

Introducción

La Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL, 2005) en su publicación, *“El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso”*, define al riesgo como: «El resultado de la interacción de tres factores: peligro, vulnerabilidad y exposición. Esta interacción determina la generación de daños o pérdidas tanto económicas, físicas, sociales o ambientales en ciertos sectores de la sociedad».

De acuerdo a lo anterior, definimos un sitio con riesgo como aquel en donde se conoce el peligro, la vulnerabilidad y su exposición ante un fenómeno perturbador, por lo que se esperan daños, pérdidas económicas, físicas, sociales y ambientales.

La Secretaría de Protección Civil del Distrito Federal (SPC, 2014) definió 20 sitios con riesgo por fenómenos de remoción en masa, hundimiento, fracturamiento y minas, en los cuales se deben realizar estudios de las condiciones y características del subsuelo por medio de tomografías eléctricas. Uno de esos sitios es la Unidad Habitacional, UH Linda vista (definido así por la SPC) en peligro por los fenómenos de hundimiento y fracturamiento, objeto del presente informe.

Antecedentes de la Secretaría de Protección Civil (SPC)

La SPC describe al fenómeno «Es un conjunto de edificios de departamentos con una edad de 42 años, de planta rectangular, están construidas, estructurados con muros de carga y losas macizas de concreto armado. . En ella se identificaron una serie de viviendas con diversos grados de daño, asociados al hundimiento regional, que en dicha zona registra una acumulación de 0 a 2 m ».

Objetivo general

Conocer las características y condiciones en que se encuentran los materiales en el subsuelo del sitio con riesgo colonia Unidad Habitacional Lindavista, por medio de métodos indirectos (tomografía eléctrica).

Objetivo específico

Realizar una imagen resistiva que cruce perpendicularmente la zona de hundimiento y tenga una resolución de 0.5 a 1 m.

Definición del problema geológico

Hundimiento: Dislocación de la corteza terrestre que da lugar a la remoción en sentido vertical de fragmentos de la misma [13].

Fractura: Ruptura de las rocas sin desplazamiento de los bloques que separa. Se usa también como sinónimo de falla [14].

Metodología de trabajo

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en el sitio con riesgo colonia Unidad Habitacional Lindavista, para el desarrollo del proyecto se siguió la siguiente metodología:

Descripción del marco de referencia y geología de la zona. Se realizó una descripción del marco de referencia y geología de la zona, con el fin de conocer la ubicación y acceso al sitio, e indagar las condiciones geológicas que generan o favorecen los fenómenos que se manifiestan en sitio con riesgo colonia Unidad Habitacional Lindavista.

Fundamentos del Método Geofísico. En esta etapa se abordaron los principios físicos y matemáticos que sustentan el método utilizado en la prospección.

Recorrido de campo. Se visitó el polígono identificado por la SPC y se observaron las condiciones de peligro y vulnerabilidad en la que se encuentra la población.

Determinación de la zona de la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE). Después del recorrido de campo se identificó el sitio ideal para realizar la TRE, el cual cumplió las condiciones ideales para el desarrollo e identificación de las condiciones en las que se encuentran los materiales en el subsuelo. Una vez que se seleccionó la zona para la TRE se describió el equipo a utilizar para el levantamiento.

Diseño del levantamiento o secuencia de la TRE. En esta etapa se ingresaron en el equipo los datos del sitio, longitud y separación entre electrodos. Una vez aprobado el diseño de la TRE, se verificaron las condiciones de los electrodos y cables para proceder a transmitir la corriente y levantar el registro.

Procesamiento de datos. Se descargaron los datos de la memoria del equipo hacia la computadora, y se inició el procesamiento de los datos con los programas adecuados para obtener un modelo geoelectrico en 2D.

Interpretación de datos (modelo geoelectrico 2D). En esta etapa se relacionaron las propiedades resistivas de los materiales geológicos del modelo 2D.

Desarrollo del proyecto

Descripción del marco de referencia y geología de la zona

Localización

El sitio con riesgo colonia Unidad Habitacional Lindavista se encuentra ubicado al noreste de la Delegación Gustavo A. Madero, está delimitado por las calles de Margarita Maza, Calzada Vallejo y Telecomunicaciones. El estudio geofísico se llevó a cabo en las áreas verdes frente a los edificios A y B (Calle Telecomunicaciones), entre las calles Caminos y S. C. T.

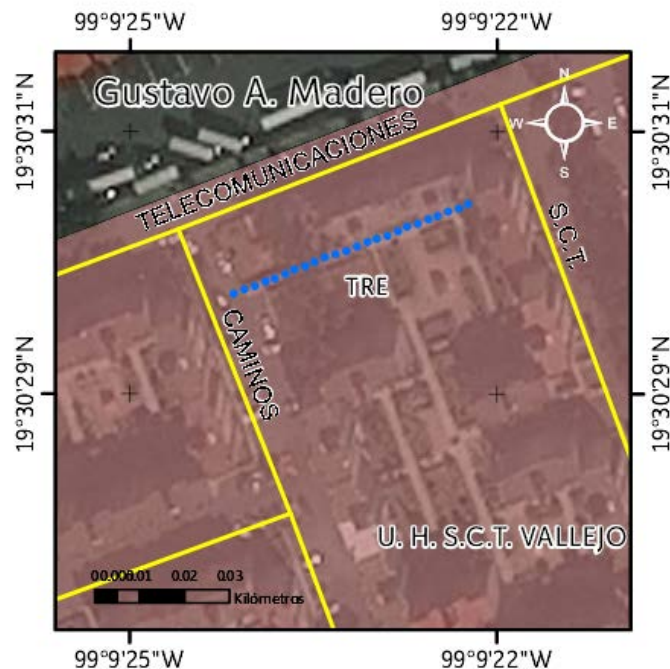


Figura 1. Croquis de localización del sitio con riesgo U. H. S. C. T. Vallejo y localización de la TRE (los puntos en color azul marcan la ubicación de los electrodos).

Geología de la zona de estudio

Relieve

El territorio de la demarcación se compone por las siguientes zonas: lacustre, de transición y de lomerío. La primera de ellas se localiza al Sureste; está constituida por dos formaciones arcillosas, la superior e inferior; entre estos dos estratos se encuentra una fase de arena y limo de poco espesor llamada capa dura. A profundidades mayores se tienen principalmente arenas, limos y gravas. Hacia la parte Norte, las dos formaciones de arcilla se hacen más delgadas, hasta llegar a la zona de transición, la cual está constituida por intercalaciones de arena y limo con propiedades mecánicas muy variables (PDDU, 2010).

La zona de suelo lacustre, que estaba ocupada anteriormente por el Lago de Texcoco y constituye aproximadamente un 60% del territorio, presenta hundimientos en la mayor parte de su extensión por la desecación de los mantos acuíferos, así como por la falta de infiltración de agua al subsuelo (PDDU, 2010).

La zona de transición es la que se encuentra ubicada en las faldas de la Sierra de Guadalupe y de los cerros de Zacatenco, Guerrero, Tepeyac y Gachupines, en donde ocupa el 15% de los mismos.

La zona de lomeríos es la más resistente en cuanto a composición geológica se refiere, ya que está compuesta por piroclastos, conglomerados, tobas y horizontes de pómez, con depósitos de lavas y de aluvión conformados por gravas y arenas. Se encuentra erosionada casi en su totalidad por la tala de árboles y el establecimiento de viviendas, y ocupa el 25% del territorio; el cual, de acuerdo con el Programa General de Desarrollo Urbano del Distrito Federal por ser Suelo de Conservación, está regulado por las Zonas de Preservación Ecológica (PE), así como las Áreas Naturales Protegidas (ANP) localizadas en estas zonas, por lo que se rigen por su programa de manejo. Las principales elevaciones que se encuentran en el territorio de la delegación; se ubican en la Sierra de Guadalupe, y son las siguientes: Picacho Grande con una altitud de 2,750 msnm; el Cerro del Chiquihuite con 2,730 msnm; Zacatenco con 2,500 msnm; El Guerrero con 2,440 msnm; Los Gachupines con 2,330 msnm y Tepeyac con 2,270 msnm (PDDU, 2010).

Litología y Estratigrafía

Gustavo A. Madero se localiza en el sector Norte de la Cuenca del Valle de México, dentro de la Faja Volcánica Trans-Mexicana (Ortega Gutiérrez *et al.*, 1992). Las sierras que la enmarcan son de origen volcánico, y tienen composición química de intermedia a básica, con edades que varían desde el Oligoceno Medio hasta el Reciente. De acuerdo con Padilla y Sánchez (1989) el basamento de esta demarcación es el mismo que para el resto del Valle de México, se encuentra representado por una unidad de roca caliza del Cretácico a una profundidad aproximada de 2,000 m. Sobre esta unidad se encuentra una secuencia de rocas conglomeráticas heterogéneas con clastos de caliza y fósiles del Cretácico, a la que Oviedo de León (1970) asigna el nombre Formacional de Conglomerado Texcoco; esta secuencia sedimentaria se considera la base de la secuencia estratigráfica de la cuenca, y fue descrita en una perforación llevada a cabo por el Instituto Mexicano del Petróleo denominada Pozo "Texcoco-1"; cabe resaltar que esta unidad no se encuentra expuesta en la superficie de la extensión territorial de la delegación.

El Programa General de Desarrollo Delegacional de Gustavo A. Madero (PGDD, 2013), señala que el territorio que ocupa la Delegación Gustavo A. Madero se encuentra conformado por rocas del Cenozoico, correspondiente al periodo Terciario Superior (Neógeno) y Cuaternario. Los depósitos más recientes corresponden a suelos de tipo aluvial, de granulometría variada y suelos de origen lacustre. Las elevaciones de la delegación se componen de rocas ígneas extrusivas, donde predominan las andesitas, cuya composición corresponde generalmente a plagioclasas y otros minerales ferromagnesianos como piroxeno, biotita y hornblenda. Al Sureste de la delegación predomina el suelo de tipo lacustre, constituido por secuencias arcillosas tanto en la parte superior como inferior de la secuencia, entre estos dos estratos se encuentra una fase de arena y limo de poco espesor denominado "capa dura"; a mayor profundidad se encuentran principalmente arenas, limos y gravas. Hacia la parte norte, las secuencias de arcilla se hacen más delgadas hasta llegar a la zona de transición, la cual está constituida por intercalaciones de arena y limo, cuyas propiedades mecánicas son muy variables.

El PDDU (2010) también señala que el suelo ocupa la mayor parte del territorio delegacional con un 72.51%, de los cuales 25.64% es de tipo aluvial y 46.87% de origen lacustre. Las rocas ígneas extrusivas abarcan el restante 27.49% y se distribuyen en brecha volcánica intermedia con 3.84%, brecha volcánica básica con 0.48%, andesita con 18.13% y volcanoclástica 5.04%.

Fundamentos del Método Geofísico

Los métodos geofísicos exploran de manera indirecta las propiedades físicas existentes en los materiales que componen el subsuelo. Entre las propiedades estudiadas se encuentran la resistividad eléctrica, es decir, la oposición que presentan los materiales al flujo de una corriente eléctrica a través de ellos. La resistividad varía en función del contenido de agua (la salinidad y la distribución de ambas en los poros) de la presión y de la temperatura (Serrano, 2009).

Las rocas presentan minerales semiconductores y entre sus poros pueden existir fluidos, los cuales pueden contener electrolitos que hacen que se comporten como conductores iónicos de resistividad muy variable. Llamamos resistividad (ρ) a la resistencia específica de cada material y en nuestro caso está dada por la siguiente fórmula (Auge, 2008):

$$\rho = k * (\Delta v/I)$$

Donde:

Δv , es la diferencia de potencial y se mide en volts.

I , es la corriente eléctrica y se mide en amperes.

k , es la constante geométrica.

Para obtener k usamos la siguiente fórmula:

$$k = \pi n a(n + 1)(n + 2)$$

Donde:

π , es la constante matemática con valor de 3.141592...

a , es la separación que existe entre electrodos y es constante.

n , es el número de niveles en el cual se profundiza.

Esta fórmula sólo se aplica para el método de Dipolo-Dipolo (Mussett, 2000).

Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE)

La Tomografía de Resistividad Eléctrica es un método de resistividad multielectródico, basado en la modelación 2D de la resistividad del terreno mediante el empleo de técnicas numéricas (elementos finitos o diferencias finitas) para generar imágenes denominadas pseudosecciones (Serrano 2003). Por el número de datos obtenidos, éste es un método geofísico de alta resolución (Constantino, 2011).

Para la realización de la TRE se usó el siguiente arreglo:

Arreglo Dipolo-Dipolo. El método Dipolo-Dipolo al igual que otras variables de prospección eléctrica utiliza un arreglo dado por cuatro electrodos (tetraelectródico), dos de corriente (C_A y C_B) y dos de potencial (P_M y P_N) separados por una distancia nD (Orellana, 1972; *ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012; Figura 2*).



Figura 2. Disposición de los electrodos de corriente (C_A , C_B) y los electrodos de potencial (P_M , P_N) (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

Los electrodos de potencial se mueven de la siguiente manera: el electrodo P_M ocupará el lugar del electrodo P_N , y P_N avanzará una distancia D (Figura 3).

Para determinar la profundidad del punto de atribución o cuadripolo, que es un valor de ρ_a que se obtiene con un dispositivo dipolar, suele atribuirse a un punto de intersección de dos semirrectas que parten desde los centros de cada dipolo con un ángulo de 45° (Perdomo, 2009; Figura 3).

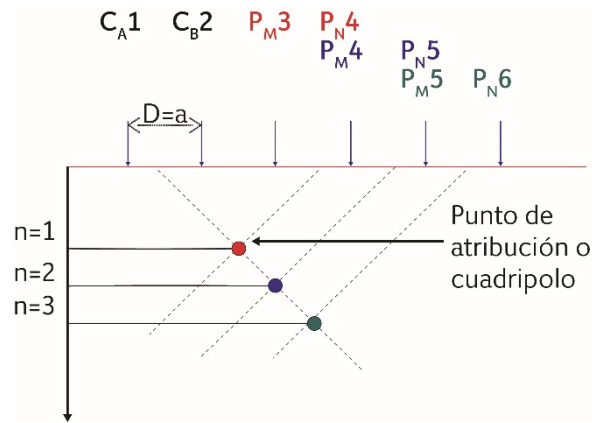


Figura 3. Muestra la secuencia de ocupación de los electrodos de potencial durante se desarrollan las mediciones (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

El electrodo de corriente C_A se moverá extendiendo su separación con el electrodo C_B al doble de la distancia inicial ($D=2a$) (Figura 4).

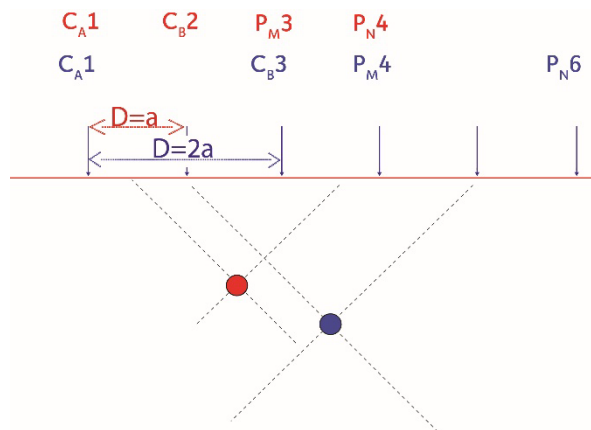


Figura 4. Secuencia del movimiento de los electrodos de corriente; los 4 electrodos (C_{A1} , C_{B2} , P_{M3} , P_{N4}) para obtener el punto de atribución rojo se denotan en el mismo color; y de la igual manera para el cuadripolo azul (C_{A1} , C_{B3} , P_{M4} , P_{N6}) (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

Recorrido de campo

La Unidad Habitacional se integra por edificios que constan de 10 departamentos distribuidos en 5 niveles, agrupados en 8 manzanas. El polígono muestra movimientos diferenciales asociados a una zona de hundimiento regional, el cual presenta un acumulado de hasta 1m (Geoinformática, 2008).

Los movimientos diferenciales han ocasionado afectaciones en los edificios provocando la inclinación de algunos de ellos, la mayor evidencia se observa en las juntas constructivas, donde la separación es desigual a lo largo de la estructura (Figura 5 y 6).



Figura 5. fracturamiento en muro perimetral de una vivienda, la fractura parte de la zona superior del muro en la colindancia en dirección diagonal hacia la zona de piso terminado; se observa que la raíz del árbol ha dañado la banquetta, por lo que se infiere el comportamiento del muro (19.3948° N, 99.1130° W. Calle: Chinampas).).



Figura 6 Fotografía C (Imagen 48), fracturamiento en la fachada lateral de una vivienda; la fractura atraviesa todo el muro desde la esquina superior izquierda hasta la esquina inferior derecha (19.4901° N, 99.1380° W. Calle: Recife)

También se observaron en algunos edificios fracturas diagonales, las cuales se encuentran presentes con mayor ocurrencia en la planta baja, en muros y marcos de ventanas (Figura 7).



Figura 7. Se observan las afectaciones en los edificios, las cuales se encuentran principalmente en la planta baja de éstos donde se producen fracturas diagonales por el hundimiento (19.5078° N, 99.1559° W. Calle: S.C.T.).

Determinación de la zona de la TRE

Con base en la cartografía del polígono de peligro, los datos estructurales y el recorrido de campo, se determinó que la zona para realizar la exploración geoelectrica sería el área verde frente a los edificios localizados en la calle Telecomunicaciones entre Caminos y S. C. T., la cual cuenta con las siguientes características: cruza transversalmente a la zona del hundimiento, no está afectada por el tránsito vehicular en ningún momento (con la finalidad que la inyección de corriente y la recolección de datos sean continuos).

Descripción del equipo

El equipo utilizado para el estudio geofísico (TRE) es el siguiente:

Resistivímetro automático multielectrodo *Syscal Pro*, el cual es un sistema de resistividad y polarización inducida (IP) para estudios eléctricos y perfiles de 10 canales. Combina un transmisor, un receptor (sus características se describen en la Tabla 1) y una unidad de conmutación en una sola carcasa.

Transmisión		Recepción	
Potencia	250 W	Impedancia de entrada	100 MΩ
Voltaje	800–1,000 V	Voltaje máxima por canal	1 : 15V
Corriente	2.5 A	Tipo de precisión	0,2 %
Conversión de potencia	DC/CD ext	Resolución	1 microV (μV)

Tabla 1. Características del equipo *Syscal Pro* (fuente: www.iris-instruments.com).

Accesorios:

- Fuente: batería externa de 12 V
- 48 electrodos impolarizables
- 4 carretes de cables de superficie de 12 conexiones cada una con espaciamientos de 10 m

- Computadora portátil que cuente con los programas de *ELECTRE Pro* y *Prosys II*, *EarthImager*, *Surfer 9* y *ComsysPro*
- Navegador GPS
- Rotomartillo
- Conos de señalamientos
- Cronómetro
- Cinta métrica
- Marro
- Lápiz
- Libreta

Pruebas de calibración

De acuerdo a Sepúlveda (2009) existen dos formas de diseño de equipos para medir resistividad:

- 1) Equipos que entregan un voltaje o una corriente invariable en el tiempo (CD) a la salida de sus terminales (A y B).
- 2) Equipos que obtienen un voltaje o una corriente alterna con forma de onda cuadrada a la salida de sus terminales A y B. El problema con estos equipos es que se necesita contar con un medidor de potencial y de corriente que pueda medir señales cuadradas de pequeñas frecuencias, proceso llamado *prueba de calibración*.

El equipo *Syscal Pro* corresponde al primer grupo. De acuerdo a las instrucciones del manual de uso del fabricante la opción de calibración de los canales del equipo se debe realizar después de la actualización de *firmware*, también si se tiene una duda sobre los niveles de voltaje recibidos (*Syscal Pro User's Manual*, 2012).

Diseño del levantamiento de la TRE

Una vez determinada la zona donde se realizará la TRE, se diseña el levantamiento (también llamado secuencia), que incluye establecer la separación entre electrodos, el número de electrodos usados, la continuidad y la alineación de los mismos (Figura 10).

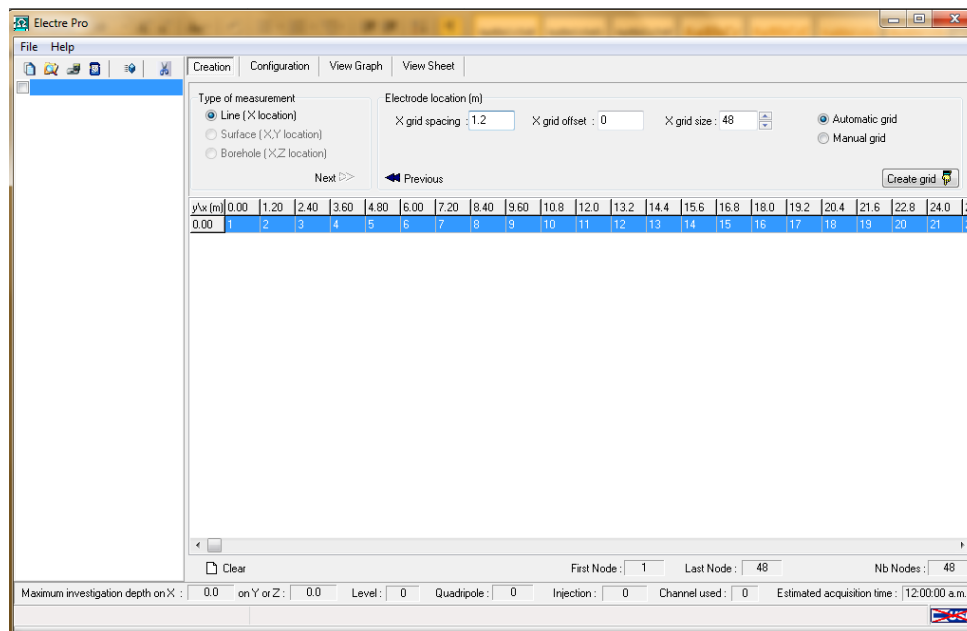


Figura 10. Ventana de asignación de separación entre electrodos (Software *ELECTRE Pro*, Iris Instruments, 2012).

Configuración del levantamiento con el software *ELECTRE Pro*.

En este paso se determina el tipo de arreglo a usarse, el voltaje inyectado, número de mediciones y el factor de calidad (Figura 11).

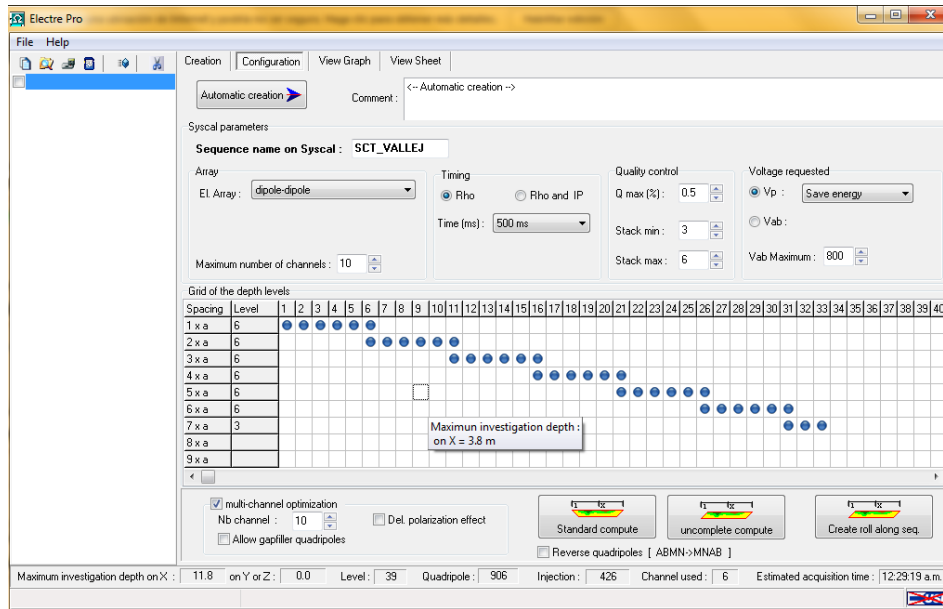


Figura 11. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre que tendrá el levantamiento, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

Obtención de gráfica preliminar.

Con los parámetros determinados por el usuario, el software *ELECTRE Pro* construye una gráfica preliminar, que permite verificar si el diseño del levantamiento es el adecuado (Figura 12).

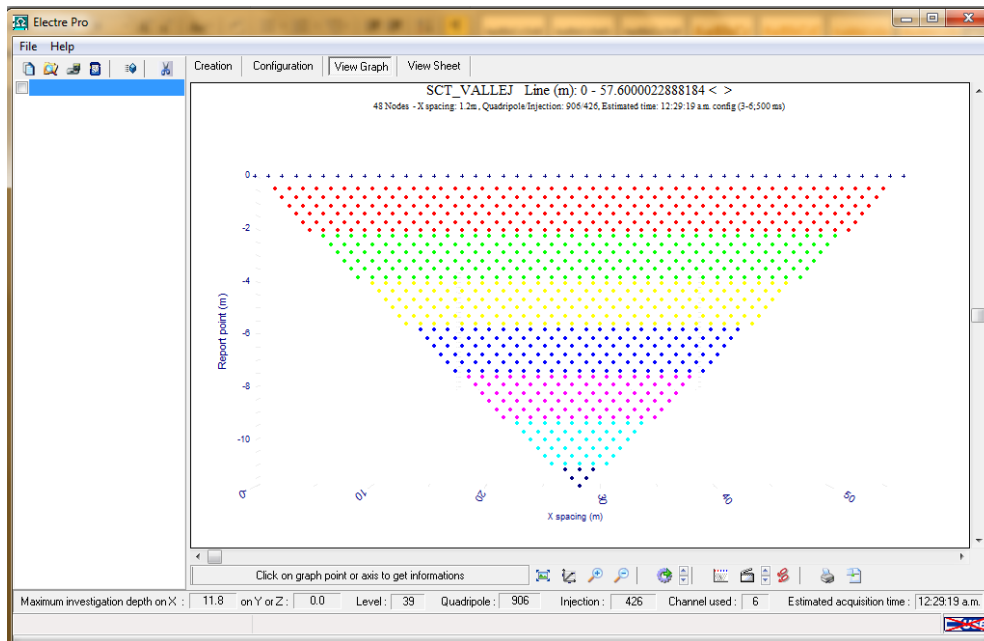


Figura 12. Ventana que muestra la gráfica preliminar del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadrípolos; en la parte inferior (de izquierda a derecha): el nivel máximo de investigación, niveles, total de cuadrípolos, canales utilizados y el tiempo estimado (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

Una vez verificado que el diseño del levantamiento sea el adecuado, se introduce al equipo. Las características de este levantamiento o secuencia fueron las siguientes (Tabla 2):

Longitud del levantamiento	57 m
Número de electrodos utilizados	48
Separación entre electrodos	1.2 m
Profundidad máxima de investigación	12 m
Total de puntos de atribución	906
Puntos de inyección	426

Tabla 2. Datos del levantamiento (Fuentes: Datos obtenidos en campo y PROSYS II).

Durante el levantamiento en campo de la TRE, se aplicó la siguiente metodología:

1. Ubicación y medición de las líneas de tomografía.
2. Perforación en cada uno de los puntos donde se ubicaron los electrodos.
3. Colocación de electrodos a 1.2 m de distancia entre cada uno.
4. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo (Figura 13).
5. Instalación de los conectores del cable principal hacia los electrodos. Se verificó que el cable no estuviera enrollado o doblado a fin de que el flujo de electricidad no sufriera interrupción (Figura 14).
6. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre los electrodos 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa (Figura 14).
7. Comprobación preliminar del paso de corriente en cada uno de los electrodos y medición preliminar de la resistencia de la puesta a tierra de los dipolos.
8. Recopilación de datos con el equipo, durante la cual se observó que el cableado no fuese movido o el flujo de corriente pudiese haber sufrido interrupción por causas externas.
9. Verificación del correcto guardado de los datos en la memoria del equipo concluido el tiempo de levantamiento.



Figura 13. Fotografía donde se observan electrodos colocados en contacto con el terreno (19.5084° N, 99.1564° W. Calle: Telecomunicaciones).



Figura 14. Fotografía que muestra la colocación del equipo y la fuente externa (19.5084° N, 99.1564° W. Calle: Telecomunicaciones).

Ubicación de los electrodos

Durante el levantamiento se obtuvo la ubicación de los electrodos, el cual se muestra a continuación en la Tabla 3.

N° de Electrodo	X	Y	Distancia (m)
1	483548	2157081	0
3	483549	2157082	2.4
5	483551	2157083	4.8
7	483553	2157085	7.2
9	483554	2157085	9.6
11	483556	2157086	12
13	483557	2157087	14.4
15	483558	2157087	16.8
17	483558	2157088	19.2
19	483559	2157088	21.6

21	483560	2157088	24
23	483561	2157088	26.4
25	483562	2157089	28.8
27	483563	2157090	31.2
29	483564	2157090	33.6
31	483566	2157090	36
33	483568	2157091	38.4
35	483569	2157089	40.8
37	483569	2157089	43.2
39	483569	2157088	45.6
41	483569	2157088	48
43	483570	2157088	50.4
45	483571	2157088	52.8
47	483573	2157087	55.2

Tabla 3. Ubicación de electrodos nones en coordenadas UTM (fuente: datos de campo).

Justificación del tipo de arreglo de la TRE

El arreglo Dipolo-Dipolo, es altamente sensitivo a los cambios horizontales (estructuras verticales) y ofrece una mayor densidad de puntos de atribución (Constantino, *óp. cit.*); razones por las que se optó por usar este arreglo. En la Figura 15 se muestra un ejemplo del modelo de puntos de atribución obtenidos con el método Dipolo-Dipolo; la flecha indica la dirección de la medición; se usan dos electrodos de inyección de corriente (color rojo) y 4 o 6 electrodos de potencial (color azul); el distanciamiento entre puntos de atribución es corto, por lo que la resolución es mayor.

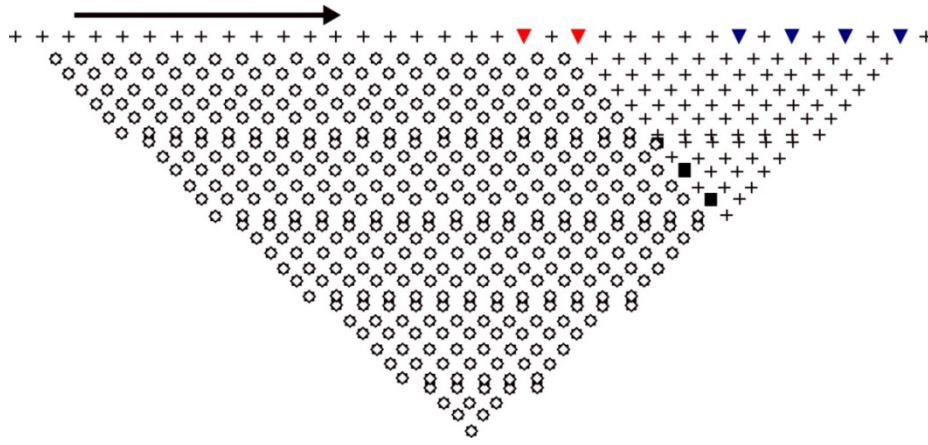


Figura 15. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son los puntos de atribución que aún no han sido medidos (Iris Instruments, Software ELECTRE Pro, 2012).

Procesamiento de datos

Los datos del levantamiento o datos de campo se extraen del equipo con el software *Prosys II*, en un archivo (.txt). La obtención de datos de manera manual con el equipo *Syscal Pro* no es posible, dada la rapidez de ejecución del equipo durante el levantamiento.

El software *Prosys II*, nos muestra una ventana que contiene los siguientes apartados: número, tipo de arreglo, *Spa 1* (electrodo CA), *Spa 2* (electrodo CB), *Spa 3* (electrodo PN), *Spa 4* (electrodo PM), *Rho*, *Dev*, *Sp* (potencial espontáneo), *Stack* (número de apilamiento), *Rs-Check* (resistividad aparente superficial) y fecha (Figura 16).

#	Elarray	Spa1	Spa2	Spa3	Spa4	Rho	Dev	M	Sp	Yp	In	Name	Date
1	Dipole Dipole	14.40	20.40	45.60	51.60	6.31	6.63	0.00	106.43	-1.261	509.799	SCT_V	12/06/2015 12:39:24
2	Dipole Dipole	14.40	20.40	46.80	52.80	6.10	7.41	0.00	366.42	-1.110	521.919	SCT_V	12/06/2015 12:39:39
3	Dipole Dipole	14.40	20.40	48.00	54.00	6.80	9.03	0.00	366.39	-1.096	516.774	SCT_V	12/06/2015 12:39:54
4	Dipole Dipole	14.40	20.40	49.20	55.20	8.14	1.10	0.00	346.43	-1.117	489.758	SCT_V	12/06/2015 12:40:03
5	Dipole Dipole	14.40	20.40	50.40	56.40	10.54	5.19	0.00	371.01	-1.211	454.790	SCT_V	12/06/2015 12:40:18
6	Dipole Dipole	15.60	16.80	18.00	19.20	17.83	0.60	0.00	-135.54	-147.120	186.596	SCT_V	12/06/2015 12:40:34
7	Dipole Dipole	15.60	16.80	19.20	20.40	6.41	6.07	0.00	379.53	-13.226	186.596	SCT_V	12/06/2015 12:40:34
8	Dipole Dipole	15.60	16.80	20.40	21.60	4.24	26.04	0.00	388.94	-3.496	186.596	SCT_V	12/06/2015 12:40:34
9	Dipole Dipole	15.60	16.80	21.60	22.80	4.10	1.27	0.00	-4.21	-1.691	186.596	SCT_V	12/06/2015 12:40:34
10	Dipole Dipole	15.60	16.80	22.80	24.00	5.84	5.36	0.00	12.34	-1.375	186.596	SCT_V	12/06/2015 12:40:34
11	Dipole Dipole	15.60	16.80	24.00	25.20	6.91	12.58	0.00	-4.74	-1.017	186.596	SCT_V	12/06/2015 12:40:34
12	Dipole Dipole	15.60	16.80	25.20	27.60	3.15	8.46	0.00	35.74	-0.891	119.363	SCT_V	12/06/2015 12:40:51
13	Dipole Dipole	15.60	18.00	27.60	30.00	13.74	17.29	0.00	-22.66	-1.813	119.363	SCT_V	12/06/2015 12:40:51
14	Dipole Dipole	15.60	18.00	30.00	32.40	1.43	654.38	0.00	56.54	-4.107	119.363	SCT_V	12/06/2015 12:40:51
15	Dipole Dipole	15.60	18.00	26.40	28.80	5.95	0.16	0.00	0.93	-0.860	94.289	SCT_V	12/06/2015 12:41:01
16	Dipole Dipole	15.60	18.00	28.80	31.20	9.40	1.08	0.00	19.86	-0.731	94.289	SCT_V	12/06/2015 12:41:02
17	Dipole Dipole	15.60	18.00	31.20	33.60	4.61	17.74	0.00	114.65	-0.215	94.289	SCT_V	12/06/2015 12:41:02
18	Dipole Dipole	15.60	19.20	32.40	36.00	4.31	4.60	0.00	-48.45	-2.120	539.742	SCT_V	12/06/2015 12:41:12
19	Dipole Dipole	15.60	19.20	36.00	39.60	4.55	6.41	0.00	-35.90	-1.232	539.742	SCT_V	12/06/2015 12:41:12
20	Dipole Dipole	15.60	19.20	33.60	37.20	4.57	1.80	0.00	-143.88	-1.848	549.332	SCT_V	12/06/2015 12:41:21
21	Dipole Dipole	15.60	19.20	37.20	40.80	4.40	7.54	0.00	62.24	-1.017	549.332	SCT_V	12/06/2015 12:41:21
22	Dipole Dipole	15.60	19.20	34.80	38.40	4.46	3.29	0.00	18.12	-1.476	547.782	SCT_V	12/06/2015 12:41:31
23	Dipole Dipole	15.60	19.20	38.40	42.00	4.25	6.51	0.00	-12.45	-0.891	547.782	SCT_V	12/06/2015 12:41:31
24	Dipole Dipole	15.60	20.40	39.60	44.40	5.48	4.26	0.00	40.73	-1.308	432.037	SCT_V	12/06/2015 12:41:42
25	Dipole Dipole	15.60	20.40	44.40	49.20	5.88	9.76	0.00	-4.90	-0.802	432.037	SCT_V	12/06/2015 12:41:42
26	Dipole Dipole	15.60	20.40	40.80	45.60	5.50	7.72	0.00	-124.43	-1.203	499.770	SCT_V	12/06/2015 12:41:58
27	Dipole Dipole	15.60	20.40	45.60	50.40	7.55	15.46	0.00	133.64	-0.967	499.770	SCT_V	12/06/2015 12:41:58
28	Dipole Dipole	15.60	20.40	42.00	46.80	6.26	4.90	0.00	20.26	-1.175	495.531	SCT_V	12/06/2015 12:42:07
29	Dipole Dipole	15.60	20.40	43.20	48.00	5.52	6.41	0.00	17.66	-0.852	429.364	SCT_V	12/06/2015 12:42:22
30	Dipole Dipole	15.60	21.60	46.80	52.80	6.47	3.83	0.00	367.69	-1.390	547.954	SCT_V	12/06/2015 12:42:31
31	Dipole Dipole	15.60	21.60	48.00	54.00	7.24	1.42	0.00	367.46	-1.390	550.339	SCT_V	12/06/2015 12:42:40
32	Dipole Dipole	15.60	21.60	49.20	55.20	7.56	3.86	0.00	347.74	-1.275	540.422	SCT_V	12/06/2015 12:42:49
33	Dipole Dipole	15.60	21.60	50.40	56.40	11.48	4.46	0.00	371.65	-1.762	547.729	SCT_V	12/06/2015 12:42:59
34	Dipole Dipole	16.80	18.00	19.20	20.40	14.81	0.99	0.00	391.36	-56.547	86.387	SCT_V	12/06/2015 12:43:10
35	Dipole Dipole	16.80	18.00	20.40	21.60	6.57	48.62	0.00	-917.77	-6.276	86.387	SCT_V	12/06/2015 12:43:10
36	Dipole Dipole	16.80	18.00	21.60	22.80	1.24	682.37	0.00	282.19	-4.473	86.387	SCT_V	12/06/2015 12:43:10
37	Dipole Dipole	16.80	18.00	22.80	24.00	4.50	5.24	0.00	12.78	-0.860	86.387	SCT_V	12/06/2015 12:43:10

Figura 16. Ventana que muestra una sección de datos del levantamiento (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

El software *Prosys* nos genera, a partir de los datos de levantamiento, una gráfica preliminar que corresponde a la resistividad aparente ρ_a , que puede contener datos anómalos (Figura 17).

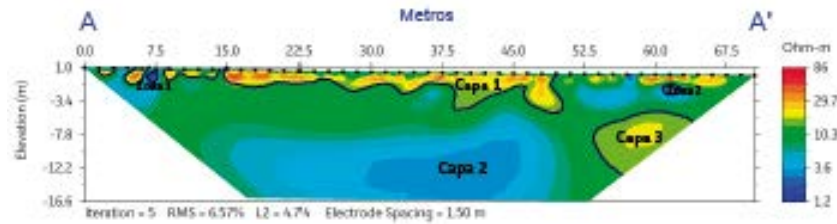


Figura 17. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software Prosys II, Iris Instruments, 2012).

Los datos de campo son extraídos en un archivo (.txt), ya que la obtención de datos de manera manual no es probable dada la rapidez de ejecución del equipo durante el levantamiento.

Correcciones topográficas.

Una vez obtenida la ubicación espacial de los electrodos, se extrae la altimetría correspondiente al perfil de la TRE, en el levantamiento topográfico realizado en la zona por el equipo de topografía (Figura 18).

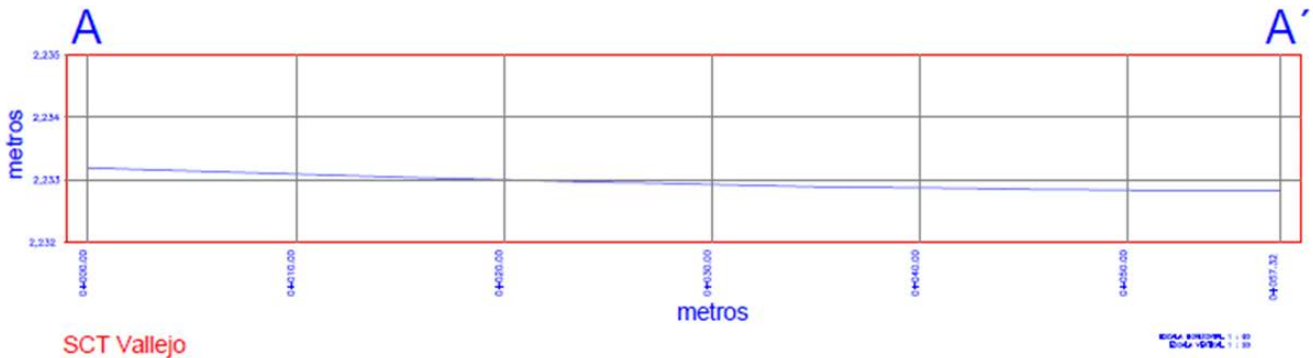


Figura 18. Perfil topográfico de la línea donde se realizó TRE.

Inversión de datos

Con los datos del archivo (.txt) obtenidos con el software Prosys II, se crea un archivo universal de resistividad, (.urf), el cual será modelado en el programa EarthImager.

El modelado (también llamado proceso de inversión) sirve para la interpretación de los datos obtenidos en campo, debido a que ninguna ecuación se relaciona con mediciones múltiples (como las realizadas en este estudio) y no pueden resolverse con una respuesta única. Se recurre a esta técnica porque es una forma matemática de estimar una respuesta, verificarla en función de las observaciones y modificarla hasta que sea aceptable (Barclay, 2008).

El proceso de inversión de datos comienza con la propuesta de un modelo directo, que parte de las propiedades del suelo. En la Tabla 4 se muestran los parámetros que constituyen el modelo directo propuesto para este estudio.

MinVoltage=0.2	Voltaje mínimo.
MinAppRes=0.1	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=1000	Resistividad aparente máxima.

MaxRepeatErr=3	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=6	Error de repetición recíproco.
RemoveNegERT=1	Remover valores negativos de la TRE.

Tabla 4. Parámetros para construir el modelo directo del proceso de inversión de datos (fuentes: datos obtenidos en campo y software EarthImager 2D, 2009).

En la gráfica cruzada de *resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida*, en el eje de las abscisas se encuentran los datos de resistividad medida y en el eje de las ordenadas la resistividad aparente del modelo propuesto; en la parte inferior el número de iteraciones; la raíz media cuadrática y el espaciamiento entre electrodos. Podemos estimar que nuestro modelado alcanzó parámetros adecuados, y por ello los resultados son aceptables (Figura 20).

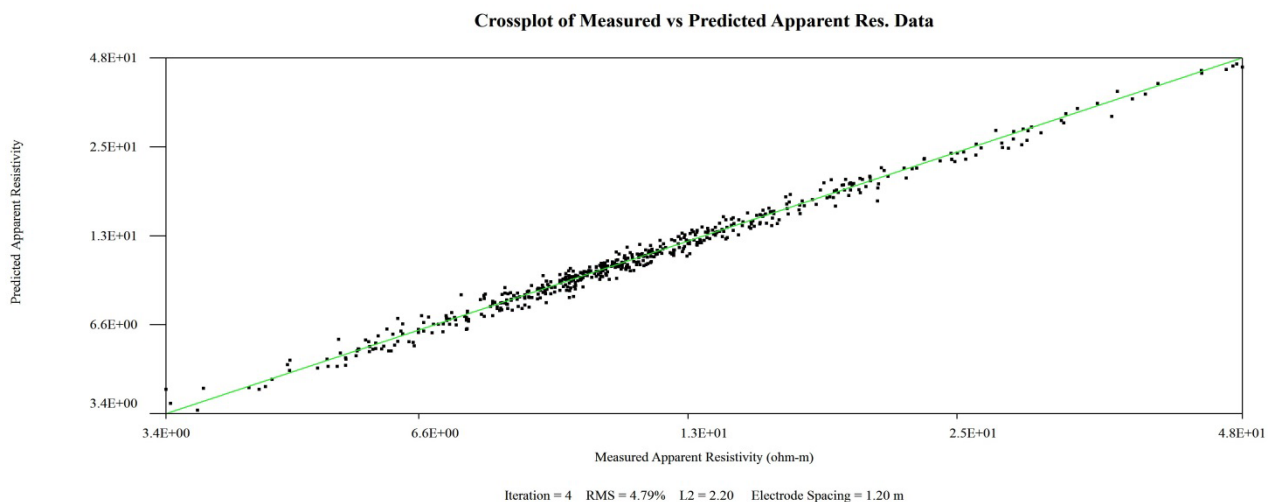
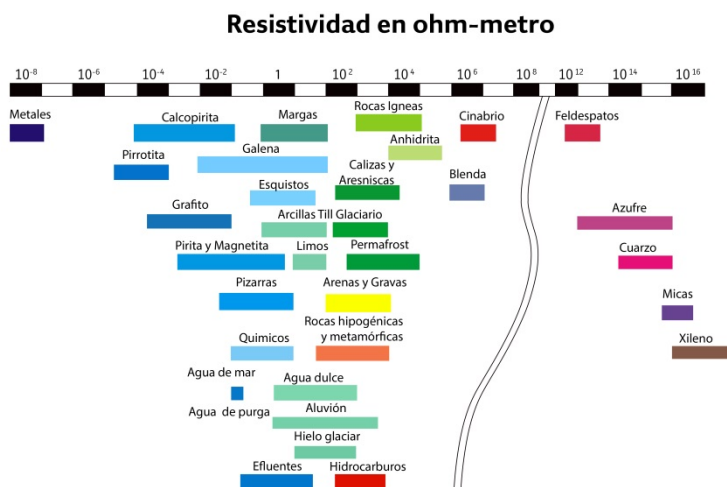


Figura 20. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida. (software EarthImager 2D, 2009).

Interpretación de datos (Modelo geoelectrico 2D)

Con los resultados de la TRE se procedió a identificar las diferentes capas resistivas, espesores y profundidad resistividad de acuerdo a la gráfica de valores de resistividad mediante la relación entre la geología y los valores de resistividad propuestos para diferentes rocas y minerales (Figura 25).



Una vez obtenido un ajuste aceptable del modelo propuesto y los datos de campo, se obtuvo el Modelo geoelectrico 2 D (Figura 26).

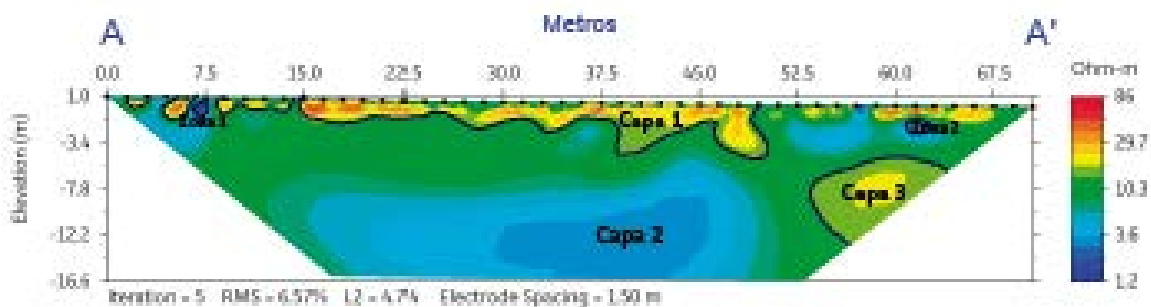


Figura 22. TRE obtenida en la Unidad Habitacional Lindavista

Capa 1

De los 0 a los 17 m corresponde a un jardín anexo a la zona de estudio, con restos de raíces de árboles que han sido talados. A partir de los 23 m se encuentran los edificios afectados. La profundidad máxima de esta capa es aproximadamente 3 m, y su resistividad máxima de 70 Ωm ; asociamos esta resistividad por lo observado a en la zona de estudio en sus primeros metros (0 a 17m) a restos de raíces y suelos poco saturado.

Capa 2

En color verde en la TRE, se extiende desde los 0 m hasta la base del estudio podemos asociarla a una capa de arcilla húmeda su rango de resistividad va de los 5 a los 15 Ωm , se observan zonas con baja resistividad (color azul) que se encuentran inmersas en esta capa y se extienden predominantemente hacia la parte donde se localizan los edificios afectados y profundiza hasta la base del estudio (Figura 23).

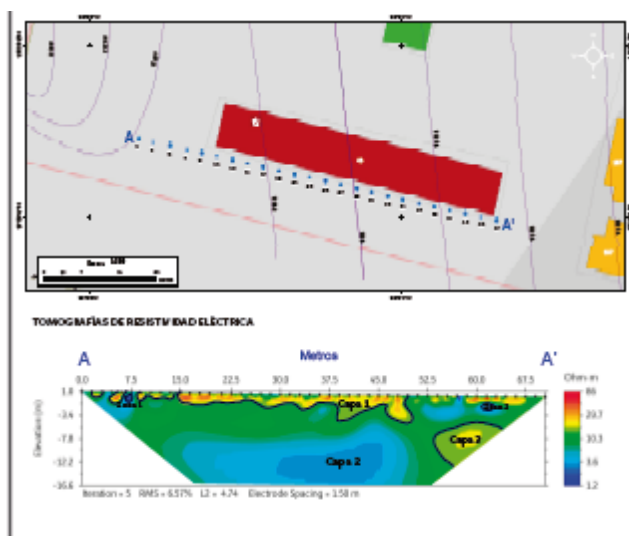


Figura 23. Se señala el punto de localización de la consola del equipo syscal pro como referencia para indicar hacia donde se extiende la zona de menor resistividad de la capa 2.

Zona 1.

Inicia en los 14 m y se extiende hasta los 18, su cima está a los 2 m de profundidad y su base por debajo de los 4 m presenta una resistividad por debajo de los 2 Ωm sobre esta zona se localiza un jardín (Figura 24).

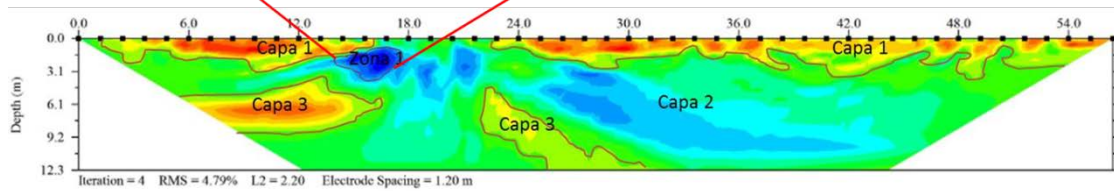


Figura 24. Ubicación de la Zona 1 en superficie.

Capa 3

Se compone de pequeños cuerpos de una resistividad mayor al de las zonas adyacentes, en forma de lentes, de acuerdo a la geología que se localiza esta zona en la zona de transición, podemos relacionarla con lentes de arena saturados, que presentan una baja resistividad, sin embargo, difiere de los rangos de resistividad alcanzados por las arcillas.

Conclusiones

La capa superficial se observa un material arcilloso poco saturado, sin embargo, y de acuerdo a las resistividades observadas en la TRE, debajo de esta costra (capa superficial) se encuentra una capa arcillosa saturada (acuífero superficial) cuyo nivel freático es muy somero. Contribuye a la inestabilidad del terreno la presencia de lentes de materiales con mayor resistividad que las arcillas, que se intercalan con éstas a pocos metros de la superficie (Figura 25).

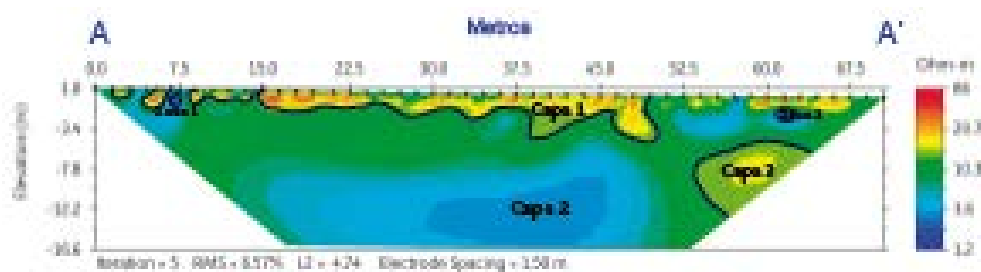


Figura 25. Imagen resistiva, con exageración vertical, que ilustra la relación de la capa 1, que se encuentra actuando como costra superficial y su relación con el acuífero superficial contenido en la capa y cuyo nivel freático es muy somero. Los lentes arenosos se localizan a poca profundidad.

Glosario de términos

Alteración: Sinónimo de intemperismo. Proceso de transformación y destrucción de los minerales y las rocas en la superficie de la Tierra a poca profundidad, bajo la acción de agentes físicos químicos y orgánicos. (...) Como resultado de esta actividad se forma la

corteza de intemperismo, misma que representa la porción menos consolidada del material poroso consistente en detritos de rocas y minerales nuevos, resistentes en condiciones de temperaturas y bajas presiones: con frecuencia es una formación arcillosa [1].

Aluvi3n: Dep3sitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundaci3n de los valles. La composici3n granulom3trica y mineral3gica, as3 como caracter3sticas estructural-texturales var3an ampliamente en funci3n del r3gimen de los r3os, de la resistencia de las rocas a la erosi3n, de la cuenca hidrogr3fica y de las condiciones geomorfol3gicas generales [1].

Andesita: Roca 3gnea efusiva de composici3n intermedia, color oscuro, compuesta de cristales de plagioclasa intermedia, minerales m3ficos y frecuentemente vidrio volc3nico, com3n en las monta3as de los Andes. Junto con el basalto forma las masas principales de rocas efusivas en las regiones de volcanismo joven y actual. Se presenta en general, en las zonas de subducci3n correspondientes a la margen de los continentes y los arcos insulares. Origina una amplia variedad de formas del relieve volc3nico y al transformarse por la erosi3n es com3n que se formen valles y laderas empinadas y una red fluvial de tipo dendr3tico [1].

Arcillas lacustres: Suelo constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposici3n de minerales de aluminio. Surge de la descomposici3n de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de a3os. El di3metro de las part3culas de la arcilla es inferior a 0,002 mm [12].

Asfalto: Es una mezcla s3lida y compacta de hidrocarburos y de minerales que mayormente es empleada para construir el pavimento de las calzadas [4].

Avalancha de escombros: Proceso gravitacional que puede originarse de dos maneras. La primera por la ca3da o deslizamiento de un cuerpo rocoso con movimiento progresivo y p3rdida de cohesi3n que lo convierte en derrubios y se transforma en un flujo de tipo avalancha. La segunda, por el movimiento de un dep3sito de derrubios que se transforma en avalancha [1].

Barranco: Forma lineal negativa del relieve, estrecha, con laderas abruptas, con frecuencia se ramifica hacia la cabecera. En longitud llega a alcanzar algunos kil3metros, y en anchura y profundidad, algunas decenas de metros. Los barrancos se forman generalmente en rocas incoherentes o f3cilmente erosionables, como los loess, dep3sitos pirocl3sticos y conglomerados, por escurrimiento de temporada de las aguas pluviales y nivales [1].

Basalto: Roca 3gnea efusiva de composici3n b3sica y color oscuro, consistente principalmente en plagioclasas b3sicas, augita y con frecuencia olivino. Generalmente es una roca compacta y porosa. Presenta estructuras de derrame; forma mesas de lava de cientos o miles de kil3metros cuadrados. Entre las formas de relieve caracter3sticas est3n los volcanes de lava y sus derrames asociados, del tipo de Haw3i e Islandia. Cubre tambi3n extensiones gigantescas del fondo oce3nico, mismo que incluye la planicie abisal, monta3as submarinas y las dorsales [1].

Basamento: Conjunto de rocas que subyacen con discordancia a la cobertura de rocas sedimentarias; posee un estilo tect3nico definido y han sido afectadas por metamorfismo y deformaciones, aunque 3stas pueden estar ausentes [1].

Biotita: f. Silicato de hierro y magnesio de color negro, marr3n o verde oscuro, del que se extraen l3minas delgadas [4].

Brecha volc3nica: Roca consistente en detritos angulosos mal clasificados debido a que sufrieron un transporte reducido. Constituida de ceniza y lapilli, y de clastos volc3nicos. Se puede formar directamente a causa de una erupci3n explosiva, por remoci3n posterior del material volc3nico o por un hundimiento superficial [1].

Calizas: Roca sedimentaria consistente en calcita o residuos calc3reos de organismos, raras veces de aragonita. Con frecuencia contiene minerales de dolomita, part3culas arcillosas y arenosas [1].

Caolinitas: Arcillas minerales cuya composici3n es de 3xido de aluminio hidratado, formado generalmente a partir de la hidr3lisis de feldespato pot3sico y otros minerales aluminosilicatos [2].

Carbonataci3n: Reacci3n qu3mica del 3cido carb3nico del agua de lluvia, agua del suelo y agua subterr3neas con los minerales, afecta intensamente a los minerales y rocas carbonatas, como la caliza o el m3rmol; es una actividad de la meteorizaci3n qu3mica [2].

Cauce: Porci3n inferior de un valle fluvial ocupada por la corriente. Se caracteriza por la anchura, la profundidad y la superficie del agua, factores que var3an de manera continua [1].

Ceniza: Partículas de roca volcánica, cristales o vidrio volcánico, generado durante las erupciones (diámetro menor a 2 mm) [3].

Colada de lava: Forma en que fluye y se dispone la lava en la superficie terrestre. Sus dimensiones dependen de la viscosidad, del volumen y velocidad de salida del magma a la superficie, y de la pendiente del terreno. Los de tipo ácido son generalmente cortos (1-10 km) y de fuerte grosor (más de 25 m). Los derrames de lava o coladas de lava basálticos, especialmente los de estructura ondulada, son muy largos, de decenas de kilómetros. La mayor velocidad que se conoce para el escurrimiento de lavas fluidas es de 70 km / h [1].

Coluvión: Detritos rocosos producto del intemperismo, desplazados ladera abajo por la acción de la fuerza de gravedad. Se depositan en las laderas con aspecto de capas delgadas y al pie de ellas. El tamaño de los detritos es muy variable, son angulosos y sin clasificación, es sinónimo de derrubios [1].

Conglomerado: Roca sedimentaria compuesta de granos redondeados del tamaño de la grava [3].

Conglomerado: Roca sedimentaria compuesta de cantos rodados, cementados en una matriz fina (arena, limo, arcilla), algunas veces la matriz puede ser calcárea o silicosa y en ocasiones en que el conglomerado ha sido sometido a fuertes presiones y temperaturas la matriz puede hallarse fundida. Los conglomerados se forman en las cuencas aluviales, fluvio-glaciales, grandes conos aluviales, áreas próximas a los litorales y en las márgenes de los ríos [4].

Cono volcánico: Forma de relieve que se origina por la acumulación del material volcánico alrededor de la chimenea; su forma depende de la proporción de lavas y material no consolidado que lo constituye; generalmente posee un cráter en la cima. El cono se forma por el depósito gradual de material piroclástico y escoria cerca de la chimenea, adquiriendo una pendiente fuerte en sus laderas, de 30° a 35° cuando es material fino, y 40° y más cuando el material es grueso, depositado cerca del cráter; con el tiempo, el perfil de las laderas evoluciona por la acción de los procesos exógenos [1].

Corrosión: Es la pérdida o deterioro de las propiedades físicas y/o químicas de un metal, sobre todo el hierro, al interactuar con su medio. Sucede naturalmente, transformándose el metal en un óxido, (reacción anódica, donde ocurre la disolución del metal) que es un compuesto más estable, por el cual el metal vuelve a su estado anterior u original, que es el que tenía antes del proceso metalúrgico.

Cuarzo: Mineral compuesto por dióxido de silicio, constituyente esencial de las rocas ígneas félsicas y uno de los principales componentes de la arena y arenisca [2].

Cuenca: Depresión de la superficie terrestre, de forma y origen diversos. Puede ser exorreica (con un desagüe que permite que las aguas circulen y sean expulsadas de la cuenca y endorreica (sin desagüe). Independientemente de sus dimensiones y profundidad, puede estar ocupada por el agua (lagos, mares). Es una porción de la tierra firme con un sistema centrípeto de laderas y corrientes fluviales. Se denomina con más precisión cuenca fluvial o hidrográfica. Está delimitada por divisorias desde las cuales escurren aguas superficiales o subterráneas hacia un río principal. La cabecera de una cuenca fluvial montañosa presenta un canal con pequeños afluentes [1].

Dacitas: Roca ígnea ácida de grano fino, compuesta de microlitos de plagioclasa, vidrio, cuarzo y, con menor frecuencia, hornblenda, biotita, piroxeno y otros minerales. Su equivalente en roca intrusiva es la granodiorita. Las formas de relieve de la dacita son derrames de lava de corta extensión, debido a la viscosidad del magma, de grosor considerable y con bordes escarpados; también originan agujas de lava [1].

Degradación: A nivel ecológico y natural, la degradación significa que un producto u objeto ya completo y fabricado comienza a ser degradado por la naturaleza para poder absorberlo, acción para la cual necesita simplificarlo y alterarlo físicamente [5].

Depósitos de caída: Fragmentos piroclásticos que han caído de una nube eruptiva [3].

Discordancia: Superficie de contacto entre dos grupos de estratos que por su edad y estructura refleja que hubo un tiempo prolongado (puede ser superior a una era geológica) en la formación de las capas que separan la discordancia [1].

Domo volcánico: Lava con forma de cúpula que crece en el fondo del cráter o en la cumbre de un volcán. Es propiamente el cono que se forma por la acumulación de material expulsado a través del cráter y la forma es determinada por las proporciones de lava y elementos piroclásticos en el material de su composición [3].

Drenaje: La red de drenaje de una cuenca está integrada por un cauce principal y una serie de tributarios cuyas ramificaciones se extienden hacia las partes más altas de las cuencas [3].

Electrodo: Cuerpo conductor en contacto con un medio del que se recibe o al que transmite una corriente eléctrica [4].

Escarpe: Ladera abrupta o a desplome, de altura variable, que puede formarse por distintas causas: tectónicas, procesos exógenos, principalmente gravitacionales [1].

Escurrimiento: Es el agua proveniente de la precipitación, circula sobre o bajo la superficie terrestre y llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca [3].

Esfena: También denominada titanita, puede ser un mineral primario o secundario en rocas ígneas. En el segundo caso puede formarse a partir de otros minerales ricos en titanio, como la ilmenita o durante la cloritización de micas ferromagnesianas ricas en titanio. Suele ser un accesorio frecuente en rocas alcalinas. Se caracteriza por su relieve alto, color variable de incoloro a marrón y birrefringencia intensa, muchas veces enmascaradas por los colores propios del mineral. Las secciones con terminaciones en forma de cuña son muy características, especialmente las de forma de diamante [17].

Erosión: Es el desgaste que se produce en la superficie de un cuerpo por la acción de agentes externos (pueden ser el viento, las corrientes de agua, los cambios de temperatura o hasta la acción de seres vivos) o por la fricción continua de otros cuerpos [7].

Falla: Desplazamiento de un bloque rocoso con respecto a otro colindante a éste o de ambos bloques, a través de un plano denominado «plano de falla». Las fallas son producto de esfuerzos tectónicos, producto de la epirogenesis, orogenia, diastrofismo, tectónica de placas o cualquier otro tipo de desplazamiento de parte de la corteza. Una falla ocasiona discontinuidad de las estructuras geológicas. Los esfuerzos pueden ser: tensionales, compresionales, verticales (en ambos sentidos) o inclinados, dando lugar a diversos tipos de fallas. Los elementos de una falla son: plano de falla, bloque superior o techo, bloque inferior o piso, desplazamiento de la falla o rechazo, espejo de falla, etc. El reconocimiento de las fallas se hace más fácilmente en las rocas sedimentarias y en las metamórficas de origen sedimentario debido a la discontinuidad de las capas o estratos. En las rocas ígneas la identificación es más difícil y solo es posible su reconocimiento observando detenidamente los espejos de falla o planos de fricción, o cuando existen diques o filones que señalan su desplazamiento a través del plano de falla. El estudio de las fallas es de suma importancia para la definición de la geología estructural o de la tectónica de la región. Del punto de vista práctico es de suma utilidad en geología minera para definir la posición o desplazamiento de las vetas mineralizadas o de los cuerpos mineralizados. También es de suma importancia para el estudio de los yacimientos petrolíferos. Tipos de fallas: Oblicua, cruzada, longitudinal, transversal, paralela al plano de estratificación, etc. [11].

Flujo de lodo. Mezcla de materiales sólidos de diferentes tamaños y agua que se desplazan por efecto de las pendientes del terreno [6].

Flujos piroclásticos: Mezclas de materiales volcánicos fragmentados y gases a altas temperaturas (de 300 a 1200 °C), que generalmente se producen por colapso de la columna eruptiva que emerge de los cráteres durante un episodio de actividad volcánica. Las velocidades de los flujos piroclásticos han sido estimadas en un espectro quínetico de entre 10 y 200 m/s, siendo la velocidad más comúnmente registrada, aquella que fluctúa alrededor de los 20 m/s. La extensión de las áreas que suele afectar este tipo de flujos, puede ser muy variable, y asciende desde unos 70 hasta varios cientos de kilómetros cuadrados [5].

Fosa Tectónica: Zona de hundimiento tectónico delimitado por fallas paralelas, de longitud considerablemente mayor que la anchura. Las dimensiones de una fosa tectónica son muy variables. Puede ser simétrica o asimétrica, consistente en una depresión alargada y delimitada a ambos lados por elevaciones (el pilar u *horst*). La erosión se produce transversal a las laderas, formando barrancos y por acumulación, abanicos aluviales en la desembocadura, en la planicie de la fosa tectónica [1].

Fractura: Ruptura de las rocas sin desplazamiento de los bloques que separa. Se usa también como sinónimo de falla [14].

Geofísica: Ciencia que destina su estudio e investigación a estudiar el planeta Tierra desde un ángulo físico justamente. Aborda cuestiones como ser la estructura, las condiciones físicas y la evolución de la tierra [5].

Hidratación: Proceso del intemperismo químico que consiste en la adsorción y absorción del agua por los coloides en los canales de la red cristalina de los minerales; un mineral se transforma en otro por influencia del agua [1].

Hipersteno: Mineral presente en rocas volcánicas o metamórficas. Se presenta exclusivamente en masas laminares o trozos de exfoliación de color verde oscuro a negro, con brillo vítreo y una iridiscencia o reflejos de color cobrizo [16].

Hornblenda: Mineral de la clase de los silicatos. Contiene silicio, oxígeno, calcio, sodio, potasio, magnesio, hierro, aluminio y flúor. Algunas hornblendas de rocas volcánicas pueden contener también titanio. Desde el punto de vista estructural pertenece al sistema monoclinico. Se presenta en cristales incompletos o alargados que en ocasiones aparecen con secciones casi hexagonales y con caras terminadas en formas que parecen romboedros. Brillo vítreo con dureza considerable y bastante pesada [16].

Hundimiento: Dislocación de la corteza terrestre que da lugar a la remoción en sentido vertical de fragmentos de la misma [13].

Hundimiento regional y agrietamiento: Fenómenos de naturaleza geológica cuya presencia se debe a los suelos blandos, en los cuales se producen pérdidas de volumen como consecuencia de la extracción de agua del subsuelo [13].

Interestratificación: Intercalación de unidades dentro de la estructura de los silicatos, ya sean laminares o en láminas de unidades distintas en otro mineral [11].

Lahar: Palabra indonesia con la cual se denomina a una especie de flujo de lodo formado por una mezcla de agua (meteórica o cratérica) y ceniza que baja por las pendientes de un volcán arrastrando otras rocas y formando avalanchas de gran poder destructivo. Puede producirse no sólo durante las erupciones volcánicas, sino también muchos meses después, debido a las lluvias y a la liberación de agua del cráter [6].

Limo: Partículas de 0.002 a 0.02 mm de diámetro. Son mayores que las arcillas y menores que las arenas [1]

Máfico: Adjetivo referente a la composición de un magma o una orca caracterizada por un alto contenido de magnesio y hierro. Las rocas de la corteza oceánica tienden a tener una composición máfica [7].

Magnetita: Mineral óxido de hierro, muy pesado, de color negro, que atrae el hierro y otros metales; imán. [4].

Mampostería: Sistema de construcción que consiste en levantar muros a base de bloques que pueden ser de arcilla cocinada, piedra o concreto entre otros. Actualmente se unen utilizando un mortero de cemento y arena con un poco de agua, en las proporciones adecuadas [6].

Mapa Geomorfológico: Representa el relieve terrestre con base en la morfología y la génesis del mismo, además de otros parámetros, como geomorfometría, litología y edad [1].

Mioceno: Término debido a Lyell (1832) para designar la época posterior al Oligoceno y anterior al Plioceno, del periodo Neógeno (Terciario tardío) [1].

Montmorillonita: Mineral arcilloso derivado por alteración química de los minerales silíceos de diversas rocas ígneas; se expande fuertemente cuando absorbe agua [2].

Oxidación: Uno de los procesos del intemperismo químico que incluye reacciones de combinación con oxígeno, especialmente con minerales de hierro en presencia de agua. El estado ferroso pasa a férrico, con formación de películas y cortezas de color amarillo a pardo que se disgregan fácilmente. Un ejemplo es la transformación de pirita en limonita [1].

Piroclastos: Fragmentos de magma arrojados durante las erupciones volcánicas de tipo explosivo. De acuerdo con su tamaño se clasifican en cenizas (menor a 2 mm), lapilli (2 a 64 mm) y mayor a 64 mm son bombas (de forma ovoide) y bloques (angulosos) [1].

Piroxeno: Los piroxenos son una familia de los silicatos de composición variable, y a la vez muy compleja; teniendo en cuenta el sistema de cristalización, se pueden distinguir de los rómbicos, denominados ortopiroxenos, y los monoclinicos, o clinopiroxenos. Estos últimos se dividen a su vez en aluminíferos y no aluminíferos según contengan o no aluminio en sustitución de silicio en los tetraedros. [16]

Plagioclasa: Feldespato de la serie calco-sódica que presenta solución sólida de los términos extremos albita y anortita. Los términos ricos en sodio son más frecuentes en rocas ácidas, mientras que los más cálcicos lo son en rocas básicas. Sus características distintivas más relevantes son la extinción oblicua, el desarrollo de un maclado polisintético con múltiples individuos, colores de birrefringencia grises y frecuente alteración a un agregado microcristalino rico en micas [16].

Plioceno: Es la segunda época del Neógeno, el quinto periodo del Terciario, posterior al Mioceno. La duración del Plioceno se calcula en unos 5 Ma, y debe haber terminado hace aproximadamente 2 Ma. En este lapso tuvo un desarrollo gran parte del relieve actual de la Tierra, en especial de regiones jóvenes como México y Centroamérica [1].

Procesos exógenos: Procesos geológicos producidos por fuerzas externas de la Tierra, se originan en la superficie de ella y en las capas superiores de la litosfera. Están condicionados principalmente por la energía de la radiación solar, la fuerza de la gravedad y actividad de los organismos [1].

Procesos fluviales: Procesos que modifican la superficie terrestre por medio del agua de escurrimiento lineal (temporal y permanente) y en manto. Crean formas de relieve fluvial de erosión y acumulación [1].

Puntales: Término que se emplea a un elemento que se coloca por lo general en manera de plano inclinado para apuntalar un elemento constructivo que corre el riesgo de fallar [7].

Red de Drenaje: Todos los sistemas de drenaje están compuestos por una red interconectada de corrientes que, juntas, forman modelos concretos. Estos modelos de drenaje responden a los tipos de rocas o modelos estructurales de fallas y pliegues presentes. Los tipos de modelos de drenaje son dendríticos, rectangulares, enrejados o radiales [3].

Reducción: Reacción química en la que un átomo o ión, toma uno o más electrones, o acrecienta su densidad electrónica por desplazamiento de los mismos [1].

Resistividad eléctrica: Resistencia que se obtiene en un centímetro cúbico de una sustancia, tomado en forma de cubo, a la corriente eléctrica dirigida perpendicularmente en una de las aristas de ese cubo. Se mide en Ohm metro u ohm centímetro [9].

Resistivímetro: Es un instrumento de resistividad diseñado para trabajos de resistividad como comprobación eléctrica de tierra-cuadrícula, prueba de resistividad del subsuelo utilizando el método Wenner de electrodos [8].

Subsuelo: Término aplicado al horizonte B de un perfil de suelo. [3]

Surges: Son mezclas de ceniza fina, gases volcánicos y aire caliente, que forman una nube densa que puede viajar fácilmente sobre los flancos del volcán a más de 100 km/h. Estas nubes alcanzan temperaturas de 200 °C y pueden carbonizar fácilmente cualquier material orgánico que encuentren a su paso. Las oleadas piroclásticas se crean también durante erupciones freatomagmáticas, cuando éstas tienden a ser menos calientes pero igualmente destructivas. Mientras estos flujos se mueven, van depositando los fragmentos más grandes, sin perder mucho calor. En un momento dado, se vuelven más ligeros que el aire y se elevan para formar una nube muy alta, conocida como «Nube fénix» que puede transportar ceniza a enormes distancias [10].

Tectónica de placas. Teoría que explica la dinámica de grandes porciones de la litósfera y su relación con la ocurrencia de sismos, volcanes y deformaciones corticales [8].

Textura microlítica (Hipocristalina): Cuando la roca está compuesta en parte por vidrio y en parte por cristales, sin que ninguno de los dos términos supere el 90% en volumen. Esta textura refleja dos ritmos de enfriamiento diferentes, uno más lento para formar los cristales y otro mucho más rápido que conlleva la formación de vidrio por solidificación del fundido sin tiempo a que los componentes químicos se ordenen en una estructura cristalina simétrica [17].

Voltaje: Es la cantidad de voltios que actúan en un aparato o en un sistema eléctrico. La presión que una fuente de suministro de energía eléctrica o fuerza electromotriz ejerce sobre las cargas eléctricas o electrones en un circuito eléctrico cerrado. De esta forma, se establece el flujo de una corriente eléctrica [7].

Abreviaturas y símbolos utilizados

Abreviatura	Significado
CD/DC	Corriente Directa / Direct Current (Por sus siglas en inglés.)
Dev.	Desviación Estándar.
E	Este.

<i>et al.</i>	(Del latín <i>et. alia</i>) y otros.
ext	Externo.
GPS	Sistema de Posicionamiento Global (por sus siglas en inglés Global Positioning System).
N	Norte.
O	Oeste.
<i>óp. cit.</i>	(Del latín <i>operare citato</i>) En la obra citada.
RMS	Raíz Cuadrada Media (Por sus siglas en inglés Root Mean Square).
Rho	Resistividad.
S	Sur.
Sp	Potencial Espontáneo (Por sus siglas en inglés spontaneous potential).
TRE	Tomografía de Resistividad Eléctrica.
.txt	Extensión de un archivo de texto.
UTM	Por sus siglas en inglés Universal Transversal de Mercator.
.urf	Extensión de un archivo de resistividad universal (Por sus siglas en inglés Universal Resistivity File).

Símbolo

Significado

π	Constante matemática con valor de 3.141592...
°	Grados.
°C	Grados Celsius.
>	Mayor que.
<	Menor que.
μV	Micro volt.
2D	Modelación en dos dimensiones.
Ω -m	Ohms metros.
%	Porcentaje.
ρ_a	Resistividad Aparente.
[]	Referencias Bibliográficas.
Ω	Rho, letra del alfabeto griego usada para designar a la Resistividad Eléctrica.
A	Amperes.
cm	Centímetros.

km	Kilómetros.
km/h	Kilómetros sobre horas.
m	Metros.
m ²	Metros cuadrados.
msnm	Metros sobre el nivel del mar.
m/s	Metros sobre segundo.
mm	Milímetros.
Ma	Millones de años.
M	Mega.
s	Segundo.
W	Watts.
V	Voltios.

Bibliografía

Auge, M. (2008). *Métodos eléctricos para la prospección de agua subterránea*. Argentina: Universidad de Buenos Aires.

Barklay, F. *Inversión sísmica: Lectura entre líneas*. Oilfield Review: 44-66. Verano 2008.

CEPAL (2005). *El impacto de los desastres naturales en el desarrollo: documento metodológico básico para estudios nacionales de caso*. México: CEPAL.

Constantino R., L. D. (2011). *Método de tomografía eléctrica para determinar estructuras volcánicas, México*. (Tesis inédita de Licenciatura). UNAM. México, D. F.

Iakubovskii, I. V. y Liajov, L. L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Reverte: Moscú.

Iris Instruments, *ELECTRE Pro software Help* (CD-ROM). Francia: (2012).

Iris Instruments, *Prosys Help* (CD-ROM). Francia: (2012).

Iris Instruments. (2012). *Syscal Pro, User's Manual*. Francia.

Lugo, H. (2011). *Diccionario geomorfológico*. Instituto de Geografía. México; UNAM.

Mapa de Zonificación Geotécnica, Servicio Geológico Metropolitano. Escala 1:1000000. México: UNAM-DGPCDF.

Marsal, R.J. y Mazari, M. (1959). *The Subsoil of Mexico City. Contribution to the First Panamerican Conference on Soil Mechanics and Foundation*. Engineering, Ciudad de México. México.

Musset, A. y Khan, M. (2000). *Looking into the earth. An introduction to Geological Geophysics*. Cambridge. United States of America.

Orellana, E. (1972). *Prospección geoelectrica en corriente continua*. España: Paraninfo.

Ortega G. F., et al. (1992). Carta Geológica de la República Mexicana escala 1:2,000,000: México, UNAM, COREMIN.

Oviedo de León, A. (1970). El Conglomerado Texcoco y el posible origen de la Cuenca de México: *Revista del Instituto Mexicano del Petróleo*, 2: 5-20.

Programa Delegacional de Desarrollo Urbano para la Delegación Gustavo A. Madero del Distrito Federal, 2010.

Protección Civil, Secretaría de Gobernación (consulta en línea). <http://www.proteccioncivil.gob.mx>, consultado el día 10 de julio 2014.

Perdomo, S. (2009) *Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica*. (Tesis de Grado). Universidad Nacional de la Plata. Argentina.

Sepúlveda E, L. (2009). *Diseño de un resistivímetro de corriente directa para realizar estudios de geoeléctricos en los Valles Centrales*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca, México.

Serrano O., J. (2003). *Caracterización geofísica de filtraciones de agua en el subsuelo*. (Tesina). Universidad Politécnica de Cataluña. España.

Strahler, A.N. (1988). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega, S.A.

Tarbuck, L. (2008). *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Madrid: Ed. Pearson-Prentice Hall.

Bibliografía para el glosario de términos

[1] Lugo H, J. I. (2008). *Diccionario Geomorfológico*. Instituto de Geografía. México: UNAM.

[2] Strahler, A. y Strahler, A. (1989). *Geografía Física*. Barcelona: Ediciones Omega. S.A.

[3] Tarbuck y Lutdgens. (2005). *Ciencias de la Tierra. Introducción a la Geología Física*, Madrid: Ed. Pearson-Prentice Hall.

[4] Wordreference (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://www.wordreference.com/definicion/asfalto>.

[5] definición ABC (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://www.definicionabc.com/geografia/geofisica.php>.

[6] constructoracmproyectos (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://constructoracmproyectos.com/que-es-mamposteria-en-construccion/>.

[7] Definición. De (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <http://definicion.de/punta.l>

[8] Agiusa (s.f.). Recuperado el 22 julio de 2014 de <https://www.agiusa.com/ministing.sp.shtml>.

[9] Iakubovskii, I. V. y Liajov, L. L. (1980). *Exploración Eléctrica*. Moscú: Reverte.

[10] Glosario CENAPRED 2010 (consulta en línea). Consultado el 10 de julio 2014.

[11] Dávila B., J. (2011). *Diccionario geológico*. Perú: INGEMMET.

[12] Secretaría de Protección Civil del Gobierno del Distrito Federal. (s.f.) *Norma técnica complementaria al reglamento de la ley de P. C. del D F NTC-002-SPCDF-PV-2010*. Recuperado el 10 de julio de 2014 en <http://cgsservicios.df.gob.mx>.

[13] Protección Civil, Secretaría de Gobernación (consulta en línea). <http://www.proteccioncivil.gob.mx>, consultado el día 10 de julio 2014.

- [14] Secretaría de Desarrollo Agrario Territorial y Urbano. (2014). *Bases para la Estandarización en la Elaboración de Atlas de Riesgos y Catálogo de Datos Geográficos para Representar el Riesgo*. SEDATU: México.
- [15] <http://deconceptos.com/ciencias-naturales/corrosion###ixzz3RvvoLBvD>.
- [16] <http://www.segemar.gov.ar/biblioteca/temas/MINERALES>.
- [17] Andrés P. y R. Rodríguez. (2008). *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica*. Editorial Documenta Universitaria. España.