



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERIA**

**Tomografía de Resistividad  
Eléctrica (TRE) 2D para el  
proyecto HAWC**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:**

**INGENIERO GEOFÍSICO**

**P R E S E N T A:**

**Raúl Daniel Corona Fernández**



**DIRECTOR DE TESIS:**

**Maestro en Ciencias Gerardo Cifuentes Nava**

**2014**

## INDICE

|                                                                            |           |
|----------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resumen</b>                                                             | <b>5</b>  |
| <b>Abstract</b>                                                            | <b>6</b>  |
| <b>Introducción</b>                                                        | <b>7</b>  |
| <b>1. Antecedentes.</b>                                                    | <b>9</b>  |
| <b>1.1. Área de Estudio.</b>                                               | <b>9</b>  |
| 1.1.1. Referencia Geográfica y Fisiográfica.                               | 9         |
| <b>1.2. Marco Geológico de la Zona.</b>                                    | <b>13</b> |
| <b>1.3. Estratigrafía.</b>                                                 | <b>16</b> |
| <b>1.4. Proyecto HAWC</b>                                                  | <b>17</b> |
| <b>2. Marco Teórico</b>                                                    | <b>19</b> |
| <b>2.1. Ecuaciones fundamentales del método de corriente continua.</b>     | <b>19</b> |
| <b>2.2. Arreglos Electrónicos.</b>                                         | <b>21</b> |
| <b>2.3. Profundidad de Investigación</b>                                   | <b>24</b> |
| <b>2.4. Teoría del Sondeo Eléctrico Vertical (1D)</b>                      | <b>26</b> |
| <b>2.5. Teoría de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)</b>        | <b>27</b> |
| <b>2.6. Sensibilidad de los arreglos</b>                                   | <b>29</b> |
| <b>2.7. Teoría básica de Inversión</b>                                     | <b>32</b> |
| 2.7.1. Modelo Directo                                                      | 32        |
| 2.7.2. Modelo Inverso                                                      | 33        |
| <b>3. Metodología.</b>                                                     | <b>35</b> |
| <b>3.1. Características del Equipo</b>                                     | <b>35</b> |
| <b>3.2. Características del Arreglo electrónico y adquisición de datos</b> | <b>37</b> |
| <b>3.3. Manejo de Datos</b>                                                | <b>43</b> |
| <b>3.4. Inversión de datos</b>                                             | <b>44</b> |
| <b>3.5. Representación gráfica de los perfiles geoelectricos</b>           | <b>50</b> |
| <b>4. Resultados</b>                                                       | <b>51</b> |
| <b>4.1. Perfil Geoelectrico 0</b>                                          | <b>52</b> |
| <b>4.2. Perfil Geoelectrico 1</b>                                          | <b>54</b> |

|      |                            |    |
|------|----------------------------|----|
| 4.3. | Perfil Geoeléctrico 2      | 56 |
| 4.4. | Perfil Geoeléctrico 3      | 58 |
| 4.5. | Perfil Geoeléctrico 4      | 60 |
| 4.6. | Perfil Geoeléctrico 5      | 62 |
| 4.7. | Perfil Geoeléctrico 6      | 64 |
| 4.8. | Imagen Psedo 3D            | 66 |
| 5.   | Conclusiones y comentarios | 72 |
|      | Bibliografía               | 74 |
|      | ANEXOS                     | 77 |

## Índice de Figuras

Figura 1.1 Mapa del cinturón volcánico Transmexicano.

Figura 1.2 Relieve del municipio de Atzitzintla.

Figura 1.3 Georeferencia del sitio de estudio, en la panorámica.

Figura 1.4 Mapa Geológico del área alrededor del volcán Citlaltépetl y Sierra Negra.

Figura 1.5 Pseudosección B-B1 de la figura 1.4 donde se muestra la relación estratigráfica entre las unidades y los volcanes, representando diferentes etapas de

evolución, la flecha roja a las faldas del volcán Sierra Negra resalta la zona en donde se realizó el estudio.

**Figura 1.6 Posición relativa de los detectores que componen el observatorio HAWC**

**Figura 2.1 Arreglos más comunes y su distribución geométrica con factor geométrico, específico para cada uno de ellos.**

**Figura 2.2 Curvas normalizadas de profundidad de investigación características para los arreglos alpha, que contiene puntos de atribución que representan a 2 de las configuraciones más comunes Wenner y Schlumberger, y beta, que incluye puntos de atribución del arreglo Dipolo-Dipolo”.**

**Figura 2.3 Ejemplo de secuencia usada para construir una pseudosección con un arreglo Wenner.**

**Figura 2.4 Función de sensibilidad para el arreglo Dipolo-Dipolo con: a)  $n=1$ ; b)  $n=2$ ; c)  $n=4$ ; d)  $n=6$ .**

**Figura 3.1 Resistivímetro SYSCAL Pro Switch y cable multi-core.**

**Figura 3.2. Electrodo de Cobre.**

**Figura 3.3 Referencia de los 7 perfiles de tomografía 2D en un plano con coordenadas UTM.**

**Figura 3.4 Gráfico de puntos de adquisición en EarthImager para perfiles con 28 electrodos.**

**Figura 3.5 Gráfico de puntos de adquisición en EarthImager para perfiles con 32 electrodos.**

**Figura 3.6 Ejemplo de un archivo URF.**

**Figura 3.7 Ajustes Iniciales de la Inversión en EarthImager.**

**Figura 3.8 Ajustes del modelo Directo en EarthImager.**

**Figura 3.9 Ajustes de la Inversión de Resistividad en EarthImager.**

**Figura 4.1 Ubicación de perfiles en la zona de estudio. (Elaborada en Google Earth).**

**Figura 4.2 Perfil Geoeléctrico 0.**

**Figura 4.3 Perfil Geoeléctrico 1.**

**Figura 4.4 Perfil Geoeléctrico 2.**

**Figura 4.5 Perfil Geoeléctrico 3.**

**Figura 4.6 Perfil Geoeléctrico 4.**

**Figura 4.7 Perfil Geoeléctrico 5.**

**Figura 4.8 Perfil Geoeléctrico 6.**

**Figura 4.9 imagen Pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos.**

**Figura 4.10 Imagen Pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos vista de los 3 ejes.**

**Figura 4.11 Imagen Pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos con el plano de intersección a los -5.41 m.**

**Figura 4.12 Imagen Pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos con el plano de intersección, vista al Noreste.**

## **INICE DE TABLAS**

**Tabla 1. Coordenadas UTM que delimitan la zona de estudio.**

**Tabla 2 Puntos iniciales y finales para cada perfil.**

## **Resumen**

Los estudios de prospección geofísica en la geotecnia han demostrado ser de gran importancia, pues hacen una descripción de las estructuras en el subsuelo. En este trabajo se realizó un estudio geotécnico de Tomografía de Resistividad Eléctrica 2D con el cual fue más fácil determinar la manera en que se emplazó la infraestructura del observatorio HAWC.

Este observatorio se encuentra a las faldas del volcán Sierra Negra en el parque Ecológico Pico de Orizaba, y su principal actividad es estudiar los rayos gamma del cielo Norte y Ecuatorial haciendo un mapeo de este.

El estudio que se realizó consta de 7 perfiles 3 de ellos en dirección SE-NW y 4 en dirección SW-NE. Para cada perfil se realizó la inversión de datos correspondiente obteniendo un modelo correspondiente, también se obtuvieron las representaciones gráficas para cada perfil, en las cuales se delimitó un horizonte geoelectrico, bajo los primeros metros de la superficie, con los valores de resistividad por encima de los 12,000 Ohm-m en su mayoría y en anomalías específicas en algunos perfiles alcanzando hasta los 30,000 ohm-m. En cada Perfil el espesor de dicho horizonte es variable y existen zonas en las cuales esté no se observa tan claro.

Para una mejor representación y análisis de la zona de estudio, se realizó una imagen pseudo 3D, en donde se pueden observar los 7 perfiles intersectados entre ellos. De esta manera se aprecia de una mejor manera la distribución de los valores de resistividad a lo largo de la zona por debajo de superficie y se observa la variación del horizonte geoelectrico, por debajo de la superficie volcánica.

A esta imagen se le agrego un plano, que representa una pendiente del 2% con respecto a la altura media del terreno, pendiente necesaria para el emplazamiento de la infraestructura del observatorio.

## Abstract

Geophysical prospecting studies in geotechnics have proved being of great importance, because they made a description of the structures in the subsurface. In this paper **it had done** realized a geotechnical study of 2D Electrical Resistivity Tomography with this one was easier to determine how the infrastructure of HAWC observatory was located.

This observatory is located on the slope of Sierra Negra volcano in Pico de Orizaba Ecological Park, and its main activity is the mapping of gamma ray from the North and Equatorial sky.

The study was conducted consisting of 7 profiles 3 of them in SE- NW direction and 4 in SW- NE direction. For each profile it was realize the corresponding data inversion model obtaining an inverse model with the data measured in the field, the plots for each profile were also obtained, in which was delimit a geoelectric horizon, under the first meters of the surface, with resistivity values mostly above 12,000 Ohm- m and in specific anomalies in some profiles reaching 30,000 ohm - m. In each profile the thickness of this horizon is variable and there are areas where this is not seen as clear at all.

For a better representation and analysis of the study area, a Pseudo 3D image was made where you can see the 7 Profiles intersected between them. This way we can be seen in a better way the distribution of resistivity values along the surface area below the surface and the geoelectric horizon variation is observed below the volcanic surface.

In this image was add a plane, representing a gradient of 2 % compared to the average height of the terrain, slope necessary for the postponement of the infrastructure of the observatory.

## **Introducción**

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es un método de exploración geofísica usado frecuentemente en la geotecnia debido a su alta capacidad resolutive, pues de esta manera se puede caracterizar el subsuelo para saber la distribución de resistividad lateral y horizontal, y determinar a qué profundidad se encuentran los cuerpos geológicos.

Además en la detección y caracterización precisa de zonas situadas bajo niveles rocosos con mayor grado de consolidación que los materiales subyacentes. Esta capacidad hace

que la TRE sea una alternativa de solución en estudios geotécnicos donde es frecuente el empleo de técnicas geofísicas convencionales.

El proyecto HAWC (High Altitude Water Cherenkov) por sus siglas en inglés, requiere para su instalación un estudio preciso Geotécnico para emplazar la infraestructura operativa, así a través de un estudio TRE-2D, se auxilió a la construcción del observatorio determinando los materiales a profundidad que se encuentran en el sitio y así fueron considerados por el equipo geotecnista que ejecuto la preparación del terreno. El objetivo para este proyecto es no afectar el entorno en donde se emplazara la infraestructura del observatorio.

El observatorio HAWC, tiene como función principal la cartografía celeste en rayos gamma y rayos cósmicos, realizar un mapeo del cielo Norte y Ecuatorial, mediante un estudio de fuentes individuales y un monitoreo de fuentes transitorias. También podrá observar restos de supernova como fuentes difusas galácticas, destellos de rayos gamma, ráfagas solares y búsqueda de evidencia de la materia oscura.

Un espacio aproximado de 150 por 150 *m*, debe de estar por encima de los 4,000 *m* sobre el nivel del mar y deberá estar disponible por al menos 15 años, estos son los requerimientos para la instalación de la infraestructura del observatorio HAWC.

Para la construcción de este observatorio en México se tiene como sede el parque Nacional Pico de Orizaba, a las faldas del volcán Sierra Negra que tiene una altura aproximada de 4,100 *m* sobre el nivel del mar y una temperatura promedio de 19° C situado al Sureste de la cima más grande de México, el volcán Pico de Orizaba. La infraestructura consiste en 300 tanques para agua de 5 *m* de diámetro por 4.3 de profundidad en un espacio de 150 por 135 *m*.

Para la instalación de estos tanques se requiere nivelar el terreno dejándolo con una pendiente del 2%, comparada con la del 9% original en el espacio antes mencionado.

La topografía se nivelo a partir del punto de origen de los perfiles eléctricos, con coordenadas UTM (678,079.3 E, 2,101,027.7 N, 4,104 Z), al ajustar la pendiente en s perfiles tenemos una pendiente del 2 % de la zona designada para la infraestructura con una altura de 4098.6 metros sobre el nivel del mar.

El proceso para este observatorio consiste en 4 fases, la instalación (3 años), operación (10 años), desmantelamiento (2 años) y recuperación. El estudio y el equipo de geotecnia intervienen en la primera fase.

## **1. Antecedentes.**

### **1.1. Área de Estudio.**

#### **1.1.1. Referencia Geográfica y Fisiográfica.**

La zona de estudio donde se localiza el observatorio HAWC se encuentra en los límites del estado de Veracruz y el estado de Puebla a las faldas del volcán Sierra Negra en el llamado parque nacional Pico de Orizaba, ubicado en el municipio de Atzitzintla en el estado de Puebla, colindante con el municipio de Chalchicomula de Sesma y el estado de Veracruz al Oriente del cinturón volcánico Transmexicano.

Este volcán llamado así porque comparado con las blancas lavas del Pico de Orizaba parece más oscuro de lo que en realidad es, también llamado Tliltépetl (náhuatl: Cerro Negro) o volcán Atlitzin (náhuatl: Venerable Señor del Agua) , con coordenadas **18°59'00" N, 97°18'50" O** y una elevación de **4,621 m** sobre el nivel del mar, es la sede del

Observatorio HAWC. Localizado a la vertiente austral de la cima más alta de la República Mexicana, el Pico de Orizaba, con coordenadas **19°01'00" N, 97°16'00" W** que sirve como punto limítrofe entre los estados de Puebla y Veracruz con una altura de 5,675 m sobre el nivel del mar (Macías 2005).

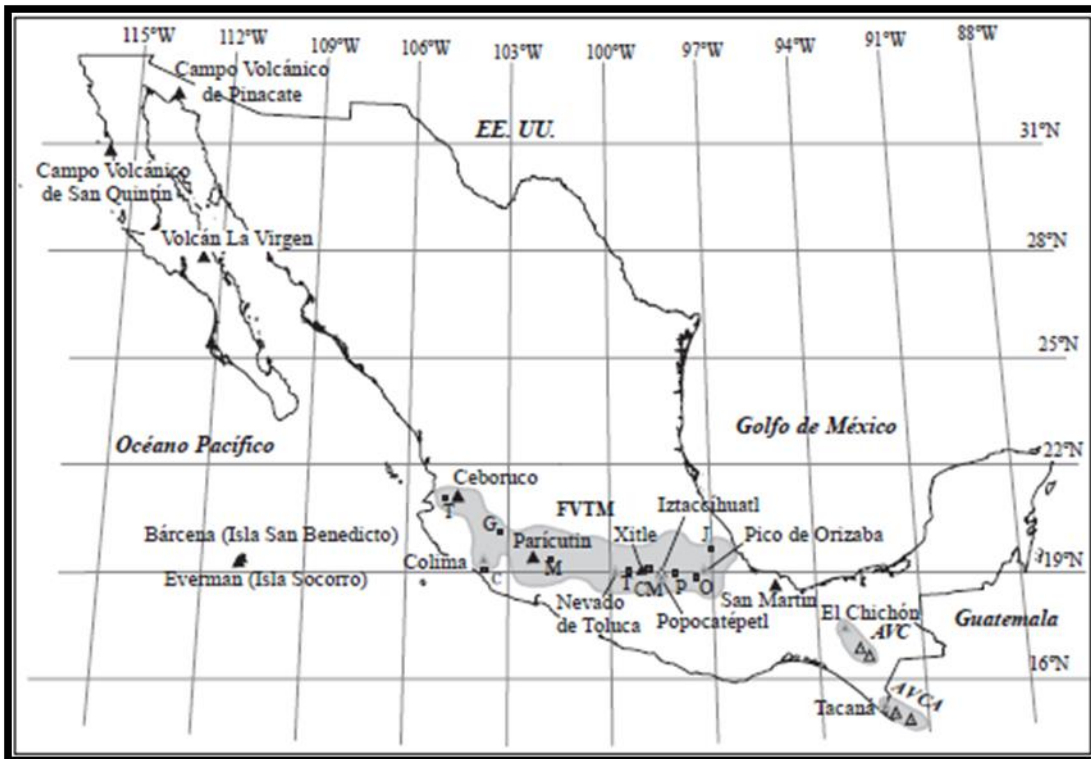


Figura 1.1

Mapa del cinturón volcánico Transmexicano. Se muestran los principales volcanes y calderas en la zona central del País (Tomada de Macías 2005).

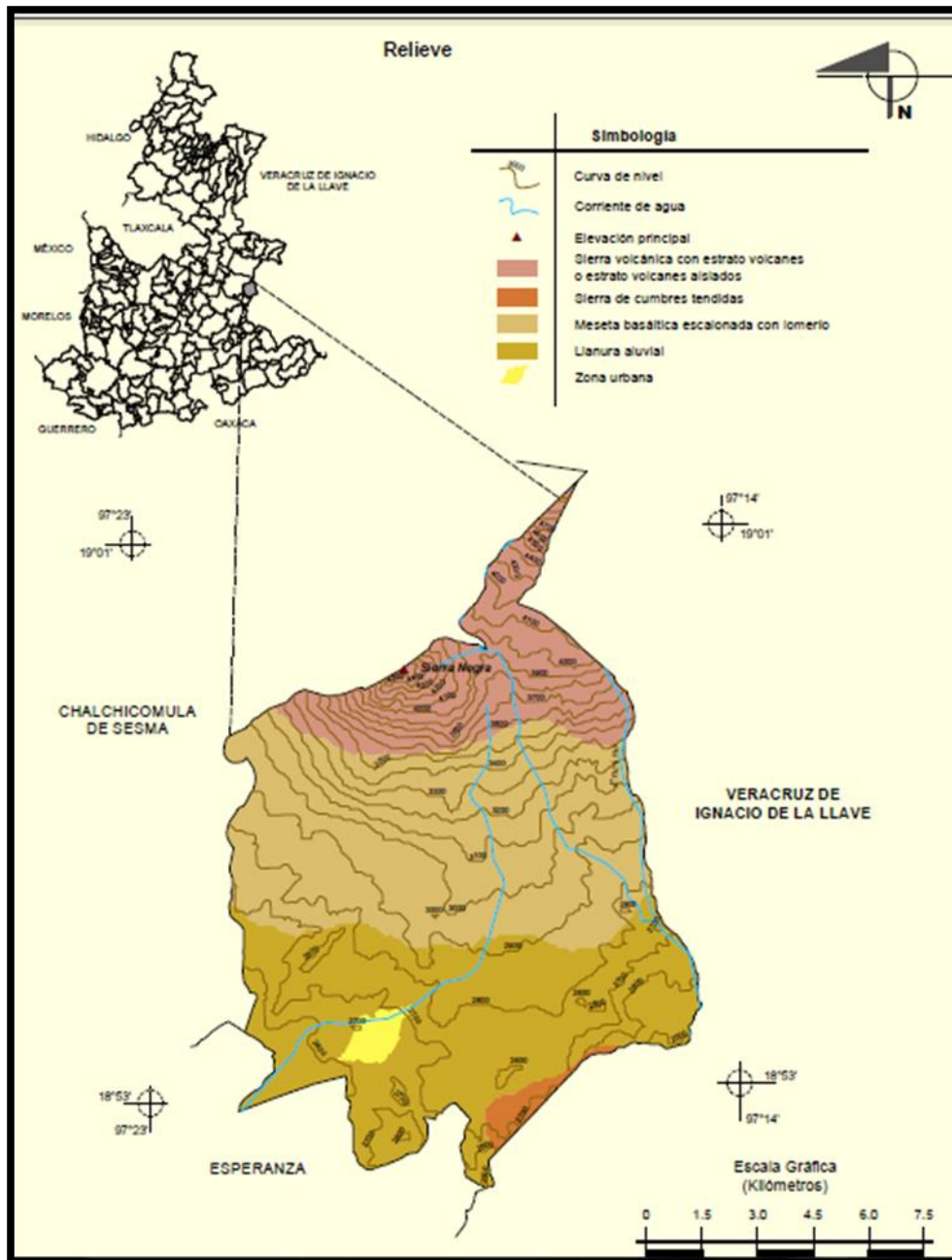


Figura 1.2

Relieve del municipio de Atzitzintla. Se muestra la elevación del volcán Sierra Negra. (INEGI 2013)

La zona determinada para el emplazamiento de la infraestructura del observatorio tiene un área de  $135\text{ m} \times 210\text{ m}$  delimitada por las coordenadas UTM:

Tabla 1. Coordenadas UTM que delimitan la zona de estudio.

| Vértice | E            | N         |
|---------|--------------|-----------|
| SW      | 14 Q 678,079 | 2,101,028 |
| NW      | 14 Q 678,042 | 2,101,158 |
| NE      | 14 Q 678,244 | 2,101,216 |
| SE      | 14 Q 678,281 | 2,101,086 |

Cabe mencionar que la zona delimitada es mayor que el espacio necesario para la infraestructura del observatorio HAWC, del cual se darán las especificaciones más adelante.

En la figura 1.3 se observa en la panorámica a, delimitado con una línea de color verde el parque nacional Pico de Orizaba, los volcanes Sierra Negra y Pico de Orizaba. En la panorámica b, se muestra la zona delimitada por las coordenadas de la tabla 1, en donde se llevó a cabo el proyecto, el rectángulo blanco delimita la zona de estudio.

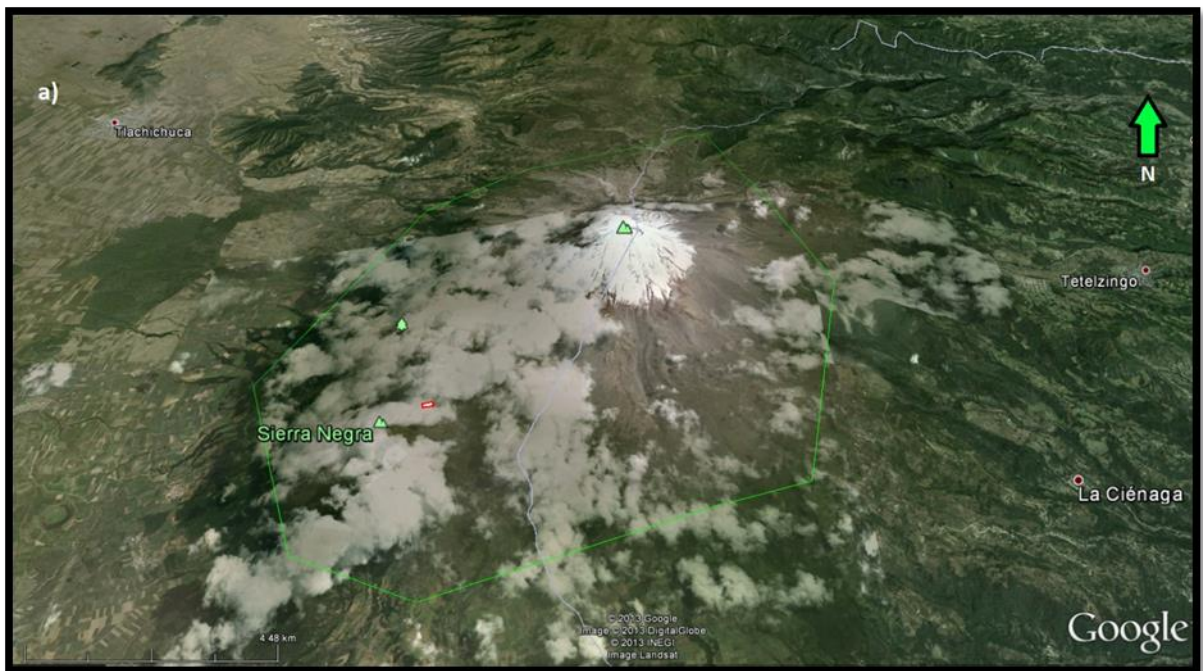




Figura 1.3 Georeferencia del sitio de estudio, en la panorámica a) se observa en contorno verde, alrededor de los volcanes Sierra Negra y Pico de Orizaba, el parque Nacional Pico de Orizaba; la panorámica b) muestra el rectángulo que es la zona de estudio designada para la infraestructura del observatorio HAWC. (Google Earth, se agregó orientación al norte)

En la Tabla 1 observamos las coordenadas UTM para cada punto, nombrado con su orientación geográfica, que delimita la zona de estudio.

## 1.2. Marco Geológico de la Zona.

La mayor parte del municipio de Atzitzintlaen tiene roca ígnea intrusiva, brechas volcánicas y tobas intermedias, junto con andesitas y basalto, del periodo Neógeno a Cuaternario (INEGI, 2013).

El volcán Sierra Negra es un volcán en su totalidad de roca andesítica, a mediados del periodo Neógeno anterior a la serie del Plioceno, siendo un cono de formación más antigua que el Pico de Orizaba, en su primera fase. (Paul Waitz, 1910).

La montaña es en realidad un sólo cono volcánico estratificado, apagado por completo desde hace mucho tiempo y afectado por la erosión en gran parte de su estructura, (Yarza de la Torre, 1992) que consiste en su mayoría de flujos de lava andesítica porfídica masiva.

La formación del edificio volcánico comprende varias fases, en la primera se sabe que el volcán tenía un cráter ancho y las paredes eran de material volcánico estratificado. En una segunda fase, este gran cráter se llenó de lava que se solidificó en ese mismo lugar,

formándose por encima de este un nuevo cono, a su vez estratificado, que cubrió el primer cráter y el cono anterior (Paul Waitz, 1910).

Este mismo fenómeno se repite sobre el edificio en formación, esta afirmación se deduce al observar las lavas estratificadas y en las estructuras adjuntas al edificio de acuerdo con Paul Waitz (1910).

A pesar de la semejanza entre las lavas producidas por el volcán Sierra Negra y el Pico de Orizaba, realizando un estudio detallado se encuentran grandes diferencias.

La lava del banco del volcán Sierra Negra, con su aspecto más compacto, el color más claro y con grupos de cristales verdosos (posiblemente Olivino) es una andesita de hiperstena y augita con una matriz holocristalina-hipidiomorfa compuesta de plagioclasas. La anfíbola presente en la demás lavas, no aparece en esta (Waitz, 1910).

Estas lavas no son nada parecidas a las que se encuentran en el flanco sur del volcán Pico de Orizaba. Las lavas del Pico de Orizaba son andesitas de anfíbola con augita con una matriz de plagioclasas y maso o menos vidriosa, lo mismo que el resto de las lavas del Sierra Negra (Waitz, 1910).

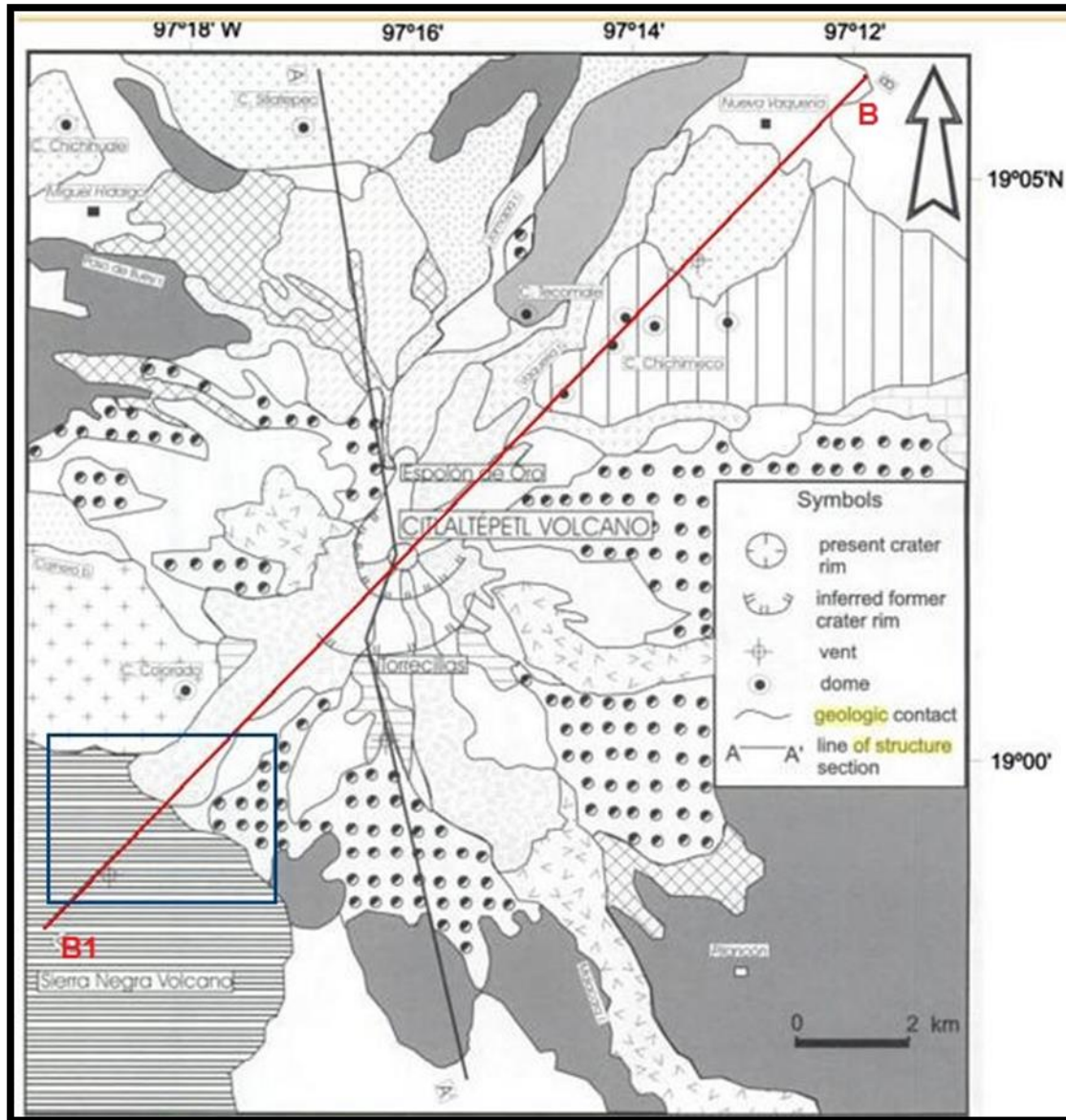
Del Pico de Orizaba corre una enorme corriente que nace de uno de sus flancos que corre hacia el sur, con un frente de entre 40 y 50 m de altura llega hasta el pie del Sierra Negra, justo a unos metros de este contacto entre las lavas andesísticas sobre el derrame del volcán Sierra Negra se localiza el Observatorio HAWC. Estas lavas son de la última emisión que forma el cono y son lavas dacíticas llamadas Orizaba (Macias, 2005).

El occidente de los dos volcanes se encuentra cubierto por restos volcánicos acarreados de ambos volcanes por la erosión desde sus flancos y arrojados por volcanes más pequeños cercanos en el valle de San Andrés como son los conos de tezontle, al sur del valle, y los Xalapazcos o cráteres de explosión. Destacan entre las capas de arena: corrientes de lava, piedra pómez, padecería fina oscura y toba pomosa de grano fino (Yarza de la Torre, 1992).

El volcán Sierra Negra forma con el Pico de Orizaba forman un sistema binario volcánico, es decir, dos grandes volcanes ubicados sobre una misma falla geológica (Yarza de la Torre, 1992).

Los extremos de los flujos de los conos Espolón de Oro y el derrame de la dacita Orizaba están parcialmente desviados o frenados por las lavas del Sierra Negra es por eso que, a

pesar de estar subyacentes en algunas áreas entre los volcanes, se interpretan como más jóvenes que las dacitas del volcán Sierra Negra.



Fig

ura 1.4 Mapa Geológico del área alrededor del volcán Citlaltépetl y Sierra Negra. La línea B-B1 representa una sección geológica sobre la falla que cruza a ambos volcanes. El recuadro azul en la parte inferior del lado izquierdo de la imagen resalta la zona en donde se realizó el estudio.

(G. Carrasco Núñez 2000, modificada para señalizaciones)

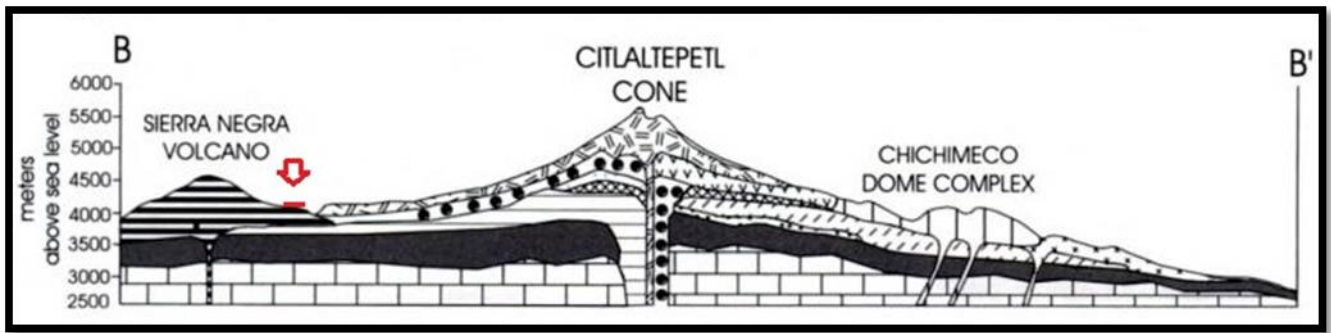


Figura 1.5 Pseudosección B-B1 de la figura 1.4 donde se muestra la relación estratigráfica entre las unidades y los volcanes, representando diferentes etapas de evolución, la flecha roja a las faldas del volcán Sierra Negra resalta la zona en donde se realizó el estudio. (G. Carrasco Núñez 2000, modificada para señalizaciones)

### 1.3. Estratigrafía.

La secuencia estratigráfica para la zona de estudio abarca del periodo Cretácico al Neógeno.

En la superficie del terreno, antes de encontrar roca sólida, tenemos una capa de arena (ceniza) y pedazos de rocas sueltas que abarcan varios metros de espesor a lo largo de la zona, después de esto, la primera formación que aflora es de roca andesita de anfíbola que da estructura al Volcán Sierra Negra, con una edad aproximada de  $0.25 \pm 0.05$  Ma (Carrasco Nuñez, 2000) y un espesor aproximado de 1 Km desde el punto más alto del volcán hasta su base que se sobrepone al derrame de andesita del volcán Citlaltepetl llamado Torrencillas, el cual está compuesto en su mayoría de andesita porfídica y brechas alteradas, con un espesor menor a 100 m variable de capas que van de 3 a 5 m de espesor intercalados con depósitos estratificados de andesita, dacita y pómez, tiene una edad aproximada de  $0.3 \pm 0.1$  Ma (Carrasco Nuñez, 2000).

Subyacente a este derrame la unidad de basalto andesítico de olivino en su composición general, está dividida en 3 partes, la primera, la parte de la base, tiene lavas masivas y brechas de esta roca en capas de 3 a 4 m, la segunda es un flujo de lava andesítico alternado con brechas en una sola capa de aproximadamente 80 m, y la tercera compuesta de brechas de basalto, con un espesor mayor a los 400 m en total y una edad aproximada de  $0.65 \pm 0.071$  Ma fechado por una roca relacionada con esta unidad en el valle Metlac. Bajo estas unidades volcánicas se encuentra un depósito de roca sedimentaria rica en limolita y arcillas del periodo cretácico (Carrasco Nuñez, 2000).

#### 1.4. Proyecto HAWC

Un espacio aproximado de 150 por 150 *m*, que debe de estar por encima de los 4,000 *m* sobre el nivel del mar y estar disponible por al menos 15 años, son los requerimientos necesarios para la instalación de la infraestructura del observatorio HAWC.

El observatorio HAWC (High Altitude Water Cherenkov) por sus siglas en inglés, tiene como función principal la cartografía celeste en rayos gamma, realizar un mapeo del cielo Norte y Ecuatorial mediante un estudio de fuentes individuales y un monitoreo de fuentes transitorias.

En la técnica Cherenkov, el detector es utilizado para muestrear partículas en "lluvias de aire" a nivel del suelo, grabado en el Cherenkov de luz producido cuando estas partículas pasan a través de los tanques llenos con agua purificada

Es un observatorio único en su tipo para el estudio de partículas de alta energía. Sera capaz de monitorear dos terceras partes de la atmosfera durante las 24 horas del día. Los detectores de luz Cherenkov del HAWC son sensibles a las partículas derivadas de los rayos cósmicos que inciden sobre ellos.

También podrá observar restos de supernova como fuentes difusas galácticas, destellos de rayos gamma, ráfagas solares y búsqueda de evidencia de la materia oscura.

Los detectores de agua Cherenkov en el observatorio HAWC son tanques de metal corrugado de 4 *m* de altura y 7.3 *m* de diámetro. Cada tanque contiene una vejiga a prueba de agua y 4 tubos fotomultiplicadores (*photomultipliertube* PMT) 3 en la periferia y uno central, los cuales son sensibles al largo de onda en el rango ultravioleta. Los 3 fotomultiplicadores de la periferia son de 8 *in* (pulgadas) semiesféricas y se emplazan en el fondo del tanque mirando hacia arriba y bastante espaciados del centro del tanque. El fotomultiplicador central, que también se coloca en el fondo del tanque mirando hacia arriba, está diseñado para aumenta la eficiencia del observatorio cuando se tenga una "lluvia de aire" de baja energía.

En total el detector contara con 300 tanques, de esta manera el observatorio contara con 1,200 PMT's en total.

La disposición relativa de los tanques sobre el terreno se muestra en la figura 1.6, donde los círculos de color azul muestran la posición de cada tanque. El hueco en el centro de la matriz de tanques, es donde se colocó el edificio de la electrónica central, los cables de lectura pasaran por el mayor espacio entre los tanques de Este a Oeste, esta canal es

llamado "Tenth Avenue ó Avenida Decima ", ya que se encuentra entre la fila 10 y 11 de los tanques cuando se cuenta desde la parte inferior.

Se consideró el arreglo de esta manera, pues el aislamiento óptico entre los tanques reduce el porcentaje de ruido en cada detector. Esta es una consideración importante pues, a una gran altura, el flujo de rayos cósmicos de baja energía es muy alto.

Todos los detalles sobre el funcionamiento y distribución del observatorio se referencian con base en el sitio web [www.hawc-observatory.org](http://www.hawc-observatory.org) (2013)

El suelo por debajo del arreglo de los tanques es decir la primera capa de roca sólida (Andesita de anfíbola), fue removido con una excavadora, para asegurar que los detectores quedan relativamente nivelados, con la pendiente necesaria. Estos niveles se detectaron a través de los resultados de este estudio en complemento con la geología del lugar.

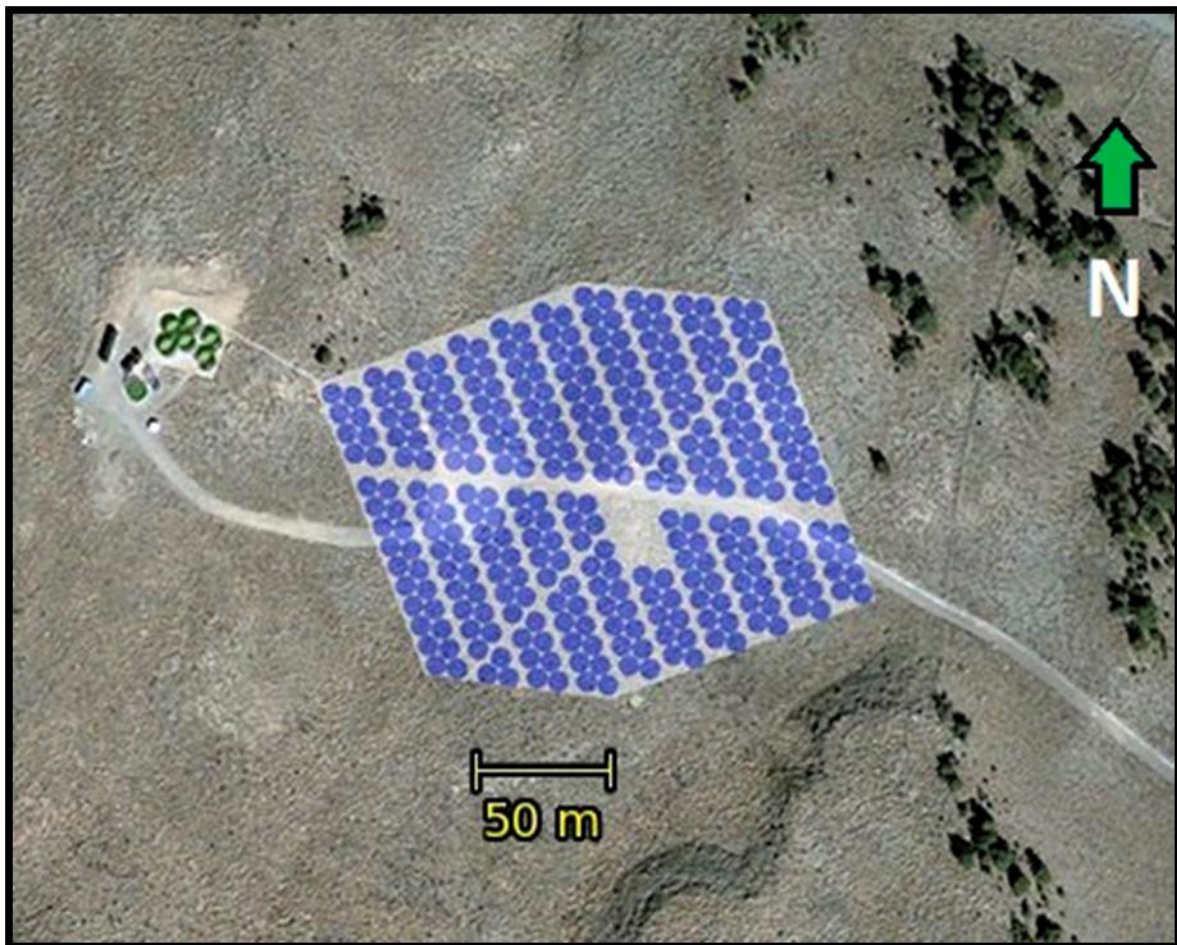


Figura 1.6 Posición relativa de los detectores que componen el observatorio HAWC. ([www.hawc-observatory.org](http://www.hawc-observatory.org) 2013, se añadió orientación al norte)

## 2. Marco Teórico

### 2.1. Ecuaciones fundamentales del método de corriente continua.

Cuando se realizan estudios eléctricos, lo que se pretende es determinar la distribución de la resistividad del subsuelo mediante las mediciones realizadas en superficie.

La teoría dice que en un medio homogéneo e isotrópico el comportamiento de los campos magnéticos y eléctricos está determinado por las ecuaciones de Maxwell.

El comportamiento del campo eléctrico para el caso de corriente continua. Considerando una fuente puntual, como es el caso de un electrodo de corriente se puede describir específicamente con las siguientes ecuaciones que rigen el campo eléctrico (Orellana, 1972):

$$\nabla \times \vec{E}(\vec{r}) = 0 \quad \dots (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{E}(\vec{r}) = I\rho \delta(\vec{r}) \dots (2)$$

Donde, de la ecuación 1, se dice que “ $\nabla$ ” es el gradiente de “ $E$ ”, el campo Eléctrico, es decir el gradiente del campo eléctrico es igual a “0”.

Por otro lado la Ley de Faraday, considerando una fuente puntual, dice que el campo Eléctrico es conservativo e irrotacional, por lo que deriva de un potencial escalar “ $U$ ”, quedado expresado como:

$$\vec{E}(\vec{r}) = -\nabla U(\vec{r}) \dots (3)$$

Si se sustituye en la ecuación 3 en la ecuación 2, se tiene:

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = -I\rho \delta(\vec{r}) \dots (4)$$

Para encontrar el potencial producido por una fuente puntual en la interface de dos semiespacios, a partir de la ecuación 4, el problema se expresa como:

$$\nabla^2 U(\vec{r}) = -I\rho \delta(\vec{r}) \quad Z > 0 \dots (5)$$

$$\frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} = 0 \quad Z = 0 \dots (6)$$

Empleando funciones de Green, la solución de la ecuación 5 se puede expresar de la siguiente manera:

$$U(\vec{r}) = - \int_V G(\vec{r}, \vec{r}^1) \nabla^2 U(\vec{r}) dv + \int_S \left( G(\vec{r}, \vec{r}^1) \frac{\partial U(\vec{r})}{\partial \eta} - U(\vec{r}) \frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}^1)}{\partial \eta} \right) ds \dots (7)$$

donde la ecuación de Green satisface la ecuación diferencial expresada como (Kaufman, 1992):

$$\nabla^2 G(\vec{r}, \vec{r}^1) = -\delta(\vec{r}, \vec{r}^1) \quad z > 0 \dots (8a)$$

$$\frac{\partial G(\vec{r}, \vec{r}^1)}{\partial \eta} = 0 \quad z = 0 \dots (8b)$$

La identidad de Green para el problema del semiespacio, que satisface las ecuaciones (8a) y (8b) es la siguiente según Kaufman, 1992:

$$G(\vec{r}, \vec{r}^1) = \frac{1}{4\pi} \left( \frac{1}{\sqrt{(x-x^1)^2 + (y-y^1)^2 + (z-z^1)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x+x^1)^2 + (y+y^1)^2 + (z+z^1)^2}} \right) \dots (9)$$

Si se sustituye en la ecuación (7) las ecuaciones (5), (6) y (8b), se obtiene una ecuación para el potencial expresada por:

$$U(\vec{r}) = I\rho \int_V G(\vec{r}, \vec{r}^1) \delta(\vec{r}^1) dv \dots (10)$$

o

$$\int_V G(\vec{r}, \vec{r}^1) \delta(\vec{r}^1) dv = G(\vec{r}, \vec{0}) \dots (11)$$

Por propiedades de las funciones impulso

$$\text{Donde } \delta(\vec{r}^1) = \delta(0,0,0)$$

Si se sustituye la ecuación (11) en la ecuación (10) se tiene:

$$U(\vec{r}) = I\rho G(\vec{r}, \vec{0}) \dots (12)$$

Y de la identidad de Green dada por la ecuación (9) sustituida en la ecuación (12). El potencial se expresa como:

$$U(\vec{r}) = \frac{I\rho}{2\pi R} \quad \dots \quad (13)$$

Por lo tanto la relación entre el potencial eléctrico y la intensidad del campo está dado por:

$$E = -\nabla\varphi \quad \dots \quad (14)$$

Dónde:  $\varphi = U(\vec{r})$

$$R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

De igual forma se debe de cumplir la ley de Ohm, que en su forma vectorial para el flujo de corriente en un medio continuo e isotrópico se expresa como (Locke, 2010):

$$J = \sigma E \quad \dots \quad (15)$$

Donde " $\sigma$ " es la conductividad del medio, " $J$ " es la densidad de corriente y " $E$ " es la intensidad del campo eléctrico. En la práctica, lo que se mide es el potencial del campo eléctrico. Sabemos que en estudios geofísicos la resistividad del medio " $\rho$ " es igual al recíproco de la conductividad.

## 2.2. Arreglos Electrónicos.

Existen varios tipos de arreglos básicos, en su mayoría de 4 electrodos colineales y simétricos, con un espaciamiento variable entre los 2 electrodos internos y externos. (Barker, 1989).

Las mediciones de resistividad se realizan inyectando corriente en la tierra a través de 2 electrodos de corriente C1 y C2 positivo y negativo respectivamente (A y B), y midiendo la diferencia de potencial resultante en 2 electrodos de potencial P1 y P2 (M y N). A partir de los valores de intensidad de corriente " $I$ " y el factor geométrico se puede obtener el potencial " $\varphi$ " que se expresa como:

Con  $\Delta\varphi$  como la diferencia de potencial se puede despejar la resistividad de la ecuación 5 quedando como:

$$\rho = \frac{K_a \Delta\varphi}{I} \quad \dots \quad (16)$$

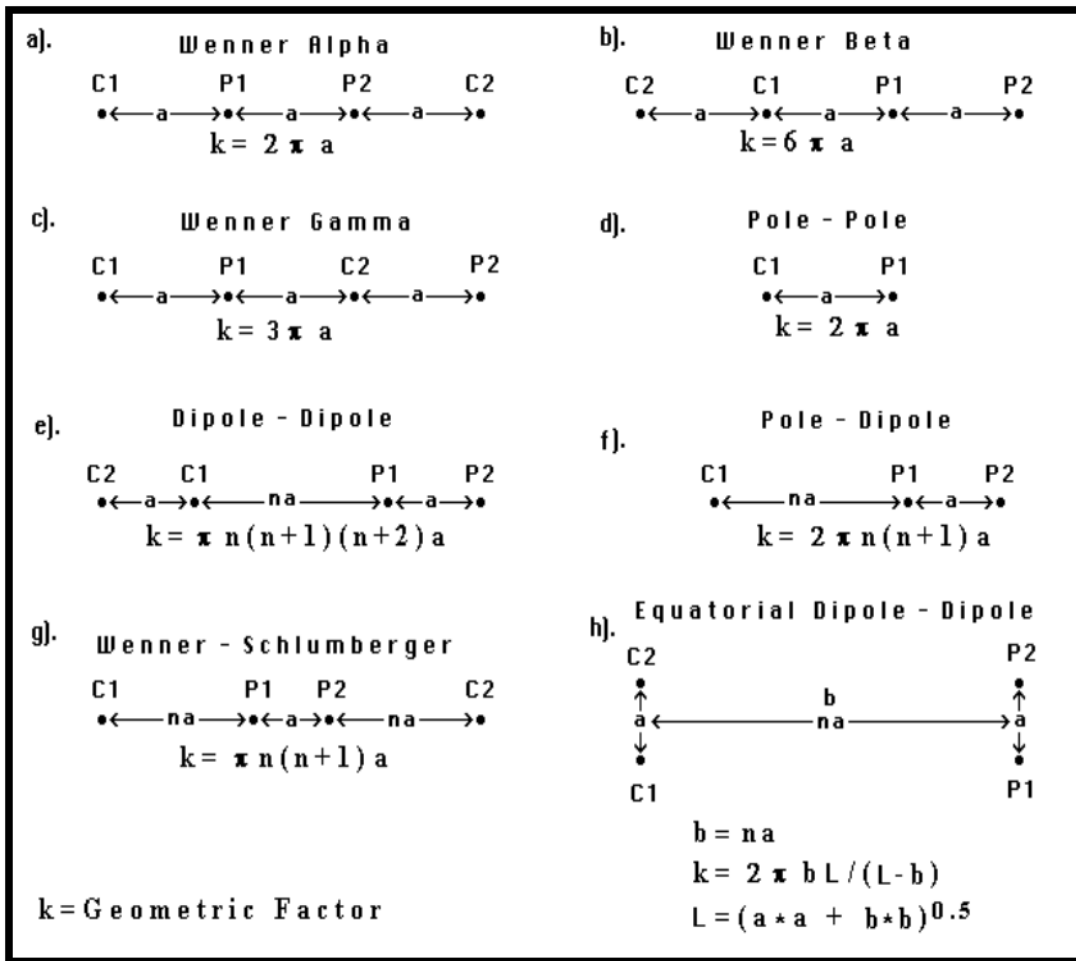
Donde " $K_a = 2\pi R$ " es el factor geométrico asociado a la posición de los electrodos, que se representa con la siguiente ecuación:

$$K_{\alpha} = \frac{2\pi}{\frac{1}{rC_1P_1} + \frac{1}{rC_2P_1} + \frac{1}{rC_1P_2} + \frac{1}{rC_2P_2}} \dots (17)$$

La ecuación (16) puede utilizarse para calcular la resistividad " $\rho$ " de un medio homogéneo, pero cuando el subsuelo no es homogéneo, más bien es un medio anisotrópico, al realizar las mediciones y llevarlos a esta ecuación, el resultado será una " $\rho_a$ " resistividad aparente que será una combinación de la cantidad "n" de medios por los cuales fluya la corriente inducida.

Para determinar el valor de la resistividad real a partir de la resistividad aparente, se debe usar un problema de inversión, el cual se explica a mayor detalle más adelante.

Los arreglos más comunes son: Schlumberger, Wenner, Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo, Polo-Polo. Estos arreglos son usados en sondeos 1D o 2D donde se pueden combinar para obtener una mejor resolución.



Figur

a 2.1 Arreglos más comunes y su distribución geométrica con factor geométrico, específico para cada uno de ellos. (Tomada de Locke 2012)

El arreglo Wenner mantiene la misma distancia “a” tanto entre los electrodos de corriente “C” y los electrodos de potencial “P”, el arreglo Schlumberger aumenta de manera exponencial la distancia “b” entre los electrodos de corriente “C”, mientras que la distancia “a” entre los electrodos de potencial “P” se mantiene constante hasta que la distancia entre los electrodos de corriente es tan amplia que el flujo de dicha corriente ya no está en el radio de lectura de los electrodos de potencial, cuando esto pasa se requiere ampliar la apertura de manera exponencial a un punto en el cual la el  $\Delta V$  se lea de una manera confiable, en el arreglo Dipolo-Dipolo la distancia entre los electrodos de corriente “C” y la distancia entre los electrodos de potencia “P” se mantiene contante como “a”, mientras que la distancia “na” entre “C1” y “P1” es variable con “n=1,2,3 ..”, al igual que en el arreglo Polo-Dipolo, aunque en este arreglo el electrodo de Corriente C2 se encuentra en el infinito ( a una distancia mayor a 20 veces “na”)

La elección del mejor arreglo para un sondeo depende del tipo de estructura que se quiera mapear, la sensibilidad del rango de resistividades y el ruido de fondo que se tenga.

Dentro de las características a considerar para escoger el arreglo están:

- a) Profundidad de investigación,
- b) sensibilidad del arreglo a cambios en la resistividad del subsuelo horizontales y verticales
- c) cobertura horizontal de los datos
- d) fuerza de la señal.

Las primeras dos características se pueden determinar por la ecuación de sensibilidad, la cual esta dada por la derivada de Frechet (McGillivray y Oldenburg, 1990), e indica el grado con que un cambio en la resistividad influye en el potencial medido en la señal, entre más grande sea este valor más grande es la influencia del medio en la señal.

La cobertura horizontal de los datos depende del tipo de arreglo, al igual que la fuerza de la señal, la cual está más ligada al factor geométrico del arreglo.

### 2.3. Profundidad de Investigación

Para cada uno de estos arreglos básicos se puede determinar una profundidad de investigación, que se define como la profundidad a la cual una capa horizontal hace su mayor contribución a la señal medida en superficie (Evjen, 1938), al representar gráficamente esta respuesta para cada uno de los arreglos, el punto máximo de cada curva determina la profundidad de investigación, o de acuerdo con Edwards (1977), el punto medio de cada curva representa esta profundidad de investigación para cada arreglo. (Figura 2.1)

De acuerdo con el estudio realizado por Barker (1989), esta profundidad de investigación teórica depende del tipo de arreglo utilizado y de la relación que exista entre la separación de los electrodos interiores y la distancia entre los electrodos exteriores, y no solo se relaciona con la profundidad de penetración de la corriente, determinada por la distancia entre los electrodos de corriente.

Lo que pretende la Profundidad de investigación es relacionar mediciones realizadas en superficie con una determinada profundidad, esto hablando teóricamente y basándonos solo en la geometría y para un medio idealizado, es decir, isotrópico y homogéneo. Para medios reales en campo la profundidad de investigación no solo depende de estos factores geométricos, sino también del tipo de roca, minerales que contenga, fracturamiento, saturación de fluidos, entre algunos otros factores.

De acuerdo con Barker (1989), la relación entre las distancias de los electrodos centrales y los electrodos externos de cada tipo de arreglo, definen la profundidad de investigación de un estudio eléctrico, y normalizadas de acuerdo a su factor geométrico se obtienen la curva de profundidad de investigación.

Se elabora la gráfica sobre el eje "Y" el valor de la curva de profundidad de investigación " $b/L$ ", en el eje "X" la profundidad " $Z/L$ ", donde " $Z$ " es profundidad del subsuelo, " $L$ " la distancia entre los electrodos externos y " $b$ " la distancia entre los electrodos internos. (Figura 2.1)

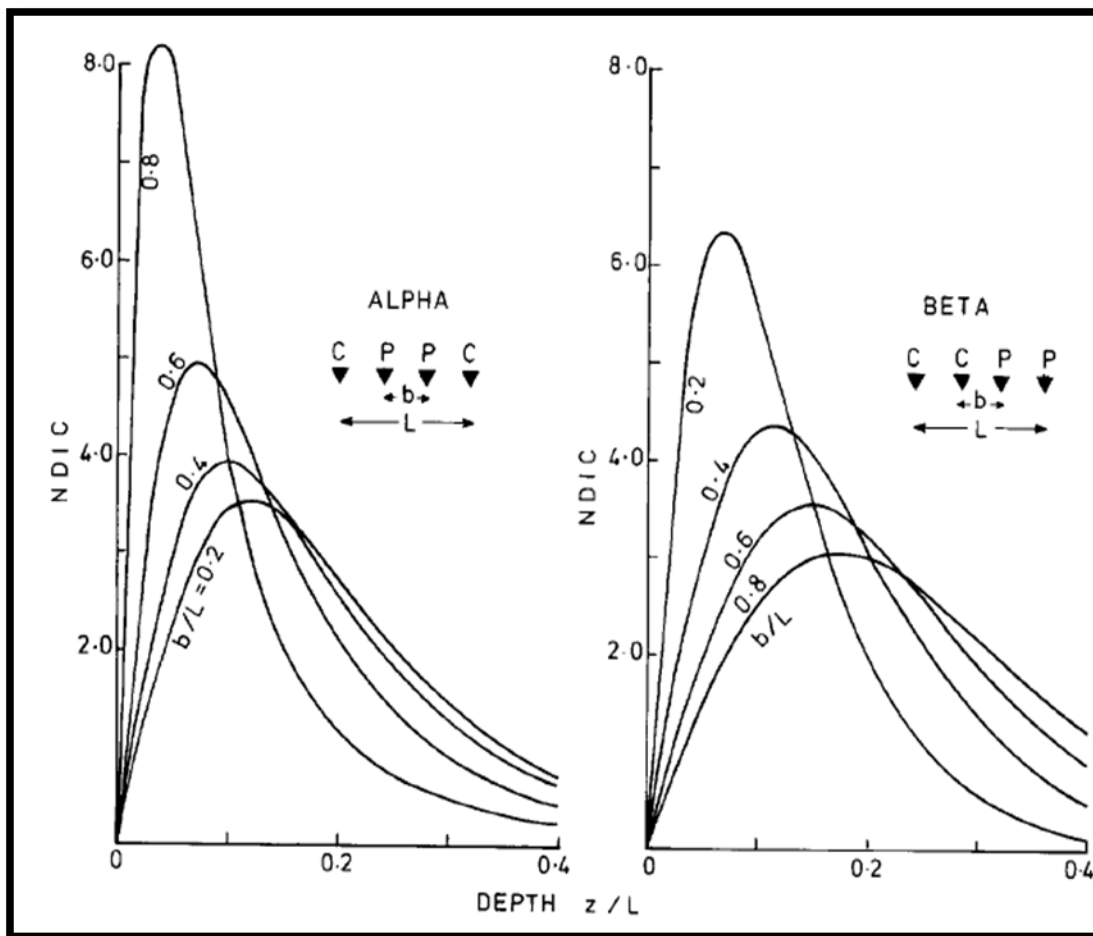


Figura 2.2

Curvas normalizadas de profundidad de investigación características para los arreglos alpha, que contiene puntos de atribución que representan a 2 de las configuraciones más comunes Wenner y Schlumberger, y beta, que incluye puntos de atribución del arreglo Dipolo-Dipolo” (Barker, 1989)

## 2.4. Teoría del Sondeo Eléctrico Vertical (1D)

El sondeo Eléctrico Vertical en 1D solo registra cambios horizontales de resistividad, y da una posible interpretación para modelos de capas horizontales.

La mayor limitante de este método (sondeo de resistividad) es que no toma en cuenta los cambios laterales de resistividad, esto puede provocar errores al momento de interpretar la resistividad de una capa y /o su espesor.

Medir los cambios laterales de resistividad en la mayoría de los casos, se confunde con cambios de resistividad con la profundidad cuando se tiene una geología del subsuelo muy compleja, donde existen cambios muy bruscos de resistividad, y en los cambios de

resistividad a cortas distancias los modelos de sondeos 1D no son suficientes para interpretar.

En un modelo 1D, y caracterizando la curva de la función de sensibilidad, se puede obtener la profundidad media de investigación conforme el valor de “n” aumenta para el arreglo Dipolo-Dipolo, con el cual, teóricamente, se obtiene una mayor profundidad de investigación.

## 2.5. Teoría de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

Uno de los métodos más utilizados recientemente es la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) 2D, que puede obtener mejores resultados en áreas geológicas con anomalías ligeramente complejas. Las mediciones se realizan usando un número grande de electrodos (25 o más), cuando se cuenta con un equipo automático como es el caso del Syscal Pro Switch, se seleccionan los 4 electrodos correspondientes para cada medición (cuadripolo), y automáticamente va cambiando, para realizar las mediciones, de acuerdo al arreglo seleccionado.

Para el caso de TRE 2D se registran cambios en la resistividad en dirección vertical y en dirección horizontal, es decir una cobertura 2D de las medidas, por lo tanto se puede tener un mejor modelo y una mejor interpretación del subsuelo.

En la práctica los arreglos que más se utilizan para imágenes 2D son: Wenner, Dipolo-Dipolo, Wenner-Schlumberger, Polo-Polo y Polo-Dipolo.

Cada arreglo tiene una detectabilidad diferente, es decir, como registra los cambios de la resistividad aparente, los arreglos Schlumberger y Wenner tienen una mejor detectabilidad en dirección vertical, mientras que el arreglo Dipolo-Dipolo la tienen en la dirección horizontal, al igual que el arreglo Polo-Polo y Polo-Dipolo que tienen una mayor profundidad de investigación. Para el arreglo Wenner-Schlumberger la detectabilidad va de moderada a media en ambas direcciones. (Locke, 2012).

Un ejemplo de una cobertura 2D se muestra en la figura 2.3, donde se ilustra una secuencia de mediciones para un arreglo Wenner de 20 electrodos, con un espaciamiento “a” entre cada uno de ellos, los primeros 4 electrodos serán C1, P1, P2, C2 respectivamente hasta conseguir 17 mediciones ( $20 - 3$ ). Para el segundo nivel se utilizaran los electrodos 1, 3, 5, 7 para la primera medición con un espaciamiento de “2a”, la segunda medición serán los electrodos 2, 4, 6 y 8 hasta obtener 14 mediciones ( $20 - 2 * 3$ ) y así se realizan los siguientes niveles aumentando a “3a”, “4a” etc.

Para representar las mediciones en un sondeo eléctrico 2D se utiliza el método de contornos o *pseudosección*.

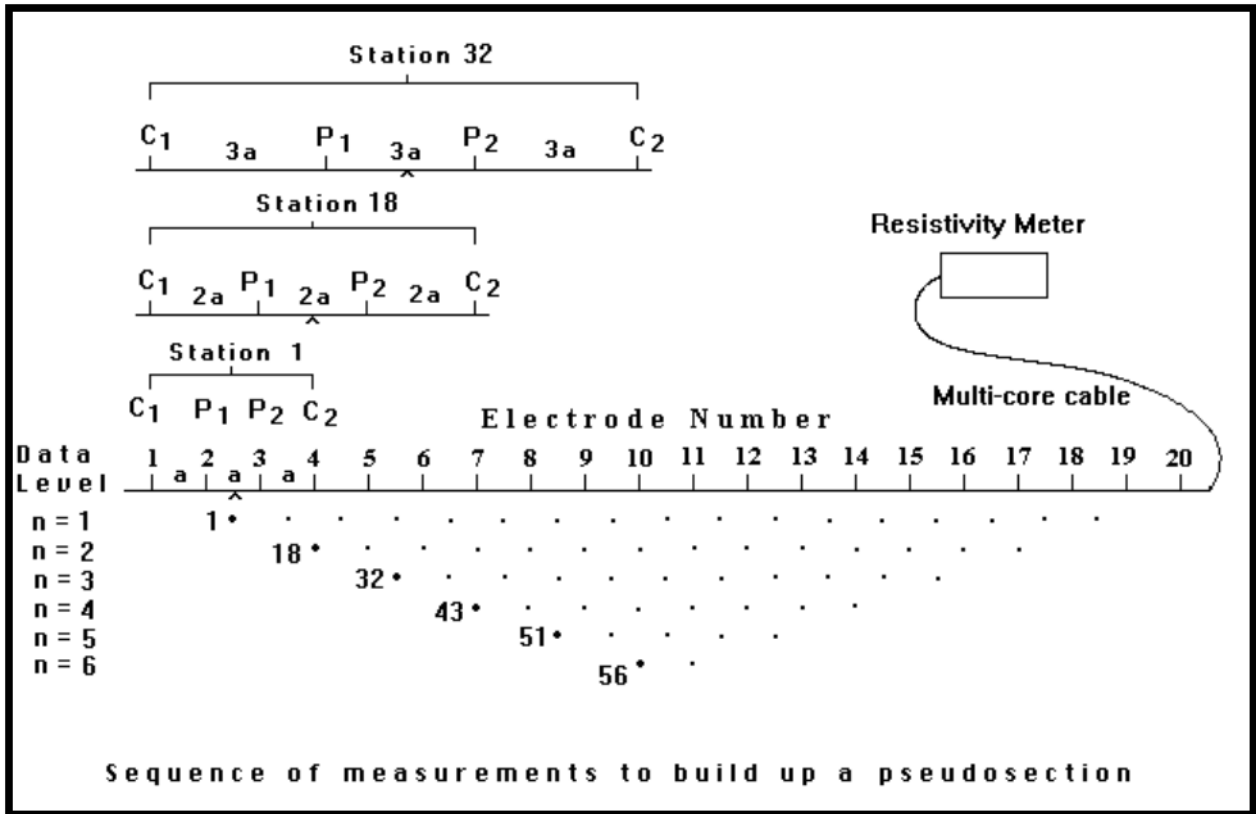


Figura 2.3 Ejemplo de secuencia usada para construir una pseudosección con un arreglo Wenner.  
(Barker 1989)

El mayor número de mediciones se obtienen con el arreglo Polo-Polo.

En estos casos, la ubicación horizontal del punto de medición se pone en el medio entre los 4 electrodos del arreglo o dispositivo utilizado, y baja a 45° sobre la vertical al punto a medición, donde podemos caracterizar la mediana de la profundidad de investigación antes mencionada, aunque estos no son los puntos que la definen.

La ubicación vertical del punto de medición se dispone a una distancia que es proporcional a la separación entre los electrodos.

Para representar las mediciones en un sondeo eléctrico 2D se utiliza el método de contornos o pseudosección.

La pseudosección da una idea aproximada de la distribución de resistividad en el subsuelo, aunque a la vez distorsionada. Una pseudosección no se debe de tomar como una imagen final de valores de resistividad real en el subsuelo, pues se pueden obtener varias

representaciones de diferentes arreglos electródicos. Pero también debemos de considerar, de la función de sensibilidad desde el punto de vista 2D, la resolución en la vertical y horizontal de cada arreglo.

Al realizar un sondeo para el mismo ejemplo, un prisma rectangular, con diferentes tipos de arreglos nos podemos percatar, de acuerdo al espaciamiento y el orden de los electrodos de potencial y corriente, como la imagen de resistividad es diferente para cada uno, y como cada uno de estos arreglos caracteriza de diferente manera los cambios de resistividad en la vertical y horizontales.

## 2.6. Sensibilidad de los arreglos

Para representar estos arreglos tetraelectródicos tenemos que C1 es el electrodo de Corriente 1, C2 el electrodo de corriente 2 y P1 y P2 son los electrodos de potencial 1 y 2 respectivamente.

Se tiene que para el arreglo **Wenner** (C1-P1-P2-C2), los contornos para la sensibilidad son casi horizontales bajo en centro del arreglo, lo cual indica que es más sensible a cambios de resistividad en la vertical del subsuelo y no así a los cambios horizontales. Tiene una profundidad de investigación de  $0.5 "a"$ , pero tiene una pobre cobertura horizontal cuando este espaciamiento " $a$ " aumenta. Con un factor geométrico menor al de los demás arreglos, dando una mayor fuerza a la señal (Locke, 2012).

El arreglo **Dipolo-Dipolo** (C2, C1, P1, P2) es y seguirá siendo muy usado debido a su bajo acoplamiento EM (Electromagnético) entre los electrodos de corriente y potencial.

El espaciamiento entre los electrodos C2-C1 y P1-P2 está dado por " $a$ ", mientras que existe otro factor denominado " $n$ " que es la relación de la distancia entre C1 y P1 y la separación " $a$ ", es decir la distancia entre C1 y P1 es " $na$ " donde el factor " $n$ " aumenta desde 1, 2, 3...hasta " $n$ " veces, con la finalidad de aumentar la profundidad de investigación. Con el análisis de la función de sensibilidad, nos damos cuenta que los valores más importantes de sensibilidad están bajo el par de electrodos de corriente, y también bajo el par de potencial, es decir es sensible a cambios de resistividad entre cada par de "dipolos" (Locke, 2012).

Esto da como resultado una somera profundidad de investigación, que depende del valor de " $n$ " y de " $a$ ", tiene una mejor resolución en cambios horizontales de resistividad y baja sensibilidad para cambios de resistividad en la vertical, por lo tanto mejor cobertura de

datos en la horizontal. La fuerza de la señal disminuye conforme el valor del factor “n” aumenta (Figura 2.4).

El arreglo **Wenner-Schlumberger** (C1, P1, P2, C2) es una combinación de dos arreglos básicos en prospección eléctrica, en donde el espaciamiento entre electrodos C1-P1 y P2-C2 es de “a”, el factor “n”, para este caso, es la relación entre la distancia “a” y el par de electrodos de potencial.

La sensibilidad para este arreglo es similar al arreglo Wenner, con un valor más bajo entre los pares de electrodos C1 y P1 (P2-C2) con una alta sensibilidad entre los electrodos de potencial (Locke, 2012).

Esto indica que es moderadamente sensible a cambios de resistividad, tanto vertical como horizontal, tiene una profundidad media de investigación aproximadamente 10% mayor a los arreglos Wenner. La cobertura de los datos en la horizontal es media, no tan buena como en el arreglo Dipolo-Dipolo, y la fuerza de la señal esta entre la del arreglo Wenner y el Dipolo-Dipolo.

El arreglo **Polo-Polo** es el menos usado en la práctica, posee un solo electrodo de corriente y uno solo de potencial (C1 y P1), los segundos electrodos (C2 y P2) deben de ponerse a una distancia mayor a 20 veces la separación “a” entre C1 y P1.

Tiene una resolución vertical moderada y buena cobertura de datos horizontal, con una profunda investigación de profundidad entre más se separen los electrodos, aunque su señal es propensa a tener mucho ruido, y por lo tanto afectar la resolución y veracidad de los datos (Locke, 2012).

El arreglo **Polo-Dipolo** (C1, P1, P2) es un dispositivo asimétrico que se verá reflejado en los valores de resistividad aparente y puede influir en el modelo inverso, el cual se describirá más adelante. Tenemos la distancia “a” entre los electrodos de potencial, y “na” entre C1 y P1, conforme este valor aumenta existe una mayor penetración de la señal, la cual es mayor a la del Dipolo-Dipolo, pero menor a los demás arreglos.

La sensibilidad de los datos se concentra entre los electrodos de potencial teniendo mejor resolución horizontal que vertical (Locke, 2012).

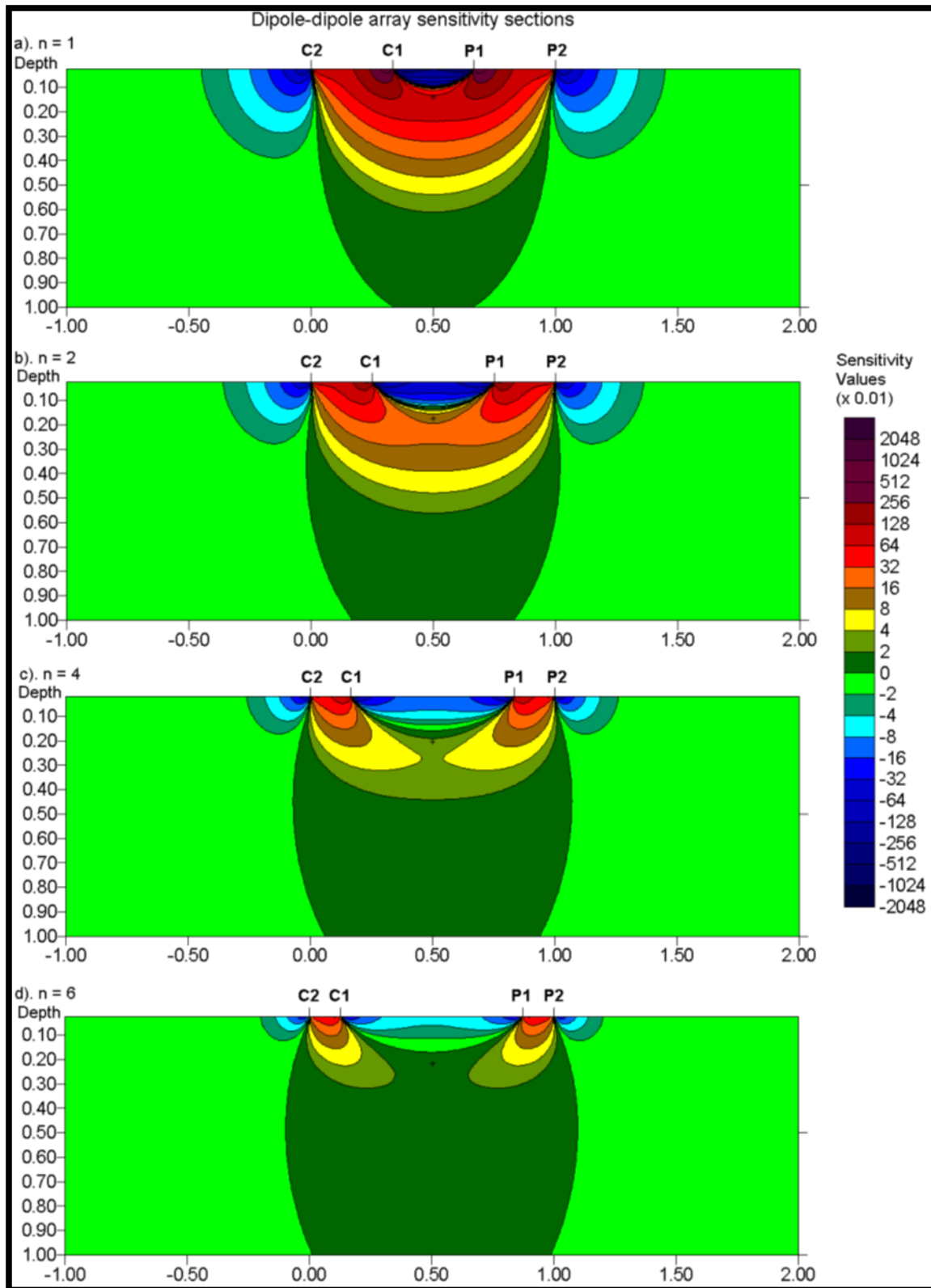


Figura 2.4 Función de sensibilidad para el arreglo Dipolo-Dipolo con: a)  $n=1$ ; b)  $n=2$ ; c)  $n=4$ ; d)  $n=6$ .  
(Locke 2012)

## 2.7. Teoría básica de Inversión

La teoría de inversión está organizada por un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas, que tienen la finalidad de reproducir información acerca de las propiedades físicas de un sistema. Para explicar la teoría de inversión se tiene puede abordar desde 2 modelos que son inversos uno con el otro: El Modelo Directo y el Modelo Inverso.

### 2.7.1. Modelo Directo

El Modelo Directo se define como: Dado los valores de un conjunto de parámetros para un modelo hipotético de la Tierra, se reproducen los datos observados de manera sintética.

Para esto muchas veces se utiliza un programa 2D de modelado directo.

Existen 3 diferentes maneras que es el método más exacto aunque se limita a geometrías muy simples, por elementos de frontera que es más flexible en geometría pero limita el número de cambios de resistividad, y el método de diferencias y elementos finitos que permite una distribución más arbitraria de calcular los valores de resistividad aparente para un modelo directo: métodos analíticos de las resistividades en el subsuelo.

Por lo general antes de realizar las mediciones en campo, se conoce la magnitud de los cuerpos en el subsuelo que se buscan o que se esperan, de esta manera se pueden calcular mejor las matrices y las ecuaciones para conocer la sensibilidad y realizar los modelos de inversión.

En el proceso de la inversión de los datos de resistividad aparente a valores de resistividad “real” con los modelos de inversión debemos de remover datos anómalos, es decir, valores que no coincidan con los demás ni tengan relevancia con el terreno, realizar los ajustes apropiados, de acuerdo a las características del terreno y lo que se espera del subsuelo, al modelo de inversión.

Una de las limitaciones de las imágenes 2D realizadas de mediciones en superficie es la reducción de la resolución a profundidad, esta, es una limitación física que ninguna cantidad de reconfiguración o modelo puede superar. En teoría la única manera de mejorar la resolución en profundidad es colocar los sensores más cerca de las estructuras, y esto es casi imposible en la mayoría de los casos.

Los arreglos simétricos tienen una mejor definición de las imágenes, y mejor resolución para interpretación. Debido a la sensibilidad que registran, los arreglos de 4 electrodos, son los que tienen una mejor interpretación en cuanto a cambios de resistividad en el

subsuelo, con arreglos de 3 electrodos la imagen, al no ser simétrica, es más compleja de interpretar.

Para el caso de un modelo del subsuelo en 2D, donde el problema directo no es lineal y se pretende obtener las resistividades verdaderas en el subsuelo, el problema directo se define como el mapeo de un “espacio del modelo (m)” y un espacio de datos (e), y una función F que relaciona el modelo con cada dato (Urbietta 2001).

$$e_j = F_j(m) \dots (8)$$

### 2.7.2. Modelo Inverso

El problema inverso se define como: Dado un conjunto de datos experimentales (e), determine aquellos parámetros de la Tierra (m) que expliquen los datos observados.

La solución completa del problema inverso se divide en 2 partes, primero se debe de encontrar una estructura o modelo que reproduzca las observaciones y segundo ese modelo debe de ser evaluado para determinar cuáles de estas características son significativas en la presente observación, a esto se lo conoce como el principio de no unicidad (Oldenburg 1978)

Se tiene una variedad de métodos para encontrar el modelo que reproduzca las observaciones, ajustando con curvas, el Kernel elevado y usando funciones de Dar Zarrouk para crear un algoritmo para generar un perfil en capas, y se invierten las observaciones directamente.

Con este método, los datos de diferentes arreglos de electrodos (y de hecho los datos de mediciones geofísicas completamente diferentes) se puede invertir simultáneamente.

Si asumimos que se conoce la resistividad de un semiespacio isotrópico ubicados en  $z=0$ , la solución del problema inverso por resistividad nos lleva a la construcción de un modelo que se ajuste a los datos.

Esta solución requiere primero la construcción de un modelo  $m(z)$  cuya respuesta calcule  $E_j$  y que coincida con las observaciones  $E_{0j}$ , con “n” observaciones de diferencia de potencial.

El método Backus y Gilbert muestra que existen infinitas ecuaciones que satisfacen la ecuación solución, para encontrar la perturbación adecuada, minimizamos la cantidad de observaciones (Oldenburg 1978).

La solución se puede obtener mediante la ecuación:

$$\delta m(z) = \frac{1}{f(z)^2} \sum_{j=1}^n \alpha_j G_j(z) \quad \dots (9)$$

Que define el Ferchet Kernel, es decir la ecuación que nos permitirá observar la estructura resistiva en el subsuelo.

Donde  $f(z)$  es una función ponderada arbitraria, asumiendo que se conoce la resistividad del medio y solo se toman en cuenta las soluciones para  $\delta m(z)=0$  o los valores más cercanos a 0 nos darán un mejor aproximación, con esta función ponderada se puede incluir información geológica al problema.

Se cuenta con software especializado con el cual se pueden obtener el modelo directo y el modelo inverso para una secuencia de datos tomados en campo, o a partir de datos sintéticos.

En el uso de software para la interpretación e inversión de modelos 2D y 3D se debe tomar en cuenta la manera en que se tomaron los valores de resistividad aparente, las estructuras que se esperan o se están buscando del subsuelo, el arreglo usado y la sensibilidad de este para detectar las estructuras deseadas y los cambios en la resistividad vertical y horizontal, para realizar los ajustes a los parámetros con los cuales se obtendrá el modelo de inversión.

### 3. Metodología.

#### 3.1. Características del Equipo

Para realizar el estudio se utilizó un resistivímetro multicanal marca IRIS llamado SYSCAL Pro Switch de 10 canales que está diseñado para estudios de alta productividad, que combina un transmisor, un receptor y la unidad Switch en una sola consola, suministrada por una batería de 12 V. Se vuelve muy práctico en el trabajo de campo. Permite medir las curvas de voltaje primario y decaimiento del voltaje, dando datos tanto de resistividad como de polarización inducida. (Figura 3.1)

Las especificaciones de salida son:

- 800V en el modo Switch, 1, 000 V en el modo manual,
- Corriente, hasta 2.5 A
- Voltaje, hasta 1,000V (2,000V pico a pico), opcionalmente hasta 1,500V (3,000V pico a pico) con convertidor externo.
- Poder, hasta 250W, o 1,200W con convertidor externo.
- Duración de pulso, 0.15, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, y 8 segundos.
- Precisión de la corriente, 0.2% típica.
- Impedancia de entrada, 100 MΩ
- Voltaje de entrada, canal 1-15V, canales 2-10 es de 15vV adicionales, protección de entrada 1,000 V.
- Filtros Notch de 50 y 60 Hz.
- Medición de Voltaje, 0.2% típico, resolución 1μV.
- Rango Automático de inyección, controlado por microprocesador.

EL SYSCAL pro utiliza cables multi-core (figura 3.1) para el control de un conjunto de electrodos conectados a una línea o varias líneas (perfiles). El número estándar de electrodos utilizados son: 24, 48, 72, 96, 120, este número puede ser aumentado con unidades Switch Pro para imágenes 2D y 3D del subsuelo.

Los electrodos son de cobre y miden 42 cm de longitud con diámetro de 3 cm (figura 3.2). Para este estudio se utilizaron 28 y 32 electrodos en direcciones Noreste -Suroeste y Sureste -Noroeste respectivamente.

Los diez canales del sistema de permisos para llevar a cabo hasta 10 lecturas al mismo tiempo para una alta eficiencia.

Las mediciones se llevan a cabo de forma automática (Voltaje de salida, número de apilamiento, factor de calidad) después de delimitar los valores por parte del operador en la consola y se almacenan en la memoria interna.



Figura 3.1 Resistivímetro SYSCAL Pro Switch y cable multi-core.



Figura 3.2. Electrodo de Cobre.

### 3.2. Características del Arreglo electródico y adquisición de datos

Para el estudio realizado en Sierra Negra se implementó el arreglo electródico Dipolo-Dipolo con una separación “a” de 5 m para la adquisición de los datos, debido a las condiciones geológicas de la zona y a las necesidades del estudio.

La razón por la cual se eligió este arreglo es debido a su sensibilidad a cambios horizontales en la resistividad, de modo que es útil para identificar estructuras enterradas, fallas, etc. por lo que se adapta para el propósito de determinar la frontera de la roca consolidada con respecto a la roca más suelta en superficie.

Para una mejor cobertura del terreno se plantearon perfiles cruzados en ambas direcciones horizontales (Norte-Sur y Este-Oeste).

La primera toma de datos se realizó los días 18 y 19 de noviembre del 2010, donde se realizaron 4 levantamientos (4 perfiles). El día 18 se realizaron los primeros 2 con una orientación Oeste –Este y una longitud total de 155 m.

El día 19 se realizaron otros 2 perfiles con una orientación Sur-Norte y una longitud total de 135 m.

La segunda toma de datos se realizó el día 15 de abril del 2011, realizando 3 perfiles 2 con orientación Norte-Sur y una longitud de 135 m; y uno con orientación Este-Oeste y una longitud de 155 m.

En total se realizaron 7 perfiles; 4 en dirección Noreste -Suroeste y 3 en dirección Sureste -Noroeste, paralelos entre sí en ambas direcciones.

La distancia entre los perfiles Noreste – Suroeste es de 48 m, hacia el Suroeste y la distancia entre los perfiles Sureste -Noroestes de 43 m hacia el Noroeste.

En la figura 3.1 se tenemos la geometría de los 7 perfiles de tomografía de resistividad eléctrica 2D, con coordenadas UTM para el punto inicial y punto final de cada perfil (tabla 1), delimitados por una cruz. Las líneas de color verde muestran los perfiles realizados en la primera visita a la zona del estudio, mientras que las líneas punteadas de color roja muestran los perfiles realizados en la segunda visita al lugar.

Para la tabla 2 tenemos en la primera columna los puntos iniciales y finales para cada perfil, P0-0 es el punto inicial del perfil 0, mientras que P0-155 es el punto final del mismo perfil; en la segunda columna se muestra la coordenada UTM sobre el eje “X” y en la tercera columna la coordenada UTM sobre el eje “Y”.

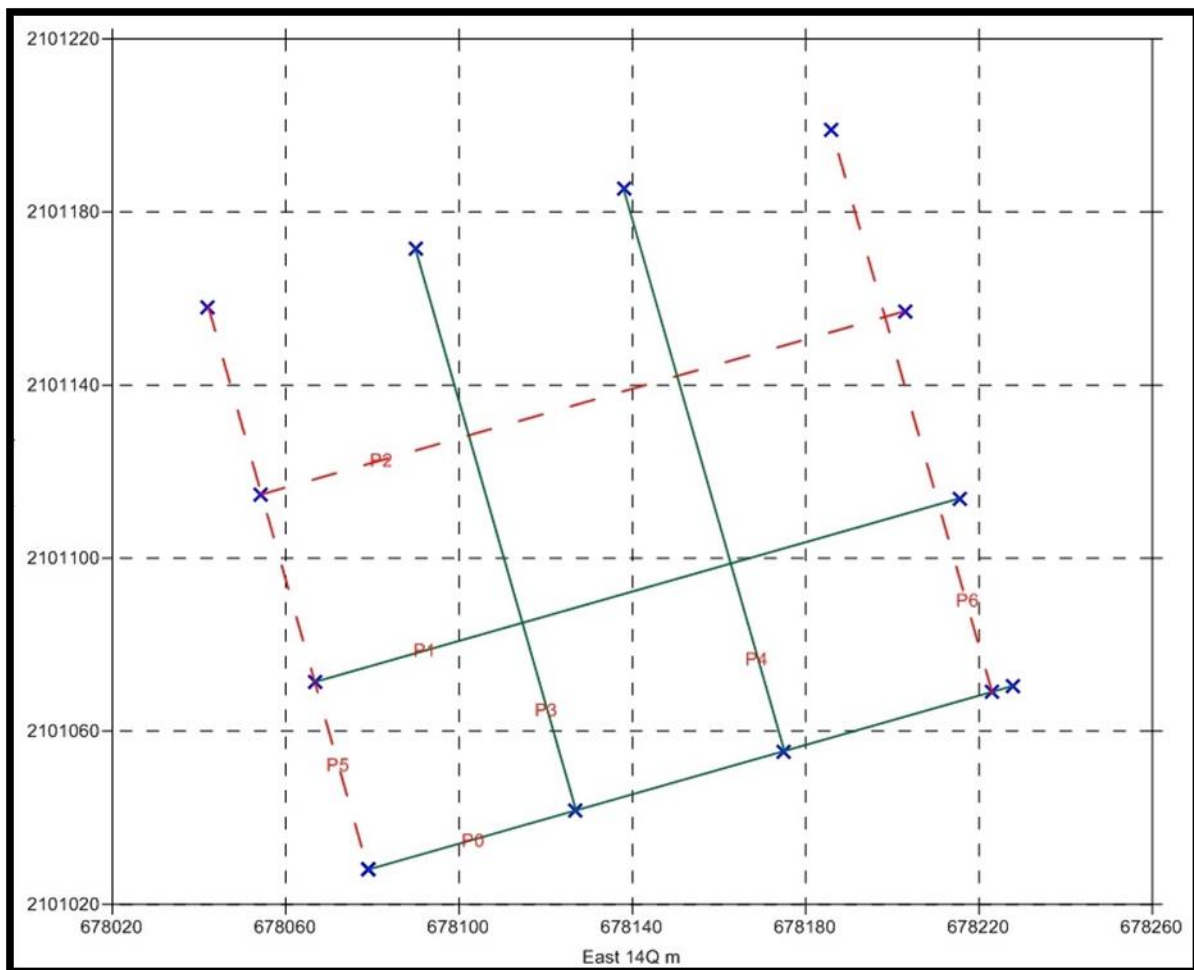


Figura 3.3 Referencia de los 7 perfiles de tomografía 2D en un plano con coordenadas UTM.

Tabla 2 Puntos iniciales y finales para cada perfil

| LINEAS | X[E]        | Y[N]      |
|--------|-------------|-----------|
| P0-0   | 14Q 678,079 | 2,101,028 |
| P0-155 | 14Q 678,228 | 2,101,070 |
| P1-0   | 14Q 678,067 | 2,101,071 |
| P1-155 | 14Q 678,215 | 2,101,114 |
| P2-0   | 14Q 678,054 | 2,101,115 |
| P2-155 | 14Q 678,203 | 2,101,157 |
| P3-0   | 14Q 678,127 | 2,101,042 |
| P3-135 | 14Q 678,090 | 2,101,172 |
| P4-0   | 14Q 678,175 | 2,101,055 |
| P4-135 | 14Q 678,138 | 2,101,185 |
| P5-0   | 14Q 678,079 | 2,101,028 |
| P5-135 | 14Q 678,042 | 2,101,158 |
| P6-0   | 14Q 678,223 | 2,101,069 |
| P6-135 | 14Q 678,181 | 2,101,199 |

En este estudio y con el arreglo Dipolo-Dipolo antes mencionado se utilizaron 32 y 28 electrodos.

Los perfiles de 28 electrodos tienen una longitud de 135 metros y una orientación Norte-Sur en 2 secuencias del electrodo 11 al 24 y del 25 al 38 para los perfiles 3 y 4; y en 2 secuencias del electrodo 1 al 24 y del 25 al 28 para los perfiles 5 y 6.

Se tiene 4 niveles de profundidad para estos perfiles, es decir la distancia "a" de 5 m se multiplica por un "n" máximo igual a 4 (Figura 3.3).

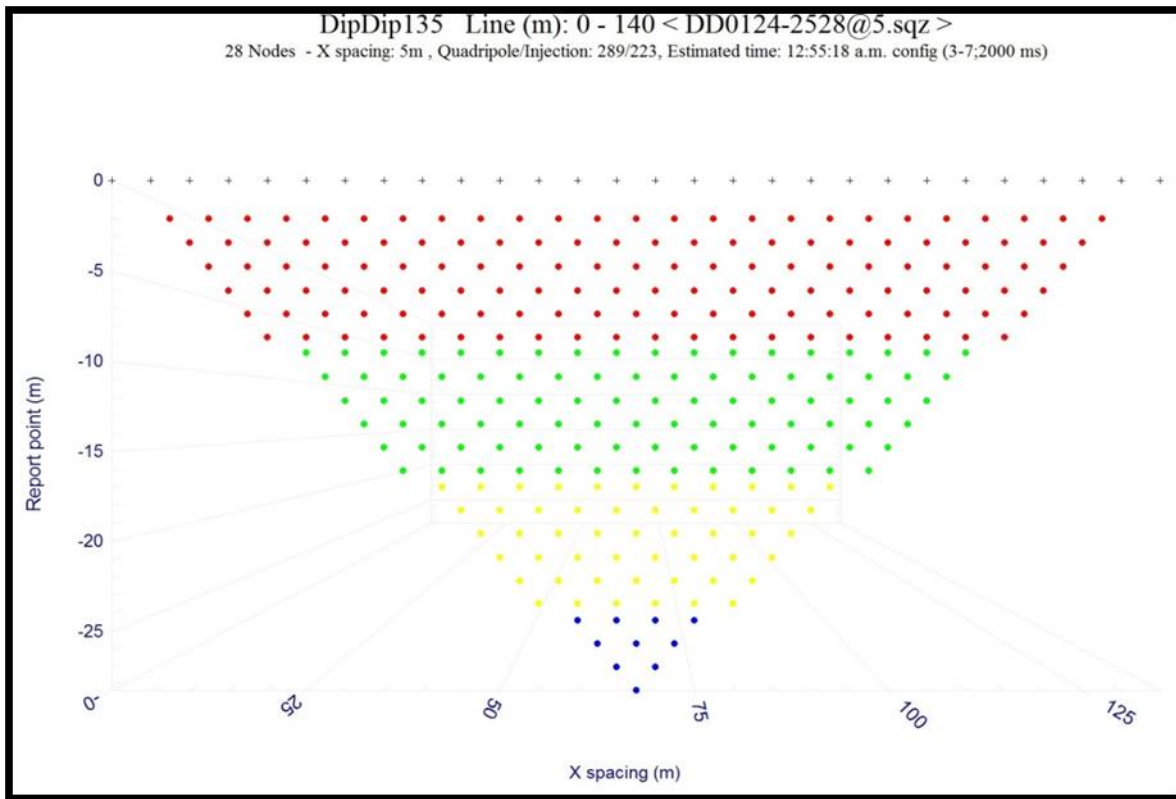


Figura 3.4 Gráfico de puntos de adquisición en EarthImager para perfiles con 28 electrodos.

En la imagen 3.3 cada color es un nivel en la adquisición de datos, es decir los puntos de color rojo se obtiene con una apertura "na" entre los electrodos de potencial y los electrodos de corriente, donde  $a=5\text{ m}$  y  $n=1$ , para los puntos de color verde  $n=2$  y así sucesivamente para los 4 niveles. En el eje "X" tenemos el espaciado entre electrodos en metros, y en el eje "Y" tenemos la profundidad del punto de adquisición a partir de una superficie de  $0\text{ m}$ .

Los perfiles con 32 electrodos tienen una longitud de  $155\text{ m}$  con una orientación Este-Oeste en 2 secuencias del electrodo 9 al 24 y del 25 al 40 para los perfiles 0 y 1; y en 2 secuencias del electrodo 1 al 24 y del 25 al 32 para el Perfil 2.

Se tienen 5 niveles de profundidad para estos perfiles, es decir que la distancia "a" de  $5\text{ m}$  se multiplicara por un "n" máximo igual a 5 (Figura3.4), aunque el último nivel solo presenta un punto medio de adquisición.

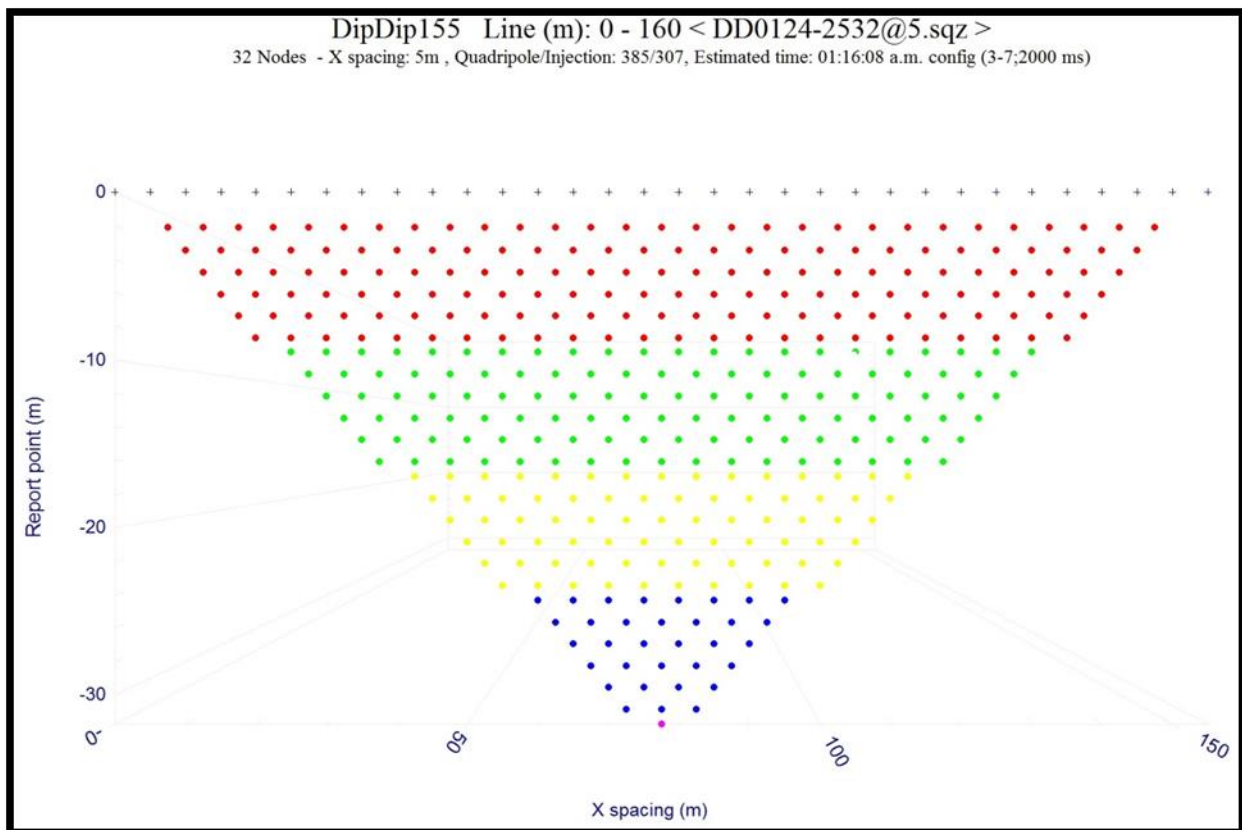


Figura 3.5 Gráfico de puntos de adquisición en EarthImager para perfiles con 32 electrodos.

En la imagen 3.4 cada color es un nivel en la adquisición de datos, es decir los puntos de color rojo se obtiene con una apertura "na" entre los electrodos de potencial y los electrodos de corriente, donde  $a=5\text{ m}$  y  $n=1$ , para los puntos de color verde  $n=2$  y así sucesivamente para los 5 niveles. El último nivel de color morado solo tiene un punto de adquisición central. En el eje "X" tenemos el espaciamiento entre electrodos en metros, y en el eje "Y" tenemos la profundidad del punto de adquisición a partir de una superficie de 0 m.

### 3.3. Manejo de Datos

Los archivos guardados en la memoria interna del resistivímetro, son 2 para cada perfil el archivo SQZ que es la configuración del arreglo y el archivo BIN que contiene los valores de resistividad, voltaje, Intensidad de corriente, factor de calidad y número de apilamiento, que es la información que obtenemos del subsuelo.

Como primera parte para la inversión de datos, con la información que tenemos de cada perfil, se crearon archivos *Universal Resistivity Format (URF)* el cual es un formato fácil de crear y que es aceptado por el software con el cual se realizó la inversión de los datos para obtener los modelos de resistividad.

Un archivo URF se crea preferentemente en una hoja Excel y se necesitan los datos de diferencia de voltaje [V], intensidad de corriente [In], la desviación estándar para cada medición, es decir el porcentaje de error, y la configuración del arreglo.

En las primeras líneas se escriben comentarios como lugar y fecha de donde se obtienen los datos del perfil, anteponiendo un ";". Después de esto se especifican las unidades que en este caso son metros.

Posteriormente se escribe el número del electro utilizada (*ID*), seguido de la posición de éste (*X, Y, Z*). Al terminar esto, siguen las mediciones, colocando primero la secuencia de medición (*A, B, M, N*) los electrodos de potencial y de corriente respectivamente, complementándose con los valores [*V/In, In, DesEst*], que son Voltaje medido sobre Intensidad de corriente, intensidad de corriente y desviación estándar (el porcentaje de error) para la medición correspondiente. En la figura 3.5 se muestra un ejemplo de un archivo URF.

```
;Perfil_0
;20101118
Units:Meters
:Geometry
;ID,x,y,z
9,0,0,0
10,5,0,0
11,10,0,0
12,15,0,0
13,20,0,0
14,25,0,0
15,30,0,0
16,35,0,0
17,40,0,0
18,45,0,0
19,50,0,0
:Measurements
;A,B,M,N,V/In,In,DesEst
9,10,11,12,-89.47380952,2.1,0.1
9,10,12,13,-23.88714286,2.1,0.1
9,10,13,14,-8.09372029,19.985,0
9,10,14,15,-2.548261196,19.985,0
9,10,15,16,-1.275437217,53.406,0.1
9,10,16,17,-0.644178557,53.406,0.1
9,11,17,19,-2.123777276,23.922,0
9,11,18,20,-1.453677361,35.501,0.1
9,11,19,21,-1.016883398,46.14,0
9,11,20,22,-0.746648765,46.177,0.1
9,11,21,23,-0.568227577,46.191,0.1
```

Figura 3.6 Ejemplo de un archivo URF

### 3.4. Inversión de datos

A pesar de contar con los datos de perfiles paralelos, con los cuales se puede realizar una inversión 3D de los datos y esperar un modelo más completo de la zona, se tiene razones por las cuales se optó por realizar diversas inversiones 2D.

La inversión de datos de una tomografía en 3D puede ser muy tarda y complicada ya que la memoria de las computadoras muchas veces no es suficiente y también porque lograra la estabilidad en la convergencia suele ser muy complicada.

La razón principal es porque, de acuerdo a Aizebeokhai (2010), el espaciamiento óptimo entre líneas, relativo a la separación mínima entre electrodos, es el mayor reto para usar imágenes paralelas 2D para crear una imagen 3D y realizar una sola inversión. Para una óptima inversión y resolución de una imagen 3D a partir de líneas paralelas 2D, el espacio

entre líneas debe de ser 4 veces mayor al espacio mínimo espacio entre electrodos. En el presente trabajo el espacio entre líneas es mayor a 4 veces el espaciamiento mínimo (5 m) entre electrodos, por lo cual las imágenes resultantes pueden llevar a una mala interpretación de las anomalías en términos de dimensiones y localización.

Para realizar la inversión de los datos se utilizó el software de *Advanced Geosciences Inc (AGI) EarthImager 2D*. Al ingresar el archivo URF en el software se presenta un modelo directo con los datos medidos en campo.

El software tiene en el menú de inversión parámetros de por default, los cuales se pueden modificar de acuerdo con las anotaciones en la bitácora de campo sobre las características de la zona de estudio.

Para realizar la inversión de los datos en el EarthImager tenemos tres secciones del menú donde podemos modificar parámetros para obtener un mejor modelo inverso.

En ajustes iniciales tenemos más de 11 parámetros en la página de configuración como criterio para remover datos ruidosos, seleccionar el método de inversión, determinar la función del eje Y en el estudio, y el espaciamiento mínimo entre electrodos para X y Z.

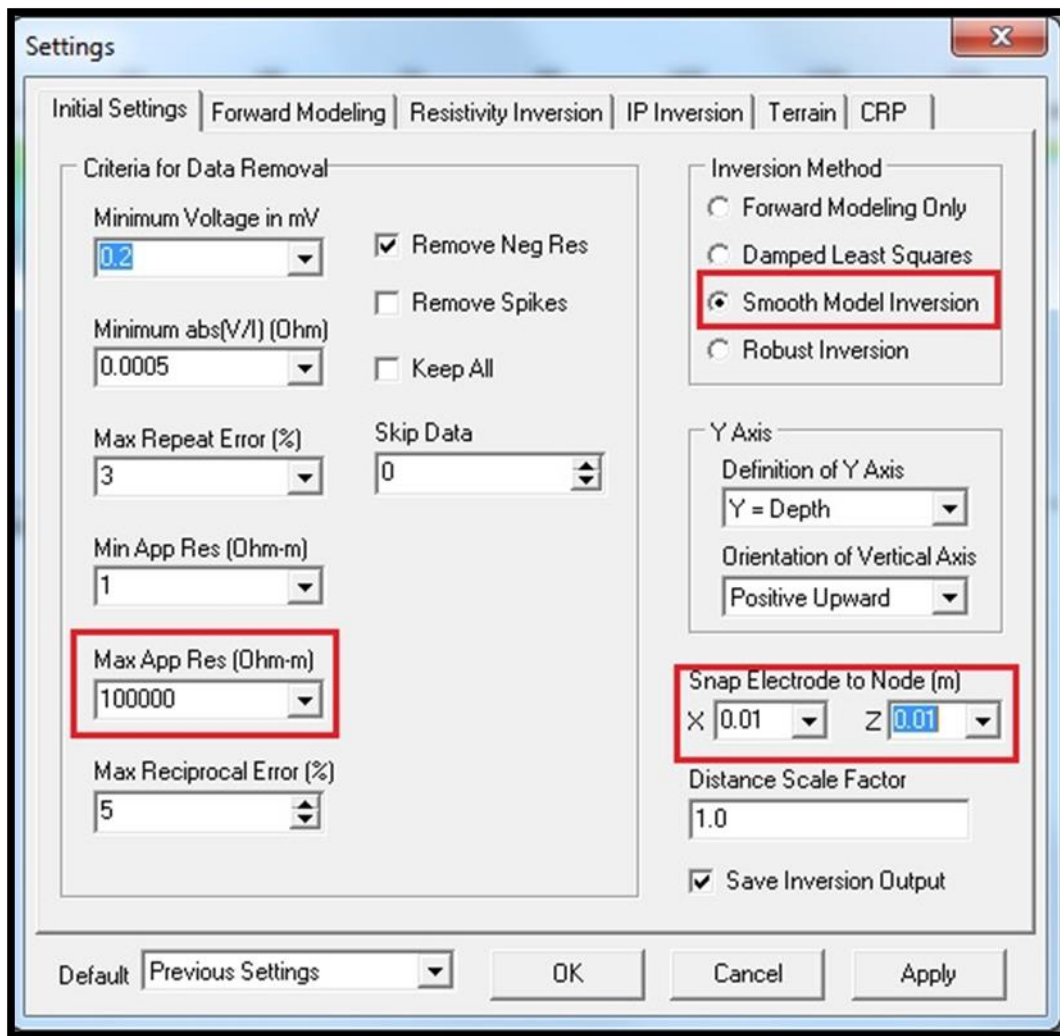


Figura 3.7 Ajustes Iniciales de la Inversión en EarthImager.

En la figura 3.6 tenemos la página de configuración en donde podemos hacer los ajustes iniciales para la inversión. Para este estudio se utilizó una lectura de entrada de la resistividad aparente de 100,000 Ohm-m, siendo el máximo valor absoluto de resistividad aparente en ohm-m permitido en la inversión, cualquier medición cuyo valor absoluto de sea mayor a este valor será removido al igual si tiene un error mayor del 5%, estos son los criterios de eliminación de datos.

Se escogió un modelo de inversión suavizado, por ser estable y robusto, y un espaciamiento entre los electrodos dinámicos de 1 cm, lo cual da una malla más estable por la separación real de los electrodos en campo.

Para el modelo directo hay 8 parámetros en la página de configuración. Esta página brinda opciones para elegir el método de modelado directo, resolución de ecuaciones de matriz directa, el tipo de condición de contorno, discretización de malla, etc.

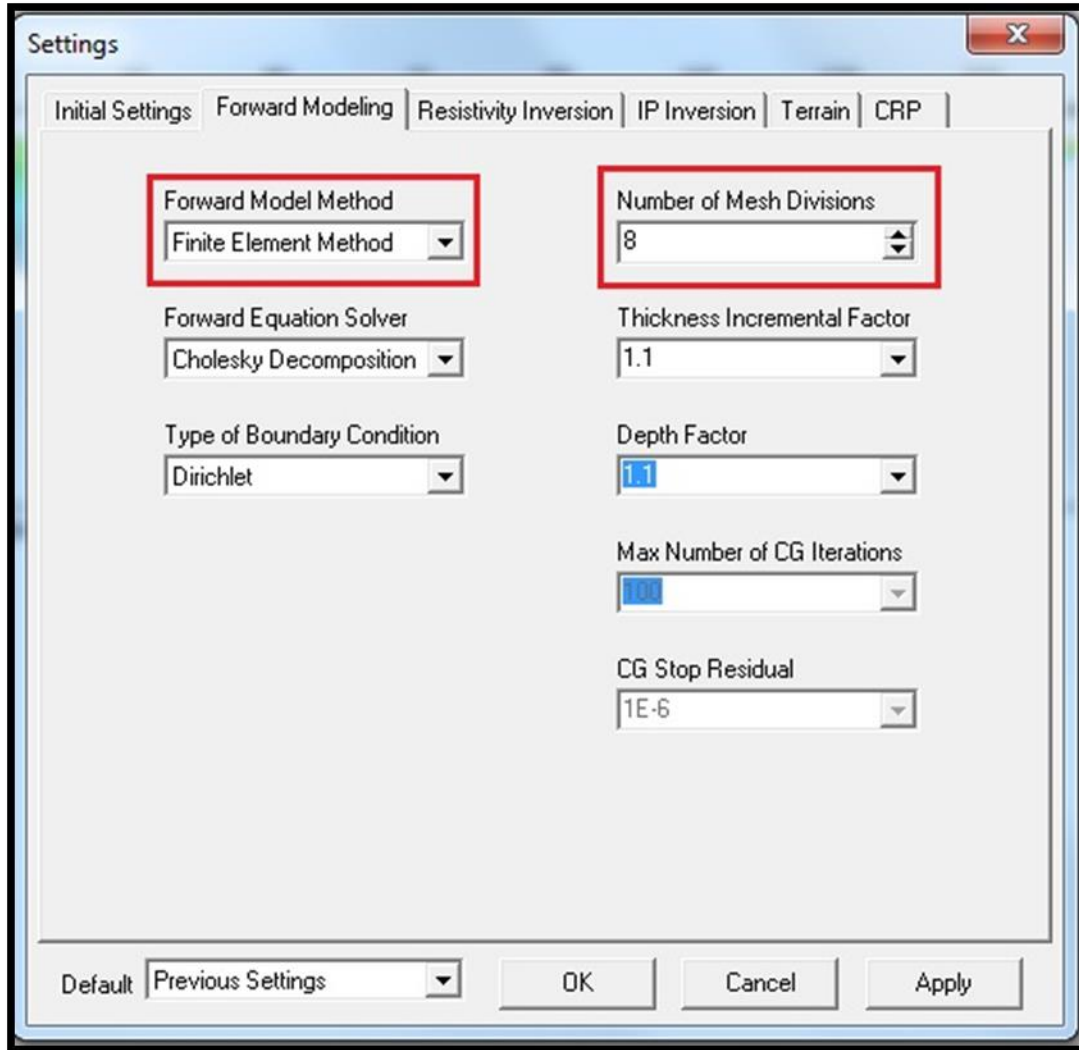


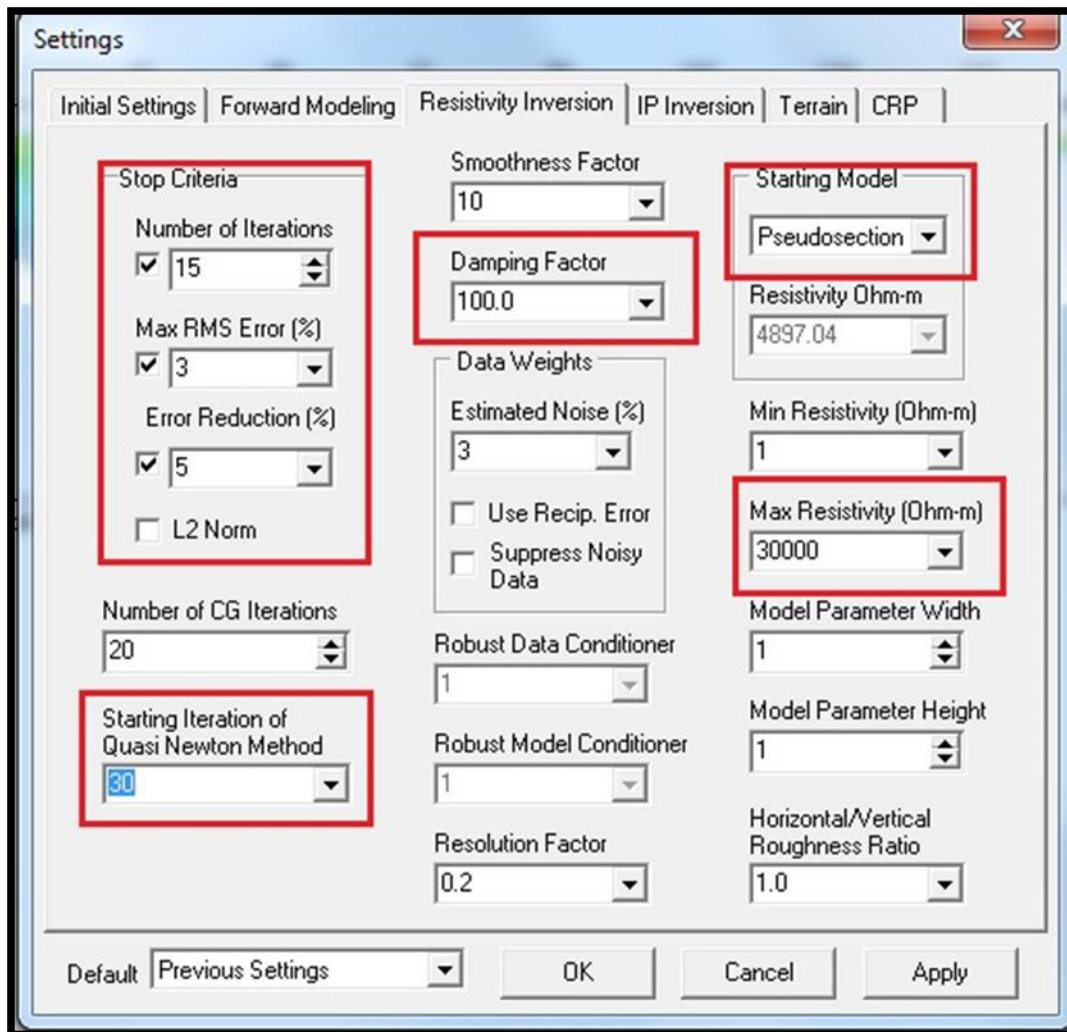
Figura 3.8 Ajustes del modelo Directo en EarthImager.

En la figura 3.7 tenemos la página de configuración en donde podemos hacer los ajustes del modelo directo. Para este estudio se utilizó el método de elementos finitos que produce una solución del modelado directo más exacto con la “misma” discriminación de malla.

Además, el método de elementos finitos modela mejor la topografía de la tierra, con condiciones de frontera tipo Dirichlet y la división de la malla de salida es de 8 que será el número mínimo de células (bloques) entre dos electrodos, haciendo una malla más fina,

es decir un mayor número de datos, con menor espacio entre ellos, teniendo así una imagen con mayor detalle.

En la pantalla de configuración de la inversión de resistividad podemos determinar los criterios con los cuales se detendrá dicha inversión, el número de iteraciones, factores de rugosidad, modelo inicial, valores máximo y mínimo de resistividad entre otros factores que darán resolución al modelo inverso.



Figura

### 3.9 Ajustes de la Inversión de Resistividad en EarthImager.

En la figura 3.8 tenemos la página de configuración para determinar los parámetros para la inversión de resistividad.

Este Software maneja la inversión de Occam, siendo este el algoritmo que le da más consistencia a los datos y de un razonamiento de lo más simple. La aplicación de la

inversión de Occam genera un modelo suave que se ajusta al conjunto de datos con ciertas tolerancias, descritas por los parámetros que se describirán a continuación.

Con un máximo de 15 iteraciones, un error RMS (raíz media cuadrática por sus siglas en inglés) máximo del 3% ya que el principal objetivo de inversión es reducir las mediciones de campo de datos que no encajen y los datos calculados de un modelo reconstruido o cuando la reducción en el error entre cada iteración sea menor del 5%; estos son los criterios establecidos para que la inversión se detenga.

Para resolver el sistema linearizado en cada paso, se usa una resolución iterativa, este es el ciclo interno. Este parámetro establece el número de iteraciones a partir de este ciclo interno, en este caso 20 fue el valor asignado.

Para la iteración inicial del método Quasi-Newton se estableció un parámetro de 30, pues se requería de precisión y no velocidad en el proceso, el método Quasi-Newton usa una aproximación estimada de la matriz de sensibilidad con un esquema actualizado de sensibilidad. El número de iteración inicial del método Quasi-Newton NO debe ser menor a 3 y mayor de 20 si el tiempo del proceso no es prioridad como en este caso.

El factor de suavizado es un multiplicador de Lagrange cuyo efecto es el de equilibrar datos que no encajen y limitaciones del modelo, y el factor de amortiguamiento suprime el efecto de valores propios pequeños de la matriz Hessiana en las primeras iteraciones y acelera la convergencia en la primera etapa de inversión. Se sugiere que los valores de estos parámetros sean iguales, pero para este estudio se les dieron los valores de 10 al factor de suavizado y de 100 al de amortiguamiento por ser TRE.

El modelo inicial es a partir del cual el conjunto de datos comenzaran la inversión, en este caso el modelo de salida que se definió fue la Pseudosección y se definió un rango de resistividades de 1 a 30,000 Ohm-m.

Antes de comenzar la inversión, a cada perfil se le cargo el archivo de topografía correspondiente, ya que el terreno es muy irregular y para una mejor interpretación de los resultados finales, es necesario conocer la topografía del lugar.

Al final de la inversión tendremos 3 imágenes el modelo directo, con los datos medidos en campo, el modelo directo, con los valores calculados, y el modelo inverso determinado por los parámetros establecidos, teniendo sobre el eje X la separación entre electrodos, es decir la longitud del perfil geoelectrico, y en Z la profundidad de alcance para cada uno de los 7 perfiles geoelectricos

### 3.5. Representación gráfica de los perfiles geoelectricos

Para tener una mejor visualización de los resultados obtenidos de la inversión en el *EarthImager 2D*, los datos se guardaron en un formato de tres columnas *X Y Zen* donde *X* contienen los datos a lo largo del perfil, *Y* los datos de profundidad y *Z* el valor de resistividad.

Con este formato se cargaron los datos en *Golden Software Surfer 10* en donde, después de crear una malla con los datos por medio de una interpolación de Kriging que es un método que da la mejor estimación lineal insesgada de los valores de los puntos, esto es, elegir el promedio ponderado de los valores de las muestras la cual tenga la mínima varianza., se visualizaron como un mapa de contornos, con una escala semilogarítmica en donde los colores fríos señalan los valores de resistividad más bajos y los colores cálidos sugieren los valores de resistividad más altos para el medio.

De esta manera los contrastes entre los valores de resistividad son mejor apreciados, y podemos delimitar el cambio brusco de resistividades cerca de la superficie y también marcar las intersecciones que tienen con los demás perfiles. Esto se realizó para cada uno de los 7 perfiles, obteniendo una representación gráfica detallada de cada uno.

De manera simultánea, a partir de los datos *XYZ*, se creó un archivo que tuviera los datos de los 7 perfiles. Para esto se necesitaron ahora 4 columnas. En la primera se colocaron los valores que corresponden al eje *X*, los cuales varían para los perfiles 0, 1 y 2 y son constantes para el resto debido a la ubicación espacial, en la segunda columna los valores que corresponden al eje *Y* que, al contrario del eje *X* son constantes para los primeros 3 perfiles y ascendentes para el resto de ellos, en la tercera columna tenemos los valores de profundidad y en la cuarta columna un valor de resistividad, el cual es asignado a cada coordenada *XYZ* de las columnas anteriores.

Este nuevo archivo cargo en el *Golden Software Voxler 3*, en el cual se puede visualizar una imagen de los 7 perfiles intercalados dando una sección geoelectrica Pseudo 3D.

Por medio de un plano se delimito la cota a la cual se requiere el corte de la pendiente al 2% deseada para la infraestructura del observatorio. Esta cota se localiza a -5.41 m sobre la superficie a una altura de 4,098.6 m a partir del punto de origen de los perfiles.

Se presentan planos adicionales que cortan a los perfiles cada 5 m en profundidad a partir de la cota delimitada.

#### 4. Resultados

Para cada perfil geoelectrico se tiene una representación gráfica, en la cual se delimito la zona donde termina la capa de ceniza y roca despezada suelta a partir de los cambios de resistividad cerca de la superficie. Esta zona, al ser una zona muy porosa, presenta una mayor resistividad al paso de la corriente eléctrica.

La escala de resistividades es una escala Rainbow, en la cual los colores fríos dan razón a valores de resistividades menores y los colores cálidos dan razón a valores de altas resistividades, en general tienen un rango de variación de 1,400 ohm-m a 30,000 ohm-m.

La figura 4.1 Muestra la distribución de los perfiles en la zona del estudio, y el punto de origen. En color azul se muestran los perfiles largos (155 m) y en color rojo los perfiles cortos (135 m).

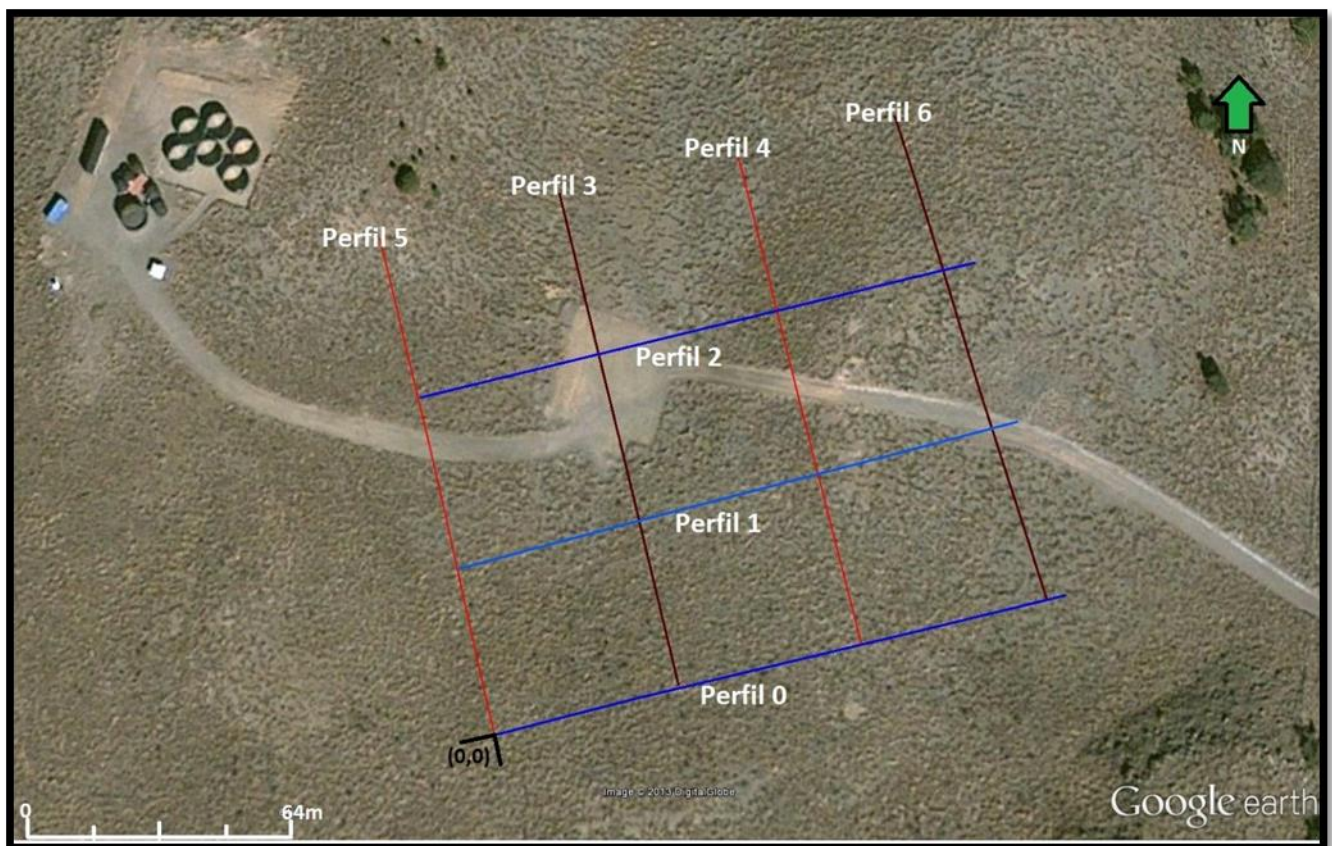


Figura 4.1 Ubicación de perfiles en la zona de estudio. (Elaborada en Google Earth)

#### 4.1. Perfil Geoeléctrico 0

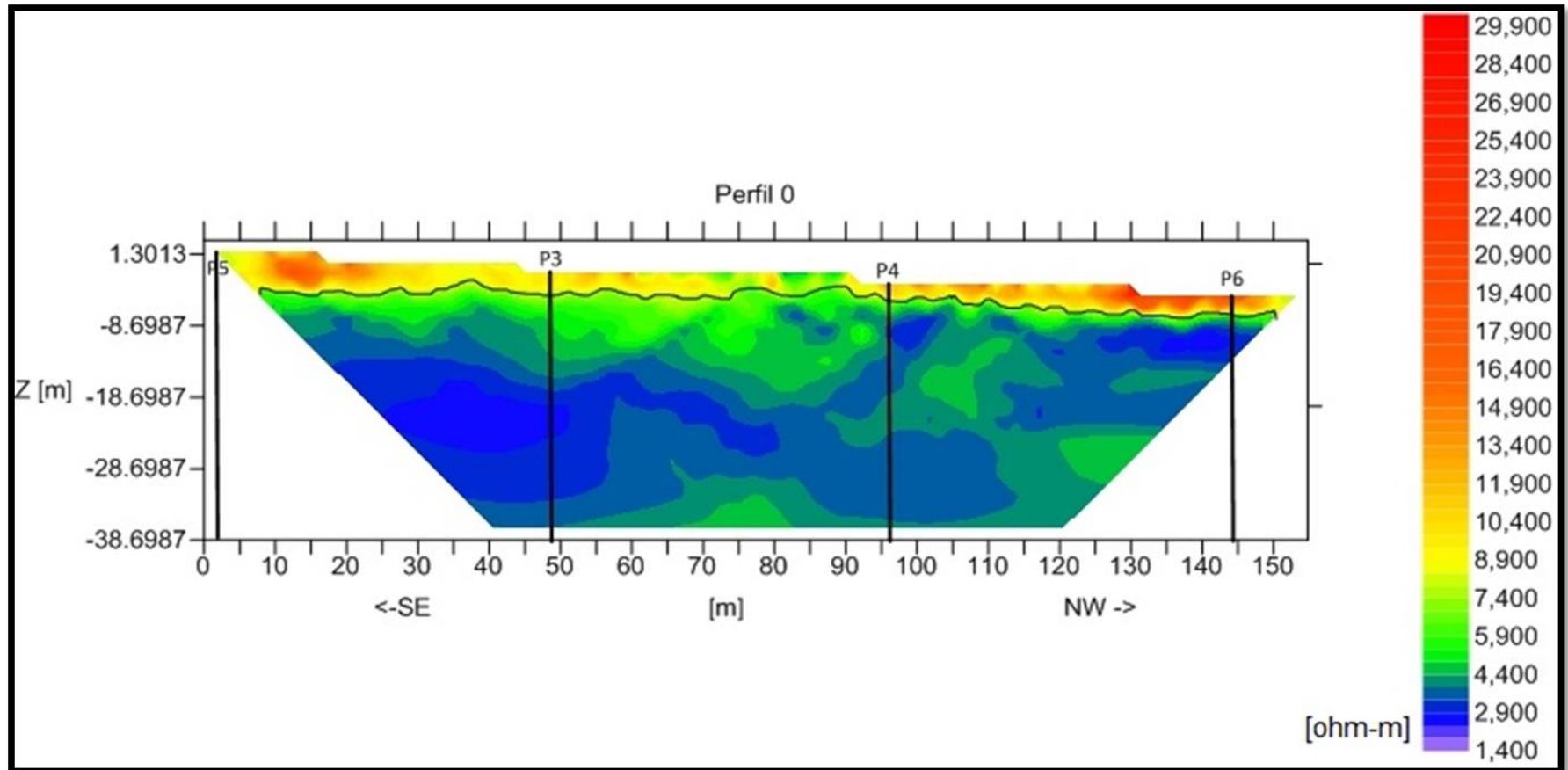


Figura 4.2 Perfil Geoeléctrico 0

El perfil 0 tiene un valor de resistividad mínimo de 2,500 ohm-m y un valor máximo de 20,000 ohm-m en superficie a los 130 m sobre la horizontal al NW. Se distingue un horizonte geoeléctrico, delimitado con una línea, a los -4 m de profundidad del lado izquierdo del perfil (SE) y hasta -8 m de profundidad del lado derecho del perfil (NW) aproximadamente, debido a la inclinación del

terreno el cual tiene una mayor altitud al inicio del perfil y decae hacia el Noroeste. Con un espesor de 5 m en promedio y con valores desde los 8,500 ohm-m hasta cerca de los 20,000 ohm-m, este horizonte tiene los más altos valores de resistividad excepto por una zona intermedia entre los 70 y 90 m sobre la horizontal en donde resaltan valores de resistividades de 5,000 ohm-m, más parecidos al horizonte inferior. Se asume que este primer horizonte, en específico las anomalías con valores muy altos es decir los colores naranjas y rojos en el perfil, definen un límite entre de la capa de ceniza y roca suelta, con la roca volcánica bien consolidada, mientras que los colores amarillos y verdes se asume que es la roca andesítica que aflora en superficie, es decir roca expuesta a intemperismo y erosión.

El segundo horizonte, el cual se asume como la roca andesítica consolidada y sin intemperismo, tiene una distribución de resistividades menores a los 6,000 ohm-m en promedio.

La información de este perfil por debajo de los 10 metros de profundidad es poco confiable, pues la distribución de los valores de resistividad es muy variables y no tienen una coherencia en la misma, por lo que la interpretación que se realiza es en base a la información geológica que se tiene de la zona.

Las líneas negras que cruzan verticalmente al perfil marcan la zona donde se intersecta con otros perfiles. El Perfil geoeléctrico 0 tiene intersección a los 0 metros con el Perfil Geoeléctrico 5, a los 48 m con el Perfil Geoeléctrico 3, a los 96 m con el Perfil Geoeléctrico 4 y a los 144 m con el Perfil Geoeléctrico 6.

Cabe mencionar que este perfil tiene el punto más alto del terreno, a los 0 metros en la horizontal, que se consideró la coordenada (0, 0, 0) para la representación gráfica pseudo 3D, y que también es origen para el perfil geoeléctrico 5.

#### 4.2. Perfil Geoelectrico 1

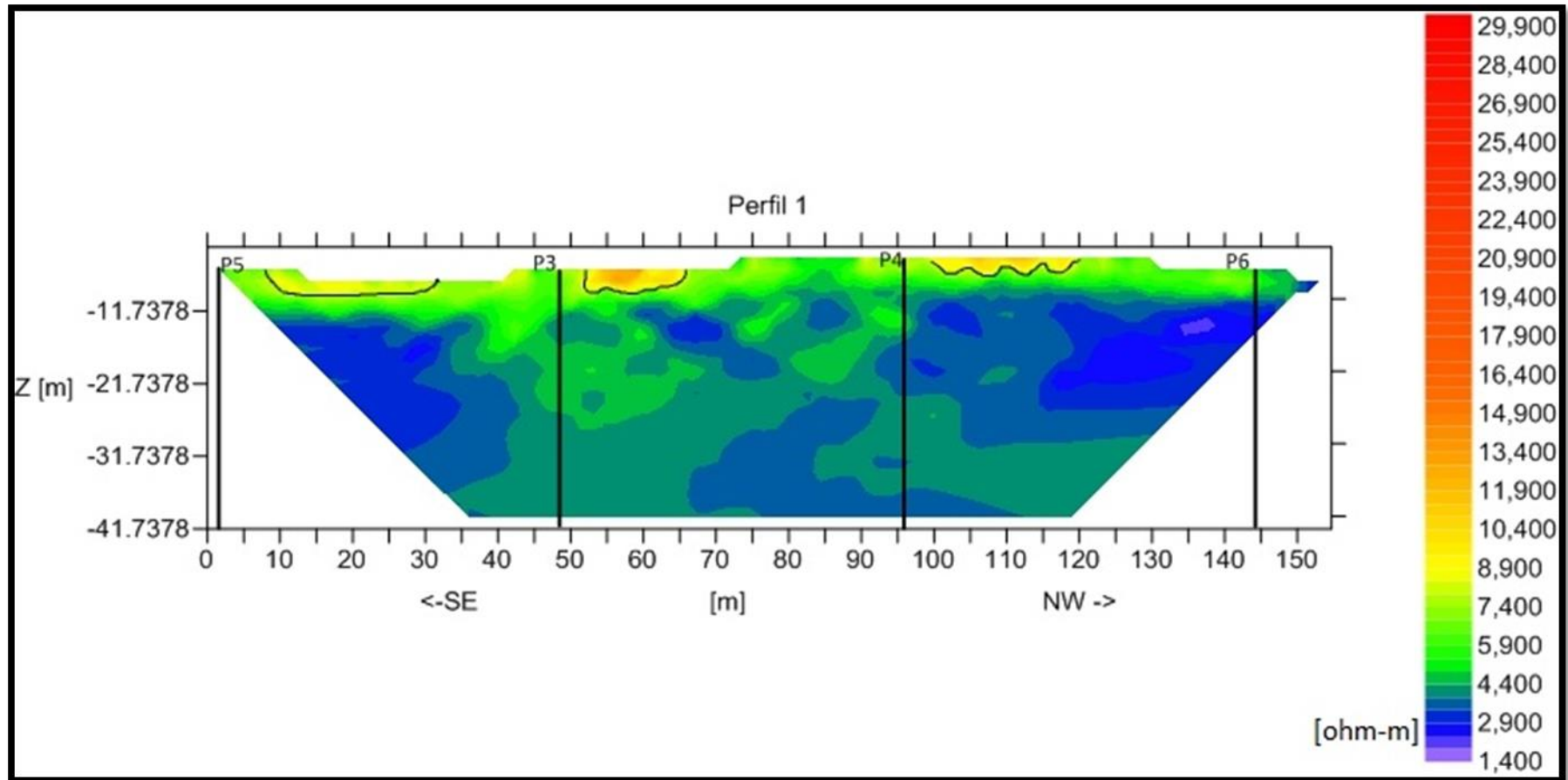


Figura 4.3 Perfil Geoelectrico 1

El perfil 1 tiene un valor de resistividad mínima de 2,200 ohm-m y un valor máximo de 13,000 ohm-m. En este perfil no se distingue el horizonte geoelectrico de los valores altos de resistividad, solo se observan 2 anomalías en la superficie. La primera entre los 55 y los 65 m sobre la horizontal, con un espesor de 3 m aproximadamente y valores de 10,000 a 13,000 ohm-m de resistividad, y la

segunda entre los 100 y los 120 *m* sobre la horizontal con un espesor de 2 *m* en promedio con valores de resistividad cercanos a los 10,000 ohm-*m*. Estas anomalías, con valores de resistividad relativamente más altos al resto del medio, están delimitadas con una línea. Se asume que estas anomalías son de roca Andesítica intemperizada de superficie.

El segundo Horizonte, el cual se asume marca la roca Andesítica, tiene una distribución de resistividades que van desde los 7,000 ohm-*m* en promedio con un espesor no mayor a los 4 o 5 metros.

La información de este perfil por debajo de este horizonte geoeléctrico es poco confiable, pues la distribución de los valores de resistividad es muy variables y no tienen una coherencia en la misma, por lo que la interpretación que se realiza es en base a la información geológica que se tiene de la zona.

Las líneas negras que cruzan verticalmente al perfil marcan la zona donde se intersecta con otros perfiles. El Perfil geoeléctrico 1 tiene intersección a los 0 *m* con el Perfil Geoeléctrico 5, a los 48 *m* con el Perfil Geoeléctrico 3, a los 96 *m* con el Perfil Geoeléctrico 4 y a los 144 *m* con el Perfil Geoeléctrico 6.

### 4.3. Perfil Geoelectrico 2

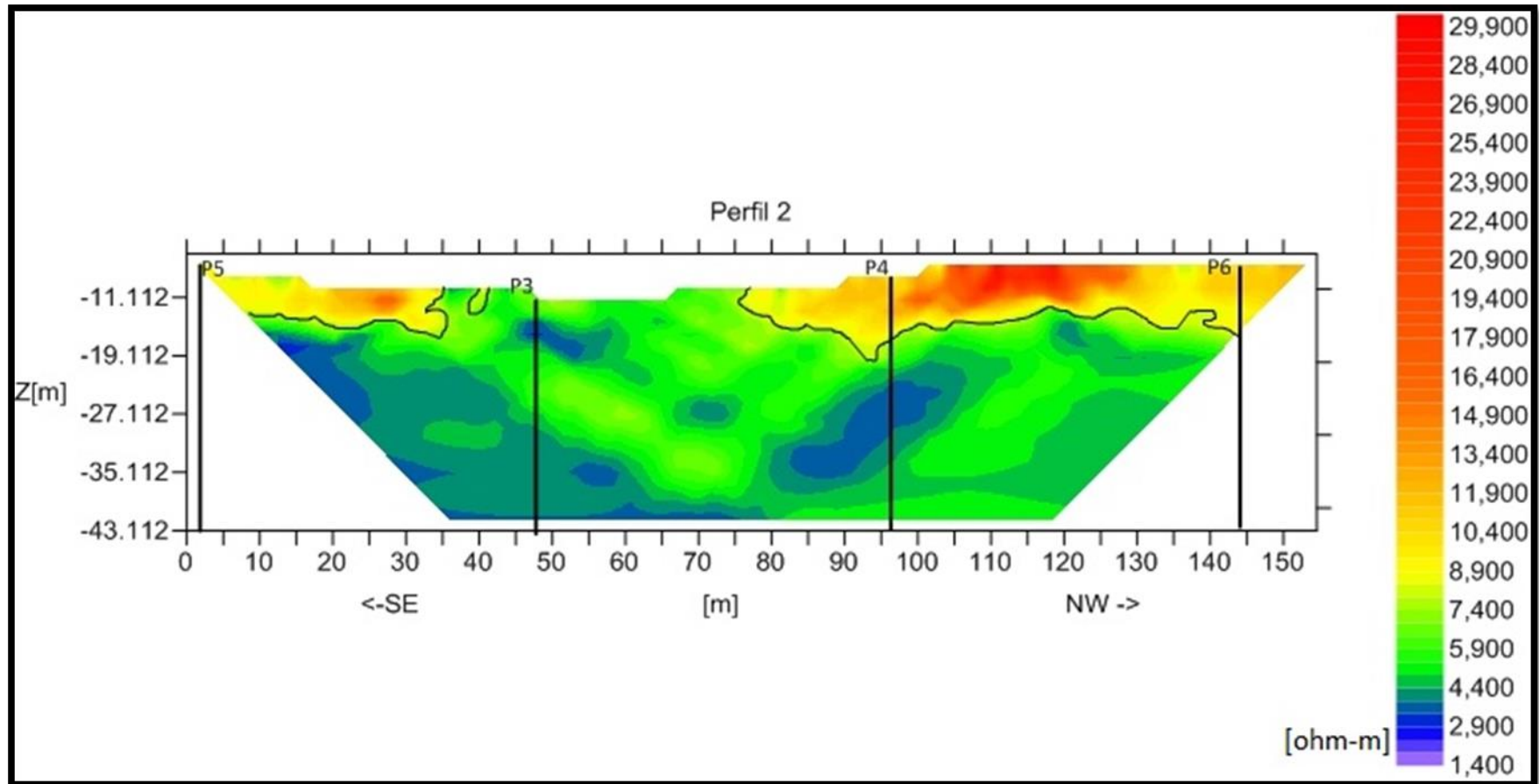


Figura 4.4 Perfil Geoelectrico 2

El perfil 2 tiene un valor de resistividad mínimo cercano a los 3,000 ohm-m y un valor máximo de 28,000 ohm-m. En este perfil se distingue el horizonte geoelectrico de valores altos de resistividad en 2 franjas, en las partes laterales y trunco en la parte central aunque más cargado al punto 0 del perfil (SE).

La primera franja del horizonte del lado izquierdo del perfil va desde los 0 hasta los 35 m sobre la horizontal llegando hasta los -14.5 m de profundidad con un promedio de 7 m de espesor. Tiene valores de resistividad que van desde los 9,000 hasta los 16,000 ohm-m. La segunda franja del horizonte geoeléctrico comienza a los 76 m sobre la horizontal y se extiende hasta el fin del perfil a los 155 m (SW), tienen un promedio de espesor de 7.5 m, llegando hasta -20 m de profundidad en algunos puntos y tiene valores de resistividad desde los 9,000 hasta los 27,000 ohm-m, los valores extremos altos de resistividad se encuentran pegados a la superficie entre los 105 y los 120 m aproximadamente, sobre la horizontal. Se asume que este primer horizonte, en específico las resistividades con valores muy altos es decir los colores naranjas y rojos en el perfil, definen un límite entre de la capa de ceniza y roca suelta, con la roca volcánica bien consolidada, mientras que los colores amarillos se asume que es la roca Andesítica que aflora en superficie, es decir roca expuesta a intemperismo y erosión.

El segundo Horizonte, el cual se asume marca la roca Andesítica consolidada y sin intemperismo, está por debajo de las franjas del primer horizonte y en la parte central del perfil (de los 40 a los 75 m en la horizontal) tiene una distribución de resistividades entre los 7,000 y 4,000 ohm-m en algunas zonas.

La información de este perfil por debajo de este horizonte geoeléctrico, en el cual no se define su profundidad debido a que la distribución de valores de resistividades es muy variable y poco coherente, por lo tanto la información es poco confiable, lo que la interpretación que se realiza es en base a la información geológica que se tiene de la zona.

Este perfil alcanza una profundidad de -43 m, siendo el punto más bajo de todo estudio, aunque no el de mayor profundidad, pues con referencia al punto inicial marcado en los perfiles Geoeléctricos 0 y 5, el perfil 2 comienza a los -7.5 m.

Las líneas negras que cruzan verticalmente al perfil marcan la zona donde se intersecta con otros perfiles. El Perfil geoeléctrico 2 tiene intersección a los 0 m con el Perfil Geoeléctrico 5, a los 48 m con el Perfil Geoeléctrico 3, a los 96 m con el Perfil Geoeléctrico 4 y a los 144 m con el Perfil Geoeléctrico 6.

#### 4.4. Perfil Geoelectrico 3

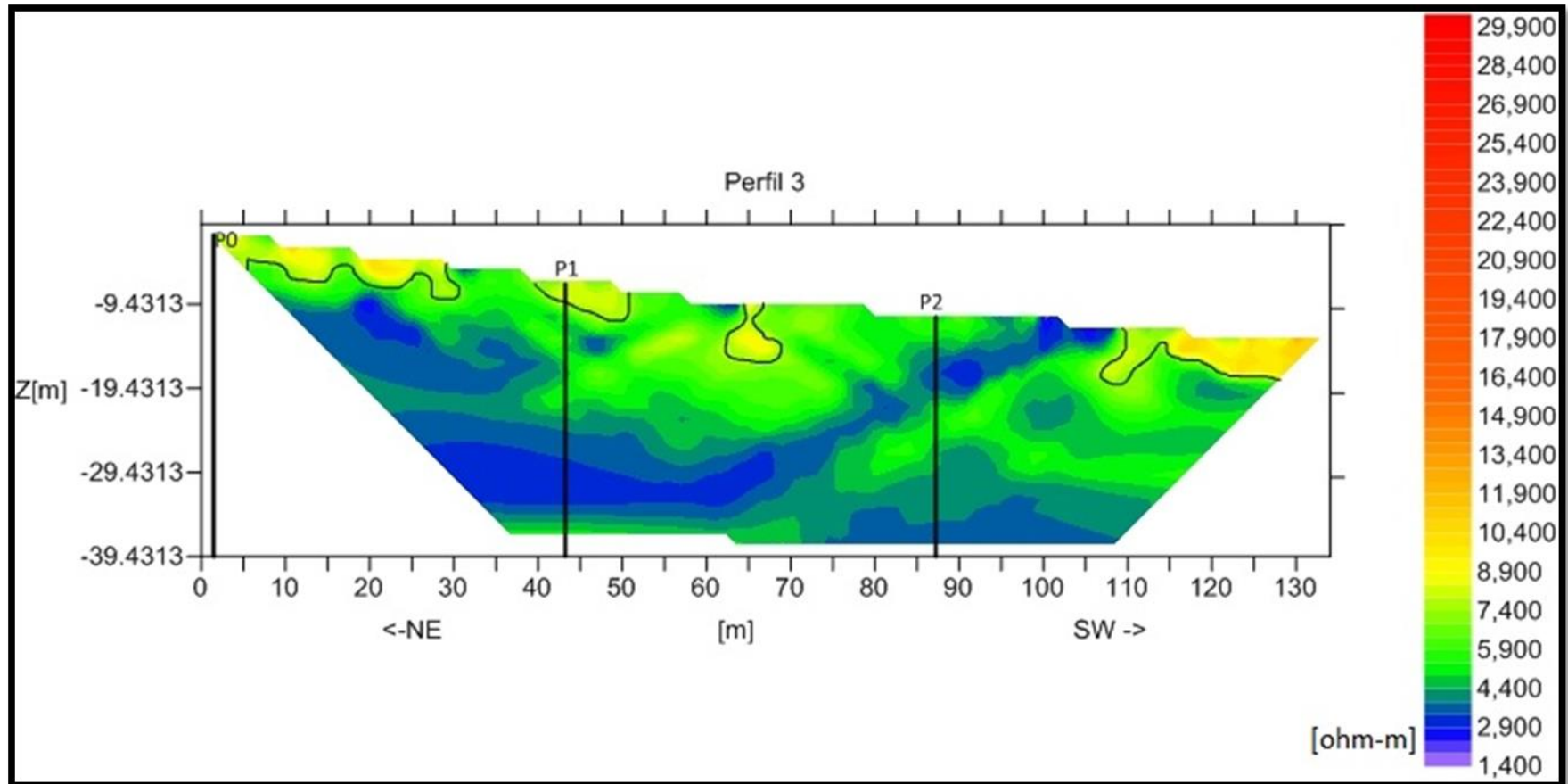


Figura 4.5 Perfil Geoelectrico 3

El perfil 3 tiene un valor de resistividad mínimo cercana a 3,000 ohm-m y un valor máximo de 10,000 ohm-m. En este perfil no se distingue el primer horizonte geoelectrico, solo se observan varias anomalías pegadas a la superficie con valores solo un poco más altos que el resto de la distribución. La anomalía más notable se encuentra en los últimos 20 m del perfil sobre la horizontal, con un

espesor de 4 *m* en promedio y valores no mayores a 10,000 ohm-*m* de resistividad. Las otras anomalías presentan valores muy similares y solo contrastan en color con el resto de la distribución en el perfil. Estas anomalías, con valores de resistividad relativamente más altos al resto del medio, están delimitadas con una línea. Se asume que estas anomalías son parte de roca Andesítica intemperizada por estar cerca de superficie, aunque en este caso los valores de resistividad en superficie, en su mayoría, son cercanos a los 6,000 ohm-*m*.

La distribución de resistividades en el perfil son valores que tienden cerca de los 6,000 y 7,000 ohm-*m*, formando el segundo horizonte geoelectrico, el cual se asume marca la roca Andesítica, con un espesor de 5 *m* en los primeros metros del perfil (NE) y aumenta hasta un espesor de hasta 14 *m* entre los 40 y los 80 *m* sobre la horizontal.

Los valores de resistividad por debajo de este horizonte, tienen una distribución poco coherente y una distribución muy variable, por lo que no son confiables. Así que la interpretación que se realizó es en base a la información que se tiene de la geología del lugar.

Las líneas negras que cruzan verticalmente al perfil marcan la zona donde se intersecta con otros perfiles. El Perfil geoelectrico 3 tiene intersección a los 0 *m* con el Perfil Geoelectrico 0, a los 44 *m* con el Perfil Geoelectrico 1, a los 86 *m* con el Perfil Geoelectrico 2.

#### 4.5. Perfil Geoelectrico 4

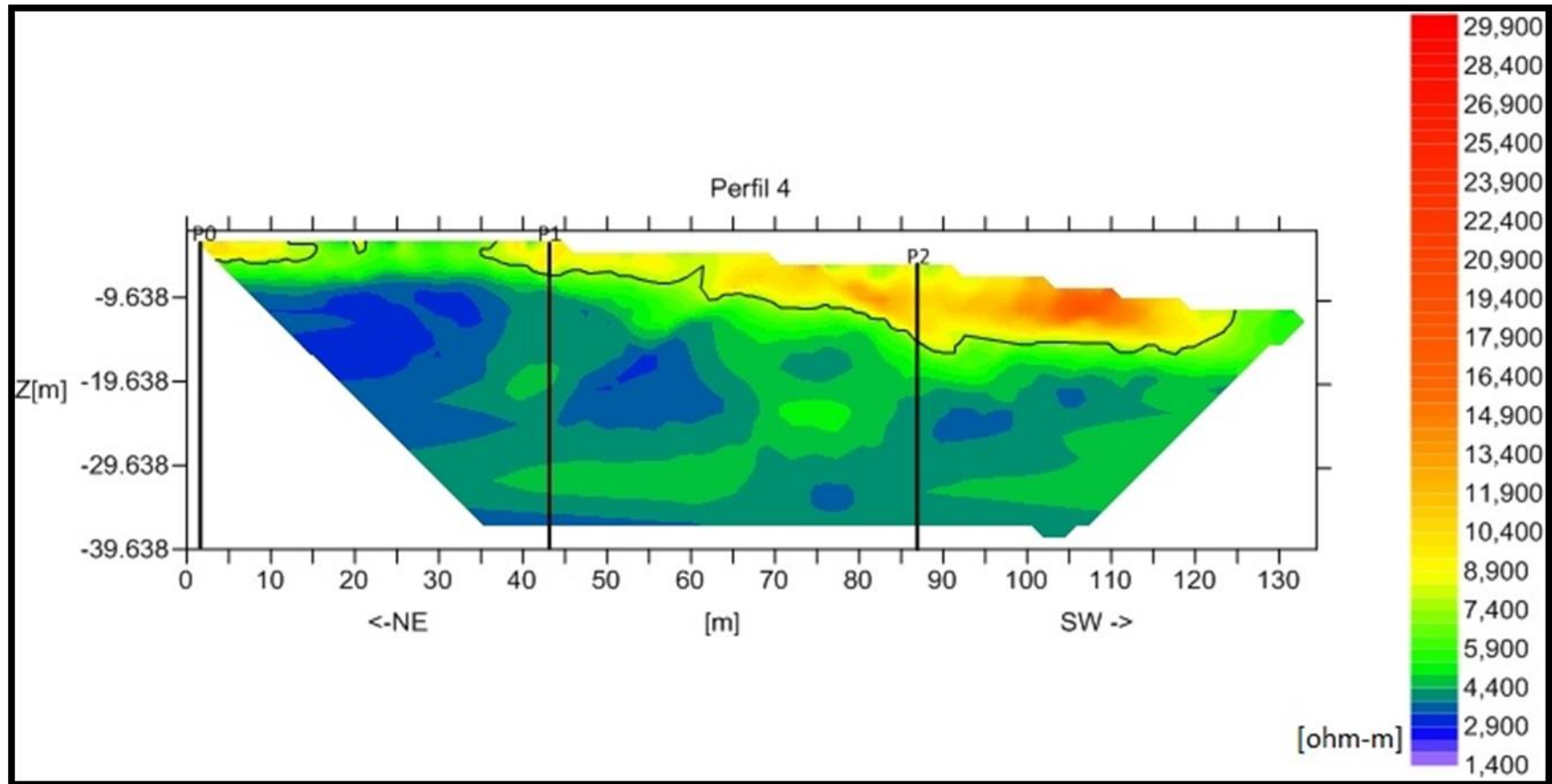


Figura 4.6 Perfil Geoelectrico 4

El perfil 4 tiene un valor de resistividad mínima de 3,000 ohm-m y un valor máximo de 20,000 ohm-m. En este perfil se distingue un horizonte geoelectrico sobre casi toda la superficie, con un espesor discontinuo que se hace mayor conforme decae la topografía del terreno hacia el SW, delimitado con una línea.

Existe una pequeña franja del horizonte geoelectrico los primeros 15 m del perfil al (NE) con valores de resistividad alrededor de los 9,000 ohm-m y un espesor de 2 m, la franja más notable del horizonte va desde los 35 a los 125 m sobre la horizontal, con un espesor de 3 m en promedio los primeros 25 m de la franja, y de 6 m el resto de la misma. En este horizonte encontramos valores de resistividad entre los 8,000 y 10,000 ohm-m en su mayoría, salvo por una anomalía con valores mayores a los 16,000 y hasta 20,000 ohm-m, entre los 100 y los 112 m de la horizontal pegados a la superficie. Se asume que esta anomalía es parte de la capa de ceniza y roca suelta que se sobrepone a la roca Andesítica.

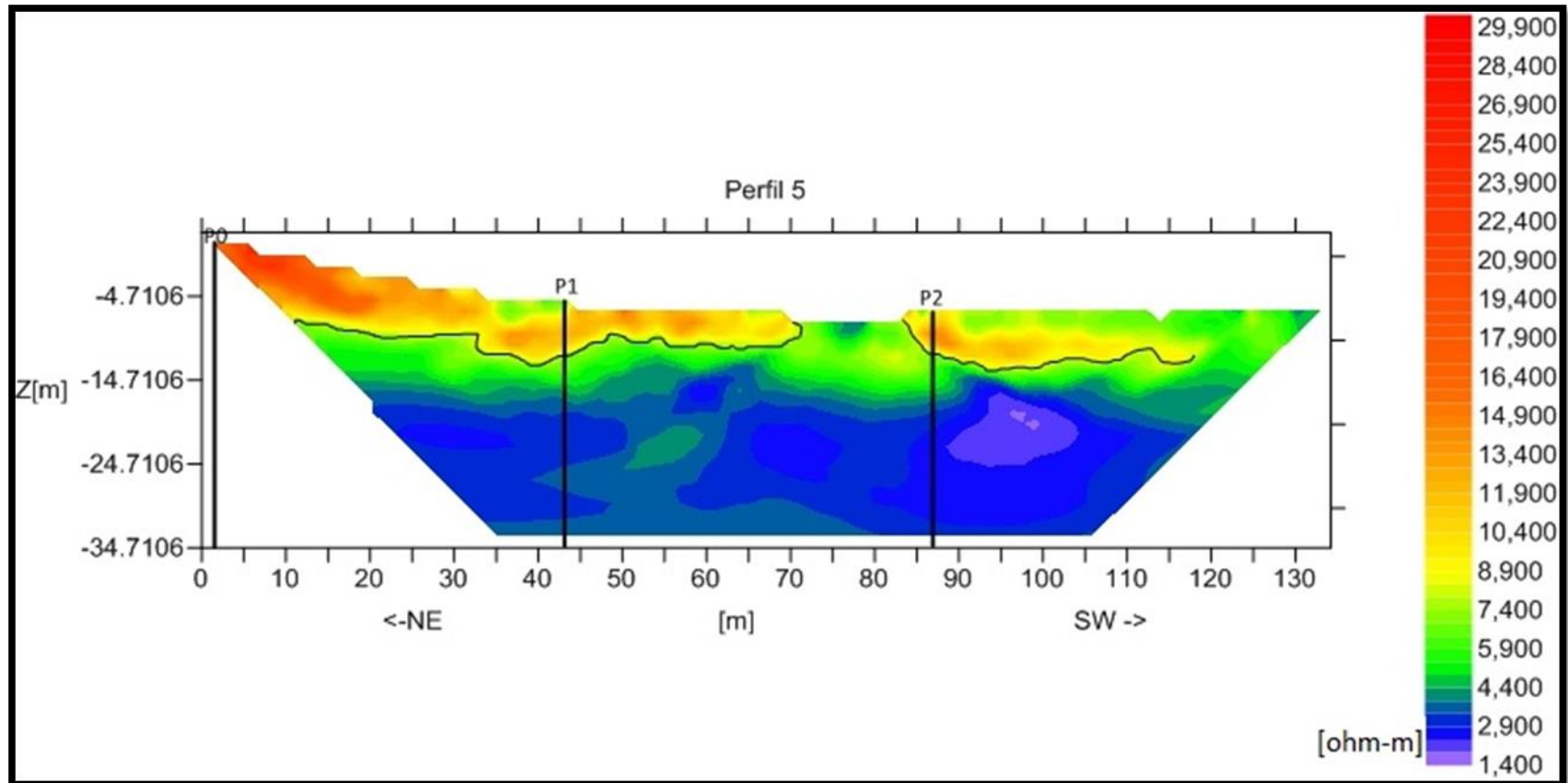
Por debajo de este horizonte observamos valores de resistividad cercanos a los 6,000 y 7,000 ohm-m que forman un segundo horizonte a lo largo de todo el perfil con un espesor promedio de 3 m y que de igual manera sigue la topografía en superficie. Este horizonte se asocia con la roca Andesítica en superficie intemperizada.

Por debajo de este nivel la distribución de los valores resistivos se encuentra en un rango de los 3,000 a los 5,000 ohm-m, encontrando su valor más bajo en una anomalía entre los 15 y los 30 m sobre la horizontal y hasta los casi -20 m de profundidad. Estos valores de resistividad junto con su distribución ya es muy variable, por lo que son poco confiables, por lo tanto la interpretación se realiza con la información geológica que se tiene de la zona.

Las líneas negras que cruzan verticalmente al perfil marcan la zona donde se intersecta con otros perfiles. El Perfil geoelectrico 4 tiene intersección a los 0 m con el Perfil Geoelectrico 0, a los 44 m con el Perfil Geoelectrico 1, a los 86 m con el Perfil Geoelectrico

2.

#### 4.6. Perfil Geoelectrico 5



Fi

gura 4.7 Perfil Geoelectrico 5

El perfil 5 tiene un valor de resistividad mínima de 1,800 ohm-m y un valor máximo cercano los 22,000 ohm-m. En este perfil se distingue un horizonte geoelectrico, delimitado por una línea, con los valores más altos de resistividad al principio de este, cercano a la superficie, con un espesor discontinuo debido a la topografía del lugar, pero con un límite a los -13 m de profundidad aproximadamente.

La franja de este horizonte se desplaza hasta los 70 *m* sobre la horizontal disminuyendo su espesor conforme avanza, tiene valores de resistividad cercanos a los 10,000 ohm-m en promedio, con excepción del pico donde inicial, en donde encontramos valores de resistividad superiores a los 18,000 y hasta los 22,000 ohm-m. Después de esta franja, el horizonte de valores altos de resistividad se distingue a los 80 y hasta los 120 *m* sobre la horizontal, con valores alrededor de los 10,000 ohm-m aunque por debajo de la superficie. Se asume que estas anomalías son parte de la capa de ceniza y roca suelta que se sobrepone a la roca Andesítica.

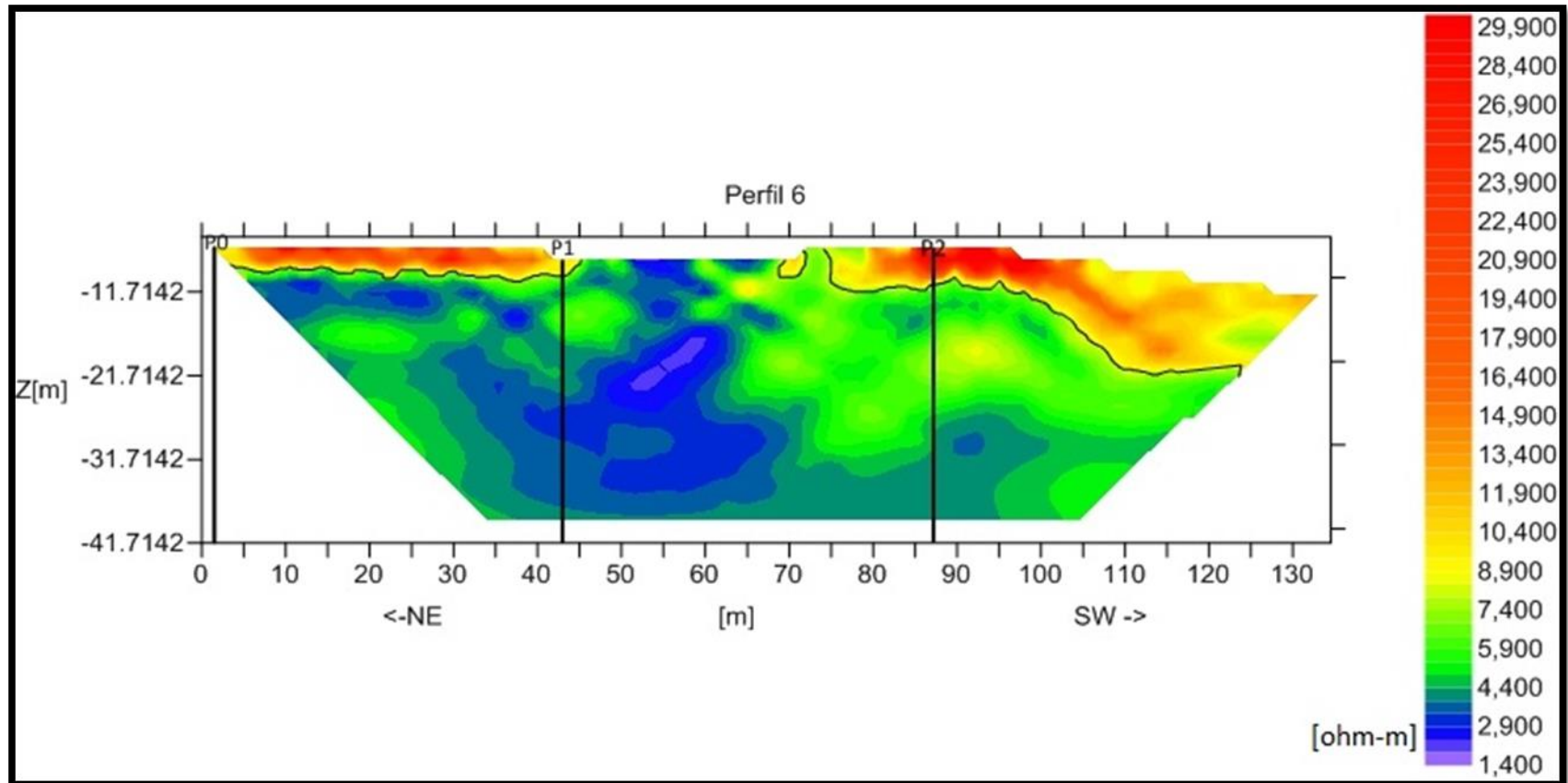
Un segundo horizonte geoelectrico se distingue por debajo del anterior, este con valores de resistividad entre los 5,000 y los 7,000 ohm-m con un límite a los -16 *m* de profundidad en promedio y con un espesor de 5 metros. En la parte SW del perfil este horizonte envuelve al primero, siendo este el que está en contacto con la superficie. Este horizonte se asocia con la roca Andesítica en superficie intemperizada.

Por debajo de este segundo horizonte la distribución de los valores resistivos se encuentra en un rango de los 2,000 a los 4,000 ohm-m, encontrando su valor más bajo en una anomalía entre los 90 y los 100 *m* sobre la horizontal y hasta los casi -20 *m* de profundidad, siendo una anomalía muy pequeña para ser notada.

Las líneas negras que cruzan verticalmente al perfil marcan la zona donde se intersecta con otros perfiles. El Perfil geoelectrico 5 tiene intersección a los 0 *m* con el Perfil Geoelectrico 0, a los 44 *m* con el Perfil Geoelectrico 1, a los 86 *m* con el Perfil Geoelectrico 2.

Cabe mencionar que este perfil tiene el punto más alto del terreno, a los 0 *m* en la horizontal, que se consideró como la coordenada (0, 0, 0) para la representación gráfica Pseudo 3D, y que también es origen para el Perfil Geoelectrico 0.

#### 4.7. Perfil Geoelectrico 6



Fi

gura 4.8 Perfil Geoelectrico 6.

El perfil 6 tiene valores de resistividad mínimo cercanos a los 2,000 ohm-m y valores máximos cercanos a los 30,000 ohm-. En este perfil el horizonte geoelectrico, delimitado con una línea, con los valores más altos de resistividades muy variado y está dividido en 2 franjas, una al principio del perfil y una en los últimos metros, dejando la zona central del perfil con valores de resistividad más parecidos a los del segundo y tercer horizonte.

La primera franja se extiende desde el inicio del perfil y hasta los 45 *m* de la horizontal, con un espesor de 2.5 *m* en promedio y con valores entre los 15,000 y los 22,000 ohm-*m*, con los más altos pegados a superficie. La segunda franja comienza a los 75 *m* y se extiende hasta los 130 *m* sobre la horizontal, con un espesor que, hasta los 95 *m*, es uniforme y después de este punto el espesor se hace mayor conforme decae la topografía hacia el SW, con un espesor máximo de 12 metros de profundidad, justo a los 110 *m* sobre la horizontal. Esta segunda franja del horizonte geoeléctrico los valores de resistividad van desde los 10,000 hasta valores más altos cercanos a los 30,000 ohm-*m* estos principalmente entre los 80 y los 100 *m* del perfil pegados a la superficie.

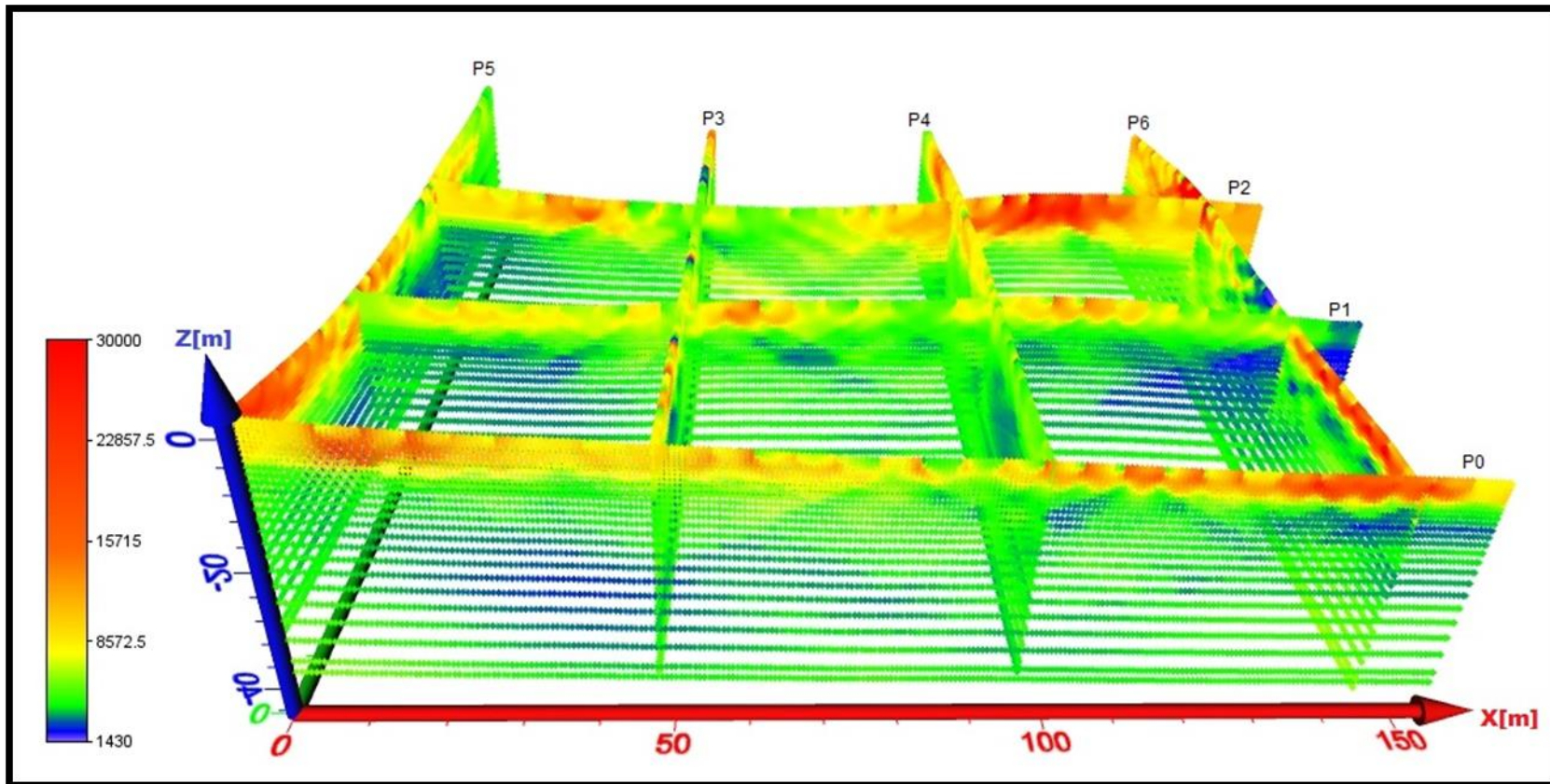
En este perfil no se puede distinguir tan detalladamente el segundo horizonte, aquí los valores de resistividad entre los 5,000 y los 7,000 ohm-*m* (anomalías de color verde) crean un pequeño horizonte de 2 *m* de espesor por debajo de la franja del primer horizonte lado izquierdo del perfil (NE), el resto de las anomalías están dispersas en este lado del perfil, mezclados con los valores más bajos de hasta 2,000 ohm-*m*, los cuales sobresalen entre los 40 y los 65 *m* sobre la horizontal sobre toda la profundidad del perfil. Del lado derecho del perfil (SW) este horizonte tiene un mayor espesor dispuestos hasta los -31 *m* de profundidad subyacente al primer horizonte.

Los valores de resistividad por debajo de los -15 *m* sobre la vertical, junto con su distribución ya es muy variable, por lo que son poco confiables, por lo tanto la interpretación se realiza con la información geológica que se tiene de la zona.

Las líneas negras que cruzan verticalmente al perfil marcan la zona donde se intersecta con otros perfiles. El Perfil geoeléctrico 6 tiene intersección a los 0 *m* con el Perfil Geoeléctrico 0, a los 44 *m* con el Perfil Geoeléctrico 1, a los 86 *m* con el Perfil Geoeléctrico 2.

#### 4.8. Imagen Psedo 3D

Con el software Voxler 3, se creó una imagen con los 7 perfiles, en los cuales varían sus coordenadas en X y Y formando una imagen Pseudo 3D, en la cual podemos observar la distribución espacial así como las intersecciones entre los perfiles. En la imagen 4.8 podemos observar dichas intersecciones entre los 7 perfiles individuales, del lado derecho de la imagen, a los 0 m del eje Z, tenemos la coordenada (0, 0, 0) del estudio, que también es la intersección del perfil0 y del perfil5.



Fig

ura 4.9 imagen Psedo 3D de los perfiles Geoeléctricos

También se puede observar como en cada intersección hay coincidencia entre los valores de resistividad excepto un poco con las intersecciones del perfil1 con los perfiles, 5 y 6.

El eje rojo, que va de Sureste a Noroeste, es el que indica dirección X para este estudio; el eje verde, que va de Noreste a Suroeste, es el que indica la dirección Y; y el eje azul indica la profundidad de los perfiles. (Figura 4.9)

Como se mencionó en el inciso 4, la escala de colores que se utilizó para destacar los valores de resistividad es una escala arcoiris, en donde los colores azules (colores fríos) indican valores de resistividades más bajos, mientras que los colores rojos y naranjas (colores cálidos) indican valores de resistividad más altos. Esta escala tiene un rango de resistividades desde los 1430 ohm-m hasta los 30,000 ohm-m predominando los valores entre los 4,000 y los 7,000 ohm-m en la mayor parte de la imagen.

La parte superior del perfil, pegado a superficie tienen valores de resistividad por encima de los 10,000 ohm-m y en algunos puntos llegan hasta los 30,000 ohm-m, estos valores tan altos y disparados de resistividad se deben a que, la roca suelta Andesítica y la capa de arena (ceniza) que se encuentra en superficie, tienen mucho espacio entre sus partículas en el cual no hay nada más que aire, el cual presenta una alta resistencia al paso de la corriente eléctrica. En la imagen podemos observar estas anomalías en colores rojos, naranjas.

El color amarillo en la imagen presenta valores cercanos a los 10,000 ohm-m pero no superiores, lo cual nos sugiere una capa de roca andesítica intemperizada y desgastada, lo cual deja espacios entre la roca que hacen que los valores de resistividad aumenten.

Por debajo de este horizonte, delimitado con una línea en los perfiles individuales presentados anteriormente, tenemos un horizonte que predomina en todos los perfiles, es un horizonte con valores de resistividad entre los 4,000 y los 7,000 ohm-m en colores verdes, que se asocia con la roca volcánica más joven de la zona, que es roca andesita de anfíbola que da estructura al Volcán Sierra Negra, y en algunas zonas de los perfiles se presentan anomalías en colores azules con valores de resistividad mayores a los 1,400 Y menores a los 3,000 ohm-m que se asocian a la misma roca.

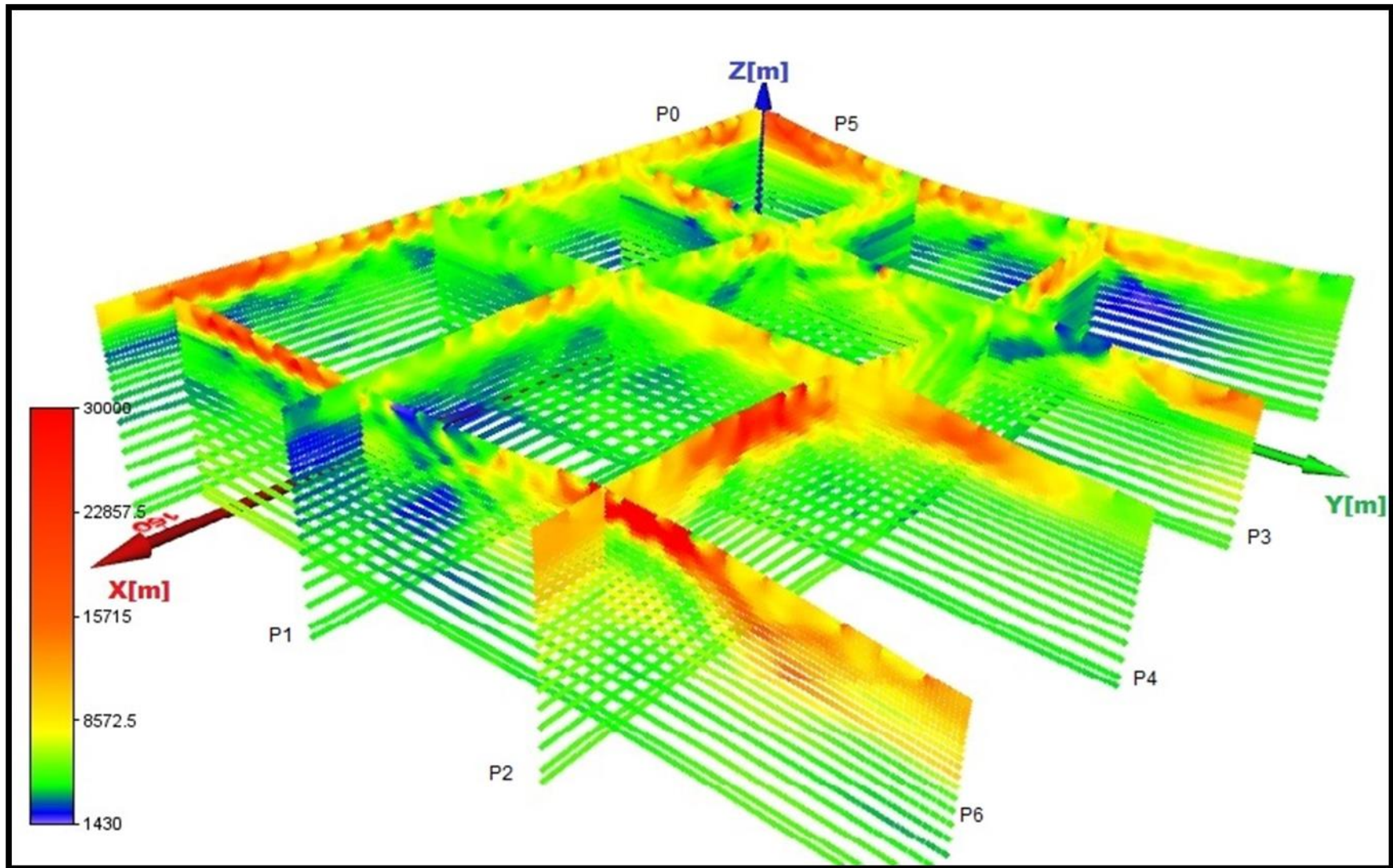


Figura 4.10 Imagen Pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos vista de los 3 ejes.

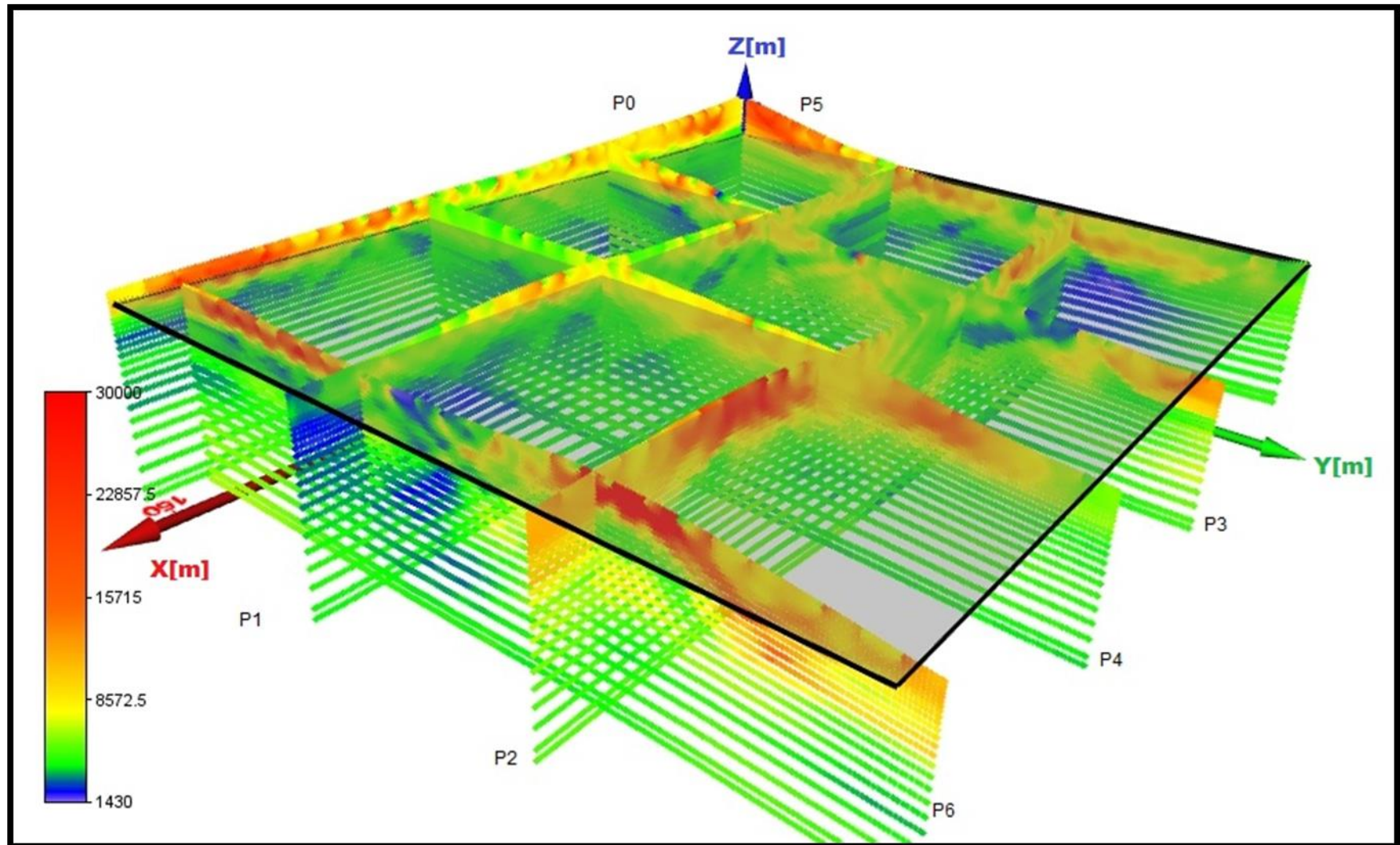


Figura 4.11 Imagen Pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos con el plano de intersección a los -5.41 m.

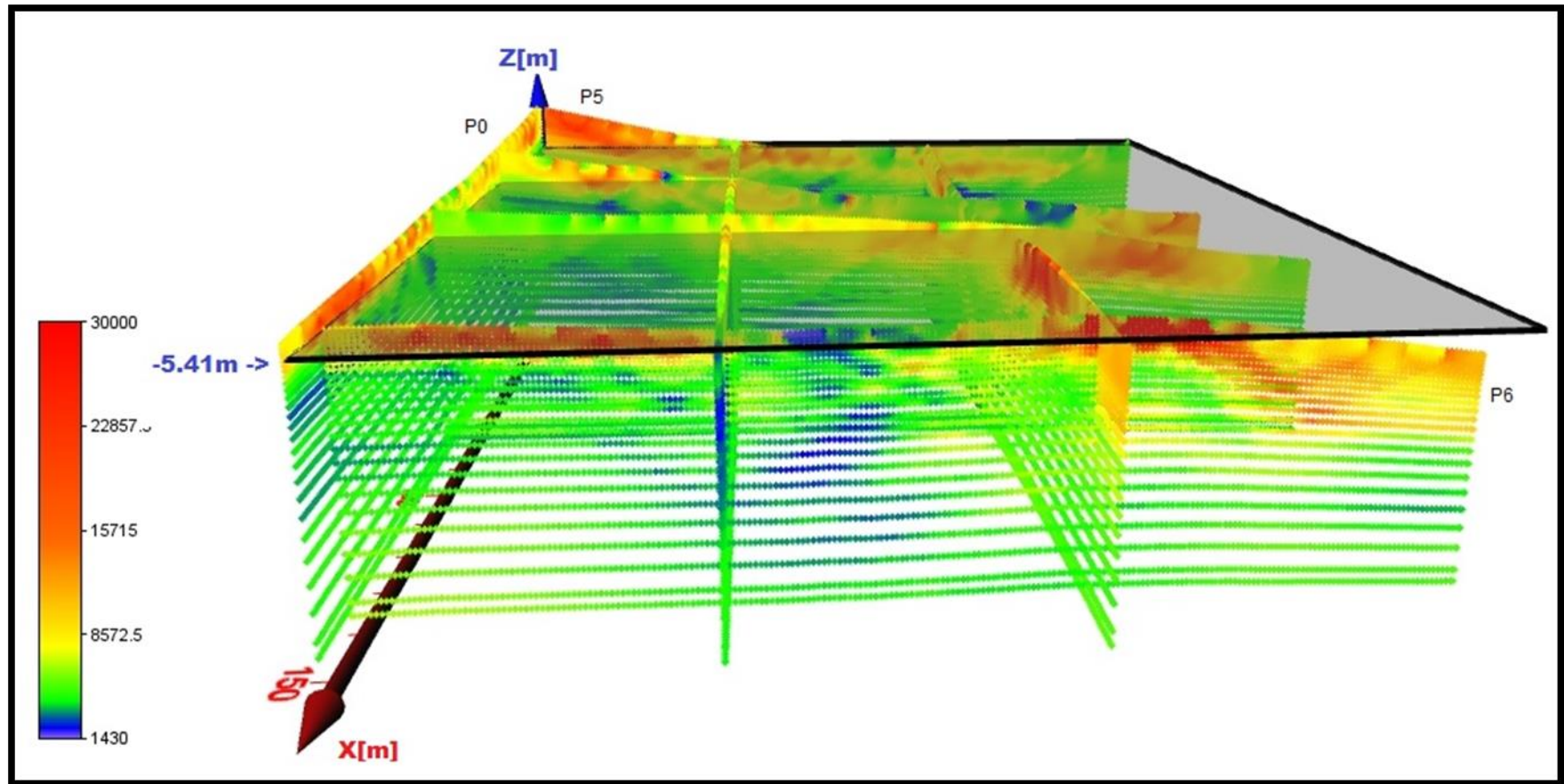


Figura 4.12 Imagen Pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos con el plano de intersección, vista al Noreste.

En la imagen 4.10 y 4.11 tenemos la imagen pseudo 3D de los perfiles Geoeléctricos con el plano de intersección a  $-5.41\text{ m}$  de profundidad a partir de la coordenada (0, 0, 0) que es la intersección de los perfiles 0 y 5.

Este plano está calculado, de manera teórica, de acuerdo a la necesidad de una pendiente del 2 % en la zona designada para el aplazamiento de la infraestructura. En coordenadas UTM este plano tiene una altura de  $4,098.6\text{ m}$  sobre el nivel del mar. Todo el material por encima de este plano es removido y se rellenan las zonas por debajo del mismo plano en donde no existe material para tener un terreno semiplano para la infraestructura del observatorio HAWC.

Este plano también sirve para delimitar de manera gráfica el horizonte geoeléctrico de valores de resistividad altos, o al menos intentar delimitarlos de una manera poco gráfica pues debido a la topografía del lugar es complicado delimitarlo con un solo plano.

Para esta imagen también se calcularon varios planos más a cada  $5\text{ m}$  por debajo de este primer plano, es decir a los  $-10.41$ ,  $-15.41\text{ m}$  de profundidad, etc. etc.

## 5. Conclusiones y comentarios

La Tomografía de Resistividad eléctrica 2D y 3D tiene una fuerte aplicación en diversos problemas de ingeniería, muy especialmente en los relacionados a la geotecnia, ya que el valor de resistividad es un valor que permite diferenciar cambios en el subsuelo.

En la geotecnia es indispensable identificar las principales estructuras en los primeros metros del subsuelo, para lo cual la TRE tiene un buen alcance y es bastante efectiva.

En el presente trabajo el estudio geotécnico permitió revelar la disposición de las primeras capas resistivas del medio, encontrando el límite de la capa de arena (ceniza y roca suelta) y la roca andesítica de anfíbola que es la base del volcán Sierra Negra. La capa de arena que se encuentra en la superficie presenta valores de resistividad muy altos, superiores a los 18,000 ohm-m y en ciertas zonas llega hasta los 30,000 ohm-m, estos altos valores se deben a la alta porosidad y la poca consolidación de la arena.

En los 7 perfiles se presenta este horizonte geoelectrico pegado a la superficie, aunque en los perfiles 1 y 3, los cuales son perpendiculares entre si y se intersectan a los 44 m sobre el eje X, dirección SE-NW y a los 48 m sobre el eje Y dirección NE-SW, solo se presentan anomalías con valores relativamente más altos al promedio de los perfiles (7,500 ohm-m), de igual manera pegadas a superficie.

Este horizonte geoelectrico es variable en los 7 perfiles como ya se menciona, en espesor y extensión. En general la pendiente del terreno decae al Oeste aunque es más notable el declive al SW de la zona de estudio. En los perfiles 2, 4 y 6 hay un notorio aumento en el espesor de la capa de arena conforme decae la topografía del terreno, es decir en los últimos metros de cada perfil, contrastante a la zona al sur del terreno donde el espesor de dicha capa es más constante, esto se puede observar muy bien en el perfil 0, y en los primeros metros de los perfiles 5 y 6, que coincidentemente son los perfiles extremos del estudio.

Esta desigualdad de la presencia del horizonte geoelectrico en los 7 perfiles, así como la variación de espesor de la capa de arena a lo largo de la zona de estudio nos indica la heterogeneidad del terreno, por lo cual era necesario el estudio geotécnico.

En 6 de los 7 perfiles realizados, por debajo del segundo horizonte geoelectrico, se observa que los valores de resistividad disminuyen y su distribución comienza a ser muy variable, por lo tanto deja de tener una coherencia de distribución en relaciona la geología de la zona. Se asume que por la naturaleza del terreno, la alta porosidad en la

capa superficial de arena (ceniza), y dureza de la roca en la cual se realizó el estudio, la energía eléctrica no penetra lo suficiente para dar una información confiable del subsuelo, por lo que solo se considera correcta la información de los primeros 10 a 15 metros por debajo de la línea superficial.

A pesar de esto, el objetivo del estudio se cumple, pues se requería solo determinar el horizonte marcado por la primera capa de arena en la zona, y con la información de valores de resistividad y distribución de los primeros metros del subsuelo se puede correlacionar de manera correcta con la geología conocida de la zona de estudio.

Para nivelar el terreno a la pendiente necesaria que se pueda aplazar la infraestructura del observatorio, es decir los 300 tanques, es necesario tener un terreno estable, por lo cual aplazarlos sobre la capa de arena no es recomendable, con los resultados del estudio se conoce el límite de esta capa y se puede realizar los trabajos necesarios para el aplazamiento de la infraestructura del observatorio.

Se sugiere remover esta capa de arena en la parte más alta del terreno que es la intersección de los perfiles 0 y 5, así como en las zonas bajas hasta llegar a la roca mejor consolidada, la roca andesítica, y sobre esta roca obtener la pendiente necesaria para los tanques.

## Bibliografía

### Libros

- ❖ Kaufman, A, 1992, **Geophysical field theory and method**, Academic Press New York 412 p.
- ❖ Koefed, O., 1979, **Geosounding Principles 1: Resistivity sounding measurements**, Elsevier Science Publishing Company, Amsterdam.
- ❖ Orellana Silva E., 1982, **Prospección geoeléctrica en corriente continua**, Editorial Paraninfo, 578 p.
- ❖ Telford, W.M, 1990, **Applied Geophysics**, Cambridge University Press, 771 p.
- ❖ Urbietta Gómez, Javier, 2001, **La tomografía eléctrica en los métodos de corrientes continua**, Tesis de licenciatura Facultad de Ingeniería UNAM, pp. 20-35.
- ❖ Yarza De la Torre, Esperanza, 1992, **Volcanes de México**, Instituto de Geografía, pp. 90-94.

### Artículos y Publicaciones

- ❖ Aizebeokhai, Ahzegbobor Philips, 2010, **2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design**, Scientific Research and Essays Vol. 5(23), pp. 3592-3605.
- ❖ Barker, R. D., 1989, **Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays**, Geophysics VOL. 54, pp. 1031-1037.
- ❖ Butler, Dwain K., 2005, **Near-Surface Geophysics**, SEG, 732p.
- ❖ Carrasco Núñez, Gerardo, 2000, **Structure and proximal Stratigraphy of Citlaltépetl Volcano (Pico de Orizaba)**, México Geological Society of America Special Papers Vol.334, pp. 247-262.
- ❖ Edwards, R.N., 1997, **A modified pseudosection for resistivity and induced polarization**, Geophysics, 42, pp. 1020-1036.

- ❖ Evjen, H. M., 1938, **Depth Factor and resolving power of electrical measurements**, Geophysical, 3, pp. 78-95.
- ❖ Locke, M. H., 1996-2012, **Tutorial: 2-D and 3D electrical imaging surveys**, 161 p.
- ❖ Macías, José Luis, 2005, **Geología e historia eruptiva de algunos de los Grandes Volcanes activos de México**, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario Temas Selectos de la Geología Mexicana, Tomo LVII, núm. 3, pp. 379-424.
- ❖ Mcgillivray P. R., Oldenburg D. W., 1990, **Methods for calculating Frechet derivatives and sensitivities for the non-linear inverse problem: A comparative study**, Geophysical Prospecting, 38, pp. 499-524.
- ❖ Oldenburg, Douglas. W., 1978, **The Interpretation of direct Current Resistivity Measurements**, Geophysics VOL 43, pp. 610-625.
- ❖ Oldenburg, D. W., 1978, **A quantitative technique for modeling ionospheric and magnetospheric current distributions**, Journal of Geophysical research, volume 83, pp. 3320-3326.
- ❖ Oldenburg, Douglas W., 1974, **The Inversion and Interpretation of Gravity Anomalies**, Geophysics VOL 39, pp. 526-536.
- ❖ Waitz, Paul, 1910, **Observaciones Geológicas acerca del Pico de Orizaba**, boletín de la sociedad Geológica de México, vol.VII, pp. 67-81.

### Consultas Digitales

- ❖ <http://www.inegi.org.mx/> Sección Geografía, Topografía, Compendio de Información Geográfica Municipal. Prontuario de información geográfica municipal de los Estados Unidos Mexicanos, Atzitzintla, Puebla, Clave geo estadística 21023, 2009, pp 9.
- ❖ <http://www.agiusa.com/agi2dimg.shtml>  
Advanced Geociencies Inc.
- ❖ <http://www.hawc-observatory.org/observatory/tanks.php>  
Water Cherenkov Tanks

- ❖ <http://www.hawc-observatory.org/observatory/layout.php>  
Layout of the HAWC Observatory
- ❖ <http://www.goldensoftware.com/>  
Voxler 3 y Surfer 10
- ❖ <http://geotechnical-eng.blogspot.mx/2011/12/la-tomografia-electrica-en-la-geotecnia.html>  
La Tomografía Eléctrica en la Geotecnia | Roberth Aguilar Chuquimuni, 2011,  
Geotechnical Earthquake Engineering

### Manuales

- ❖ EarthImager 2D Manual, 2002-2009, Version 2.4.0 Resistivity and IP Inversion Software, p. 139.
- ❖ Surfer 10 Full User's Guide, Golden Software, Inc. 2012
- ❖ SYSCAL Pro resistivity & IP equipment for SOUNDING, IMAGING and MONITORING
- ❖ Voxler 3 Full user's Guide, Golden Software, Inc. 2012

## **ANEXOS**