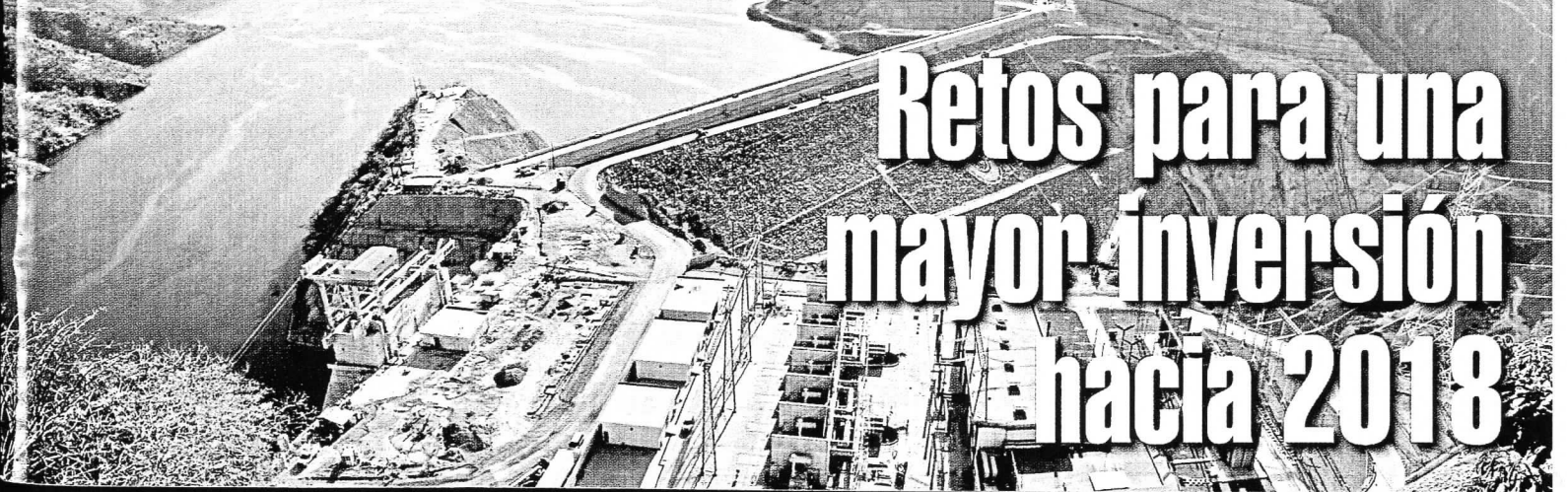


IC

INGENIERIA
CIVIL

NUM 559 / AÑO LXVI
NOVIEMBRE - DICIEMBRE 2015 \$60



**Retos para una
mayor inversión
hacia 2018**

Geofísica aplicada a obras civiles subterráneas

Trazo 6D del TEO

El presente artículo aborda los estudios de prospección geofísica aplicados a la definición del nuevo trazo 6D del Túnel Emisor Oriente, particularmente aquellos cuyo objetivo fue conocer las propiedades físicas del subsuelo y con ello determinar, de manera indirecta, sus características mecánicas y geológicas. Se tratarán los fundamentos teóricos para la aplicación de cada método, su ejecución y los resultados obtenidos a partir de su análisis.

JOSÉ ANSELMO PÉREZ REYES

Ingeniero geofísico. Se ha desempeñado como responsable de las áreas de geofísica, geología e instrumentación en proyectos de empresas privadas e instituciones públicas. Es gerente de Instrumentación y Control de Procesos en el consorcio Comissa para el proyecto TEO.

FERNANDO SÁENZ PARDO

Ingeniero civil con experiencia en las áreas de diseño y construcción de cimentaciones. Desde 2009 forma parte de la empresa Sistemas de Microtuneleo y se desempeña en las áreas de instrumentación e ingeniería para el proyecto TEO.

El Túnel Emisor Oriente (TEO), que formará parte del Sistema de Drenaje Profundo de la Ciudad de México, tendrá una longitud aproximada de 62 km y contará con 25 lumbreras necesarias para su construcción y posterior operación. Con ese fin, el TEO se dividió en seis tramos; en particular, el tramo 6 comprende la construcción de cuatro lumbreras y 12 km de túnel, aproximadamente, que van desde la lumbrera 20 hasta el portal de salida. En un inicio se planteaba que la excavación del túnel atravesara suelos mixtos compuestos por la formación Taximay, aluviales comprendidos entre el portal de salida y la lumbrera 21, y roca entre las lumbreras 20 y 21. Para optimizar la excavación del túnel se optó por buscar un trazo que evitara la presencia de suelos aluviales que hubiesen aportado una cantidad de agua considerable en el frente de excavación y provocado así un bajo rendimiento. Para lograr este cometido fue necesaria la aplicación de estudios directos e indirectos.

Se describirán los métodos de prospección geofísica empleados para la definición de un nuevo trazo denominado 6D, el cual se determinó a partir del estudio y selección del mejor subtramo para la excavación del túnel (véase figura 1).

Geofísica aplicada al trazo 6D

Debido a su complejidad geológica y dimensiones, el TEO ha representado un reto para la ingeniería mexicana; esto ha favorecido una relación estrecha entre diferentes disciplinas que, en conjunto, son necesarias para la correcta ejecución del proyecto; entre ellas la geofísica ha desempeñado un papel determinante para la comprensión de las condiciones físicas, mecánicas y estructurales del trazo. La aplicación de los métodos

geofísicos se fundamentó en los objetivos de prospección, el emplazamiento superficial y la profundidad del nivel de excavación. De este modo se definieron las técnicas por aplicar y los motivos para cada una de ellas, a saber:

- **Sondeos eléctricos verticales (SEV).** Este método se basa en un dispositivo tetraelectródico que inyecta corriente al terreno y mide la diferencia de potencial que se genera. Su objetivo fue la obtención de imágenes profundas unidimensionales que a su vez consintieran la caracterización geológica del subsuelo a partir de sus rasgos geoeléctricos.
- **Tomografía eléctrica.** A diferencia de los SEV, la tomografía eléctrica proporciona conjuntamente información lateral y en profundidad, por lo que permite obtener una imagen distancia-profundidad con la distribución de la resistividad real del subsuelo y fácilmente comprensible en términos geológicos o geotécnicos.
- **Sísmica *cross-hole* (CH) y *down-hole* (DH).** Ambos procedimientos buscan medir la velocidad de las ondas sísmicas a partir de fuentes emisoras de energía que se localizan de acuerdo con el método aplicado: desde la superficie o a la misma profundidad. De este modo los sensores registran los tiempos de llegada de las ondas de compresión (P) y de las ondas de cortante (S).

Para la aplicación de cualquier método geofísico se deben realizar estudios previos que consientan la adecuada interpretación de los datos obtenidos. Por ello, de manera paralela se definieron las siguientes actividades: análisis geológico superficial, análisis geológico-

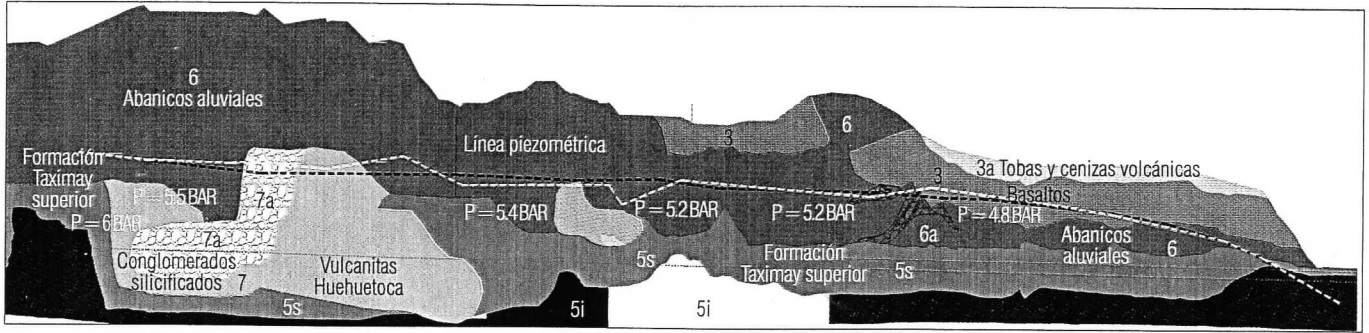


Figura 1. Perfil geológico del trazo 6D del TEO.

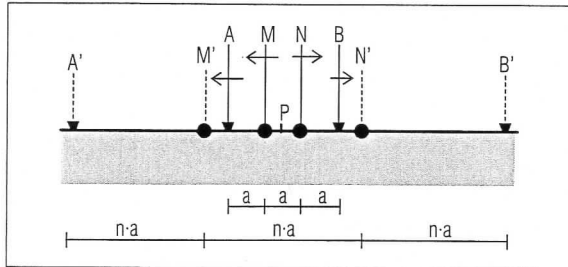


Figura 2. Dispositivo tetraelectródico tipo Schlumberger.

estructural, características hidrológicas de las rocas y censo de puntos de agua.

Así, el estudio de prospección eléctrica con SEV se ejecutó a lo largo del trazo 6C con dispositivo tetraelectródico tipo Schlumberger (véase figura 2).

La tomografía eléctrica se definió específicamente en el subtramo comprendido entre las lumbreras 20 y 21A, con el objetivo de detallar el conocimiento geológico de dicha sección y a partir de la distribución de resistividades que lo definen.

Para lo anterior se requirió un arreglo dipolar (dipolo-dipolo) que permite investigar la distribución de la resistividad a partir de la asociación de puntos a una misma profundidad, lo cual otorgó un perfil de isoresistividad en dos dimensiones (véase figura 3).

Por su parte, los estudios de prospección sísmica fueron definidos con la intención de evaluar la "vulnerabilidad sísmica" del sitio de estudio, la cual se refiere a las consecuencias probables de un movimiento de tierra sobre una construcción con la intensidad del temblor que podría generarlas; de este modo, los estudios de CH y DH fueron ejecutados en las lumbreras 21A, 23A y 24A, con la finalidad de determinar su secuencia estratigráfica, caracterizar el comportamiento dinámico del subsuelo y determinar las velocidades de propagación longitudinal (V_p) y de las ondas de compresión y de cortante (V_s), así como las fracciones de amortiguamiento y los módulos elásticos dinámicos de los diferentes estratos que constituyen el subsuelo. Lo anterior permitió complementar el estudio geotécnico y calcular el periodo dominante del sitio al igual que los espectros de respuesta y de diseño ante excitaciones sísmicas de consideración.

Justificación, descripción geológica y resultados obtenidos

La excavación del trazo original del TEO en el tramo 6 consideraba frentes formados por arcillas lacustres consolidadas de la formación Taximay, suelos mixtos con boleos aluviales, abanicos aluviales, rocas volcánicas y conglomerados. Con la presencia de suelos mixtos y un nivel de agua freática por encima del túnel, se esperaba una aportación significativa de ésta al interior de la excavación; por tal motivo, fue necesario llevar a cabo un cambio en el trazo a terrenos menos permeables, como las arcillas de la formación Taximay; éste se realizó en etapas que derivaron en una serie de trazos alternos que permitieron elegir las condiciones de excavación más adecuadas para la TBM S-519.

Como punto de partida y tomando en cuenta el conocimiento previo del Túnel Emisor Central (TEC), se decidió que el nuevo trazo —nombrado 6A— debía acercarse a éste, por lo que se ejecutaron exploraciones y prospecciones que definieron la presencia de arcilla de la formación Taximay; esto permitió replantear la posición de las lumbreras 23 y 24 que, en el trazo original, obligaban a la excavación de boleos para la TBM. Las nuevas lumbreras se denominaron 23A y 24A; el trazo 6A continuó paralelo al TEC hasta su desviación rumbo a la lumbrera 20; sin embargo, delante de la lumbrera 23A se localizaron fragmentos de rocas y brechas volcánicas, por lo que fue necesario replantear nuevamente el trazo a partir de dicho sitio.

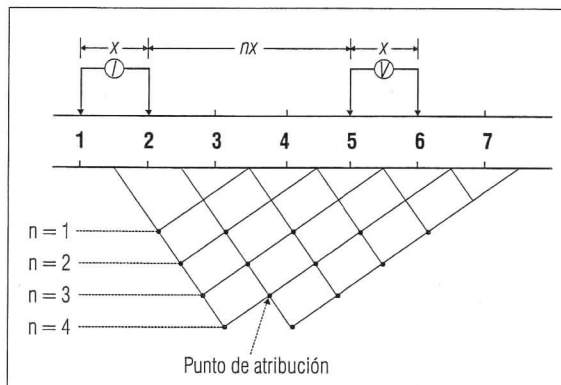


Figura 3. Arreglo dipolo-dipolo.

Posteriormente se procedió a explorar entre las lumbreras 22 y 23A con la finalidad de detectar la presencia de la formación Taximay; los estudios confirmaron esto y dieron paso a la definición del trazo 6B. Asimismo, a partir de la lumbrera 22 se ejecutaron nuevos estudios alejados del trazo original; de ellos se definió que a 1.5 km de la lumbrera 22 se encontraba la transición entre la arcilla Taximay y las vulcanitas, lo que permitió ubicar la nueva lumbrera 21A y dar origen al trazo 6C –subtramo comprendido entre ellas–. Entonces, con aproximadamente 8 km de excavación en la formación Taximay, se buscó una ruta más favorable entre las lumbreras 20 y 21A, por lo que se plantearon distintos trazos en donde, para todos los casos, se identificó la presencia de roca, lo que obligó a buscar aquel que tuviera las mejores condiciones de calidad. De esta forma se definió el trazo 6D, que abarca aproximadamente 3,400 m en roca y 600 m en arcilla. Por convención y facilidad, al conjunto de trazos que conforman la nueva ruta del túnel se le denominó trazo 6D del TEO.

En resumen, el nuevo trazo estará conformado por la formación Taximay desde el portal de salida hasta la lumbrera 21A y conglomerados de la formación Vulcanitas Huehuetoca entre esta última y la lumbrera 20 (véase figura 4).

La geofísica aplicada al nuevo trazo se ejecutó por partes. Durante el levantamiento geoelectrónico se ejecutaron 20 SEV a lo largo del trazo 6C; con él y con la información geológica disponible se determinó que a lo largo del nuevo trazo se tiene una morfología joven en forma de valle cuyo origen se remonta a antiguos eventos volcánicos del Plioceno superior y Cuaternario inferior, con flancos que presentan una erosión pluvial intensa y generan pendientes poco pronunciadas. El perfil definido demuestra una secuencia estratigráfica constituida por productos volcánicos, cuya parte superior está conformada por tobos arenosas, cristalinas, vítreas y pumíticas; le subyacen derrames basálticos y nuevamente arenas, boleos, gravas y arcillas con pseudoestratificación; la dirección del flujo subterráneo está determinada por fallas geológicas de dirección general NO-SE que han provocado una permeabilidad secundaria por fracturamiento. A nivel de excavación se atravesarán (véase figura 5):

- Arcillas de la formación Taximay
- Fallas geológicas en dirección E-O del sistema estructural Acambay
- Fallas geológicas en dirección NO-SE asociadas al río Tula
- Tobos arenosas y pumíticas

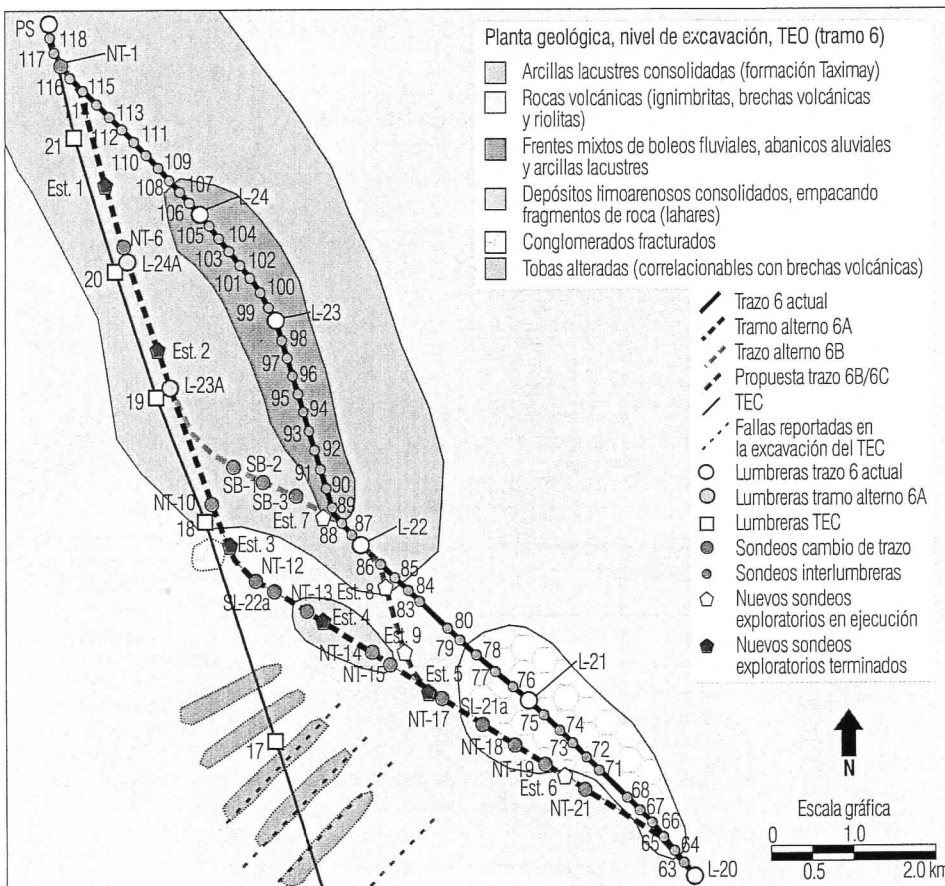


Figura 4. Planta geológica.

Para el caso de la tomografía eléctrica, los trabajos se dividieron en dos tramos: de la lumbrera 21A al Tajo de Nochistongo (TN) y de éste hacia la lumbrera 20. De los resultados se infiere que en el primero de ellos el túnel excavará materiales rocosos con resistencias por encima de los 80 ohm-m; a su vez, se detectaron algunas anomalías posiblemente asociadas a fallas geológicas. En los contactos entre diferentes unidades, la excavación puede presentar dificultades debidas a los cambios de dureza y permeabilidad de los materiales (véase figura 6).

Para el tramo 2, se infirió la presencia de una unidad formada por basalto de diferentes grados de fracturamiento; posteriormente se determinó un contacto lateral con otra unidad constituida por arcillas de color verde olivo pertenecientes a la formación Taximay (véase figura 7).

Por su parte, en los estudios de prospección sísmica llevados a cabo en las lumbreras 21A, 23A y 24A se analizaron los sismogramas y las dromocrónicas para determinar las velocidades de propagación longitudinal y transversal de los diferentes

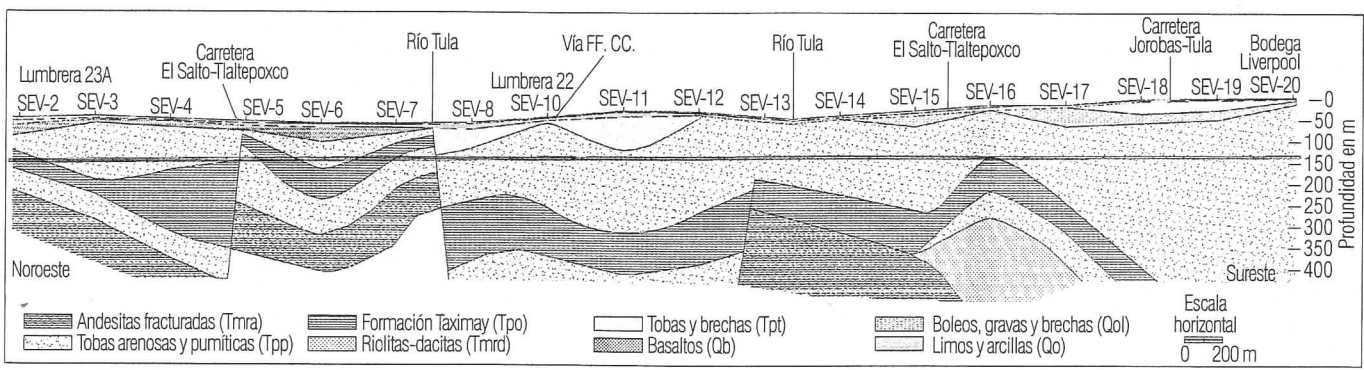


Figura 5. Perfil obtenido a partir del estudio geoelectrico (trazo 6C).

materiales inferidos en cada perfil. Para el cálculo del periodo fundamental del subsuelo fue necesario conocer la profundidad de la roca basal. Así se determinó, para cada caso, el periodo dominante del subsuelo, que considera la profundidad promedio del estrato basal y la velocidad de onda de cortante promedio de todos los paquetes suprayacentes. A su vez, con la intención de evaluar el potencial sísmico de cada sitio, se determinaron las aceleraciones del terreno para periodos de retorno de 47.5 y 475 años; como ejemplo, en el cuadro 1 se muestra el caso de la lumbrera 21A.

Cuadro 1. Aceleraciones del terreno para la lumbrera 21A

Periodo de retorno (años)	Aceleración a ras del terreno (cm/s ²)	Aceleración máxima espectral (cm/s ²)
47.5	24.74	54
475	80.48	172

Se consideró entonces una aceleración del terreno en gales representativa de las condiciones geotécnicas para cada sitio. Sin embargo, es importante considerar



Centro de Actualización Profesional e Innovación Tecnológica del Colegio de Ingenieros Civiles de México, A.C.



Especialidades

Inscripciones Abiertas



Administración de Proyectos de Infraestructura

RVOE - SEP 2005371 CLAVE DGP625754



Valuación de Inmuebles

RVOE - SEP 2005369 CLAVE DGP625728



Valuación de Negocios en Marcha

RVOE - SEP 2005370 CLAVE DGP625753

Características de los Planes de Estudios:

Estudios con RVOE

El Plan de Estudios consta de 45 créditos y 360 horas de clase.

Para obtener el Diploma y Cédula de Grado se requiere elaboración de Tesina y Réplica en Examen.

En Colaboración con:



www.capit.org.mx

Educación Superior

Actualización Profesional

Innovación Tecnológica

Biblioteca

Librería

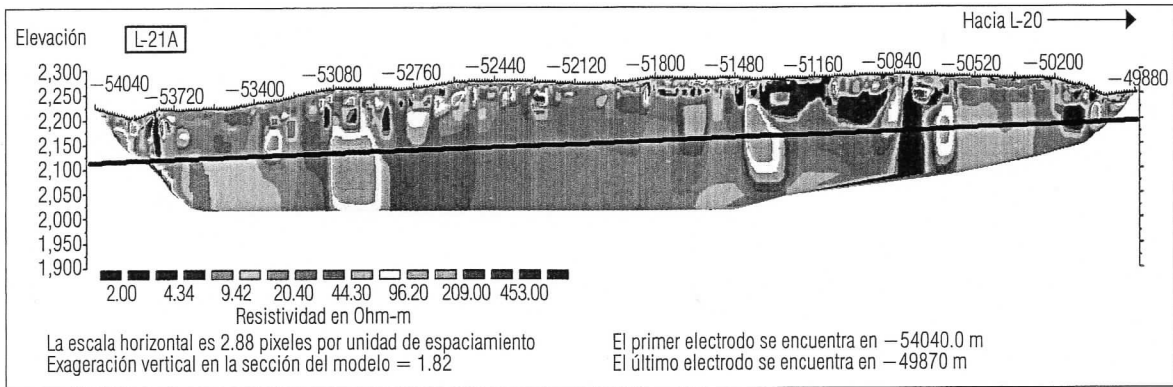


Figura 6. Perfil geoelectrico definido en el tramo 1 (L21A-TN).

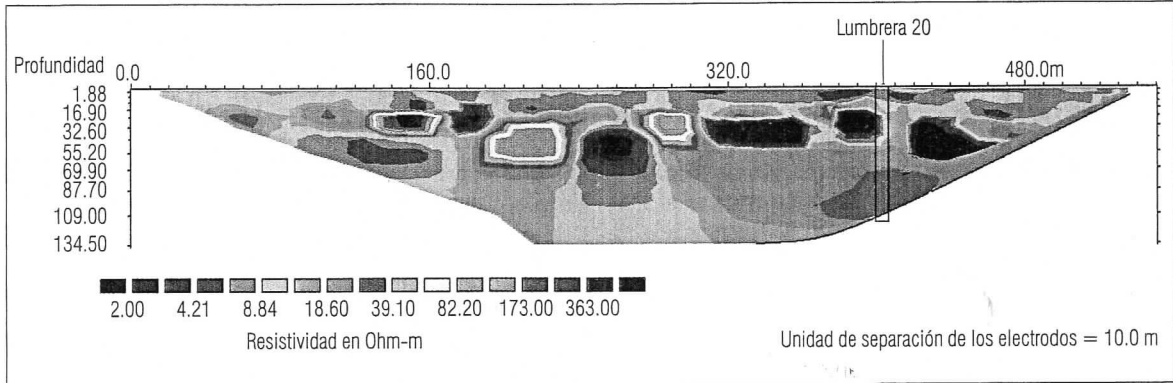


Figura 7. Perfil geoelectrico definido en el tramo 2 (TN-L20).

las propiedades dinámicas del subsuelo de manera más rigurosa, a fin de cuantificar la respuesta de la lumbraera ante eventos sísmicos de importancia, para lo cual se toman en cuenta las propiedades de cada uno de los estratos y la posición que ocupa entre ellos el nivel freático. De este modo se determinó un espectro de diseño del sitio capaz de soportar sismos de magnitud hasta 8.2 grados Richter, que es la máxima esperada en la zona de subducción del Pacífico mexicano según la regionalización sismotectónica, con coeficiente sísmico de 0.27 g y el cual considera un intervalo de periodos comprendido entre 0.00 s y 0.55 segundos.

Conclusiones y recomendaciones sobre el empleo de métodos de prospección

Como cualquier otro método indirecto, la geofísica otorga una aproximación a las condiciones del subsuelo mediante diferentes métodos y la caracterización de sus propiedades físicas; esto significa que, como trabajo complementario a los métodos directos, se apoya en ellos para una caracterización más precisa, y por tanto se requiere la conjunción de ambos para la correcta descripción de las propiedades del terreno. Así, su principal ventaja radica en la capacidad de caracterizar rápidamente y a un relativo bajo costo, en comparación con los métodos directos, las condiciones del subsuelo sin perturbarlo y otorgar una mejor caracterización general

del sitio. Por lo tanto, debe considerarse que los resultados obtenidos a partir de la prospección están sujetos a cambios inherentes a los procedimientos planteados y a la incertidumbre geológica propia de este tipo de investigaciones; así, la geofísica debe entenderse como una disciplina complementaria a las normalmente consideradas en las obras civiles y con un amplio potencial para el apoyo de esta labor [16].

Referencias

- Borgonio, G. J., y M. Orozco (1985). Reconocimiento geológico-minero del área El Salto, municipio de Tepeji del Río, estado de Hidalgo. Servicio Geológico Mexicano.
- Constructora Mexicana de Infraestructura Subterránea, Comissa (2011). Estudio geohidrológico-geofísico a lo largo del trazo del Túnel Emisor Oriente, tramo VI-C, municipio de Tepeji del Río, estado de Hidalgo. Túnel Emisor Oriente.
- Comissa (2011). Resultados de los estudios de *cross-hole* y *down-hole* realizados en la lumbraera 24A, Atotonilco de Tula, Hidalgo. Túnel Emisor Oriente.
- Comissa (2014). Informe del estudio de tomografía geoelectrica efectuado en el tramo VI del Túnel Emisor Oriente (TEO), específicamente entre las lumbraeras 21-A y 20, en los estados de Hidalgo y de México. Túnel Emisor Oriente.
- Schnabel, P. B., K. Lysmer y H. B. Seed (1972). Shake: A computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites. Berkeley: Earthquake Engineering Research Centre, Universidad de California en Berkeley.

¿Desea opinar o cuenta con mayor información sobre este tema? Escribanos a ic@heliosmx.org