Parámetros de inversión

- Criterios para la remoción de datos iniciales: Voltaje mínimo 0.2 mV, mínima resistividad aparente: 1, máxima resistividad aparente 10000.
- Método de inversión: *Smooth Model Inversion*.
- Criterios de finalización de iteración: Máximo de 8 iteraciones, error de desajuste entre los datos máximo de 10%, reducción de error entre iteraciones del 5%.
- Punto de partida de la iteración con el método Cuasi-Newtoniano = 20.
- Factores de suavización y amortiguamiento de 10

- Transformación amortiguada de la malla del modelo, para ajustarlo a la topografía, debido a las fuertes variaciones del terreno.

3.4.2. Remoción de datos desajustados

A los modelos con porcentaje de datos desajustados mayor al 10% se les aplicó remoción de datos, reduciendo la dispersión entre la sección calculada y medida. Obteniendo un modelo más fiable.

3.4.3. Resultados

En general los perfiles de resistividad encontrados en Vélez son muy homogéneos y no tienen variaciones considerables de resistividad. Predominan los perfiles con resistividades entre los 30 y 100 Ω -m; en muchos de los perfiles se encontraron concentraciones de materiales con baja resistividad (1-30 Ω -m), algunos de ellos coincidentes con antiguas quebradas existentes antes de la construcción del pueblo. En pocos tomogramas se encontraron resistividades subsuperficiales superiores a los 300 Ω -m que sería lo esperado para los materiales rocosos de la zona.

Los tomogramas generados a partir de las mediciones en Alto Jordán no difieren mucho de los perfiles obtenidos en Vélez puesto que los problemas de inestabilidad en ambos asentamientos presentan patrones similares; sin embargo, la variación de resistividades en los suelos de Alto Jordán están más relacionadas con la situación hidrológica superficial y geomorfológica de la zona, donde las concentraciones de baja resistividad (1-30 Ω -m) coinciden con posibles filtraciones en los materiales de suelo provenientes de los flujos superficiales.

3.4.4. Interpretación y análisis de resultados

Las zonas predominantes de resistividad entre los 30 y 100 Ω -m a poca profundidad se estima que corresponden a los perfiles de suelo residual de origen lutítico en estado saturado a húmedo. Las mediciones realizadas sobre coluviones sitúan a los suelos menos densos en rangos de resistividad entre los 30 a 50 Ω -m con condiciones de humedad elevadas según lo visto en campo.

La diferenciación de las concentraciones de baja resistividad (1-30 Ω -m) en los diferentes perfiles se basó en las observaciones hechas en campo, el registro fotográfico y el análisis geomorfológico regional, permitiendo identificar, cuáles pertenecían a antiguos cauces (inexistentes ya), a posibles filtraciones de los cauces existentes, cuáles podrían representar posibles concentraciones de agua subterránea y cuáles obedecían a la presencia de sistemas drenaje o a filtraciones de las tuberías del alcantarillado rotas a causa de los deslizamientos en el pueblo, gracias esto se identificaron plumas de contaminación de aguas residuales provenientes del sistema de aguas negras en mal estado.

La alta conductividad de lo que se esperarían fuesen materiales rocosos, sugiere la idea de un alto grado de diaclasamiento por donde podría fluir el agua produciendo los promedios de baja resistividad encontrados.

A continuación se presenta como ejemplo el análisis de uno de los levantamientos que tuvieron lugar durante el estudio y que se describe en detalle en el informe final de prospección de carácter confidencial elaborado para el grupo de investigación.

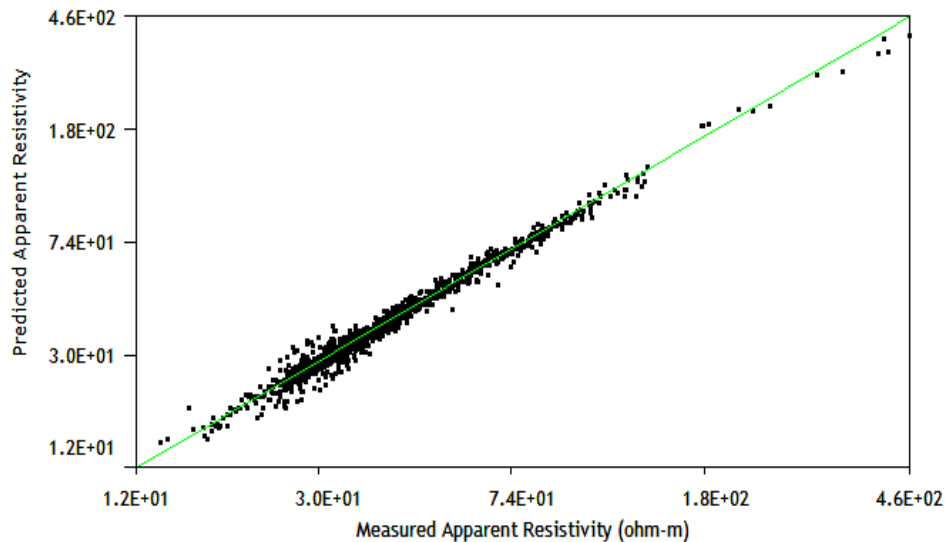
3.4.5. Ejemplo: Tomografía AJ6

Levantamiento correspondiente a la tomografía AJ6 localizada en la parte alta del centro poblado Alto Jordán durante la tercera campaña de mediciones al municipio.

Para la medición se usó el arreglo Wenner-Schlumberger con separación entre electrodos de 5m. El alineamiento se trazó junto a un canal de desagüe hecho para estabilizar el talud. La primera mitad del alineamiento se ubicó sobre una zona altamente húmeda según se pudo apreciar en campo, con alta densidad de vegetación; la segunda mitad se ubicó sobre un potrero seco con suelos superficialmente duros.

Los datos de campo se procesaron teniendo en cuenta los parámetros ya mencionados en la sección 4.4.1 del presente artículo. Para este tomograma no fue necesario realizar remoción de datos, dado que para el proyecto se manejó una tolerancia de 10% en el porcentaje de error y la imagen generada tuvo un desajuste del 8.3%.

Figura 15 Diagrama de dispersión de Resistividad Aparente Medida vs Calculada



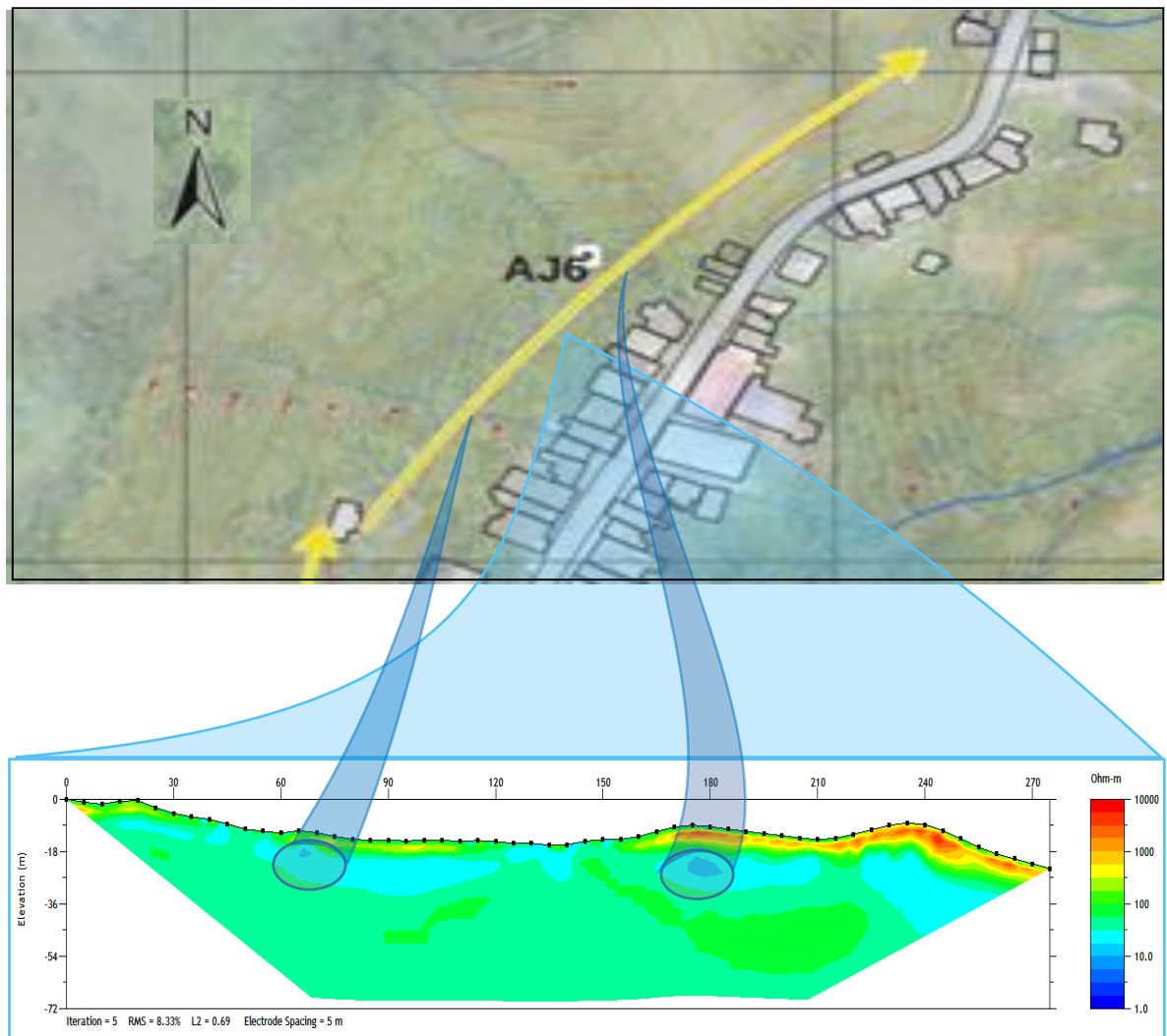
Fuente: elaboración propia

En el tomograma (ver Figura 16) se aprecia predominancia de materiales con resistividades entre los 30 y 50 Ω -m. Se estima que las dos zonas de resistividad entre los 5 y los 10 Ω -m, señaladas en la Figura 16 corresponden a filtraciones entre los materiales de suelo provenientes de las corrientes superficiales sobre las que pasa el alineamiento.

A lo largo de todo el perfil se aprecia una zona húmeda (color cian en la escala de resistividad manejada para el Tomograma) a unos 10m de profundidad la cual concuerda con la existencia del canal de desagüe.

La zona de la superficie con alta resistividad (tonos naranja a rojo en la escala de resistividad manejada para el Tomograma) en la segunda mitad del alineamiento coincide con la presencia de materiales secos y densos apreciados en campo.

Figura 16 Análisis Tomografía AJ6



Fuente: elaboración propia

3.4.6. Calibración de los resultados

Debido a que la fase de exploración con perforaciones del proyecto no ha iniciado, aún no se puede hacer una calibración definitiva de los resultados obtenidos con tomografía eléctrica. Por esta razón, en los informes de la exploración con tomografía se entregó una descripción de los perfiles de resistividad, y se habla en ellos de posibilidades de existencia de materiales en un estado de humedad u otro, dado que al ser la tomografía un método indirecto, sin las perforaciones no se tienen los elementos para emitir juicios sobre la estratigrafía del terreno y la interpretación realizada se limita a estimaciones hechas a partir de la experiencia adquirida.

3.5. Generación de informes:

De cada campaña de medición se hicieron informes de avance de la exploración con tomografía eléctrica, conteniendo únicamente la sección de resistividad real, esto debido a que las pseudosecciones de resistividad aparente calculada y medida no aportaban información al estudio. En los informes se incluye una breve descripción de la metodología de campo y de la generación de las tomografías, información de las campañas de levantamientos realizadas en el municipio, mapas con la localización de los levantamientos y las secciones de resistividad real resultantes. Para los entregables del proyecto se hizo un informe final de prospección recopilando toda la información de los informes previos. Los informes realizados permitieron a los profesionales en geotecnia del proyecto identificar de posibles filtraciones y concentraciones de agua subterránea y definir los sitios de perforación para la ubicación de los piezómetros del estudio.

4. CONCLUSIONES

El método de la tomografía eléctrica es una muy buena herramienta para el estudio del subsuelo, permite interpolar su estructura, identificar la presencia de posibles flujos y concentraciones de agua. Sus aplicaciones van más allá del uso ambiental y geo-hidroológico, el método también es aplicable a la caracterización de deslizamientos, a los estudios de asentamientos en fundaciones, el rastreo de filtraciones en presas de tierra, estabilidad de taludes, etc.

Entre las limitaciones del método se encuentran la pérdida de resolución de la imagen al aumentar la separación entre los electrodos y la dependencia de la longitud del alineamiento por parte de la profundidad alcanzada por el estudio. Sin embargo para la mayoría de estudios con fines geotécnicos no se requiere de espaciamientos muy grandes, y de requerirlo, estas restricciones se pueden vencer aumentando la cantidad de electrodos usados para alargar el alineamiento sin perder resolución.

Los equipos multi-canal para medición de resistividad como el SuperSting R8 con Wi-Fi, representan un gran avance para el estudio del subsuelo con geoelectrónica pues permiten agilizar los procesos de medición al medir la variación del potencial en varios electrodos a la vez, en el caso del SuperSting R8 la recolección de datos se hace en 8 canales a la vez, lo que permite optimizar los tiempos de los levantamientos y por lo tanto reducir costos de ejecución.

Dependiendo de los objetivos trazados para cada proyecto, la definición de los planes de exploración geotécnica con Tomografía eléctrica se apoya en la información geológica y geomorfológica previa, así como en la inspección de campo para trazar los alineamientos por donde se tomará el perfil.

El tiempo de ejecución de un levantamiento tomográfico depende del establecimiento de metodologías prácticas para el montaje y desmontaje de equipos para evitar enredos en los cables. La facilidad de acceso al sitio de la medición por las condiciones topográficas y de vegetación también juegan un papel importante en la duración de los levantamientos; factores como la presencia de personas, animales salvajes y el clima también deben ser considerados para tomar las medidas necesarias y evitar accidentes o retrasos en la medición.

Se recomienda a futuros usuarios del equipo de tomografía trazar los alineamientos de cada medición en sentido sur-norte u occidente-oriente, dado que al trazarlos en el sentido contrario habrá que mirar los mapas de localización de los levantamientos al revés dificultando el análisis de los resultados.

Debido a la superposición de los valores de resistividad para diferentes materiales de suelo y la influencia de factores como la humedad, salinidad y temperatura en los resultados⁸, es necesario calibrar los modelos de resistividad obtenidos con el método, usando litologías conocidas o información de perforaciones con el fin de establecer correlaciones entre los valores de resistividad para las principales formaciones y materiales de la zona de estudio y poder hacer estimaciones al respecto.

De la calibración realizada en el marco del proyecto Estudio Geotécnico casa de campo se puede concluir que las arenas limosas del lote se encuentran en rangos de resistividad entre los 300 y 2000 Ω -m, según su estado sea húmedo o seco su resistividad variará entre los 300 a 1000 Ω -m y los 1000 a 2000 Ω -m respectivamente. La roca poco meteorizada en el lote se encuentra entre los 2000 a 5000 Ω -m.

Dado que no han iniciado las perforaciones en el municipio de Vélez, aún no se han establecido correlaciones generalizadas entre los valores de resistividad y los materiales de suelo para las mediciones allá realizadas, sin embargo, las anotaciones de campo, el análisis de información geológica y geomorfológica y la experiencia adquirida durante la ejecución de la práctica permiten interpretar los tomogramas y emitir estimaciones de las condiciones del subsuelo. Las bajas resistividades encontradas a lo largo de los diferentes perfiles en las zonas que se esperaba fuesen materiales rocosos refuerzan la hipótesis de la existencia de flujos entre el diaclasamiento de las rocas.

Es preciso conocer los parámetros y criterios usados en el proceso de inversión de los datos recolectados en campo, la confiabilidad del modelo de resistividad real generado dependerá de las restricciones que se establezcan para su procesamiento. El uso de restricciones inadecuadas o de un descuidado ajuste topográfico puede generar imágenes muy diferentes de lo que sería la distribución real de resistividad en el subsuelo. De igual manera, la remoción de datos desajustados cuando hay mucha dispersión entre el modelo calculado y el medido es necesaria para garantizar la autenticidad de las formas que muestra el modelo.

⁸ M. Loke, (2013). Recent developments in the direct-current geoelectrical. *Journal of Applied Geophysics*

BIBLIOGRAFÍA

Abdessamad, N. (2007). Imagerie combinée géoélectrique–radar géologique des cavités souterraines de la ville de Zaouit Ech Cheikh (Maroc). *Science Direct. C.R. Geoscience* 339, 460-467.

AGI, I. (2009). *Instruction Manual for Earth Imager 2D Version 2.4.0 Resistivity and IP Inversion Software*. Austin: Advanced Geosciences, Inc.

AGI, I. (2013). *Instruction Manual for SuperSting Earth Resistivity, IP & SP System with Wi-Fi*. Austin: Advanced Geosciences, Inc.

Bernard, J. (2007). *Multi-electrode resistivity imaging for environmental and mining applications*.

Carrasco, P. (2011). *Mejora de técnicas geofísicas para la caracterización del subsuelo mediante innovación y el uso de herramientas de gestión de información espacial*. Salamanca.

Hacini, Y. (2006). *Application des méthodes géophysiques à l'étude de deux sites (Kappelen et Grenchen) de l'aquifère poreux complexe du Seeland*. Lausanne: Université de Lausanne.

Knödel, K.-J. (2007). *Environmental Geology Handbook of Field Methods and Case Studies*. Hannover: Springer.

Lagmanson, M. (2005). *Electrical Resistivity Imaging. Geophysical Electrical Resistivity Surveying*. San Antonio.

Loke, M. (2011). *Electrical resistivity surveys and data interpretation*. En H. Gupta, *Solid Earth Geophysics Encyclopaedia (2nd Edition) "Electrical & Electromagnetic"* (págs. 276-283). Springer-Verlag.

Loke, M. (2013). *Recent developments in the direct-current geoelectrical*. *Journal of Applied Geophysics* 95, 135-156.

López, A. (2003). *Técnicas Prácticas para Investigación de Resistividad en Dos y Tres Dimensiones (Tomografía Eléctrica 2D Y 3D)*. San Juan.

Marescot, L., et al. (2008). *Resistivity and induced polarization surveys for slope instability studies in the Swiss Alps*. *Engineering Geology* 98 (2008), 18-28.

Marescot, L. (2008). *Imagerie Electrique pour Geologues: acquisition, traitement, interprétation*. Zurich: Tomoquest.

Municipio de Vélez. (2004). Esquema de Ordenamiento Territorial. *Acuerdo 004 de 2004*.

Pánek, T. (2008). Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) in the study of various types of slope deformations in anisotropic bedrock: case studies from the Flysch Carpathians.

Pennetier, C. (2006). Caractérisation de la structure interne et de l'état hydrique de glissements argilo-marneux par tomographie géophysique : l'exemple du glissement-coulée de Super-Sauze (Alpes du Sud, France). *Science Direct. C. R. Geoscience* 338, 587-595.

Quintana, Á. (2013). *Aplicación de la Tomografía Eléctrica en la Caracterización del Deslizamiento de Doña Mencía*. Córdoba: Universidad de Granada.

Ravelo, D. (2007). *Inversión e Interpretación de Datos de Resistividad Aparente 2D Adquiridos en Relieve Topográfico*. Sartenejas: Universidad Simón Bolívar.

Serrano, J. (2003). Tomografía Eléctrica. En J. Serrano, *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo* (págs. 14-30). Cataluña: Universitat Politècnica de Catalunya.

Shaw. (2007). *GEOPHYSICAL SURVEY REPORT: Electrical Resistivity Imaging for Evaluating Earthen Dam Materials Hidden Lakes Estates, Granite Bay, California*. Sacramento: Shaw Environmental, Inc.

UFR. (2013). *L'UFR Sciences de la Terre, de l'Environnement et des Planètes (STEP)*. Recuperado el 28 de Mayo de 2014, de <http://step.ipgp.fr/images/f/f9/FicheERT.pdf>