



Capítulo 6



Observación forense experimental utilizando técnicas de prospección geofísica de alta resolución

Ana Luz Caccavari Garza¹, Martín Cárdenas Soto², Gerardo Cifuentes Nava¹, David Escobedo Zenil²,
José Antonio Martínez González² y Jesús Sánchez González²

Contribución arbitrada

Resumen

En este capítulo se presenta un estudio geofísico en el que se utilizaron la Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) y la Tomografía de Interferometría de Ruido Sísmico Ambiental (TIRSA) para identificar la presencia de suelos perturbados en 16 puntos en los que se simuló experimentalmente la existencia de sitios de inhumación clandestina. El empleo de estos dos métodos de alta resolución en un sitio controlado se dio con el fin de entender mejor su funcionamiento y posibilidades de aplicación en contextos de búsqueda forense.

El método TRE mide la resistividad eléctrica del terreno y se ha comprobado que resulta eficiente para la detección de fosas, pese a que los tiempos de adquisición de datos no son tan cortos. El método TIRSA mide la velocidad de las ondas sísmicas S (V_s) a partir del ruido sísmico, pero no existen referencias en la literatura sobre su uso en las ciencias forenses. Con la integración de ambos métodos se buscó eliminar ambigüedades generadas por medir una sola propiedad física.

1 Instituto de Geofísica, UNAM

2 Facultad de Ingeniería, UNAM

RIIF (Red Iberoamericana de Investigadores Forenses, CYTED)

Las mediciones hechas con TRE presentaron rasgos de baja resistividad (alta conductividad), mientras que dos de las tres distintas configuraciones de medición probadas en el caso de la TIRSA mostraron anomalías de baja velocidad. Toda vez que ambos parámetros se asocian a la presencia de suelos perturbados, se concluye que la aplicación conjunta de estos dos métodos propios de la geofísica puede utilizarse para la detección de fosas clandestinas. Los hallazgos motivan a mejorar las técnicas de adquisición y procesamiento de datos para fines de búsqueda forense.

Palabras clave: resistividad eléctrica, geofísica de alta resolución, interferometría sísmica, tomografía de ruido ambiental, tomografía de resistividad eléctrica, ruido sísmico.

La geofísica en las ciencias forenses

La geofísica se puede definir como “la aplicación de métodos geofísicos no invasivos para estudiar, localizar y mapear objetos no visibles que suelen estar debajo del suelo, del agua, de los muros, etc.” (Barone, 2017; Dick et al., 2015; Khaldouy et al., 2017; Larson et al., 2011; Pringle et al., 2016). Dicho en otras palabras, la geofísica consiste en medir desde la superficie alguna propiedad física del subsuelo para obtener información de éste y de lo que ahí se encuentre. Existen diferentes métodos geofísicos que se distinguen porque cada uno mide una propiedad física diferente, como puede ser la densidad, la resistividad eléctrica, la velocidad de las ondas sísmicas (Reynolds, 2011; Telford et al., 1990), y se elige uno según el caso de estudio.

Cuando el subsuelo es perfectamente homogéneo, la propiedad física medida se mantendrá igual, mientras que si en el subsuelo se encuentra “algo” cuyas propiedades físicas son diferentes a las del entorno, los instrumentos registran variaciones o contrastes de propiedades (Leucci, 2020). A estas variaciones se les llama “anomalías” y se pueden asociar con diversas características de la zona estudiada, tales como cortes en las capas del subsuelo, material que ha sido removido, presencia de agua, cambios en los materiales o la presencia de objetos enterrados (López-Hidalgo et al., 2002).

Aunque existen más, los métodos geofísicos utilizados con fines forenses se pueden dividir en magnetometría, gravimetría, métodos sísmicos, métodos de resistividad eléctrica y métodos electromagnéticos (Fennning & Donnelly, 2004; Ruffell & McKinley, 2008). Sin embargo, hay que considerar que esto ha ido cambiando con el tiempo, ya que algunos métodos no han sido suficientemente probados para fines forenses como para evaluar su eficiencia (Reynolds, 2011). Actualmente, con el desarrollo tecnológico se han construido instrumentos geofísicos que adquieren datos de forma más versátil y con mayor resolución. Por ello, el método sísmico, escasamente promovido para fines forenses, podría ser uno de los más prometedores en este campo, en especial, si se utiliza el ruido sísmico en vez de fuentes sísmicas o percusiones en el subsuelo.

En la Tabla 1 se mencionan los métodos geofísicos utilizados en las ciencias forenses, qué propiedad física miden, para qué tipo de estudio son recomendables y cuáles son sus principales limitantes. Una descripción más amplia del potencial de cada método relacionado con este tema puede ser encontrada en Caccavari et al. (2022).



Tabla 1. Métodos geofísicos utilizados en las ciencias forenses

Método geofísico	Propiedad física medida	Recomendable para	Limitantes
Gravimetría	Densidad	Cavidades, diferentes compactaciones de materiales, grandes cuerpos rocosos.	Costo, tiempo de adquisición alto.
Magnetometría	Susceptibilidad magnética	Objetos magnéticos.	Presencia de objetos magnéticos y eléctricos en el medio causa ruido.
Métodos sísmicos	Módulo elástico, densidad, velocidad ondas	Estructuras de diferente densidad y velocidad. Identificar distintas capas del subsuelo y calcular su espesor.	No tiene tan buena resolución en el primer metro.
Resistividad	Resistividad	Estratos, contenido de agua, cavidades, diferentes compactaciones de materiales, grandes cuerpos rocosos.	Concreto armado, líneas de corriente eléctricas (subterráneas y aéreas), rocas masivas.
Electromagnéticos GPR	Permitividad, conductividad	Método con la mejor resolución para definir rasgos en el subsuelo. La profundidad y tamaño de los rasgos del subsuelo pueden determinarse con cierta precisión.	Concreto armado, líneas de corriente eléctricas, suelos saturados de humedad, vegetación abundante.

Fuente: elaboración propia.

A pesar de que durante los últimos 30 años se han realizado estudios superficiales de alta resolución (Leucci et al., 2016; Ruffell & McKinley, 2008; Watters & Hunter, 2004), aún se puede considerar que algunos aspectos de este campo están subutilizados y que las técnicas comúnmente usadas en estos esfuerzos pueden ser inadecuadas para la búsqueda de algunos objetivos o sitios específicos (Leucci, 2020).

De igual forma, aún existe un vacío significativo sobre los mejores métodos de adquisición, análisis e interpretación de los datos geofísicos con aplicación forense (Leucci, 2020). Es por esto que conducir investigaciones en sitios controlados, como el que se presenta en este libro, resulta necesario para entender mejor el uso de estas metodologías en la búsqueda forense. Además, es necesario que todo estudio considere diferentes contextos, materiales, ambientes, tipos de suelo y demás factores, como la resolución, ya que los resultados que se obtienen pueden ser distintos.

La geofísica de exploración surge, y ha sido utilizada principalmente, para la localización de objetos de origen geológico de gran magnitud, por esto, su implementación para la búsqueda de objetos de menores dimensiones requiere de un proceso de reajuste de técnicas. Tal es el caso del método sísmico de fuente activa, cuya limitante es la resolución tanto lateral como vertical para definir la geometría de una anomalía o perturbación de la velocidad del subsuelo en los primeros dos metros de profundidad. Para obtener una mayor resolución, se requiere diseñar un arreglo o tendido con detectores (geófonos) con separaciones menores a un metro y generar ondas sísmicas de alta frecuencia mediante golpes contra el suelo. En este caso, el diseño y adquisición de datos se convierte en un proceso invasivo y destructivo que no es recomendable en la búsqueda forense.

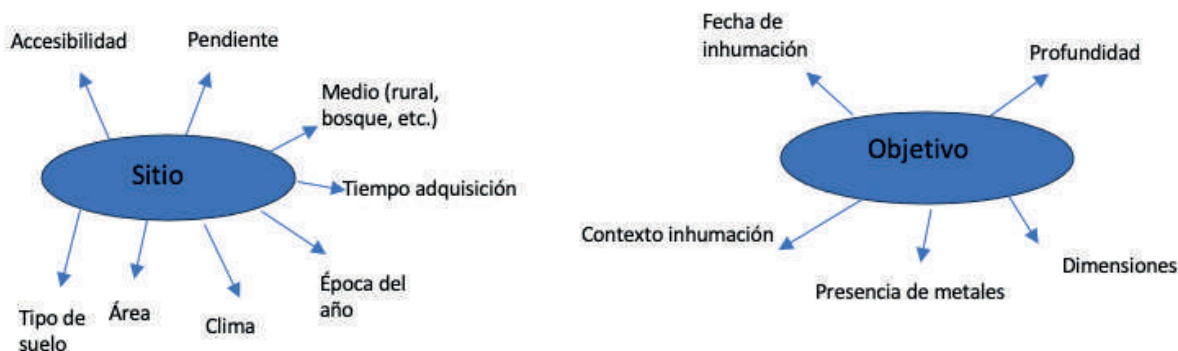
¿Qué método geofísico ayuda a resaltar mejor el objeto buscado?

Debe tomarse en cuenta que, para que sea posible encontrar un objetivo en el subsuelo, es necesario que exista un contraste entre éste y el medio (Leucci, 2019) y que el método geofísico que se utilice sea capaz de medir esta diferencia, de lo contrario resultará “ciego” al objeto buscado. Por ejemplo, si hay presencia de agua, la resistividad eléctrica de los materiales se verá alterada o al existir remoción de material, la densidad se verá modificada. Por el contrario, existen diferentes características de los materiales en las que cierta propiedad física no se verá modificada, por ejemplo, la susceptibilidad magnética de los materiales no se altera por la presencia de agua.

Considerando esto, es importante seleccionar adecuadamente el método o métodos geofísicos a utilizar. Es necesario evaluar si la propiedad física que se mide se modificará por la presencia del objeto que se busca en el subsuelo del sitio en particular, es decir, se necesita tener información del objetivo buscado y del sitio en el que se busca.

En la siguiente figura se enlistan algunas de las características que son necesarias tomar en cuenta (Figura 1). Entre mayor información se tenga, la selección del método empleado será mejor, se tendrá una planeación y procesamiento más adecuados y una interpretación más completa. Debido a esto, también es extremadamente difícil producir directrices específicas que puedan ayudar en todas las búsquedas forenses.

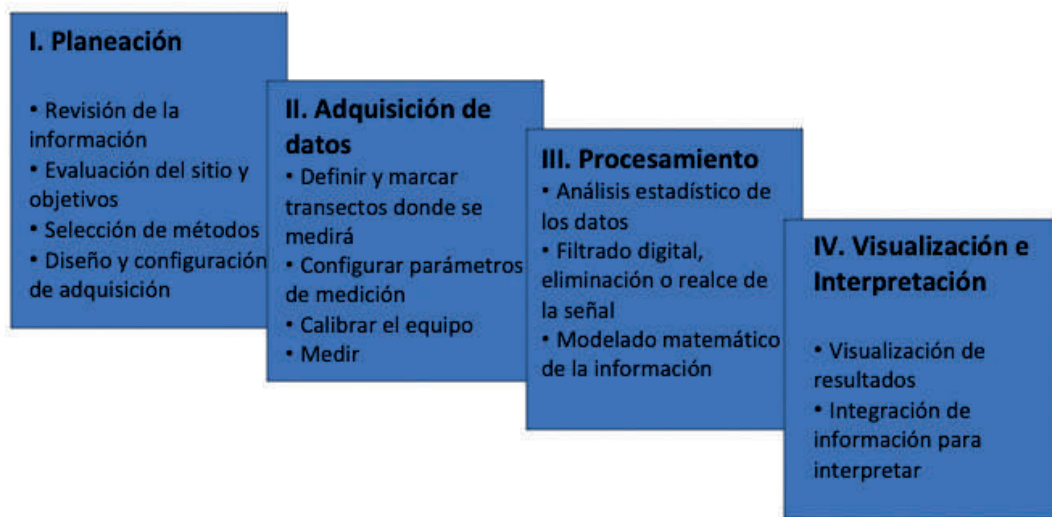
Figura 1. Esquema de información a considerar para realizar estudios con métodos geofísicos con fines forenses



Es importante mencionar también que pueden existir respuestas iguales de los parámetros físicos a características distintas; por ejemplo, al medir resistividad eléctrica y tener valores altos, estos pueden estar asociados tanto a cavidades como a rocas muy compactas. Esto es conocido como principio de la No Unicidad. Para evitar la ambigüedad que generan estas respuestas al momento de interpretar los resultados, es recomendable utilizar más de un método geofísico, es decir, medir más de una propiedad física para realizar la interpretación tomando en cuenta la respuesta a cada una de las propiedades medidas. Asimismo, considerar que al realizar búsquedas en campo, el tiempo de adquisición de los levantamientos puede ser un factor que influya en la selección del método.

Una vez seleccionado el o los métodos geofísicos a utilizar, se debe realizar la planeación de los levantamientos considerando las características del sitio y del objetivo, en particular la profundidad a la que se encuentra, el tamaño del objetivo a buscar y el tamaño del área que se investigará. De esto dependerá la configuración que se utilizará al realizar la adquisición de los datos. Los datos adquiridos en campo serán procesados en gabinete y, por último, con base en los resultados obtenidos y con la información que se tiene del objetivo y sitio de estudio, se realizará la interpretación de los resultados (Figura 2). Sobra decir que cada una de estas etapas resultará importante en la obtención de buenos resultados.

Figura 2. Etapas en un estudio geofísico



Una de las ventajas que tiene la geofísica consiste en ser no invasiva, ya que como se mencionó, todas las mediciones se realizan desde la superficie, sin necesidad de excavar o perforar. De manera general, se considera también como ventaja que se pueden cubrir áreas grandes en tiempos relativamente cortos; sin embargo, esto dependerá del método geofísico que se emplee y del detalle que se requiera para encontrar el objetivo deseado.

Como ya se ha dicho, existen diversos métodos geofísicos, para este experimento los métodos utilizados fueron la Tomografía de Resistividad Eléctrica y Estudios de Ruido Sísmico de alta frecuencia. A continuación, se realizará una breve descripción del funcionamiento de cada uno de estos métodos.

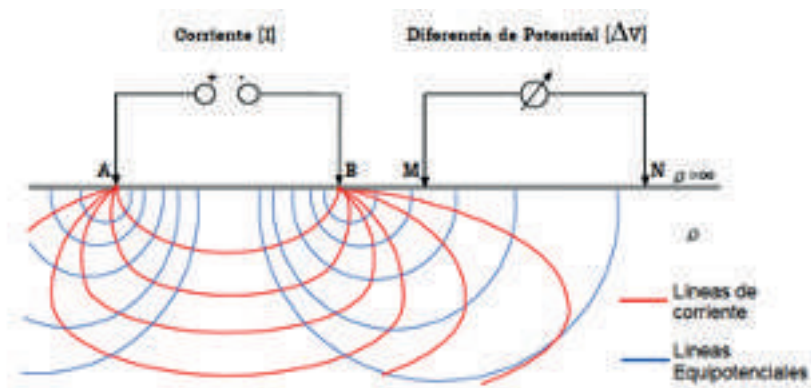
Tomografía de Resistividad Eléctrica

La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) no siempre fue considerada una herramienta que pudiera dar buenos resultados en las ciencias forenses (Reynolds, 2011); sin embargo, a

pesar de ser un método lento, con el tiempo ha mostrado tener una respuesta mucho mejor a la esperada en ciertos contextos (El-Qady et al., 2019; Leucci, 2020).

El método de resistividad eléctrica estudia las propiedades eléctricas del subsuelo. Se utiliza para resaltar las discontinuidades horizontales y verticales en términos de los parámetros eléctricos: la resistividad eléctrica y la conductividad (Leucci, 2020). La resistividad eléctrica es la medida de cómo los materiales permiten o no el paso de la corriente eléctrica y la conductividad es su inverso. Emplea una fuente artificial que introduce corriente eléctrica al subsuelo a través de un par de electrodos A y B (electrodos de corriente). Mientras que otro par de electrodos M y N (electrodos de potencial) miden el potencial eléctrico (Koefoed, 1979) (Figura 3). La corriente eléctrica se acumulará en las capas o materiales más conductoras y disminuirá en las capas más resistivas. El potencial medido en la superficie refleja estas diferencias de trayectoria y proporcionará una distribución de la resistividad eléctrica en los materiales investigados.

Figura 3. Esquema del principio de funcionamiento de la Tomografía de Resistividad Eléctrica, dos electrodos (A y B) inyectan corriente al subsuelo y dos electrodos miden la diferencia de potencial (M y N)



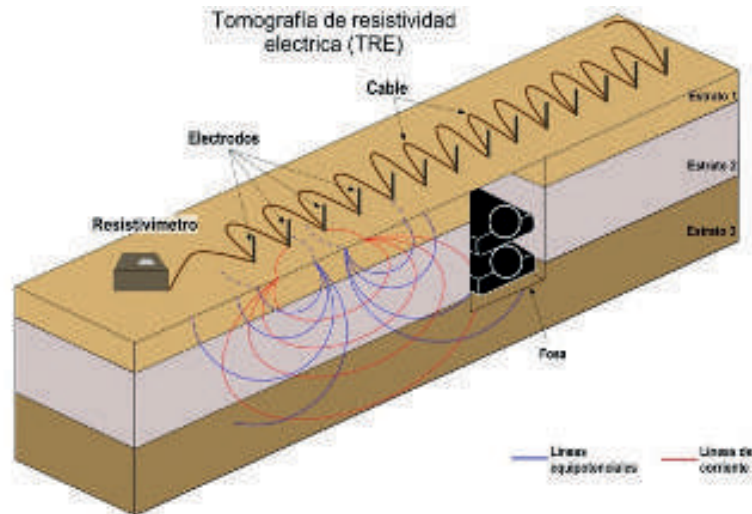
Fuente: adaptado de Quiroz (2020).

La resistividad es un concepto derivado de la ley de Ohm, que es la relación de la respuesta de la resistencia (R) ohm de un medio al flujo de una corriente eléctrica (I) ampere produciendo una diferencia de potencial (ΔV) volt, donde $\Delta V = R \cdot I$ y $R = \Delta V / I$.

El concepto de resistividad eléctrica (ρ) es un parámetro normalizado que se enuncia como la resistencia eléctrica que cruza un área por una unidad de distancia, es por esto que su unidad es ohm·m. Entonces, la ley de Ohm se modifica como $\rho = k \cdot \Delta V / I$ donde (k) es llamado factor geométrico, que es la relación entre el área que cruza la corriente por unidad de longitud, y estará determinada por la geometría del llamado arreglo electrodico. Entonces se entiende que al inyectar una corriente eléctrica (I) al terreno, midiendo su respuesta de la diferencia de potencial (ΔV) y conociendo la posición de estos puntos (k), se puede conocer el valor de la resistividad eléctrica (ρ) (Cifuentes-Nava et al., 2024).

El desarrollo en campo de este método consiste en expandir una línea de electrodos (Figura 4) con una separación entre ellos de (a), como un valor constante, donde la profundidad de investigación se incrementa al separar los electrodos en múltiplos ($n \times a$) (Figura 5).

Figura 4. Esquema de la adquisición de datos de la Tomografía de Resistividad Eléctrica

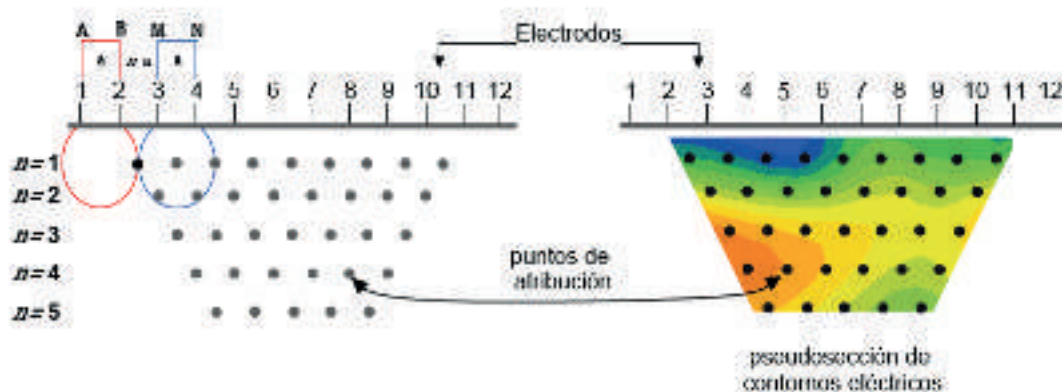


Fuente: adaptado de Quiroz (2020).

Cada valor de n representa un nivel de investigación y corresponde a una profundidad. Cada uno de los electrodos colocados puede funcionar como fuente (donde se inyecta la corriente) o de recepción (donde se lee la caída de potencial), y dependiendo de qué electrodos inyectan y miden, la lectura se irá recorriendo. La lectura que se genera con cada cuatro electrodos (cuadripolos) se conoce como punto de atribución o de medición (Figura 5).

Con los valores de resistividad se construye la sección de isorresistividades aparentes que muestran, en una primera aproximación, los cambios de resistividad presentes en el subsuelo (Figura 5, imagen derecha). Dichos cambios se representan en color, donde los colores mínimos indican bajos resistivos (altos conductivos) y los máximos, altos resistivos (bajos conductivos). Los resultados obtenidos deben someterse a un proceso numérico, llamado inversión, para obtener un modelo real. (Cifuentes-Nava et al., 2024)

Figura 5. Esquema de distribución de las mediciones. Izquierda: Posición de los electrodos y puntos de atribución generados. Así como los niveles de medición. Del lado derecho se construye una primera aproximación de los resultados asignando un color a los valores medidos



Fuente: adaptado de Quiroz (2020).

Para la interpretación, los valores de resistividad obtenidos se pueden asociar a los materiales al conocer el valor que corresponde a este material. Sin embargo, ya que las propiedades físicas de un mismo material pueden cambiar por otros factores, como la porosidad o saturación de líquidos, los valores asociados no corresponden a un valor puntual, sino que abarcan distintos rangos de valores de resistividad, como se puede ver en la Tabla 2.

Tabla 2. Rango de valores de resistividad eléctrica para los materiales y tipos de suelo más comunes

Materiales	Resistividad ohm-m	Conductividad mS/m
<i>Rocas Ígneas y Metamórficas</i>		
Granito	5x10 ³ a 10 ⁶	0.001 a 0.2
Basalto	10 ³ a 10 ⁶	0.001 a 1
Pizarra	6x10 ² a 4x10 ⁷	2.5x10 ⁻⁵ a 1.7
Mármol	10 ² a 2.5x10 ⁸	4x10 ⁻⁶ a 10
Cuarcita	10 ² a 2x10 ⁸	5x10 ⁻⁶ a 10
<i>Rocas Sedimentarias</i>		
Arenisca	8 a 4x10 ³	0.25 a 125
Esquisto	20 a 2x10 ³	0.5 a 50
Caliza	50 a 4x10 ²	2.5 a 20
<i>Suelos y Agua</i>		
Arcilla	1 a 1000	1 a 1000
Aluvión	10 a 800	1.25 a 100
Agua Subterránea (fresca)	10 a 100	10 a 100
Agua de Mar	0.2	5000

Fuente: elaboración propia con información de Loke (2001).

Métodos sísmicos

Los métodos sísmicos de prospección se dividen en: métodos sísmicos activos, aquellos que requieren una fuente para la generación de ondas, y métodos sísmicos pasivos, aquellos que utilizan ruido sísmico. A continuación se hará un breve descripción del funcionamiento de ambos y en particular del método de Tomografía de Interferometría de Ruido Sísmico Ambiental (TIRSA), qué corresponde al método sísmico empleado en este estudio.

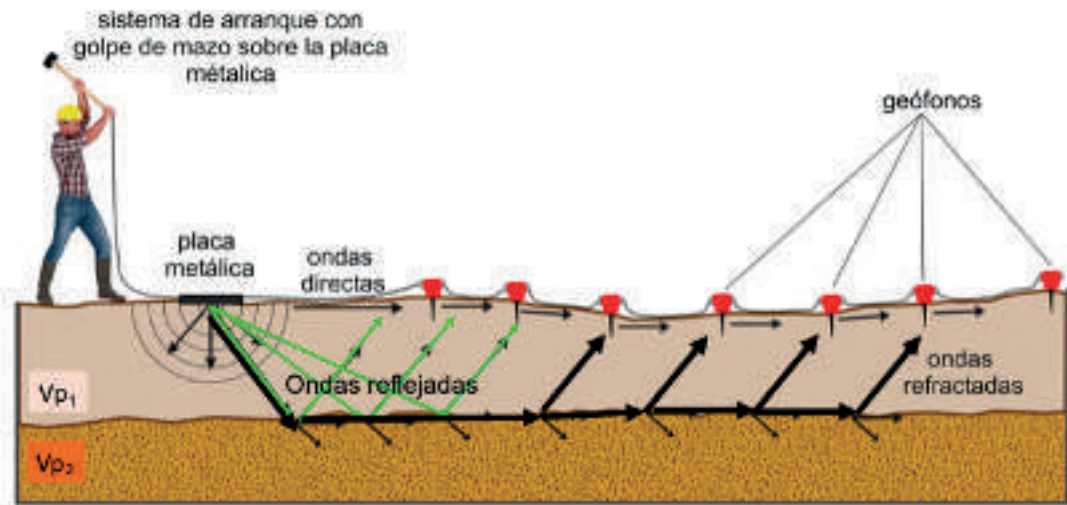
Métodos sísmicos activos

La prospección sísmica es un método geofísico de fuente artificial donde se producen ondas sísmicas que son registradas por medio de receptores sísmicos o geófonos. En el método se miden los tiempos de llegada de las ondas sísmicas que viajan de forma directa a los receptores o que son reflejadas y refractadas por la estructura geológica (Figura 6). Las ondas sísmicas se clasifican de acuerdo con la velocidad en la que se propagan en el subsuelo. Una vez que las ondas son producidas, en el registro sísmico o sismograma aparecen los desplazamientos producidos por las ondas que viajan con mayor velocidad (ondas P o primarias), y posteriormente las ondas con menor velocidad (ondas S o secundarias). El valor de la velocidad con la que se propagan estas ondas está relacionado con la velocidad de los materiales que conforman el subsuelo (Sheehan et al., 2005; Zelt et al., 2013). Una característica importante de las ondas secundarias es que éstas no se propagan en líquidos, o bien en medios saturados su velocidad puede decrecer considerablemente. Un tipo de ondas secundarias son las ondas superficiales, cuya característica principal es que la velocidad varía en función de la frecuencia, y durante su propagación la energía está concentrada cerca de la superficie (método SASW: Xia et al., 1999; método MASW: Miller et al., 1999; Park et al., 1999).

Las características de propagación de las ondas son aprovechados por los métodos de prospección sísmica de reflexión y refracción. El método de reflexión es generalmente utilizado para la búsqueda de hidrocarburos, y el método de refracción es ampliamente aplicado para determinar sitios ideales para la construcción de obras de ingeniería civil. Los estudios de ondas superficiales son un complemento de los estudios de refracción ya que permiten determinar la velocidad de corte de materiales, la cual es de gran uso en estudios de geotecnia. La resolución vertical u horizontal de estos métodos (la capacidad de detectar variaciones de

velocidad), depende de la energía sísmica inyectada al subsuelo, del diseño de arreglo de detectores, y de las características de fabricación de éstos (Jokar et al., 2019).

Figura 6. Esquema que muestra un experimento de generación de ondas sísmicas



Fuente: adaptado de Caccavari et al. (2021).

Métodos sísmicos pasivos

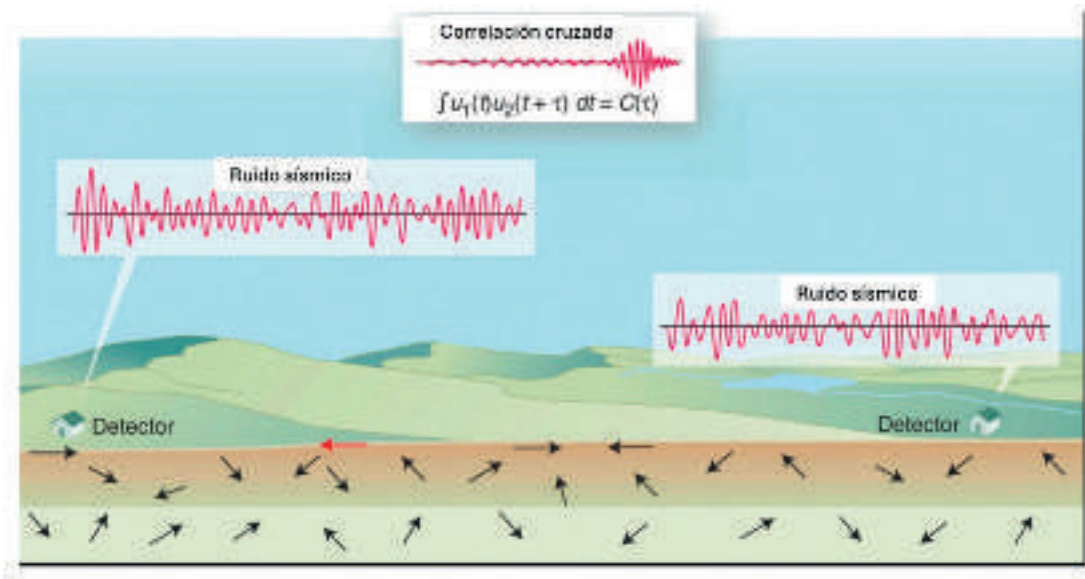
Recientemente, los métodos de prospección sísmica incluyen las técnicas de ruido sísmico, o también denominada sísmica pasiva. La sísmica pasiva hace uso de las ondas superficiales contenidas en el ruido sísmico. El uso de ruido sísmico para fines de exploración del subsuelo está asociado al concepto de microtemores, los cuales se definen como vibraciones en el subsuelo generadas por una variedad de fuentes en un amplio rango de frecuencias. En frecuencias menores de un hertzio las fuentes son, por ejemplo, debido al oleaje oceánico, y en frecuencias mayores de un hertzio éstas se deben a la actividad humana o antropogénica (Bard, 1988; Bonnefoy-Claudet, 2006).

El énfasis de los métodos de ruido es la caracterización de la estructura del subsuelo a fin contar con ventajas de reconocimiento del subsuelo más allá de lo que pueden brindar las técnicas geotécnicas. La utilización del ruido de fondo presenta ventajas con respecto a aquellas que utilizan fuentes activas, por ejemplo, los estudios se pueden realizar en ambientes urbanos y se puede alcanzar mayor profundidad de penetración debido al ruido sísmico de baja frecuencia. En el dominio de la frecuencia, el método ha sido ampliamente utilizado tanto con arreglos regulares como irregulares (Louie, 2001; Wathelet et al., 2008), incluso utilizando solo un par de estaciones (Chávez-García et al., 2006). En el dominio del tiempo, el método de Interferometría Sísmica (IS), hace uso de la correlación cruzada del ruido no solo para obtener las velocidades del subsuelo (Figura 7), sino también para generar secciones sísmicas (fuente virtual) sin necesidad de contar con una fuente para la generación mecánica de ondas (Draganov et al., 2007).

La Tomografía de Interferometría de Ruido Sísmico Ambiental (TIRSA) puede crear una representación 3D de la estructura del subsuelo a partir de los tiempos de llegada de las formas de onda de las correlaciones cruzadas entre pares de estaciones. Tal correlación captura la respuesta del subsuelo (Función de Green Empírica; FGE), es decir, contiene el campo de ondas que prevalece en el ruido sísmico (Campillo & Paul, 2003). La FGE está principalmente conformada por ondas superficiales cuyas características de dispersión pueden ser medidas en un amplio rango de frecuencias (Gouedard et al., 2008; Shapiro, 2004). Un resumen de los antecedentes históricos y una variedad de aplicaciones en diversos campos de la ciencia pueden ser encontrados en Schuster (2014), Larose et al. (2015).

La aplicación de métodos sísmicos, activos o pasivos, para fines forenses promete ser un área de oportunidad debido a los avances en el procesamiento de datos y el uso de técnicas emergentes para la visualización e interpretación de datos. Aunque aún no se cuenta una amplia variedad de estudios a escalas menores de cinco metros, algunos resultados en escalas de uno a dos decenas de metros han sido exitosamente publicados. En el caso de México, la línea de trabajo ha sido realizada por la Facultad de Ingeniería de la UNAM para la exploración de cavidades, geotécnica y fines arqueológicos (Argote et al., 2020; Cárdenas-Soto et al., 2016; 2020; 2021; Chávez-García et al., 2020; Piña-Flores et al., 2020). El uso de esas técnicas puede ser perfectamente adaptado para escalas menores siguiendo apropiados experimentos controlados.

Figura 7. Esquema de la obtención de la función de correlación cruzada o Función de Green Empírica mediante el método de Interferometría Sísmica



Fuente: modificada de Weaver (2005).

Campo Experimental Polígono 2

El área de estudio se encuentra dentro de las instalaciones de la Universidad Politécnica de la Zona Metropolitana de Guadalajara, campus Cajititlán, Jalisco (Figura 8). Se trata de un polígono de aproximadamente 20 x 30 m en el que se encuentran 16 fosas experimentales con profundidades entre 0.7 a 1.0 m, separadas aproximadamente dos metros en la dirección NS, y cuatro metros en la dirección EO, cuyas características fueron descritas en capítulos previos.

I. Planeación

Para realizar la selección de los métodos geofísicos y planear la configuración de adquisición de datos, se tomaron en cuenta los siguientes factores: las dimensiones del terreno son de aproximadamente 20 x 30 m (un área mayor requeriría varios días de adquisición y procesamiento), es posible acceder con el equipo en vehículo, tiene poca pendiente, el clima es seco, la adquisición de datos se realizó en temporada de estiaje, las inhumaciones son recientes (lo que genera contrastes con el medio por la remoción de material, además de la posible presencia de humedad derivada de los cuerpos), son fosas individuales, de metro por metro y medio, someras.

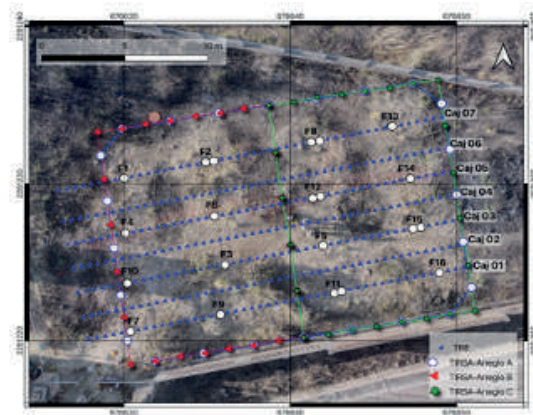
Con base en esto, para este experimento se decidió utilizar Tomografía de Resistividad Eléctrica y Estudios de Ruido Sísmico de Alta Frecuencia. La magnetometría no era viable debido a la presencia de una barda metálica que rodea el área, además de que no se reportó la presencia de objetos magnéticos en las fosas, y por otro lado, ya se contaba con estudios de GPR, que se describen en otro capítulo de este libro. Como se mencionó previamente, el objetivo de este trabajo también consiste en evaluar la respuesta de estos dos métodos en el contexto de este campo experimental.

La configuración de la adquisición de datos se diseñó considerando esta información en el caso de la TRE: realizar siete líneas paralelas con una separación entre electrodos de 0.5 m para que tuviera la resolución necesario. En el caso de la TIRSA: se realizaron tres arreglos diferentes para conocer la estructura de velocidad del subsuelo, y en especial, verificar los alcances del método TIRSA para ubicar la presencia de dichas fosas (Figura 8).



II. Adquisición de datos

Figura 8 . Esquema de adquisición de datos de la TRE y Ruido Sísmico. Los puntos blancos corresponden a la posición de las fosas observadas en campo



Fuente: elaboración propia.

Figura 9 . Fotos de la adquisición de datos A) TRE y B)TIRSA



Fuente: elaboración propia.

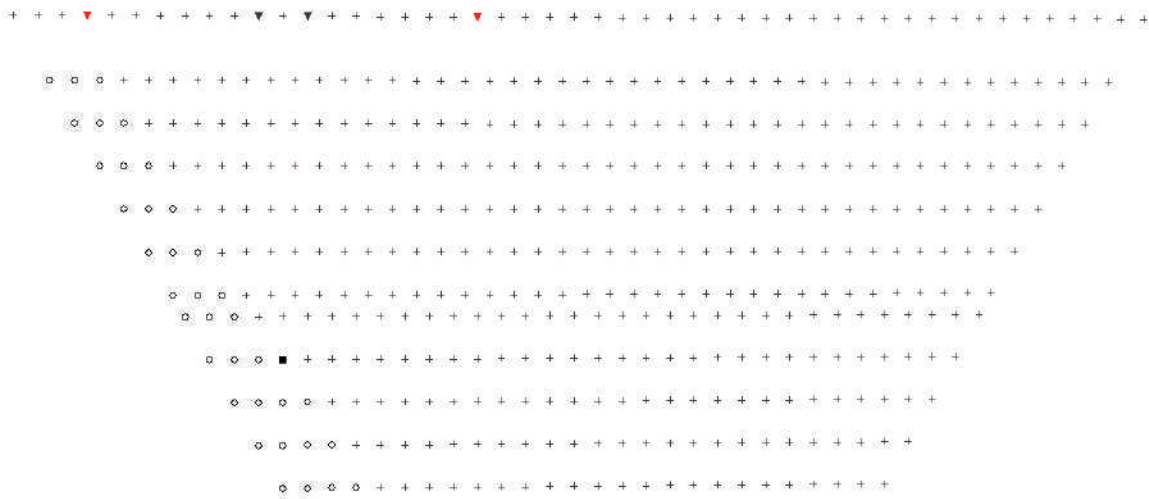
TRE

Para el método de TRE se levantaron siete perfiles 2D con una separación entre ellos de 1.5 m (salvo en la última de dos metros). En ese caso se conocía la ubicación de las fosas, por lo que se consideró que un perfil pasara sobre las fosas y otro en un terreno no modificado que pudiera servir de control, y así consecutivamente. También se consideró que la distancia entre ellas permitiera que las líneas se integraran para generar un modelo 3D.

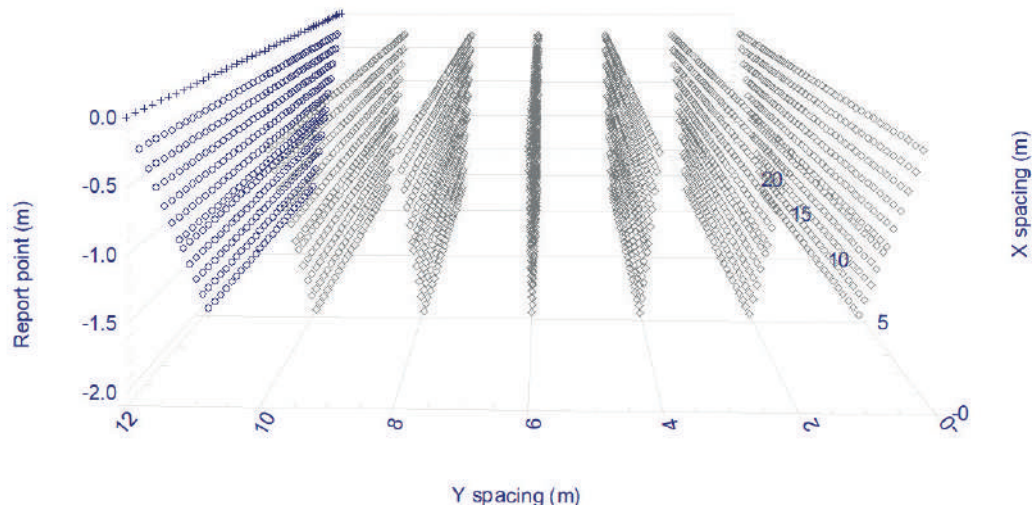
Se optó por una separación entre electrodos de 0.5 m, para tener la resolución que permitiera detectar las fosas de 1 m de ancho. Se utilizaron 48 electrodos, por lo que el largo de las líneas fue de 23.5 m (Figura 10). El equipo utilizado para este método se conoce como resistivímetro.

En esta ocasión se utilizó un resistivímetro de la marca IRIS Instruments modelo Syscal Junior con 48 electrodos de acero de 0.30 m de largo.

Figura 10. A) Esquema de medición de un perfil 2D. Se observan en rojo los electrodos de corriente A y B, en azul los electrodos de potencial MN y el punto negro corresponde al punto de atribución o de lectura de ese cuadrípolo. B) Esquema de la distribución de los puntos de atribución de los siete perfiles



Fuente: elaboración propia.

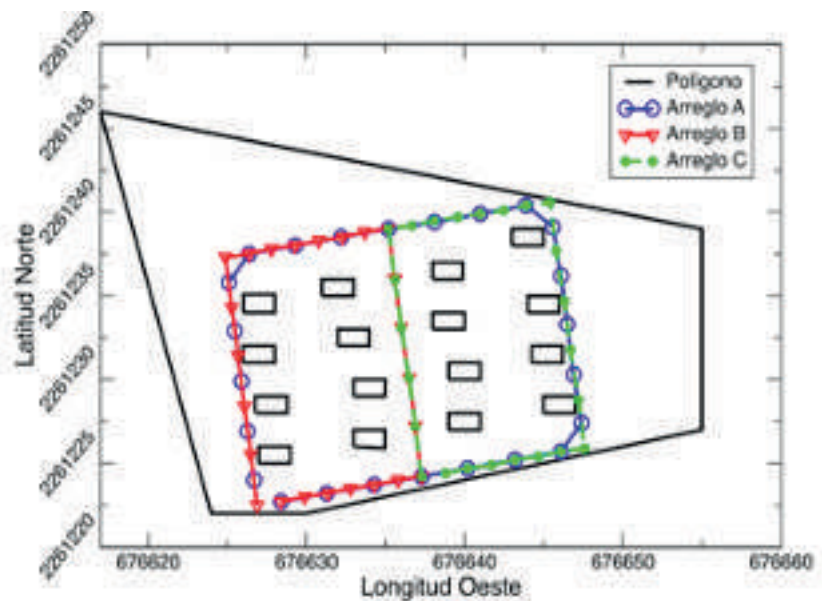


Fuente: elaboración propia.

TIRSA

Para este método se realizaron tres arreglos diferentes. La Figura 11 muestra la forma geométrica de cada uno de los arreglos, los cuales estuvieron conformados por 24 geófonos verticales con una respuesta en frecuencia de 100 Hz conectados a un sismógrafo Geode de manufactura Geometrics. La elección de geófonos de alta frecuencia se debió a que el objetivo es resolver los primeros tres metros de profundidad.

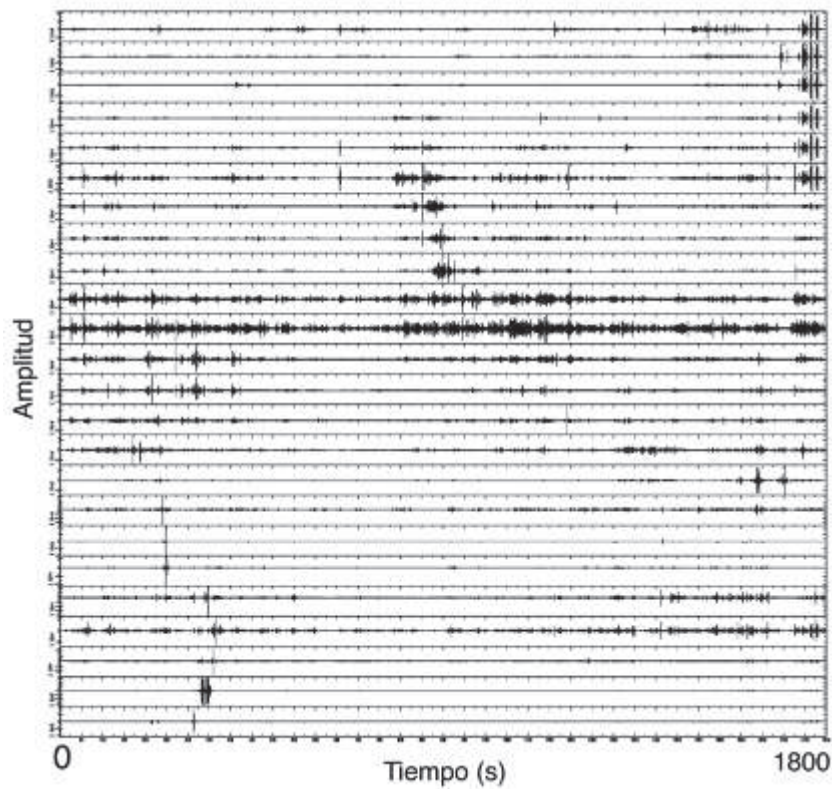
Figura 11. Diseño de arreglos para el registro de ruido sísmico. Los rectángulos indican la posición de las fosas



Fuente: elaboración propia.

Los arreglos fueron denominados A1, A2 y A3, y fueron realizados el 25 de abril de 2024. El arreglo A1 cubrió las 16 fosas y los arreglos A2 y A3 ocho fosas cada uno. La separación de geófonos fue aproximadamente de dos metros para el arreglo A1, y de uno y dos metros para los arreglos A2 y A3. En cada arreglo se registró ruido sísmico ambiental a razón de 500 muestras por segundo durante 30 minutos. La Figura 12 muestra un ejemplo del ruido registrado en el arreglo A1, al igual que en los otros arreglos, se observa que el ruido de fondo tiene la contribución de varios eventos indeseados (eventos transitorios) como es el caminar de peatones, tránsito de vehículos y posiblemente maquinaria industrial.

Figura 12. Ejemplo de registro de ruido sísmico en los 24 geófonos del arreglo A1. El orden de las trazas es de arriba hacia abajo, siendo la primera la que corresponde al registro en el geófono 01, y la última al 24. Las trazas han sido filtradas con un filtro pasa altas de 100 Hz



Fuente: elaboración propia.

III. Procesamiento

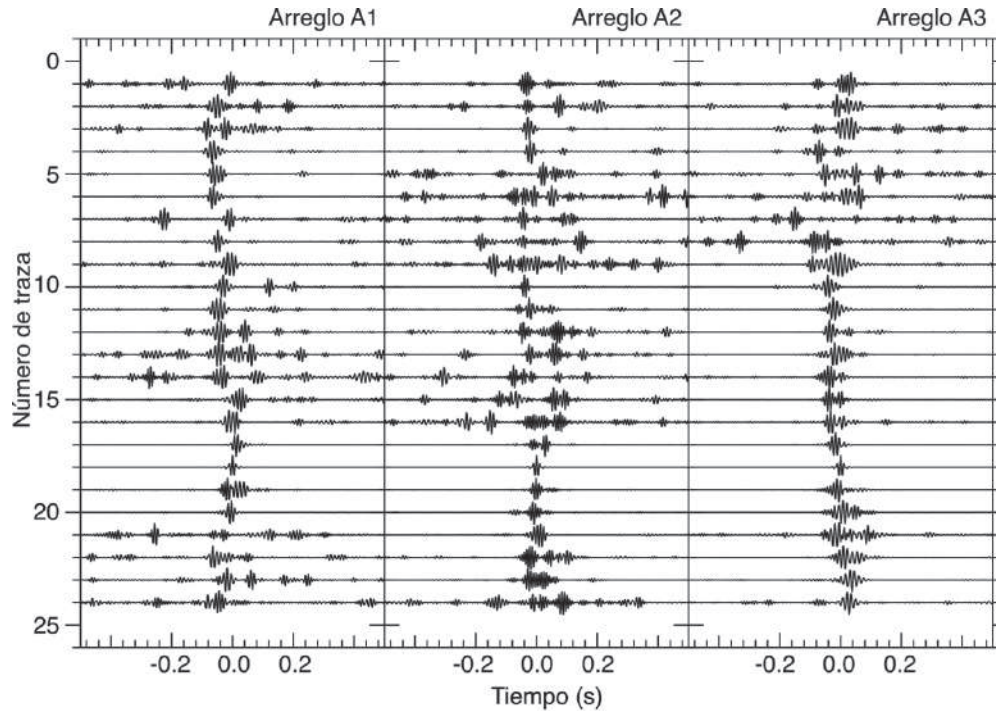
TRE

Los datos se descargan del resistivímetro en un formato *.bin*, que se abre en el programa Prosys II (v.3.14, IRIS Instruments). En este programa se pueden eliminar mediciones repetidas y exportar los datos necesarios a una hoja Excel, para posteriormente crear un formato universal *.urf* de información que se usará en el proceso de inversión, en el que se describe la geometría o posición de todos los electrodos, los cuadripolos medidos y sus valores de diferencia de potencial (ΔV), corriente (I) y desviación estándar. Posteriormente, el archivo *.urf* se utiliza en el programa AGI EarthImager 3D (AGI, 2008) para la inversión, en el que se configuran diferentes parámetros para obtener los modelos de resistividad verdaderos. Los datos se analizaron perfil por perfil y se integraron también en un modelo 3D, en que los siete perfiles se invirtieron de manera conjunta.

TIRSA

La adecuación de los datos de ruido sísmico, antes de realizar las correlaciones cruzadas, consiste en reducir los eventos transitorios y ecualizar los registros para conservar la parte estacionaria del ruido de fondo (Bensen et al., 2007). Posteriormente, se realizan las correlaciones cruzadas entre todos los pares de receptores. Para el caso de 30 min de registro de ruido en el experimento de esta zona, la correlación final es el apilamiento de 900 correlaciones cruzadas derivadas de ventanas de tiempo de ocho segundos de registro de ruido entre cada par de receptores. La Figura 13 muestra la correlación cruzada del receptor 18 con respecto a los 23 receptores restantes. En ella se observan pulsos bien definidos para algunos pares de receptores con tiempos de retraso entre -0.2 a 0.2 s. En algunas correlaciones el pulso es acausal (tiempos menores de cero) y en otra causal (tiempos mayores de cero). El caso ideal es cuando la función de correlación cruzada está compuesta por ambas partes, tanto acausal como causal, sin embargo, se observa que para el sitio de estudio la distribución de fuentes de ruido tiene una dirección predominante que puede ser el tráfico vehicular de alguna avenida.

Figura 13. Correlaciones cruzadas del receptor 18 (traza 18) con respecto a los receptores restantes



Fuente: elaboración propia.

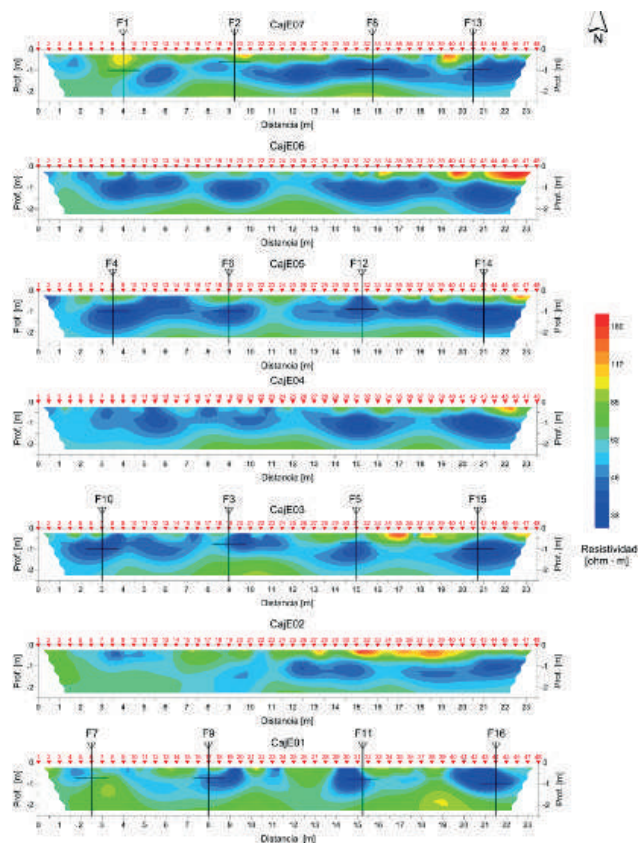
Mediante los tiempos de retraso de los pulsos de correlación filtrados en diferentes frecuencias, se construyeron 16 tomografías de tiempo de viaje en el rango de 100 a 250 Hz. El procedimiento para la creación de tomografías siguió una discretización del área de estudio en celdas con tamaño proporcional a la separación de receptores. En cada celda se resuelve un sistema de ecuaciones que involucra el número de trayectorias entre cada par de receptores y los tiempos de retraso. La solución de este sistema proporciona la velocidad de onda S (V_s) la cual se interpola para generar una imagen de tomografía. El uso y aplicación de esta técnica se ha aplicado a diferentes problemas y puede consultarse en Cárdenas-Soto et al. (2016), Cárdenas-Soto et al. (2020), Argote et al. (2020) y Cárdenas-Soto et al. (2021a).

IV. Visualización e interpretación

A continuación se muestran los resultados obtenidos en cada uno de los dos métodos:

TRE

Figura 14. Perfiles de resistividad eléctrica. Los colores azules corresponden a valores bajos de resistividad (alta conductividad) y los colores rojos a valores de resistividad altos (baja conductividad). Las líneas negras verticales corresponden a la posición de las fosas observada en campo, y las líneas negras horizontales a la profundidad estimada de cada fosa

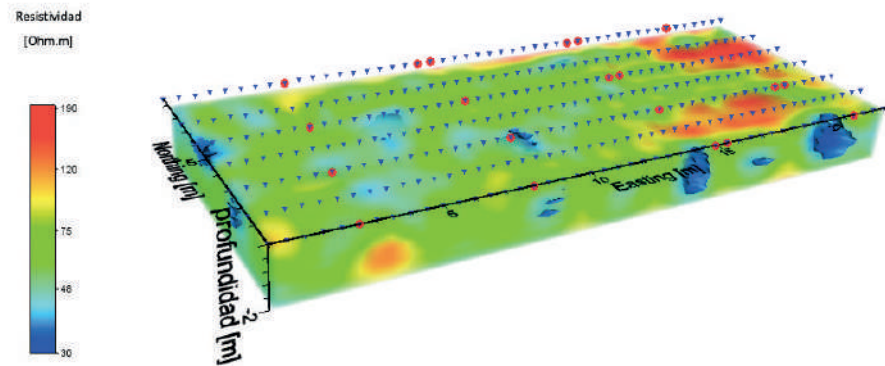


Fuente: elaboración propia.

TRE 2D: se muestran los perfiles de resistividad obtenidos en cada una de las siete líneas levantadas. Los rasgos azules corresponden a materiales conductores, mientras que los rasgos en colores rojos corresponden a valores resistivos. La profundidad que se alcanzó con estos perfiles es de aproximadamente 2.5 m. Las líneas negras corresponden a la ubicación de las fosas observada en campo. No fue posible detectar todas las fosas, pero como se puede observar en la Figura 14, la ubicación de las fosas se puede asociar con anomalías conductoras (azul).

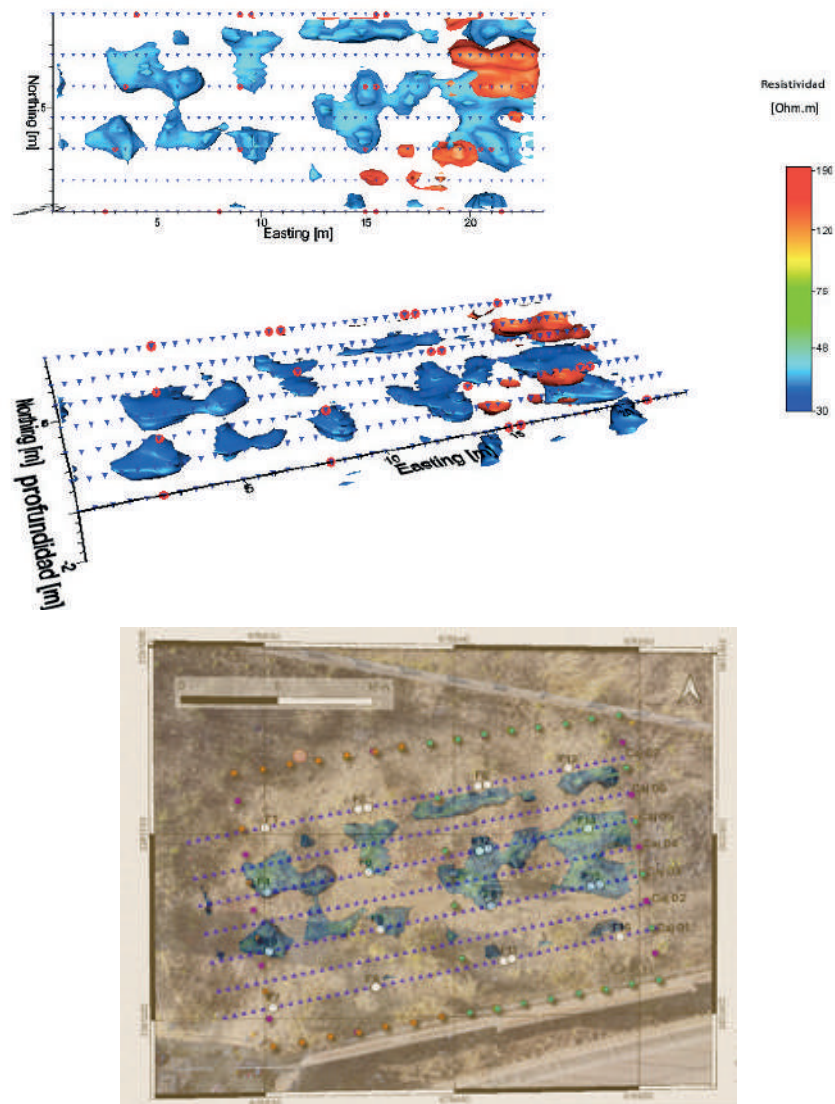
TRE 3D: en las siguientes imágenes se muestran los resultados obtenidos de la inversión 3D de los siete perfiles, lo que genera un modelo en tres dimensiones del área estudiada.

Figura 15. Modelo de resistividades. Los triángulos azules corresponden a la posición de los electrodos. Los puntos rojos corresponden a la ubicación de las fosas observada en campo. Se observan tres unidades geoeléctricas en rojo los valores resistivos altos, en verde, los valores intermedios y que corresponden a suelo del sitio, y en azul, los valores resistivos bajos, que se asocian a las fosas



Fuente: elaboración propia.

Figura 16. En las tres figuras se muestran los valores de isoresistividad altos (en rojo) y bajos (azul), en diferentes perspectivas y representados en el área de estudio. Los valores de resistividad bajos (conductividad alta) están asociados a la presencia de las fosas



Fuente: elaboración propia.

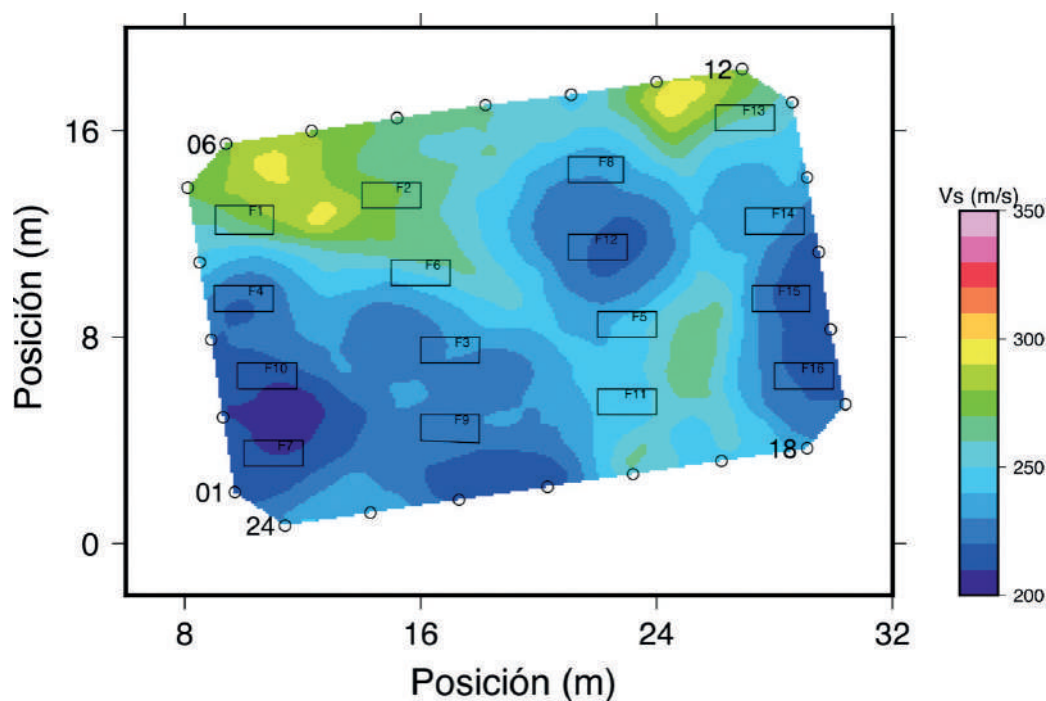
Tanto en la TRE2D (Figura 14) como en la TRE3D (Figura 15 y 16) se pueden observar, lo que se conoce como tres unidades geoeléctricas, de acuerdo a los rangos de valores de resistividad eléctrica. La primera unidad de bajos resistivos con tonos de falso color azul; la unidad de valores intermedios con tonos cercanos al verde y que representan el entorno general del subsuelo; y la tercera unidad de altos resistivos con tonos cercanos al rojo. La unidad geoeléctrica de bajos resistivos concuerda con la localización de las fosas, observable en la Figura 14 y en la Figuras 15 y 16 aunque si bien no se define la geometría de las mismas perfectamente, si se pueden establecer la correspondencia tanto en la posición horizontal como vertical en la mayoría de los casos. Existe corroboración de los resultados, ya que durante la exhumación llevada a cabo (ver capítulo correspondiente) se pudo observar que las fosas tenían alto contenido de humedad y que representa el comportamiento de bajos resistivos por su alta conductividad eléctrica. En la TRE3D (Figuras 15 y 16) se puede apreciar con mejor distribución espacial, al eliminar la segunda unidad geoeléctrica, la localización y volumen del efecto de las fosas a profundidad y extensión horizontal. Si bien no se detectaron las 16 fosas, sí aquellas en donde se localizaron los cuerpos de los cerdos que al descomponerse generan el exceso de humedad que se detectó en el estudio de TRE. Lo anterior se aprecia claramente en la TRE2D (Figura 14) donde el perfil CajE07 en las fosas 1 y 2 no hay una firma conductora sino resistiva y medio resistiva. Otra fosa que no se detecta claramente es la número 7 que corresponde a un cuerpo segmentado (Figura 14, CajE01).

TIRSA

La Figura 17 muestra la tomografía a 217 Hz para el arreglo A1. Los valores de distribución de velocidad V_s están comprendidos entre 200 y 300 m/s. Se observa una ligera dependencia de valores de baja velocidad con la posición de las fosas F4, F7, F10, F12, F15 y F16. Sin embargo, la resolución que proporciona la separación de receptores no permite resolver con mayor detalle la presencia de las fosas. En esta frecuencia ($f=217$ Hz), si se considera una velocidad promedio de $V_s=200$ m/s, la longitud de onda horizontal ($\lambda=V_s/f$) es de 1.15 m, lo cual corresponde a una profundidad promedio de 40 cm ($z=\lambda/3$). Es claro que no es posible distinguir entre materiales duros y blandos con los cuales están rellenas las fosas; sin embargo, los valores de baja velocidad parecen indicar que éstas contienen materiales saturados que se diferencian debido a mayores velocidades que contiene el suelo no perturbado. La inspección

de las imágenes de tomografía en otras frecuencias no muestra una mejoría en el resultado esperado. Se cree que esto se debe a la contaminación del ruido de fondo por los eventos antropogénicos mencionados.

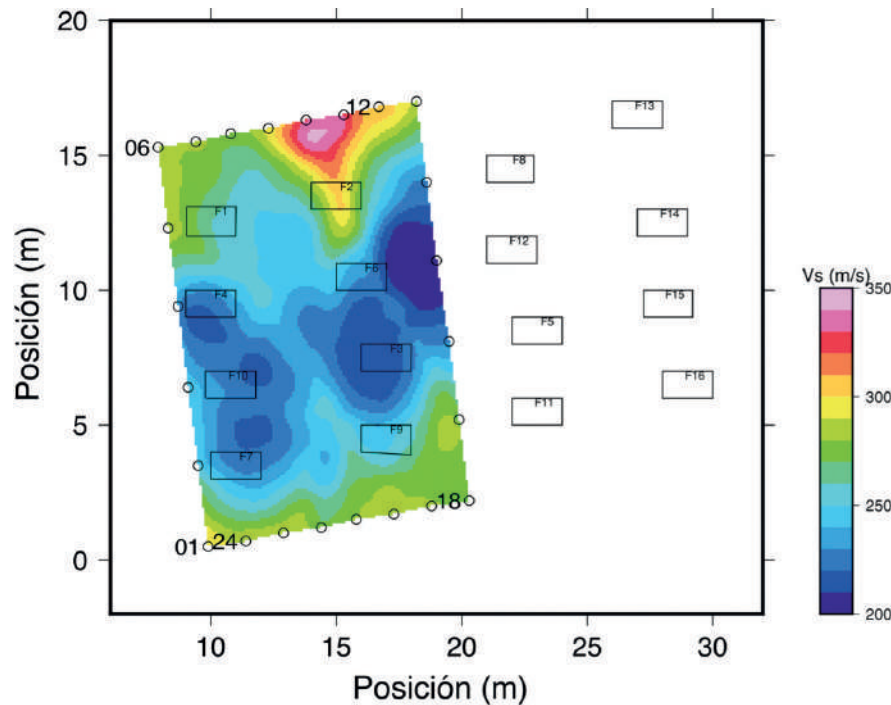
Figura 17. Tomografía de tiempo de viaje a la frecuencia de 217 Hz para el arreglo A1. La posición de las fosas es indicada por los rectángulos. Los círculos abiertos indican la posición de los geófonos, de los cuales algunos están numerados



Fuente: elaboración propia.

La Figura 18 muestra el resultado del arreglo A2 a la misma frecuencia. En este caso se tiene que la separación de receptores en la dirección horizontal es menor que en la dirección vertical. Se observan mínimos de velocidad cercanos a las fosas F4, F7, F8 y F10, lo cual permite adelantar que los contrastes de velocidad del área de estudio son debido a la saturación o infiltración de agua en materiales removidos con respecto a zonas más compactas. La zona de menor velocidad se observa entre las fosas F6 y F12, donde no se encuentra ninguna fosa particular. Y se observa una zona de alta velocidad arriba de la fosa F2. Se cree que estos valores extremos son producto de errores numéricos en la selección de los tiempos de retraso.

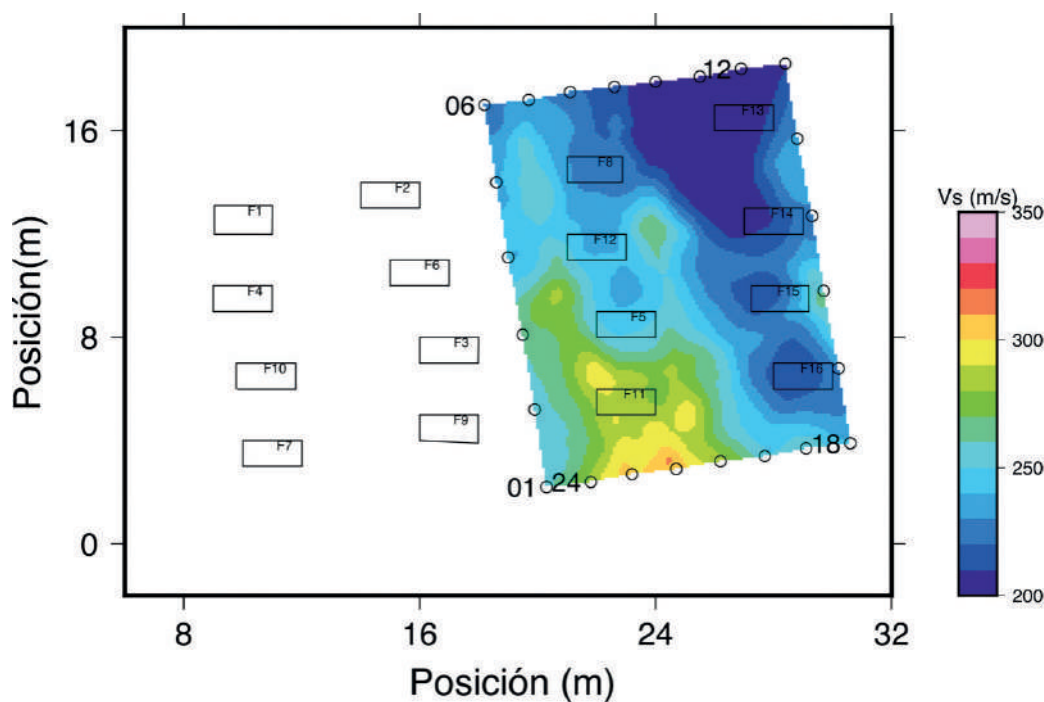
Figura 18. Tomografía de tiempo de viaje a la frecuencia de 217 Hz para el arreglo A2. La posición de las fosas es indicada por los rectángulos. Los círculos abiertos indican la posición de los geófonos, de los cuales algunos están numerados



Fuente: elaboración propia.

Resultados similares se observan en el arreglo A3 para la frecuencia de 217 Hz (Figura 19). En este caso, las zonas de baja velocidad con alguna geometría impuesta por el suelo perturbado se pueden asociar a las fosas F7, F8, F12, F15 y F16. En este caso ya no se observa la zona de baja velocidad descrita en el arreglo A2, pero se presenta otra en la parte NE del arreglo la cual incluye la fosa F13. Nuevamente, se cree que esa zona de baja velocidad es producto de la dispersión en la selección de los tiempos de retraso dada la contaminación del ruido de fondo por eventos antropogénicos.

Figura 19. Tomografía de tiempo de viaje a la frecuencia de 217 Hz para el arreglo A3. La posición de las fosas es indicada por los rectángulos. Los círculos abiertos indican la posición de los geófonos, de los cuales algunos están numerados



Fuente: elaboración propia.

La geometría de los arreglos en el método TIRSA fue diseñada para “observar” de afuera hacia dentro del área de exploración. Con ello se buscó que el experimento no fuera ni invasivo ni destructivo. Los resultados muestran que se requiere de separaciones menores entre los geófonos (0.5 a 1.0 m) para poder mejorar la resolución horizontal de los contrastes de velocidad entre el suelo perturbado y el suelo original. La profundidad de investigación para la zona de estudio (V_s promedio de 250 m/s) permite resolver fosas con profundidades mayores de 0.5 m. Sin embargo, se observa que los registros de ruido fueron contaminados por eventos antropogénicos ajenos al control de adquisición, lo cual condiciona los resultados de este estudio. Así, desde el punto de vista geofísico, una zona de materiales perturbados se puede identificar por los cambios de propiedades que impone el nivel de saturación o infiltración de líquidos que provienen de la superficie, del subsuelo, o de los cuerpos en descomposición.

Conclusiones

En este estudio se aplicaron dos métodos geofísicos (TRE y TIRSA) para determinar la distribución de un suelo perturbado a profundidad, siempre con la ventaja de ser métodos no invasivos. Los resultados muestran que no es posible obtener con precisión la geometría de las fosas, pero si es posible detectar la posición de acuerdo con el cambio de las propiedades físicas asociadas a ambos métodos geofísicos. Para ganar resolución es necesario aumentar el número de detectores (ya sea geófonos o electrodos) y por consecuencia reducir la separación entre ellos con el costo de aumentar los tiempos de adquisición.

Los métodos geofísicos, como el TRE y TIRSA, podrían integrarse en protocolos forenses estándar para la búsqueda y recuperación de víctimas de desapariciones forzadas o crímenes violentos. Esto podría implicar la inclusión de técnicas geofísicas en la formación de equipos forenses y la elaboración de guías específicas para la aplicación de estos métodos en contextos forenses. Este estudio sienta las bases para la aplicación práctica de métodos geofísicos en casos reales de búsqueda forense.

Los resultados de este estudio corresponden a un campo experimental. En condiciones reales, las condiciones del medio y los objetivos a caracterizar probablemente dificulten la



identificación de fosas. Por ello, se recomienda que siempre se apliquen dos o más técnicas para tener mayor certeza de la efectividad en aplicaciones forenses.

Estos resultados no solo tienen implicaciones prácticas inmediatas en la detección de fosas, sino que también abren nuevas oportunidades para la aplicación de métodos geofísicos en el ámbito forense. Se espera que este estudio inspire futuras investigaciones y contribuya a mejorar las herramientas y técnicas disponibles para abordar este importante problema social y humanitario.

Agradecimientos

Este proyecto ha sido apoyado por los proyectos UNAM-DGAPA: PAPIIT IN108124 y PAPIME PE111524. A los estudiantes de la licenciatura de Ingeniería Geofísica que participaron en el trabajo de campo: Nagibe Maroun González, David Alejandro Flores Ramírez, Cristobal Cifuentes Ramos.

Referencias

- ARGOTE D.L., A. TEJERO-ANDRADE, M. CÁRDENAS-SOTO, G. CIFUENTES-NAVA, R.E. CHÁVEZ, E. HERNÁNDEZ-QUINTERO, A. GARCÍA-SERRANO AND V. ORTEGA (2020). *Designing the underworld in Teotihuacan: Cave detection beneath the moon pyramid by ERT and ANT surveys*, Journal of Archaeological Science Volume 118, June 2020, 105141.
- BARD, P.-Y. (1988). Microtremor Measurements: A tool for site effect estimation? *The effects of surface Geology on Seismic Motion*. In Irikura, K., editor, Balkema. Rotterdam, Netherlands.
- BARONE, P. M. (2017). *Forensic geophysics*. In R. M. Di Maggio & P. M. Barone (Eds.), *Geoscientists at crime scenes: A companion to forensic geoscience* (pp. 175–190). Springer International Publishing.
- BONNEFOY-CLAUDET, S., COTTON, F., AND BARD, P.Y., (2006). *The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review*. Earth-Science Reviews, 79(3-4), 205–227.
- CACCAVARI-GARZA, A., QUIROZ-SUÁREZ, D., CIFUENTES-NAVA, G., CÁRDENAS-SOTO, M., & ESCOBEDO-ZENIL D. (2020). *Prospección geofísica somera aplicada en búsqueda forense* (pp. 125-156). *En Protocolos basados en evidencia para la búsqueda de personas desaparecidas*. M. Quinto (Coord.), (Universidad Nacional Autónoma de México. ISBN 9786073060530
- CAMPILLO, M., PAUL, A., (2003). *Long range correlations in the diffuse seismic coda*. Science 299, 547–549
- CÁRDENAS-SOTO, M., H. RAMOS-SALDAÑA Y M.C. VIDAL-GARCÍA (2016). *Interferometría de ruido sísmico para la caracterización de la estructura de velocidad 3D de un talud en la 3ª Sección del Bosque de Chapultepec, Ciudad de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, V68, No 2, p. 173-186.
- CÁRDENAS-SOTO M., D. ESCOBEDO-ZENIL, A. TEJERO-ANDRADE, M. NAVA-FLORES, M. VIDAL-GARCÍA AND T. NATARAJAN (2020). *Exploring a near-surface subsidence over a rehabilitated underground mine through ambient seismic noise tomography in combination with other geophysical methods*. Near Surface Geophysics, 1569-4445.

- CÁRDENAS-SOTO M., J. PIÑA-FLORES, D. ESCOBEDO-ZENIL, J. SÁNCHEZ-GONZÁLEZ AND J.A. MARTÍNEZ-GONZÁLEZ (2021). *Ambient seismic noise tomography to build up a 3D shear-wave velocity model*. Revista de Ingeniería, UNAM (In press)
- CIFUENTES-NAVA, G., CACCAVARI-GARZA, A., QUIROZ-SUAREZ, D. & RIVERA-FERNANDEZ, C. (s.f.). *Tomografía de Resistividad Eléctrica: Una Alternativa de Búsqueda*. Facultad de Medicina de la Universidad Nacional Autónoma de México.
- CHAVEZ-GARCIA, F. J., RODRÍGUEZ, M., AND STEPHENSON, W. R. (2006). *Subsoil Structure Using SPAC Measurements along a Line*. Bull. Seismol. Soc. Am., 96(2):729–736
- CHÁVEZ-GARCÍA F.J., T. NATARAJAN, M. CÁRDENAS-SOTO, AND K. RAJENDRAN (2020). *Landslide characterization using active and passive seismic imaging techniques: a case study from Kerala, India*. Nat Hazards.
- DICK, H. C., PRINGLE, J. K., SLOANE, B., CARVER, J., WISNEIWSKI, K. D., HAFFENDEN, A., et al. (2015). *Detection and characterisation of Black Death burials by multi-proxy geophysical methods*. *Journal of Archaeological Science*, 59, 132–141. <https://doi.org/10.1016/j.jas.2015.04.010>.
- DRAGANOV, D. S., WAPENAAR, K., MULDER, W., SINGER, J., AND VERDEL, A. (2007). *Retrieval of reflections from seismic background-noise measurements*. Geophys. Res. Lett., 34(4):2–5.
- EL-QADY, GAD, & MOHAMED MERWALY. (2019). *Archaeogeophysics - State of the Art and Case Studies*. Springer.
- Fenning, P. J., & Donnelly, L. J. (2004). *Geophysical techniques for forensic investigation*. In K. Pye & D. J. Croft (Eds.), *Forensic geoscience: Principles, techniques and applications*. Special Publications of the Geological Society of London (vol. 232, pp. 11–20).
- GOUEDARD, P., STEHLY, L., BRENGUIER, F., CAMPILLO, M., DE VERDIÈRE, Y. C., LAROSE, E., MARGERIN, L., ROUX, P., SÁNCHEZ-SESMA, F., SHAPIRO N. & WEAVER, R. (2008). *Cross-correlation of random fields: Mathematical approach and applications*. Geophysical prospecting, 56(3), 375–393.
- JOKAR, M. H., BOAGA, J., PETRONIO, L., PERRI, M. T., STROBBIA, C., AFFATATO, A., ROMEO, R., & CASSIANI, G. (2019). *Detection of lateral discontinuities via surface waves analysis: A case study at a derelict industrial site*. Journal of Applied Geophysics, 164, 65–74.
- KHALDAOUI, F., DJEDDI, M., ZAGH, A., & NAA, A. (2017). *Use of near-surface geophysical methods for forensic investigations*. In Proceedings of International Conference on Engineering

- Geophysics, Al Ain, United Arab Emirates, Oct 9–12, 2017. <https://doi.org/10.1190/iceg2017-037>.
- KOEFOED, O. (1979). *Geosounding Principles, 1 - Resistivity Sounding Measurements*. Elsevier Science.
- LAROSE, E., CARRIÈRE, S., VOISIN, C., BOTTELIN, P., BAILLET, L., GUÉGUEN, P., WALTER, F., JONGMANS, D., GUILLER, B., GARAMBOIS, S., GIMBERT, F. & MASSEY, C. (2015). *Environmental seismology: What can we learn on earth surface processes with ambient noise?* Journal of Applied Geophysics, 116, 62–74.
- LARSON, D. O., VASS, A. A., & WISE, M. (2011). *Advanced scientific methods and procedures in the forensic investigation of clandestine graves*. Journal of Contemporary Criminal Justice, 27(2), 149–182. <https://doi.org/10.1177/1043986211405885>.
- LEUCCI, G., DE GIORGI, L., GIZZI, F., & PERSICO, R. (2016). *Integrated geo-scientific surveys in the historical centre of Mesagne (Brindisi, Southern Italy)*. Natural Hazard, 3, 1–21. <https://doi.org/10.1007/s11069-016-2645-x>.
- LEUCCI, G. (2019). *Nondestructive testing for archaeology and cultural heritage: A practical guide and new perspective*. Springer.
- LEUCCI, G. (2020). *Advances in Geophysical Methods Applied to Forensic Investigations -New Developments in Acquisition and Data Analysis Methodologies*. Springer.
- LOKE, M. H. (2001). *Electrical Imaging Surveys for Environmental and Engineering Studies. A Practical Guide to 2-D and 3-D Surveys*. RES2DINV Manual, IRIS Instruments. www.iris-instruments.com
- LÓPEZ HIDALGO, A., LOKE, M., FANTON, G. & CARA, E. (2002). TÉCNICAS PRÁCTICAS PARA INVESTIGACIÓN DE RESISTIVIDAD EN DOS Y TRES DIMENSIONES (TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA 2D Y 3D). 36.
- LOUIE, J. N. (2001). Faster, better: *Shear-wave velocity to 100 meters depth from refraction microtremor arrays*. Bull. Seismol. Soc. Am., 91(2):347–364.
- MILLER, R.D., XIA, J., PARK, C.B. & IVANOV J. (1999). *Multichannel analysis of surface waves to map Bedrocks*. The Leading Edge, 18, 12, 1392-1396.
- PARK C., MILLER R. & XIA, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. Geophysics 64(3):800–808.
- PIÑA-FLORES, J., CÁRDENAS-SOTO, M., SARABIA-GONZÁLEZ, A., GARCÍA-JEREZ, A., SIERRA-ÁLVAREZ, C., SÁENZ, M., LUZÓN, F. & SÁNCHEZ-SESMA, F. (2021). *Imaging the structure of the Sun Pyramid*

- (Teotihuacán, Mexico) from passive seismic methods. *Engineering Geology*, 281(105969).
- PRINGLE, J. K., JERVIS, J. R., ROBERTS, D., DICK, H. C., WISNIEWSKI, K. D., CASSIDY, N. J., & CASSELLA, J. P. (2016). *Long-term geophysical monitoring of simulated clandestine graves using electrical and ground penetrating radar methods: 4–6 years after burial*. *Journal of Forensic Sciences*, 61 (2), 309–321. <https://doi.org/10.1111/1556-4029.13009>.
- QUIROZ, D. (2020). *Métodos de exploración geofísica somera aplicados a la caracterización de inhumaciones: caso experimental y real*. [Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio Institucional de la UNAM.
- SHAPIRO, N. & CAMPILLO, M. (2004). *Emergence of broadband Rayleigh waves from correlations of the ambient seismic noise*. *Geophys Res. Lett.*, 31, L07614
- SHEEHAN, J. R., DOLL, W. E. & MANDELL, W. A. (2005). *An Evaluation of Methods and Available Software for Seismic Refraction Tomography Analysis*. *J. Environ. Eng. Geophys.*, 10(1):21–34
- WATHELET, M. (2008). *An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling*. *Geophys. Res. Lett.*, 35(9):L09301
- REYNOLDS, J. (2011). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. Wiley-Blackwell
- RUFFELL, A. & MCKINLEY, J. (2008). *Geoforensics*. Wiley.
- TELFORD, W. M., SHERIFF, R. E. & GELDART, L. P. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press.
- WATTERS, M., & HUNTER, J. R. (2004). *Geophysics and burial: Field experience and software development*. In K. Pye & D. J. Croft (Eds.), *Forensic geoscience: Principles, techniques and applications* (vol. 232, pp. 21–33). Special Publications of the Geological Society of London.
- WATHELET, M. (2008). *An improved neighborhood algorithm: Parameter conditions and dynamic scaling*. *Geophys. Res. Lett.*, 35(9): L09301
- WEAVER, R. L. (2005). *Geophysics. Information from seismic noise*. *Science*, 307(5715), 1568–1569.
- XIA, J., MILLER, R.D. & PARK C.B. (1999). *Estimation of near-surface shear wave velocity by inversion of Rayleigh waves*. *Geophysics*, 64, 691–700

ZELT, C., HAINES, S., POWERS, M. H., SHEEHAN, J., ROHDEWALD, S., LINK, C., HAYASHI, K., ZHAO, D., ZHOU, H., BURTON, B. L., PETERSEN, U. K., BONAL, N. D. & DOLL, W. E. (2013). *Blind Test of Methods for Obtaining 2-D Near-Surface Seismic Velocity Models from First-Arrival Traveltimes*. J. Environ. Eng. Geophys., 18(3):183–194.



