

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 (U.H.) Ejército de Oriente, zona Peñón** (definido así por la SPC) en peligro por el fenómeno de hundimiento y fracturamiento, objeto del presente informe.

Antecedentes de la Secretaría de Protección Civil (SPC)

La SPC identificó este sitio en riesgo como «un sistema de agrietamiento por contacto geológico, reptación o *creep* y fallas tectónicas presentes al oriente del cerro del Peñón del Marqués».

Objetivo general

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

Objetivo específico

Conocer las características de los materiales que se encuentran en el subsuelo donde se observan las mayores afectaciones del sitio en riesgo por hundimiento y fracturamiento.

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].

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].

Reptación: Los movimientos de reptación indican un desplazamiento lento de las partículas de un suelo. Se producen por las variaciones de la temperatura y la humedad. En el primer caso, al sufrir dilatación en un plano en un plano de 10 a 35°, las partículas tienden a desplazarse por la influencia de la gravedad, e igual al sufrir contracción, las partículas se desplazan una fracción de milímetro. La humedad contribuye a incrementar la plasticidad del suelo, el congelamiento y deshielo del agua contenida en el mismo, favorece el desplazamiento que se ha calculado en 0.2 a 1.0 cm en un año [1].

Metodología de trabajo

Una vez identificados los fenómenos que se manifiestan en la U.H. Ejército de Oriente (Zona Peñón), 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 la U.H. Ejército de Oriente (Zona Peñón).

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

La SPC identificó como un polígono al sitio con riesgo de U. H. Ejército de Oriente (Zona Peñón), entre las calles Batalla 5 de Mayo, Exploradores, Olmos y Fuerte de Loreto, al oriente de la Delegación Iztapalapa y al sur del cerro del Peñón del Marqués o Peñón Viejo (Figura 1).

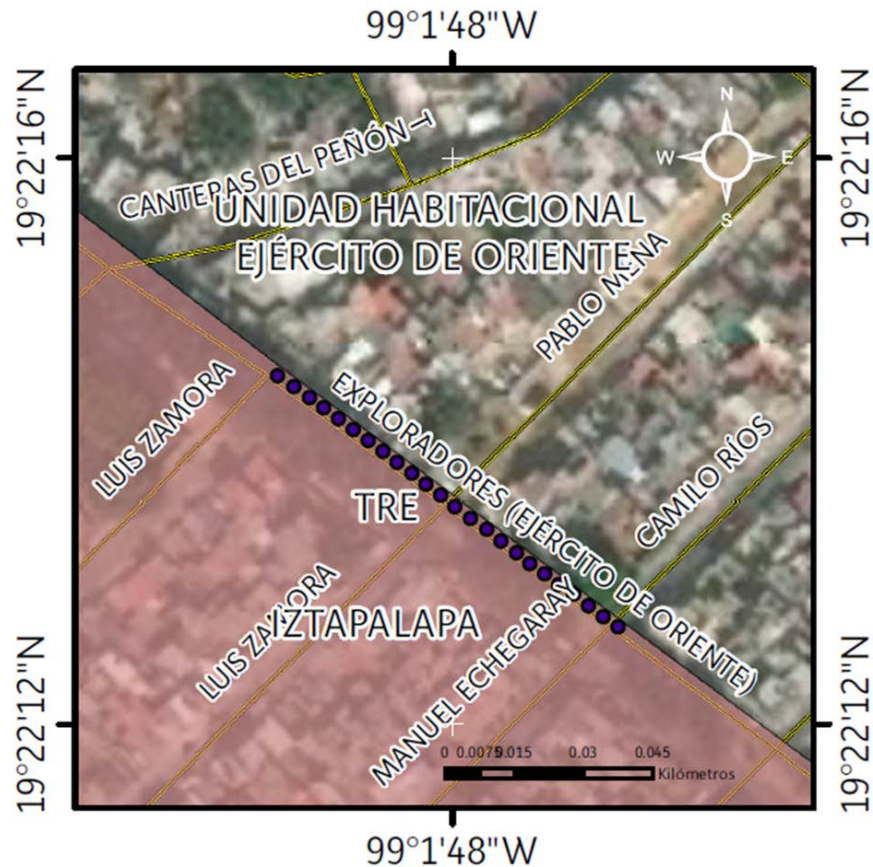


Figura 1. Croquis de localización del sitio con riesgo U. H. Ejército de Oriente (Zona Peñón) y localización de la TRE (los puntos en color azul marcan la ubicación de los electrodos).

Geología de la zona de estudio

Relieve

El relieve del Peñón del Marqués está diferenciado por dos procesos de acuerdo a su origen; relieve acumulativo y relieve endógeno modelado. El relieve acumulativo es el resultado del depósito de sedimentos lacustres que circundan el Peñón de Marqués, mientras que el relieve endógeno modelado lo componen dos estructuras volcánicas sobrepuestas. Las pendientes originales de las laderas del cono volcánico presentan inclinaciones entre los 20° y 32° en forma convexa, en las zonas de mayor elevación éstas presentan pendientes de 6° (Castañeda 2011).

La zona está conformada por depósitos lacustres que se acumularon durante los últimos 2.6 M.a. (periodo Cuaternario). Estos materiales están compuestos principalmente por arcillas y limos con intercalaciones de gravas, arenas y horizontes delgados de tobas. Hinojosa (2010) reconoce a estos depósitos como una formación aluvial cuaternaria, producto del depósito fluvial al margen del antiguo lago de Texcoco, lo que resultó en intercalaciones de piroclastos, bloques, arenas y limos interestratificados con lavas.

Litología

El Peñón de Marqués o Peñón Viejo corresponde a un cono cinerítico asociado a vulcanismo de carácter fisural, su estructura está alineada en la porción central distinguiéndose dos flancos: el flanco norte y flanco sur (Lugo, 1995). El material de las laderas se compone de lavas basálticas y andesíticas en alternancia con depósitos de escoria y piroclastos en capas con espesores de 1 a 3 m, las cuales se presentan en las partes más elevadas de la estructura volcánica (Castañeda, 2011). El material acumulativo de origen aluvial y lacustre se encuentra en las inmediaciones de las estructuras volcánicas del Cuaternario.

Castañeda (2011) menciona que la estructura del Peñón corresponde a la formación El Pino, compuesta de rocas máficas, basaltos y andesitas, con alternancias de ceniza, escoria y coladas de lava.

Hinojosa (2010), afirma que la composición del cerro Peñón del Marqués se constituye por secuencias de flujos lávicos con intercalaciones delgadas de tefra no consolidada formada por cenizas cristalinas y vítreas, lapilli y escoria. Los derrames de lava se componen por andesita basáltica de olivino y andesita de anfíbol, generalmente con buena estructura fluidal con vesículas alineadas en dirección al flujo y con desarrollo regular de lajas.

Estratigrafía

Castañeda (2011) menciona que la empresa *Estudios y Técnicas Especializadas en Ingeniería, S.A. de C.V* (2010), estableció la sucesión estratigráfica del Peñón de Marqués y que en la parte superior de la secuencia se encuentra una capa de suelo de 1.5 m de espesor, a la que le subyace un paquete de 1.5 m de rocas piroclásticas, seguidas de derrames de basalto con espesor de 10 m. Posteriormente se presenta una unidad de 4 m de piroclastos que descansa sobre un flujo de lava basáltica de 1 m de espesor.

La acumulación de material volcánico que conforma al cono de escorias del Peñón se encuentra en forma de pseudoestratos, producto de tres depósitos volcánicos. Los flujos de lava corresponden a derrames de lava básica que presentan intercalaciones de escoria y materiales de arrastre. Este tipo de lavas presentan características de coladas de lava de tipo Aa en bloques emplazados sobre la topografía preexistente (Castañeda, 2011).

El espesor de los flujos de escoria es mayor entre más próximo se localice la fuente de emisión. Los materiales son vesiculados, de morfología angulosa a subredondeada. Los depósitos gruesos son bien clasificados, con matriz soportada por fragmentos finos en contacto grano a grano (Castañeda 2011; Figura 2).

SECUENCIA ESTRATIGRÁFICA DEL CERRO PEÑÓN DEL MARQUÉS

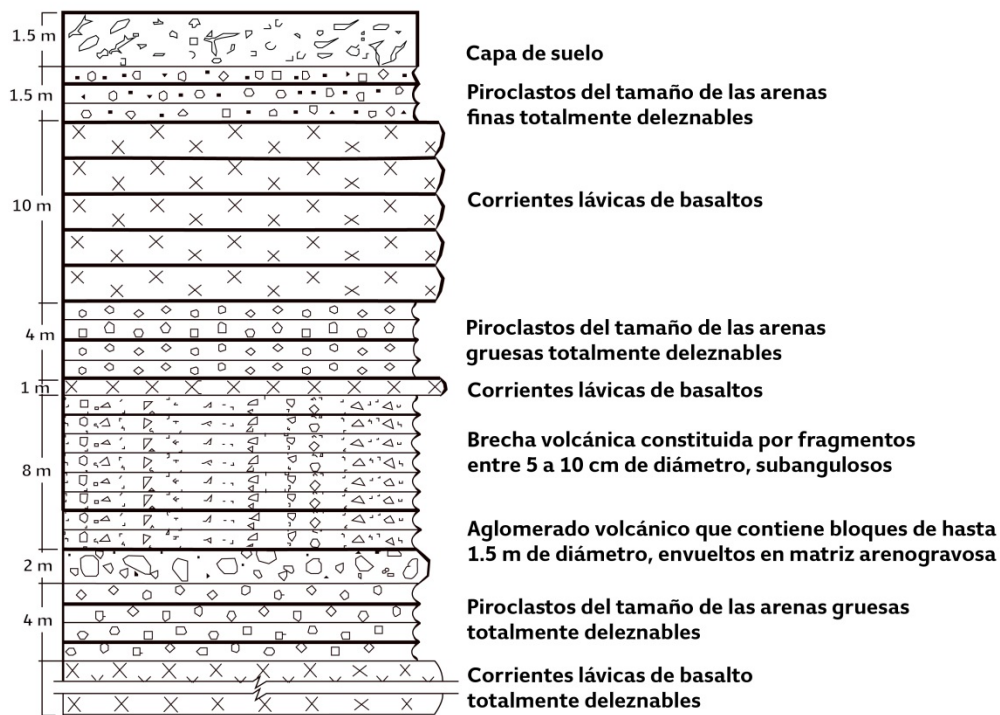


Figura 2. Secuencia Estratigráfica del Peñón de Marqués (Castañeda, 2011).

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).

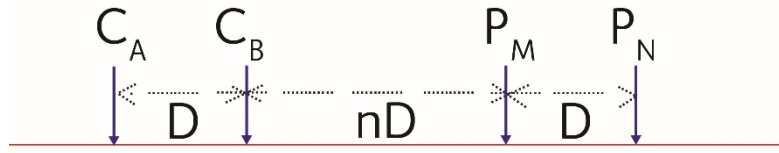


Figura 3. Disposición de los electrodos de corriente (C_A , C_B) y los electrodos de potencial (P_M , P_N) (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

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 4).

Para determinar la profundidad del punto de atribución o cuadrípulo, 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 4).

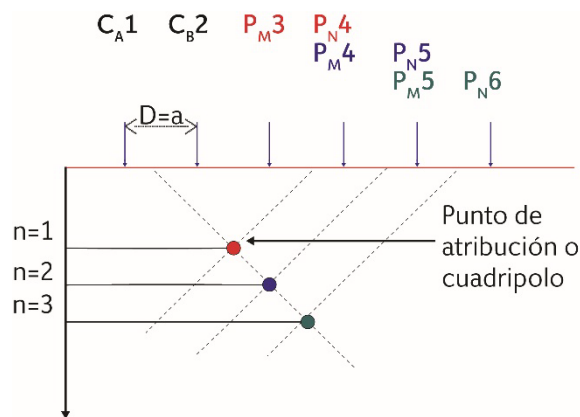


Figura 4. Muestra la secuencia de ocupación de los electrodos de potencial durante se desarrollan las mediciones (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

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 5).

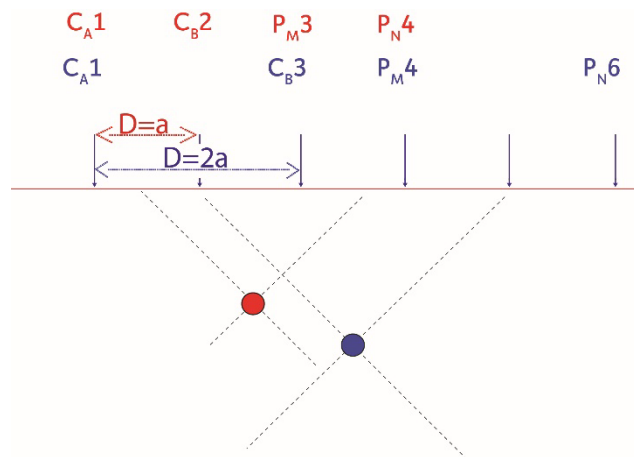


Figura 5. Secuencia del movimiento de los electrodos de corriente; los 4 (C_{A1} , C_{B2} , P_{M3} , P_{N4}) electrodos para obtener el punto de atribución rojo se denotan en el mismo color; y de la igual manera para el cuadrípulo azul (C_{A1} , C_{B3} , P_{M4} , P_{N6}) (ELECTRE Pro software Help, Iris Instruments, 2012).

Recorrido de campo

La Figura 6 exhibe un inmueble con múltiples fallas en sus elementos estructurales de mampostería, desprendimiento de algunos materiales y colapsos parciales del inmueble. Dichas fallas se deben al procedimiento constructivo que se empleó en el inmueble que actualmente se encuentra sostenido por puntales.



Figura 6. Fotografía de vivienda con fracturas diversas y colapsos parciales (19.3716° N, 99.0329° W. Calle: Retorno 1 Legión del Norte).

En la imagen inferior (Figura 7) se puede observar que el muro de mampostería semiconfinado presenta varias fracturas en forma diagonal y vertical; así como la deflexión de la losa. También podemos apreciar la falta de refuerzos estructurales.



Figura 7. Fotografías que muestra una vivienda con múltiples fracturas en muros exteriores y deflexión de la losa (19.3716° N, 99.0329° W. Calle: Retorno 1 Legión del Norte).

En la Figura 8 se observan viviendas afectadas en la calle Retorno 1 Legión del Norte, el edificio cuenta con muros de mampostería semiconfinada que presentan fallas estructurales en forma diagonal escalonada, que podemos asociar al fenómeno de hundimiento que también se manifiesta en la carpeta asfáltica.



Figura 8. Fotografía que muestran viviendas con diversas fracturas en muros exteriores y el hundimiento en la carpeta asfáltica (19.3716° N, 99.0329° W. Calle: Retorno 1 Legión del Norte).

En las fotografías de la Figura 9 se observa en el recubrimiento de la calle Retorno 1 Legión del Norte, una fractura por hundimiento. Una parte de la misma se encuentra con recubrimiento de adoquín (material con poca flexibilidad) y la otra con carpeta asfáltica.



Figura 9. Fotografía que muestran la estructura del hundimiento, que afecta tanto el recubrimiento asfáltico como al adoquín (19.3717° N, 99.0329° W. Calle: Retorno 1 Legión del Norte).

Las fotografías de la Figura 10 fueron tomadas en un parque sobre la calle Retorno 1 Legión del Norte, en el cual anteriormente se encontraban algunos inmuebles que fueron desalojados y demolidos debido a que se encontraban dañados por causa del hundimiento, mismo que sigue afectando la zona a pesar del mejoramiento con arcilla estabilizadora.



Figura 10. Fotografías tomadas en el parque (fotografía A) que muestran el hundimiento apreciable en las losas (fotografía B) que recubren el terreno (19.3717° N, 99.0328° W. Calle: Retorno 1 Legión del Norte).

En la Figura 11 se observa un muro de mampostería confinada con fracturas verticales y escalonadas debido al inadecuado procedimiento constructivo con el cual se unieron los materiales.



Figura 11. Fotografías que muestran una vivienda con fracturas en muros exteriores (19.3685° N, 99.030° W. Calle: Agustín Bolleto).

Otro ejemplo de afectación a un elemento estructural de un inmueble se muestra en la Figura 12, cuyo muro de mampostería semiconfinada presenta una fractura en diagonal, asociado al hundimiento.



Figura 12. Fotografías que muestran una vivienda con varias fracturas en el muro exterior en forma diagonal escalonada (19.3681° N; 99.0310° W. Calle: Rafael Saldaña).

Determinación de la zona de la TRE

Con base en los datos estructurales se infiere la convergencia de dos estructuras de hundimiento que aunado al recorrido de campo sirvió para determinar la realización del estudio de la TRE en la avenida Exploradores. Para este estudio era necesario que la línea de ubicación de electrodos, además de ser continua, contara con una longitud de 96 m, que se determina por el número de electrodos multiplicado por la separación entre cada uno de ellos (48 electrodos y separación de 2 m). El camellón que divide ambos sentidos de dicha arteria vial ofrecía estas características, por lo que el estudio se realizó en esa área. La disposición de los electrodos inició al sur del cruce con la calle Camilo Ríos y concluyó al norte del cruce con la calle Luís Zamora.

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	800–1000 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 espaciamentos 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 o secuencia

Una vez determinada la zona donde se realizará la TRE, se diseña el levantamiento, que incluye establecer la separación entre electrodos, el número de electrodos usados, la continuidad y la alineación de los mismos (Figura 13).

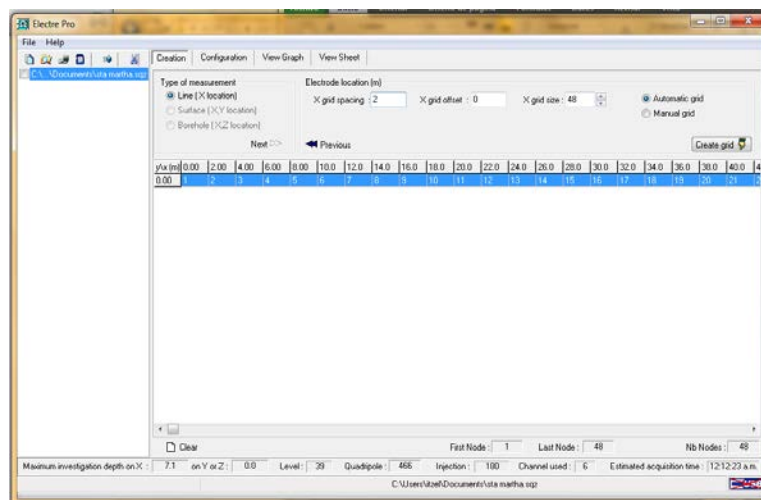


Figura 13. Ventana de asignación de separación entre electrodos (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

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 14).

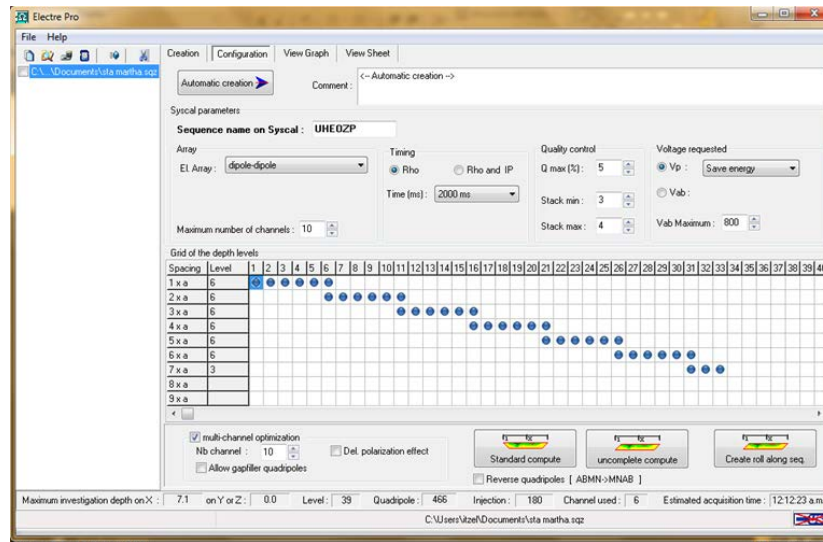


Figura 14. Ventana de configuración, en ella se introducen los parámetros de inyección de voltaje, el tipo de arreglo, el nombre que tendrá el levantamiento, entre otros (ELECTRE Pro software, Iris Instruments, 2012).

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 15).

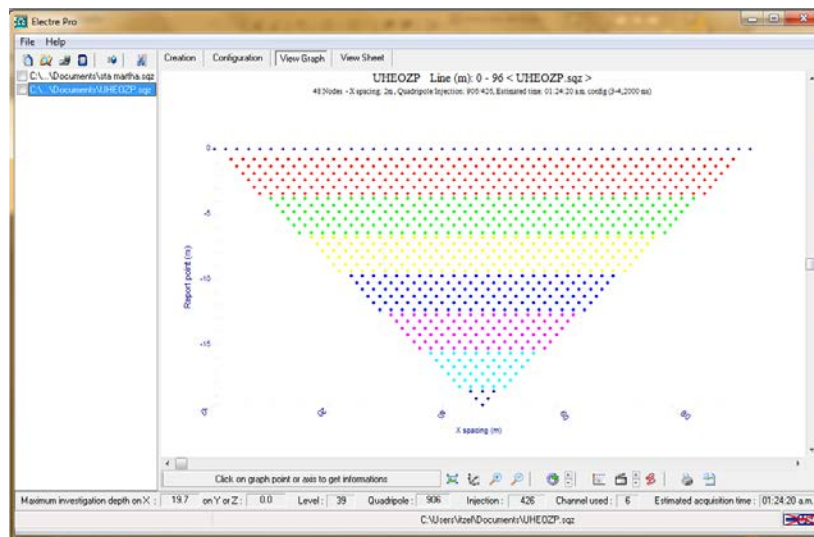


Figura 15. Ventana que muestra la gráfica preliminar del levantamiento; en la parte superior se puede observar el nombre del levantamiento y el número de electrodos a utilizarse, el espaciamiento entre ellos; en la parte media se encuentra una representación de los cuadrípolos; en la parte inferior (de 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	96 m
Número de electrodos utilizados	48
Separación entre electrodos	2 m
Profundidad máxima de investigación	20 m
Total de puntos de atribución	906
Puntos de inyección	426

Tabla 2. Datos del levantamiento (fuentes: Datos obtenidos en campo y EarthImager 2D).

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 2 m de distancia entre cada uno.
4. Verificación de que cada electrodo que hicieran contacto con el material del subsuelo.
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 16).
6. Colocación el equipo *Syscal Pro* entre el electrodo 24 y 25. Se utilizó una batería de 12 V como fuente externa (Figura 17).
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 16. Fotografías que muestran el tendido del cable y electrodos durante el levantamiento (19.3702 ° N, 99.0297° W. Calle: Exploradores (Ejército de Oriente)).



Figura 17. Fotografía que muestra la colocación de la consola del resistímetro Syscal Pro durante el levantamiento (19.3702 ° N, 99.0297° W. Calle: Exploradores (Ejército de Oriente)).

Ubicación de los electrodos

En la Tabla 3 se muestran las coordenadas de cada uno de los puntos donde se colocaron los electrodos nones.

Tabla 3. Ubicación en coordenadas UTM de los electrodos nones (fuente: Datos obtenidos en campo).

No de Electrodo	X	Y	Distancia (m)
1	496877	2141796	0
3	496885	2141791	4
5	496804	2141850	8
7	496809	2141846	12
9	496819	2141839	16
11	496827	2141833	20
13	496799	2141853	24
15	496843	2141821	28
17	496830	2141830	32
19	496823	2141835	36
21	496834	2141828	40
23	496839	2141825	44
25	496814	2141842	48
27	496847	2141819	52
29	496852	2141815	56
31	496856	2141813	60

33	496861	2141809	64
35	496865	2141806	68
37	496869	2141803	72
39	496873	2141800	76
41	496881	2141793	80
43	496889	2141788	84
45	496893	2141786	88
47	496896	2141782	92

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 18 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.

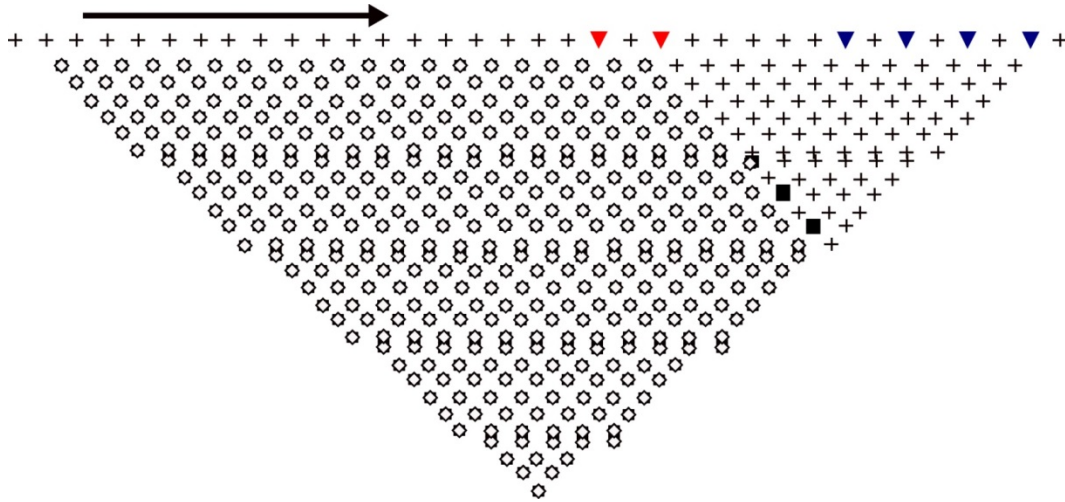
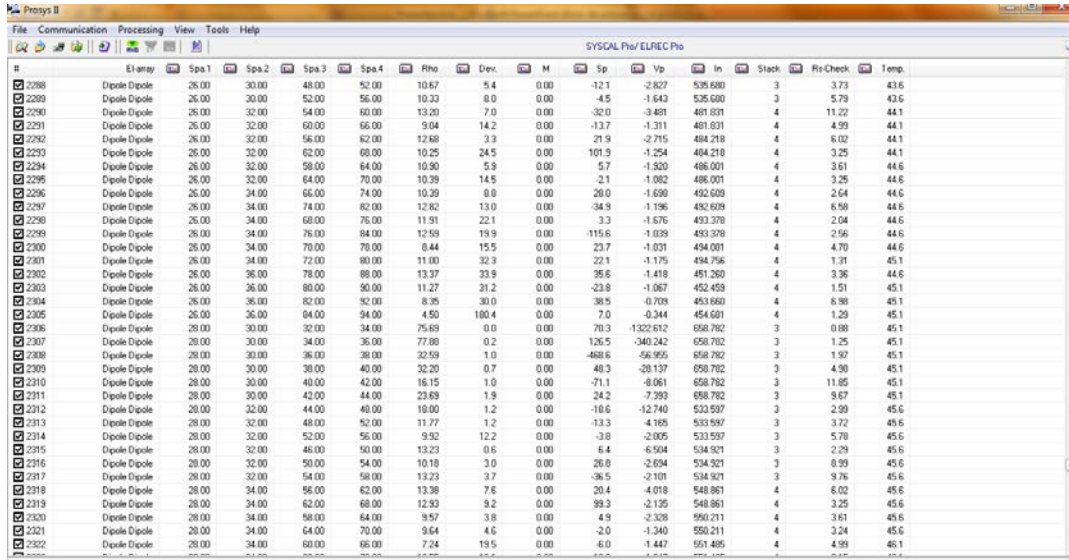


Figura 18. Modelo de puntos de atribución. Triángulos rojos, electrodos de inyección de corriente; triángulos azules, electrodos de potencial; cuadros huecos, puntos de atribución ya medidos; y cuadros negros, puntos de atribución en los que se está realizando la medición en ese momento. Las cruces son los puntos de atribución que aún no han sido medidos (Iris instrumentos, 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 19).



#	El array	Spa.1	Spa.2	Spa.3	Spa.4	Rho	Dev.	M	Sp	Vp	In	Stack	Rs-Check	Temp.
2288	Dipole Dipole	26.00	30.00	48.00	52.00	10.67	5.4	0.00	-12.1	-2.827	535.680	3	3.73	43.6
2289	Dipole Dipole	26.00	30.00	52.00	56.00	10.33	8.0	0.00	-4.5	-1.643	535.680	3	5.78	43.6
2290	Dipole Dipole	26.00	32.00	54.00	60.00	13.20	7.0	0.00	-32.0	-3.481	481.831	4	11.22	44.1
2291	Dipole Dipole	26.00	32.00	60.00	66.00	9.64	14.2	0.00	-13.7	-1.311	461.031	4	4.99	44.1
2292	Dipole Dipole	26.00	32.00	56.00	62.00	12.68	3.3	0.00	29.9	-2.715	484.218	4	6.02	44.1
2293	Dipole Dipole	26.00	32.00	62.00	68.00	10.25	24.5	0.00	101.3	-1.254	484.218	4	3.25	44.1
2294	Dipole Dipole	26.00	32.00	58.00	64.00	10.90	5.9	0.00	5.7	-1.320	486.001	4	3.61	44.6
2295	Dipole Dipole	26.00	32.00	64.00	70.00	10.39	14.5	0.00	-2.1	-1.082	486.001	4	3.25	44.6
2296	Dipole Dipole	26.00	34.00	66.00	74.00	10.39	8.0	0.00	20.0	-1.690	492.609	4	2.64	44.6
2297	Dipole Dipole	26.00	34.00	74.00	82.00	12.82	13.0	0.00	-34.9	-1.196	492.609	4	6.58	44.6
2298	Dipole Dipole	26.00	34.00	68.00	76.00	11.91	22.1	0.00	3.3	-1.676	493.370	4	2.04	44.6
2299	Dipole Dipole	26.00	34.00	76.00	84.00	12.59	19.9	0.00	-115.6	-1.038	493.370	4	2.56	44.6
2300	Dipole Dipole	26.00	34.00	70.00	78.00	8.44	15.5	0.00	23.7	-1.031	494.081	4	4.70	44.6
2301	Dipole Dipole	26.00	34.00	72.00	80.00	11.00	32.3	0.00	22.1	-1.175	494.756	4	1.31	45.1
2302	Dipole Dipole	26.00	36.00	78.00	88.00	13.37	33.9	0.00	35.6	-1.418	491.260	4	3.36	44.6
2303	Dipole Dipole	26.00	36.00	80.00	90.00	11.27	21.2	0.00	-23.8	-1.067	452.459	4	1.51	45.1
2304	Dipole Dipole	26.00	36.00	82.00	92.00	8.35	30.0	0.00	38.5	-0.708	453.660	4	6.86	45.1
2305	Dipole Dipole	26.00	36.00	84.00	94.00	4.50	180.4	0.00	7.0	-0.344	454.601	4	1.29	45.1
2306	Dipole Dipole	28.00	30.00	32.00	34.00	75.69	0.0	0.00	70.3	-1322.612	658.782	3	0.88	45.1
2307	Dipole Dipole	28.00	30.00	34.00	36.00	77.88	0.2	0.00	126.5	-340.242	658.782	3	1.25	45.1
2308	Dipole Dipole	28.00	30.00	36.00	38.00	32.59	1.0	0.00	-488.6	-56.955	658.782	3	1.97	45.1
2309	Dipole Dipole	28.00	30.00	38.00	40.00	32.20	0.7	0.00	48.3	-20.137	658.782	3	4.90	45.1
2310	Dipole Dipole	28.00	30.00	40.00	42.00	16.15	1.0	0.00	-71.1	-8.061	658.782	3	11.85	45.1
2311	Dipole Dipole	28.00	30.00	42.00	44.00	23.89	1.9	0.00	24.2	7.393	658.782	3	8.67	45.1
2312	Dipole Dipole	28.00	32.00	44.00	46.00	10.00	1.2	0.00	-10.6	-12.740	533.597	3	2.99	45.6
2313	Dipole Dipole	28.00	32.00	48.00	52.00	11.77	1.2	0.00	-13.3	4.165	533.597	3	3.72	45.6
2314	Dipole Dipole	28.00	32.00	52.00	56.00	9.92	12.2	0.00	-3.8	-2.005	533.597	3	5.70	45.6
2315	Dipole Dipole	28.00	32.00	46.00	50.00	13.23	0.6	0.00	6.4	6.504	534.921	3	2.29	45.6
2316	Dipole Dipole	28.00	32.00	50.00	54.00	10.18	3.0	0.00	26.0	-2.634	534.921	3	8.99	45.6
2317	Dipole Dipole	28.00	32.00	54.00	58.00	13.23	3.7	0.00	-36.5	-2.101	534.921	3	9.76	45.6
2318	Dipole Dipole	28.00	34.00	56.00	62.00	13.38	7.6	0.00	20.4	4.018	548.861	4	6.02	45.6
2319	Dipole Dipole	28.00	34.00	62.00	68.00	12.93	9.2	0.00	99.3	-2.135	548.861	4	3.25	45.6
2320	Dipole Dipole	28.00	34.00	58.00	64.00	9.57	3.8	0.00	4.9	-2.328	550.211	4	3.61	45.6
2321	Dipole Dipole	28.00	34.00	64.00	70.00	9.64	4.6	0.00	-2.0	-1.340	550.211	4	3.24	45.6
2322	Dipole Dipole	28.00	34.00	60.00	66.00	7.24	19.5	0.00	6.0	-1.447	551.495	4	4.99	46.1

Figura 19. 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 20).

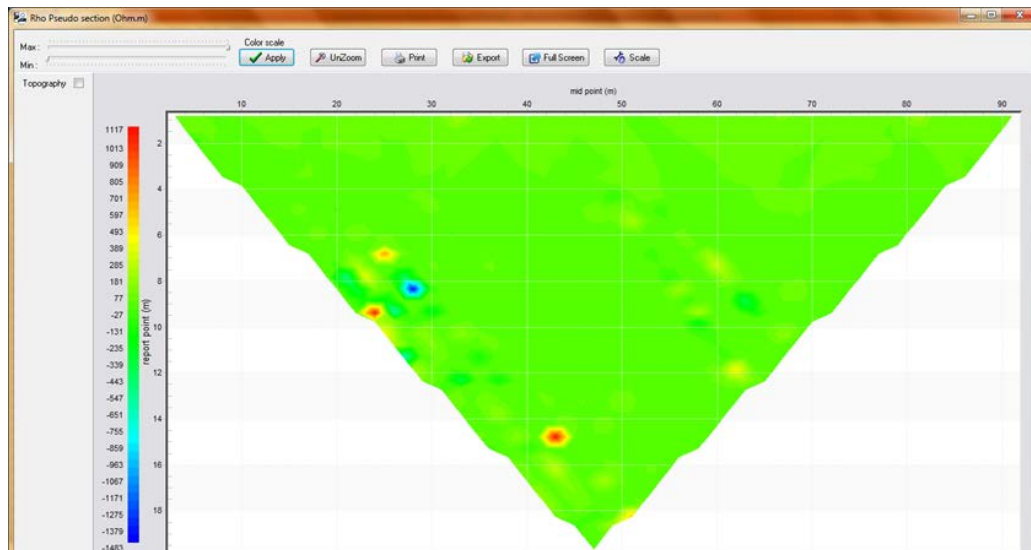


Figura 20. Gráfica de resistividad aparente sin proceso de inversión de datos (software *Prosys II*, Iris Instruments, 2012).

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 21).

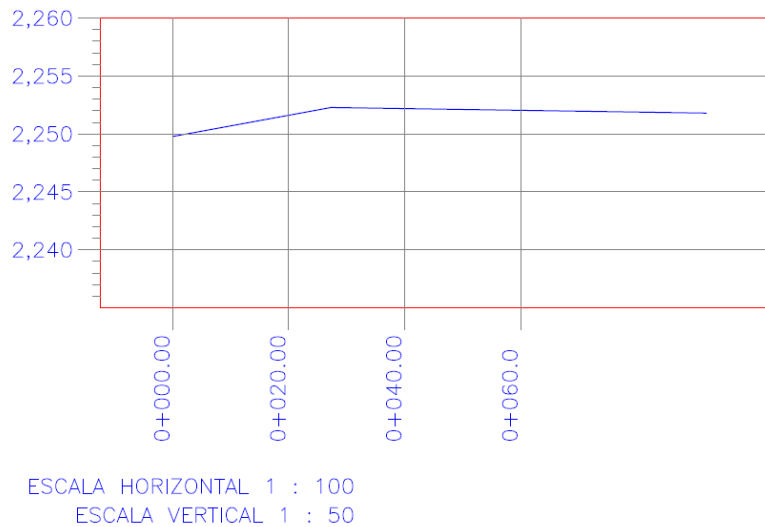


Figura 21. Perfil topográfico de la línea donde se realizó TRE.

Los datos de altimetría se integran a un archivo (.txt) que se ingresa al programa *EarthImager*, con el fin de que el modelo que se obtiene después de la inversión se adapte a las condiciones topográficas reales del terreno (Figura 22).

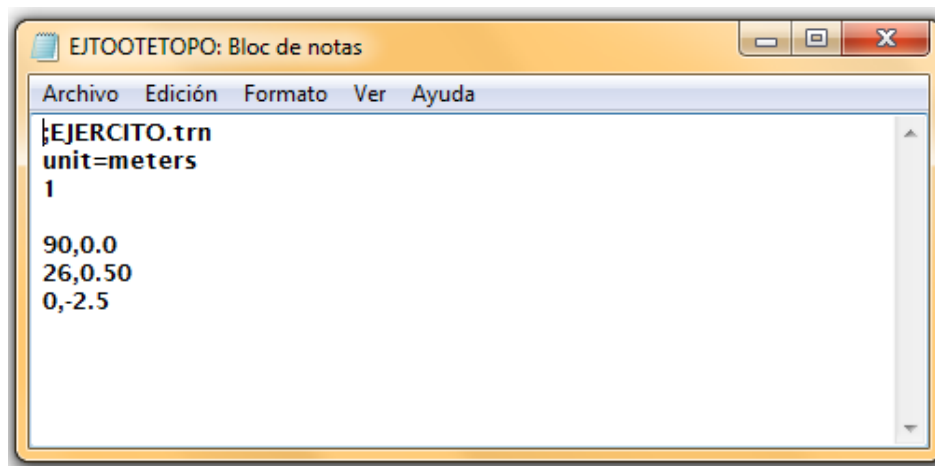


Figura 22. Archivo de topografía que se ingresa al programa *EarthImager* durante el proceso de inversión de datos.

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 propiedad del suelo. En la Tabla 4 se muestran los parámetros que constituyen el modelo directo propuesto para este estudio.

MinVoltage=-0.1	Voltaje mínimo.
MinAppRes=0.01	Resistividad aparente mínima.
MaxAppRes=1000	Resistividad aparente máxima.
MaxRepeatErr=10	Error de repetición máximo.
MaxRecipErr=3	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 (fuente: software EarthImager, 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 espaciamento entre electrodos. Podemos estimar que nuestro modelado alcanzó parámetros adecuados, y por ello los resultados son aceptables (Figura 23).

Gráfica cruzada de datos de resistividad medida y predicha

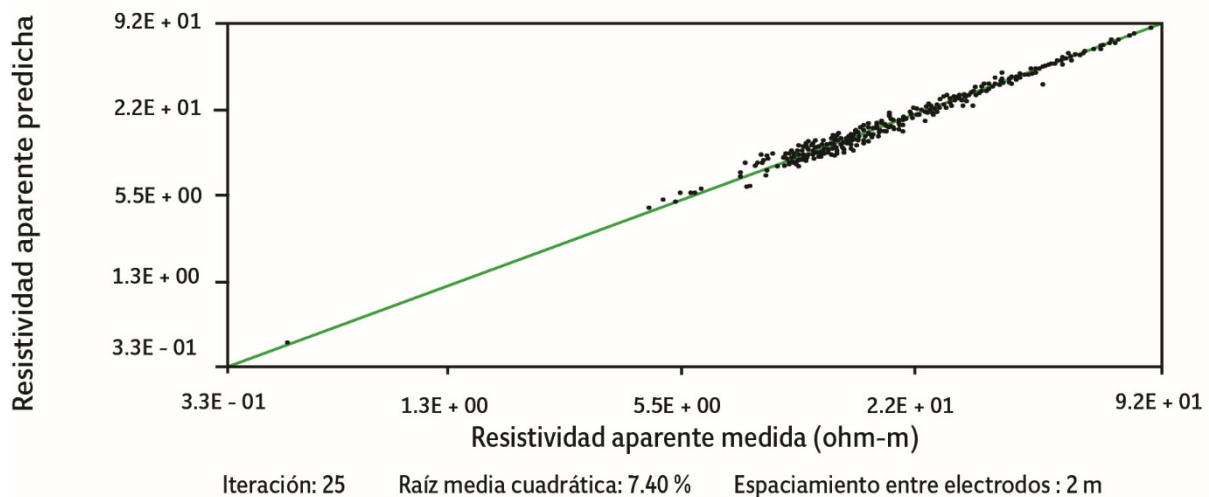


Figura 23. Gráfica cruzada de resistividad aparente del modelo directo vs resistividad aparente medida. (software EarthImager, 2009).

Interpretación de datos (modelo geoelectrico 2D)

Con los resultados de la TRE se procedió a identificar las diferentes capas resistivas, espesores y profundidad 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 24).

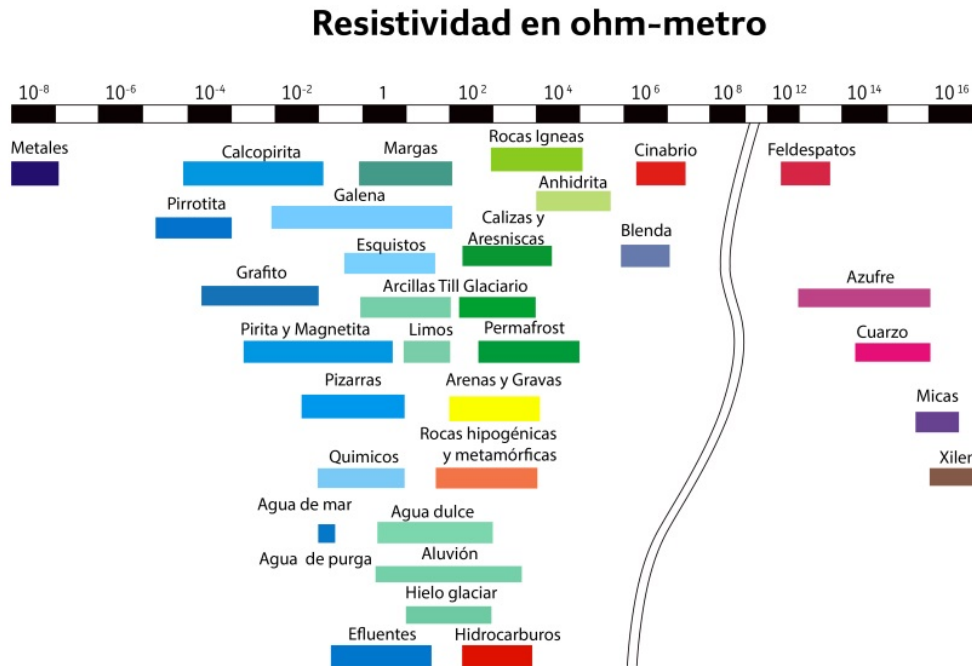


Figura 24. Gráfica de los valores de resistividad de diferentes rocas y minerales (www.estrucplan.com.ar/Articulos/verarticulo.asp?IDArticulo=897).

Una vez obtenido un ajuste aceptable del modelo propuesto y los datos de campo se obtuvo el siguiente modelo geoelectrico 2D (Figura 25). La TRE se dividió en 3 capas de acuerdo a su resistividad y su profundidad, tomando como referencia la gráfica de valores de resistividad (Figura 25):

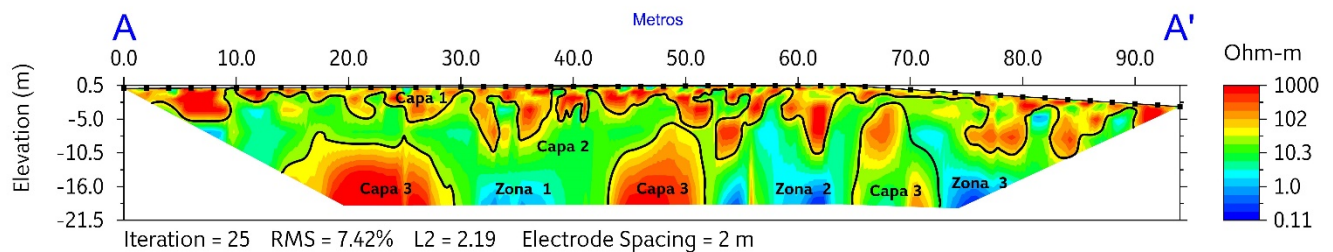


Figura 25. TRE obtenida en la calle Exploradores, U. H. Ejército de Oriente, zona Peñón, Delegación Iztapalapa.

Capa 1

Inicia desde la superficie y penetra hasta una profundidad de 10 m, se compone principalmente de bloques de roca rodeados por materiales más finos y algunas raíces de árboles. Se muestra en color rojo.

Capa 2

Tiene un espesor que varía de unos cuantos metros hasta 18 m aproximadamente, se compone principalmente de materiales degradados de la roca madre, limos, arcillas y materiales de relleno; presenta una resistividad cuyo rango oscila entre los 5-60 Ωm . En esta capa se identificaron tres zonas que a continuación se describen:

Zona 1

Es una área que se encuentra por debajo de los electrodos 16-21 (30-40m); tiene un área aproximada de 50 m², inicia en la base de la Capa 1 y llega hasta la base de la TRE; su resistividad es muy baja <10 Ωm , por lo que podemos asociarla a una zona saturada de agua o un acuífero. Sobre esta zona vemos que la base de la capa 1 alcanza una mayor profundidad con una dirección preferencial hacia la misma (Figura 26).

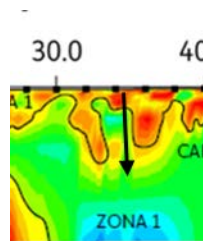


Figura 26. Zona 1 y capas superiores; la flecha indica el desplazamiento de la base de la Capa 1 sobre la Capa 2, con una dirección preferencial hacia la zona 1.

Zona 2

Es un espacio que se observa por debajo de los electros 26 y 32 (50 y 62 m); tiene un espesor cercano a los 16 m y un área de 192 m² aproximadamente. Su resistividad media es menor a 10 Ωm , la cual se puede asociar a una zona de acumulación hídrica o un acuífero. Sobre esta zona se observa que la base de la Capa 1 tiene una mayor profundidad, posiblemente por un movimiento con dirección hacia la Zona 2 (Figura 27).

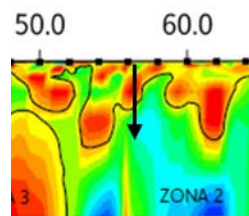


Figura 27. Zona 2 y capas superiores, la flecha indica el movimiento realizado por los materiales hacia la Zona 2

Zona 3

Está ubicada por debajo del área comprendida entre los electrodos 36 y 41 (70 y 80 m) de la TRE; a una profundidad de 13 m. Registró una resistividad <10 Ωm , la cual se puede asociar a una zona de acumulación hídrica o acuífero. Su área, según lo presentado en la imagen resistiva, es de aproximadamente 50 m², la base de la Capa 1 invade la Capa 2, con una dirección preferencial hacia la Zona 3 (Figura 28).

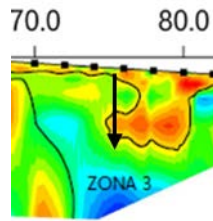


Figura 28. Zona 3 y capas superiores; la flecha indica el movimiento realizado por los bloques de capas superiores hacia la Zona 2.

Capa 3

Tiene resistividad alta (aproximadamente 1000 Ωm). Se trata de la roca madre muy alterada, la cual según la estratigrafía se puede tratar de macizos rocosos basálticos. Su cima es irregular. Su parte más alta se encuentra a 10 m de profundidad y su base profundiza por debajo del nivel investigación.

Conclusiones

En la tomografía se observan tres tipos de materiales divididos en tres capas: 1, 2 y 3. La Capa 3 nos muestra zonas con materiales más resistivos, compactos y con menor permeabilidad respecto a los materiales de la Capa 2 (Zonas 1, 2 y 3) (Figura 29). Sobre los materiales de la Capa 2 se observa la Capa 1 conformada por materiales de relleno (cascajo) con bloques de rocas de varias dimensiones, rodeados de materiales finos muy permeables. El asfalto de la calle (con espesores variables por el proceso de reencarpación) sella superficialmente a la Capa 1. En la calle objeto de este estudio el espesor del asfalto perforado para colocar los electrodos fue de 14 cm.

Con la tomografía obtenida, la calle Exploradores de la U.H. Ejército de Oriente se interpretó como una zona con antiguos canales (Zonas 1, 2 y 3), los cuales fueron rellenos de los materiales permeables (gravas, arenas, limos y arcillas) que componen la Capa 2 (resistividades 10 - 80 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$). La presencia del color azul señala materiales menos resistivos (<20 $\text{Ohm}\cdot\text{m}$) en la base de las Zonas 1, 2 y 3, e indica que ahí se acumula el agua (canales) que posteriormente fluye en una dirección perpendicular a la tomografía.

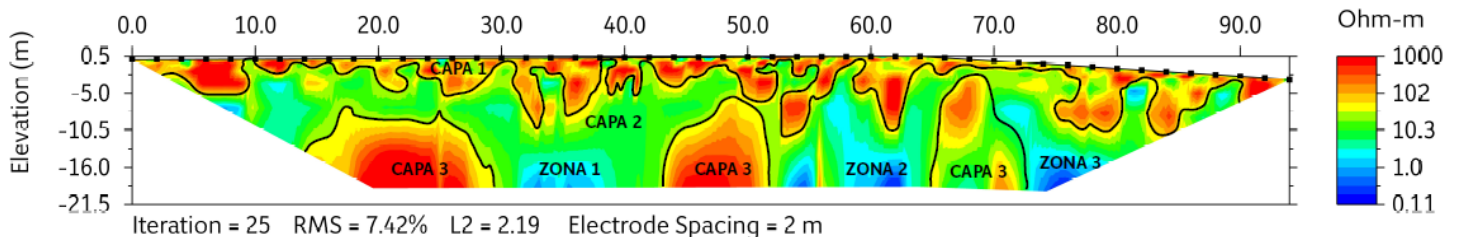


Figura 29. La imagen superior es de la tomografía eléctrica con las Capas 1, 2 y 3, así como las zonas que separan en bloques a la Capa 3.

La Capa 2 varía en espesor porque sus materiales también rellenan los canales a diferente profundidad (Zonas 1, 2 y 3). Estos materiales en algunos sitios tienen materia orgánica y basura, además de arenas, bloques, arcillas y limos. El material que predomina es arena y arcilla (Figura 30). Los materiales de la Capa 2 se encuentran saturados con agua y ésta se concentra en mayor cantidad en la zona de canales (Zonas 1, 2 y 3).



Figura 30. Estas imágenes ejemplifican el fenómeno donde el agua que satura los materiales de la Capa 2 se filtra desde la superficie por medio de huecos (fotografía superior izquierda), fracturas, hundimientos (fotografías inferior izquierda y derecha) o fuga de los drenajes (Las fotografías no pertenecen a la zona).

Para el desarrollo urbano de Iztapalapa fue necesario incrementar la altura de su superficie, ya que era parte de un lago. Esto se logró colocando materiales como cascajo (bloques de rocas rodeados de materiales finos como arena, limo y/o arcilla), escoria (tezontle) y basura, con el propósito de evitar afectaciones por inundaciones. Al filtrarse en el subsuelo y pasar entre los materiales de relleno, el agua arrastra los sedimentos finos que rodean a los bloques de roca, provocando que se formen o agranden los huecos entre los bloques. Los bloques de roca se reacomodan por efecto de la gravedad, excavaciones o vibraciones de terreno causadas por sismos o paso de vehículos. Este reacomodo da origen a deformaciones y hundimientos de la superficie.

El agua en el subsuelo de Iztapalapa fluye de forma continua y constante, ya que no existen evidencias de una escorrentía superficial, así que toda el agua de lluvia y la que baja de las estructuras volcánicas se filtra y fluye hacia las zonas más bajas o alimentan las aguas de los lagos.

El flujo del agua en el subsuelo sigue la dirección de los antiguos canales, cuya pendiente natural continúa hacia la zona de los lagos o los acuíferos profundos. El flujo natural en los canales es lento, continuo y sin presión, ya que ocurre entre los poros o huecos de los materiales de relleno.

Las deformaciones, huecos y hundimientos locales asociados al lavado de finos, son una constante en gran parte del territorio de Iztapalapa y han provocado incontables daños en vías de comunicación y viviendas. Sin embargo han sido acelerados por el incremento del flujo de agua por fugas constantes.

En estudios previos han relacionado los fracturamientos superficiales a la extracción del agua del subsuelo (acuífero a 200 m) por medio de pozos. A continuación se hace una interpretación de lo que sucede alrededor de un pozo y su relación con la superficie, para corroborar que no existe para nosotros asociación de las fracturas superficiales a la extracción del agua.

La relación entre los hundimientos locales, las deformaciones que se observan en la carpeta asfáltica en la superficie, los daños en viviendas y la extracción de agua por medio de los pozos que existen en la zona (a una profundidad de entre 150 y 200 m) podría explicarse de la siguiente forma:

La extracción del agua por medio de los pozos provoca un incremento en la velocidad del flujo del agua somera hacia el pozo, y sería en esta dirección donde se observarían las estructuras de desplazamiento vertical, los montículos de las deformaciones y las estructuras afectadas (Figura 31).

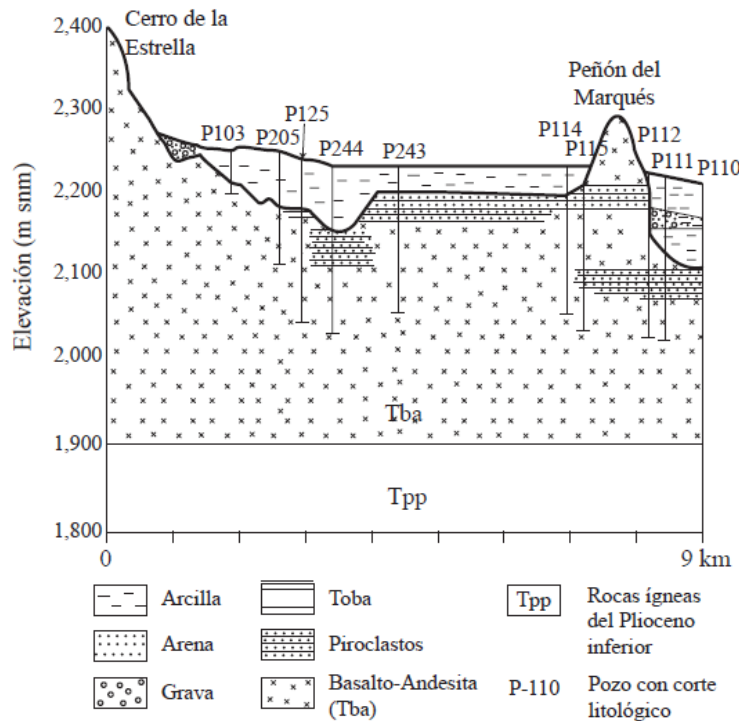


Figura 31. Sección geohidrológica esquemática que muestra la profundidad de los pozos (P; 80 a 200m aproximadamente) que extraen el agua del acuífero que se encuentra a esa profundidad en basaltos y andesitas (Tba). El acuífero superficial se encuentra a máximo 60 metros de profundidad en depósitos de arcillas. Alrededor del peñón se encuentra en la parte izquierda (esquema) un solo acuífero de 40 m de profundidad y en la parte existen dos acuíferos separados por depósitos sedimentarios (esquema tomado de Aguilar-Pérez, 2006).

La Figura 32 es un diagrama esquemático de un pozo perforado en la zona y la manera en que el cono de abatimiento se presenta a su alrededor.

El cono de abatimiento succiona el agua superficial existente en el acuífero somero, esta succión incita a que el flujo de agua natural se acelere y provoque mayor presión de poro por donde pasa. El incremento en el flujo de agua acarrea mayor cantidad de sedimentos finos, induciendo el agrandamiento de los espacios entre bloques.

El movimiento del agua ocurre entre los granos y los bloques. Por lo tanto, la dirección de los fracturamientos o hundimientos superficiales tendrán una dirección bien definida (la dirección del flujo) en la parte más lejana respecto al pozo. Si existen desplazamientos verticales en el pavimento, éstos serán perpendiculares a la dirección de la fractura. Las dimensiones del fracturamiento o hundimiento que se registre en la zona dependerán del espesor y tipos de materiales de relleno existentes en la misma.

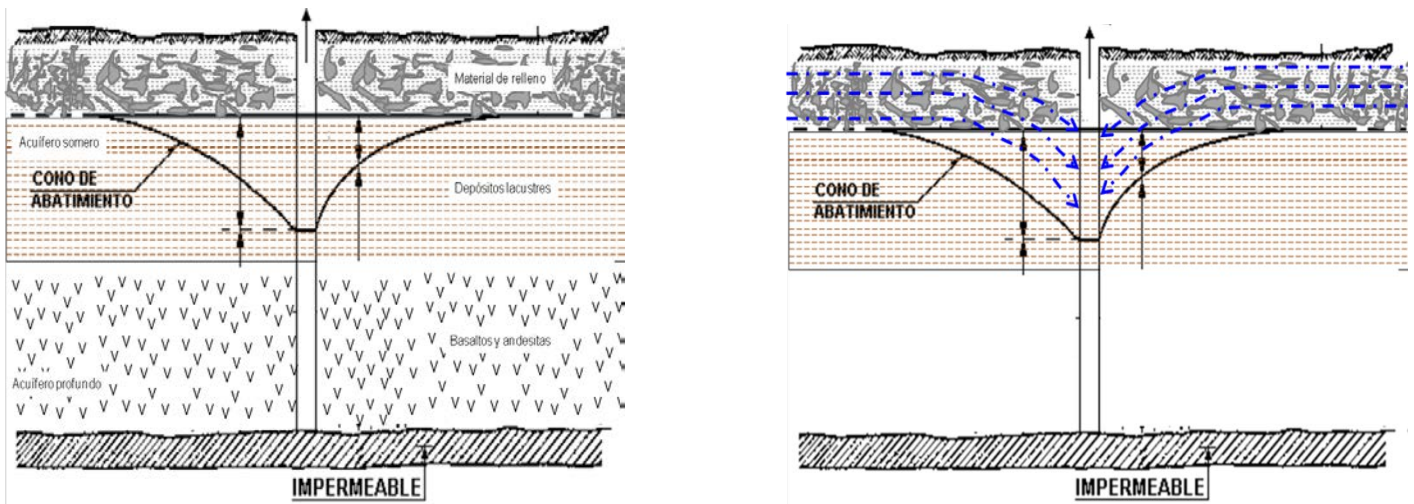


Figura 32. Dibujo esquemática de las condiciones de los acuíferos en la zona de Iztapalapa, el esquema de la izquierda muestra las características litológicas asociadas a un pozo (asfalto, materiales de relleno, depósitos lacustres y acuífero profundo en basaltos y andesitas. El esquema de la derecha es para mostrar la manera en que el flujo de agua subterránea somera sigue la dirección y la forma del cono de abatimiento. Las líneas de flujo (flechas) son horizontales a mayor distancia del pozo y tienden a descender cuando están más cerca del mismo.

La zona de influencia del cono de abatimiento es en las áreas de círculos concéntricos al pozo. El movimiento del flujo de agua es entre grano y grano de los materiales en el subsuelo (Figura 33).

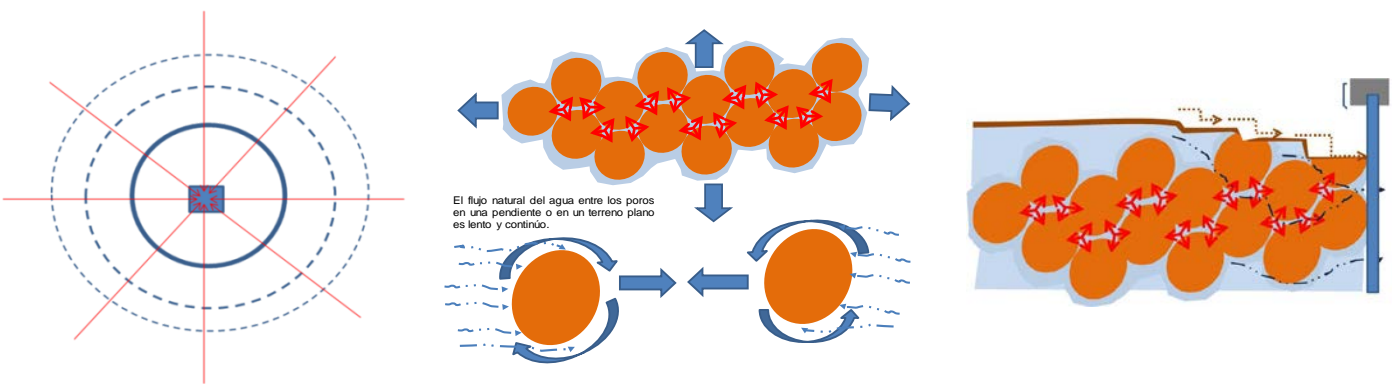


Figura 33. Dibujos esquemáticos de la dirección de los flujos de agua hacia el pozo. En el esquema de la izquierda, la calidad de las líneas de los círculos indica las áreas de influencia y el grado de afectación que podría provocar. Entre más cercano el círculo al pozo, mayores serán los daños. El esquema del centro representa la presión de poro ejercida por el agua entre los granos (flechas rojas); en un movimiento natural de agua en el subsuelo, los granos serían arrastrados en esa dirección. La figura de la derecha representa la manera en que el reacomodo de los bloques ante el flujo de agua y lavado de los finos provoca hundimientos en la superficie, y son mayores entre más cerca se encuentren del pozo.

Al hacer el análisis entre la localización de las zonas de hundimientos y fracturamientos superficiales y la zona de influencia de los conos de abatimiento de los pozos cercanos a la TRE, no se observó alguna relación entre ambos, por lo que se puede deducir que el hundimiento y fracturamiento superficial no tienen su origen al cono de abatimiento de los pozos de extracción de agua de la zona (Figura 34). No se observa una relación entre la dirección de las estructuras de hundimientos locales y la influencia del cono de abatimiento de los pozos existentes en la zona.



Figura 34. Imagen de satélite donde se localizan la cartografía de las estructuras de hundimiento (líneas rojas) el polígono de peligro (área de color rosa), lotes con vulnerabilidad alta (cuadros rojos), lotes vulnerables (color amarillo), la tomografía eléctrica (puntos azules) y los pozos con la zona de influencia del cono de abatimiento (circulo azul relleno y líneas azules punteadas). La dirección de las estructuras de hundimiento no se dirigen al cono de abatimiento.

Por lo anterior expuesto concluimos que el fracturamiento superficial presente se asocia al flujo de agua en el subsuelo por los canales naturales hacia las zonas de lagos que existen actualmente y no a la extracción de agua.

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 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].

Aluvión: Depósitos sedimentarios formados por corrientes fluviales en el cauce y llanura de inundación de los valles. La composición granulométrica y mineralógica, así como características estructural-texturales varían ampliamente en función del régimen de los ríos, de la resistencia de las rocas a la erosión, de la cuenca hidrográfica y de las condiciones geomorfológicas generales [1].

Andesita: Roca ígnea efusiva de composición intermedia, color oscuro, compuesta de cristales de plagioclasa intermedia, minerales máficos y frecuentemente vidrio volcánico, común en las montañas 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 subducción correspondientes a la margen de los continentes y los arcos insulares. Origina una amplia variedad de formas del relieve volcánico y al transformarse por la erosión es común que se formen valles y laderas empinadas y una red fluvial de tipo dendrítico [1].

Arcillas lacustres: Suelo constituido por agregados de silicatos de aluminio hidratados procedentes de la descomposición de minerales de aluminio. Surge de la descomposición de rocas que contienen feldespato, originada en un proceso natural que dura decenas de miles de años. El diámetro de las partículas de la arcilla es inferior a 0.002 mm [12].

Asfalto: Es una mezcla sólida 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 caída o deslizamiento de un cuerpo rocoso con movimiento progresivo y pérdida de cohesión que lo convierte en derrubios y se transforma en un flujo de tipo avalancha. La segunda, por el movimiento de un depósito 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 kilómetros, y en anchura y profundidad, algunas decenas de metros. Los barrancos se forman generalmente en rocas incoherentes o fácilmente erosionables, como los loess, depósitos piroclásticos y conglomerados, por escurrimiento de temporada de las aguas pluviales y nivales [1].

Basalto: Roca ígnea efusiva de composición básica y color oscuro, consistente principalmente en plagioclasas básicas, 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 kilómetros cuadrados. Entre las formas de relieve características están los volcanes de lava y sus derrames asociados, del tipo de Hawái e Islandia. Cubre también extensiones gigantescas del fondo oceánico, mismo que incluye la planicie abisal, montañas submarinas y las dorsales [1].

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

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

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

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

Caolinitas: Arcillas minerales cuya composición es de óxido de aluminio hidratado, formado generalmente a partir de la hidrólisis de feldespato potásico y otros minerales aluminosilicatados [2].

Carbonatación: Reacción química del ácido carbónico del agua de lluvia, agua del suelo y agua subterráneas con los minerales, afecta intensamente a los minerales y rocas carbonatas, como la caliza o el mármol; es una actividad de la meteorización química [2].

Cauce: Porción inferior de un valle fluvial ocupada por la corriente. Se caracteriza por la anchura, la profundidad y la superficie del agua, factores que varían 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 titanios. 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 [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 1,200 °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 quínético 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 et. alia) 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 operare citato) 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.
- Carreón F. (2011) *Identificación y caracterización de los diferentes tipos de fracturas que afectan el subsuelo de la Delegación Iztapalapa del Distrito Federal*. Distrito Federal: Instituto de Ingeniería.
- Carreón F. (2011). *Caracterización geomecánica de los suelos de Iztapalapa, México, para evaluar el fracturamiento causado por deformación diferencial*. Pan-AM CGS Geotechnical Conference.
- 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.
- Espinosa Villalpando, L.A. (2011). *Mediciones de microtemores para estimar el origen del agrietamiento en la Delegación Iztapalapa, D.F., México*. (Tesis inédita de licenciatura). UNAM. México.
- 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.
- 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 geoelectricos en los Valles Centrales*. (Tesis de Maestría). Instituto Politécnico Nacional. Oaxaca.
- 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.

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

Terracon Ingeniería. (2011). *Atlas de Riesgos Naturales de la Delegación Iztapalapa*, México, DF. Terracon Ingeniería: México, D.F.

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] Tarback y Lutdgers. (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/puntal>

[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://cgservicios.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###ixzz3RvyoLBvD>

[16] <http://www.segemar.gov.ar/bibliotecaintemin/MINERALES>

[17] Andrés P. y R. Rodríguez. (2008). *Evaluación y Prevención de Riesgos Ambientales en Centroamérica*. Editorial Documenta Universitaria. España.