

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



Facultad de Ingeniería

***“Aplicación de refracción sísmica y MASW
para la caracterización del subsuelo somero
en la zona del proyecto carretero Tuxpan -
Tampico”***

I N F O R M E

**QUE PARA OBTENER TÍTULO DE
INGENIERA GEOFÍSICA**

P R E S E N T A :

MARÍA GUADALUPE MÉNDEZ DÍAZ

ASESOR DE INFORME:

DR. MARTÍN CÁRDENAS SOTO



CIUDAD UNIVERSITARIA, MÉXICO.

2016.

AGRADECIMIENTOS

“Dios existe. Y si no, debería de existir”

Octavio Paz

Dedico el presente trabajo a ***M&G Geophysics SA de CV (Un sueño hecho realidad).***

Y quiero expresar mi total gratitud a mis padres, Pacho y Chochis, que siempre estuvieron al pendiente de mi educación, a mis hermanos: Taten, Moymas, Moni nena y Ticho, por ser un ejemplo a seguir y a mis amigos que hicieron de la universidad una aventura increíble.

Agradezco al Dr. Martín Cárdenas por el apoyo al dirigir este informe, a mi profesor y amigo el Ing. Mauricio Nava, a mi ex jefe el Ing. Aristóteles Jaramillo por creer en mí y darme la primera oportunidad de desarrollarme como profesionista. Gracias a la Facultad de ingeniería, gracias a la Universidad Nacional Autónoma de México por acobijarme todos estos años, por haber sido mi segundo hogar y mi alma mater.

Gracias a Yabin Gallegos por enseñarme un mundo diferente al que conocía, por empujarme a ir más allá de mis límites y mostrarme que no hay sueño que no podamos hacer posible.

Por último, un agradecimiento muy especial y con mucho cariño para Roberto Iván Ramírez García por brindarme en todo momento su apoyo incondicional, por motivarme cada día a ser mejor persona, por hacerme la vida más fácil con sus consejos, cariño y paciencia, pero sobre todo quiero agradecerle por siempre tener fe en mí. Muchas gracias Pollito!

Índice

RESUMEN	4
ABSTRACT	4
1. INTRODUCCIÓN	5
2. GEOFÍSICA APLICADA A LA GEOTÉCNIA	6
3. PROYECTO CARRETERO TUXPAN – TAMPICO	10
4. EXPLORACIÓN SÍSMICA	15
5. RESULTADOS	19
6. CONCLUSIONES	22
REFERENCIAS	23

ANEXOS

- I FUNDAMENTOS TEÓRICOS
- II REPORTE FOTOGRÁFICO DE LOS TRABAJOS DE CAMPO

Resumen

El presente informe tiene por objetivo mostrar la experiencia profesional adquirida en el desempeño como pasante de Ingeniera Geofísica para fines de titulación por la modalidad de experiencia profesional. Este trabajo aborda temas que incluyen el uso de arreglos sísmicos para la caracterización del sustrato del proyecto carretero Tuxpan-Tampico y determinación de sus propiedades elásticas dinámicas. Así como, la obtención de imágenes sísmicas del subsuelo a partir de la determinación del modelo 2D de velocidad de onda P, utilizando la metodología de tendido de refracción sísmica (TRS). Y la obtención del perfil unidimensional de velocidades de la onda de corte en cada punto de estudio, empleando la técnica de análisis multicanal de ondas superficiales (MASW 1D, por sus siglas en inglés).

El contenido del informe, además de incidir en mi formación como ingeniera en ciencias de la tierra, también busco despertar la atención para la formación de profesionistas de la construcción, a fin de ilustrar la aplicación de metodologías sísmicas y justificar su incorporación en los proyectos de infraestructura en México.

Abstract

This report aims to show the professional experience acquired as geophysical engineering intern in order to get the bachelor's degree by the professional experience modality. This work addresses different areas such as seismic arrays for the substratum characterization and the determination of its elastic properties into the road project Tuxpan-Tampico. As well as the acquisition of seismic images of the subsoil by the determination of the P wave-velocity using the seismic refraction methodology. Also I show results of Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW 1D) technique, in order to determinate one-dimensional profile of the shear wave-velocity.

The content of this report in addition of influencing in my professional training as an Earth sciences engineer also I pursue to awaken the attention of professionals in construction training. In order to exemplify the implementation of seismic methodologies and to justify its incorporation into the infrastructure of Mexico.

Capítulo 1. Introducción

La aplicación de métodos geofísicos en la planeación de proyectos constructivos es importante, debido a que aporta información del subsuelo para la toma de decisiones. En este trabajo muestro esa importancia para la construcción de la "Autopista Tuxpan - Tampico", en los estados de Veracruz y Tamaulipas.

En especial, se trata de conocer las características elásticas del subsuelo a fin de determinar el perfil estratigráfico del terreno y su arabilidad. Estas características están definidas por las velocidades de propagación sísmica y módulos elásticos dinámicos. Resultados que nos conducen a conocer la calidad de la roca para posteriormente calcular el espectro de diseño por sismo.

El presente informe tiene por objeto mostrar mis actividades profesionales como pasante de ingeniera geofísica. Para ello mostraré que parte de mi labor profesional la desarrollé en el diseño, la adquisición, procesamiento e interpretación.

En el mencionado proyecto realice 17 Tendidos de Sísmica de Refracción (TRS) donde los resultados nos permitieron conocer la estratigrafía general del área de estudio, así como, las velocidades de propagación de ondas longitudinales y transversales del terreno. Con ello se determinó la arabilidad de cada una de las capas geosísmicas identificadas y los módulos elásticos dinámicos de los estratos que conforman el subsuelo somero del sitio.

Por lo tanto, los objetivos fundamentales del presente trabajo son:

- Determinar los tiempos de arribo y velocidades sísmicas de las ondas longitudinales "P" y transversales "S" de los diferentes estratos presentes en el subsuelo.
- Determinar con base en las velocidades anteriores y los valores de densidad o peso volumétrico, reportados por laboratorio, los módulos elásticos dinámicos (Relación Poisson, Módulo de Elasticidad (Young) y Módulo de Rigidez) de cada uno de los estratos.
- Determinar la estratigrafía del subsuelo y sus características, además de la arabilidad de los diferentes estratos, a partir de las velocidades de las ondas longitudinales (Ondas P).

En los capítulos siguientes se mencionan los trabajos realizados en campo, se describen las condiciones estratigráficas en función de los resultados de la exploración geofísica, y finalmente se dan las conclusiones y recomendaciones pertinentes.

Capítulo 2. Geofísica aplicada a la geotecnia

La exploración geofísica tiene varias aplicaciones, entre ellas, la geotecnia. Debido al crecimiento poblacional es necesario poseer buena infraestructura tanto en las ciudades como en los caminos que las conectan. En la planeación del desarrollo de infraestructura, es muy importante saber las características del subsuelo donde se desplantarán los proyectos constructivos, ya que en la toma de decisiones dicha información es muy valiosa, pues impacta en el tiempo de desarrollo, costos, seguridad, etc.

Entonces la geofísica aplicada a la geotecnia se emplea, por ejemplo, en la construcción de edificios, puentes, carreteras, casas, etc. Lo que lleva a la creación de empresas que puedan satisfacer las necesidades y proporcionar dichos servicios a las empresas constructoras.

Las metodologías empleadas en la geotecnia son amplias, entre ellas se encuentran los métodos sísmicos, métodos eléctricos y métodos electromagnéticos, principalmente.

Los métodos sísmicos aplicados se dividen en métodos de fuente pasiva y métodos de fuente activa. Entre los métodos pasivos, es decir, que utilizan ruido sísmico están: H/V, SPAC, ReMi (Ver e.g. Park et al, 1999) El método de fuente pasiva más utilizado es el método de cocientes espectrales H/V, el hace uso de ruido sísmico (microtremores) para estima la frecuencia de vibrar de una capa de suelo. Los métodos sísmicos de fuente activa más empleados son: Downhole, Crosshole, Tendido de Refracción Sísmica (TRS), Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW, por sus siglas en inglés) y algunos métodos no convencionales como el ultrasónico y la prueba de integridad de pilas. (Figura 2.1)

- *DownHole y CrossHole*: Estas pruebas sirven para definir las velocidades de propagación metro a metro, y así obtener las diferentes propiedades elásticas dinámicas del terreno.
- *Tendido de refracción sísmica (TRS) y Análisis multicanal de ondas superficiales (MASW)*: Estas técnicas nos sirven para definir las velocidades de propagación de la onda P y onda S, respectivamente; para con ello determinar un perfil sismoestratigráfico. A partir de las velocidades determinadas se obtienen las diferentes propiedades elásticas dinámicas del terreno.

- *Ultrasónico y prueba de integridad de pilas:* Estas metodologías se emplean para saber la calidad de concreto en juntas constructivas, pilas, pilotes, etc., y se basa en el principio de reflexión de la onda P.
- *Cocientes espectrales H/V:* Consiste en medir el ruido ambiental en tres componentes, la vertical y las horizontales, para posteriormente realizar el cociente y determinar la frecuencia fundamental del terreno. El propósito es realizar la microzonificación sísmica o bien detectar el basamento rocoso.



Figura 2.1 Adquisición de prueba de integridad de pilas (Izq.) Instalación de Sensor para vibración ambiental (Der.)

Entre los métodos eléctricos utilizados se encuentran los sondeos eléctricos verticales (SEV) y las tomografías eléctricas, en diferentes arreglos según sea el objetivo. (Figura 2.2)

- *Sondeo eléctrico vertical (SEV):* Este estudio provee la distribución puntual, a profundidad, de resistividades en una zona en estudio; el arreglo empleado depende de la profundidad a la que se requiera investigar y el objetivo. Los arreglos más usados son: Schlumberger para caracterización y Wenner para instalación de tierras físicas.
- *Tomografía eléctrica:* Provee de información sobre la distribución de resistividades a través de un perfil, sus principales aplicaciones son la caracterización y detección de discontinuidades que puedan representar algún riesgo constructivo.

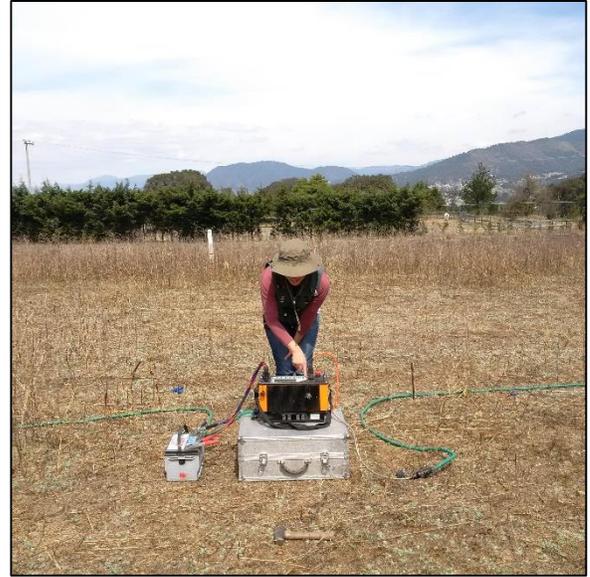


Figura 2.2 Adquisición de SEV (Izq.) Adquisición de Tomografía eléctrica en arreglo polo-dipolo (Der.)

Entre los métodos electromagnéticos el principal es el georadar, donde se calcula el contraste de la constante dieléctrica, para la localización de tuberías, cavernas o agrietamiento superficial, detección de cableado, entre otros usos. (Figura 2.3)

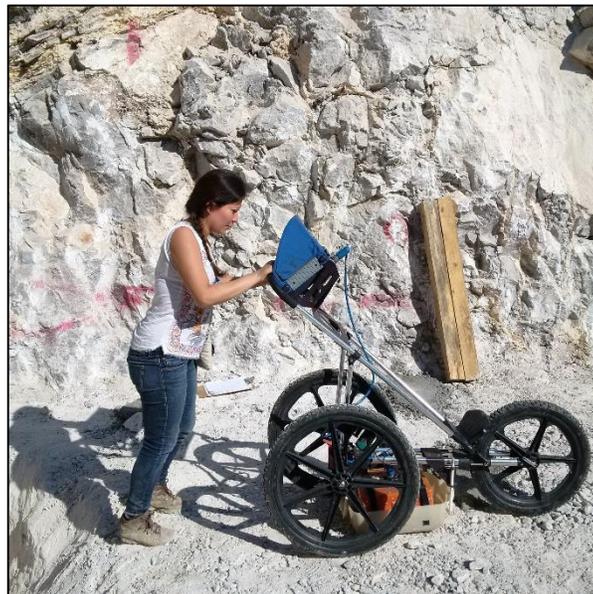


Figura 2.3 Adquisición de línea de georadar.

En mi experiencia laborando para una empresa consultora de geofísica y desempeñando el puesto de pasante de Ingeniero geofísico, pude realizar diferentes tareas que me ayudaron a desarrollar la capacidad para aplicar los conocimientos adquiridos en mi formación como ingeniero y de la misma forma adquirir la experiencia necesaria para aplicar la ingeniería de manera eficiente y con altos estándares de calidad.

Las actividades realizadas y habilidades desarrolladas eran diversas y extensas, algunas de las más relevantes fueron la planeación y desarrollo de la logística necesaria para llevar a cabo los proyectos, adquisición de datos geofísicos de diferentes metodologías como eléctrica, sísmica activa, sísmica pasiva, electromagnética, y algunas no convencionales como ultrasónico, pruebas de integridad de pilas y resistividad térmica; procesamiento e interpretación de datos geofísicos de las metodologías antes mencionadas, investigación y recopilación de información geológica, así como, elaboración de mapas geológicos; realización de informes y presentación de resultados.

Entre las habilidades desarrolladas durante el desempeño como pasante de ingeniera geofísica fueron la reparación de equipo usado en la adquisición, resolución de diversos problemas en campo, manejo de personal, toma de decisiones, etc.

Capítulo 3. Proyecto carretero Tuxpan - Tampico

3.1 Localización Geográfica

El proyecto carretero Tuxpan – Tampico tiene proyectado un trazo de 105 Km, una la ciudad de Tampico, Tamaulipas, con la autopista México – Tuxpan; siendo este el único acceso a la carretera hacia naranjos y de ahí al tramo en construcción.

El área de estudio para este informe consiste en un tramo de casi 19 kilómetros con una orientación NW-SE y se encuentra ubicada al este de los municipios de Naranjos de Amatlán y Cerro Azul; en el estado de Veracruz, México. Estos municipios se localizan al norte del estado. De manera general, la zona de estudio se encuentra en parte de la Huasteca alta (Municipio de Naranjos) y la Huasteca baja (Municipio de Cerro Azul); limitada al norte por la sierra de Tamaulipas, al sur por el macizo de Teziutlán, al este por el golfo de México y al oeste por la Madre Sierra Oriental.

Los 17 tendidos de refracción sísmica tienen una longitud de 128 metros y se distribuyeron a lo largo de los 19 km abarcados por el proyecto. (Figura 3.1)

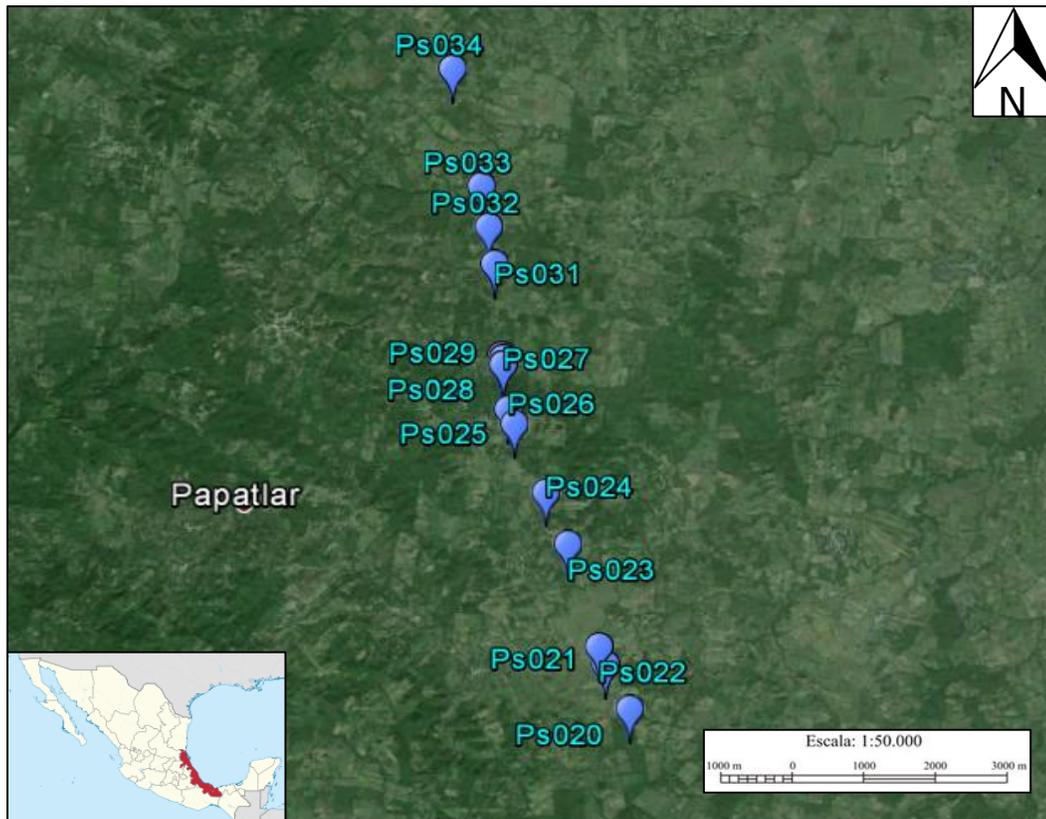


Figura 3.1 Localización de los perfiles sísmicos adquiridos. (Imagen tomada de Google Earth)

3.2 Geología General

El área de estudio se encuentra dentro de la carta geológica-minera Tamiahua F14-9, ubicada en la porción norte del estado de Veracruz. Fisiográficamente se ubica en la cuenca Tampico – Misantla y en la llanura del Costera del Golfo de México. (Raisz, 1964). La cuenca sedimentaria de Tampico – Misantla está delimitada por tres unidades estructurales primarias: la parte sur de la plataforma de Tamaulipas, la Antefosa de Chicontepec y la sierra Madre Oriental.

Regionalmente, las unidades sedimentarias son generalmente de tipo arcillo-arenoso-calcareo con edades del Terciario que van del Eoceno al Pleistoceno; representadas por las formaciones Palma Real (ToAr-Lu) constituida por arenisca-lutita del oligoceno inferior medio, Mesón (ToAr-Lm) conformada por arenisca - limolita y la Formación Tuxpan (TmAr-Cgp) constituida por arenisca- conglomerado polimíctico.

De acuerdo con la columna estratigráfica las unidades más antiguas están definidas por lutita -arenisca del Eoceno medio definida como la Formación Guayabal (TeLu-Ar), sobreyaciendo a esta unidad se encuentra marga-lutita denominada Formación Chapopote -Tantoyuca (TeLu-Ar). La unidad más reciente está definida por una unidad Cuaternaria constituida por aluvión, generado por el propio intemperismo natural de la zona.

Geológicamente el área de estudio se encuentra asentada en un depósito Terciario correspondiente a depósitos sedimentarios de arenisca - limolita (ToAr-Lm), al cual sobreyacen algunos depósitos cuaternarios constituidos por roca sedimentaria aluvión. La Figura 3.1, muestra la ubicación del área de estudio en la carta geológica así como su columna estratigráfica correspondiente.

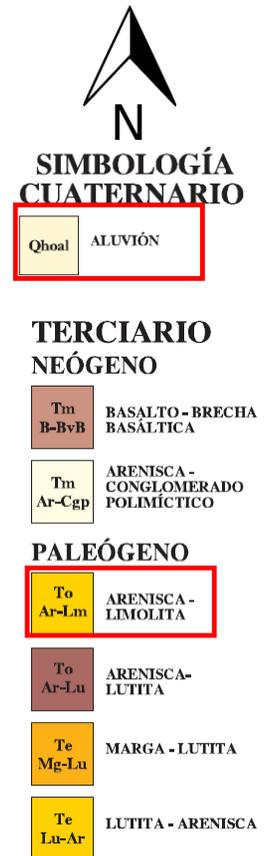
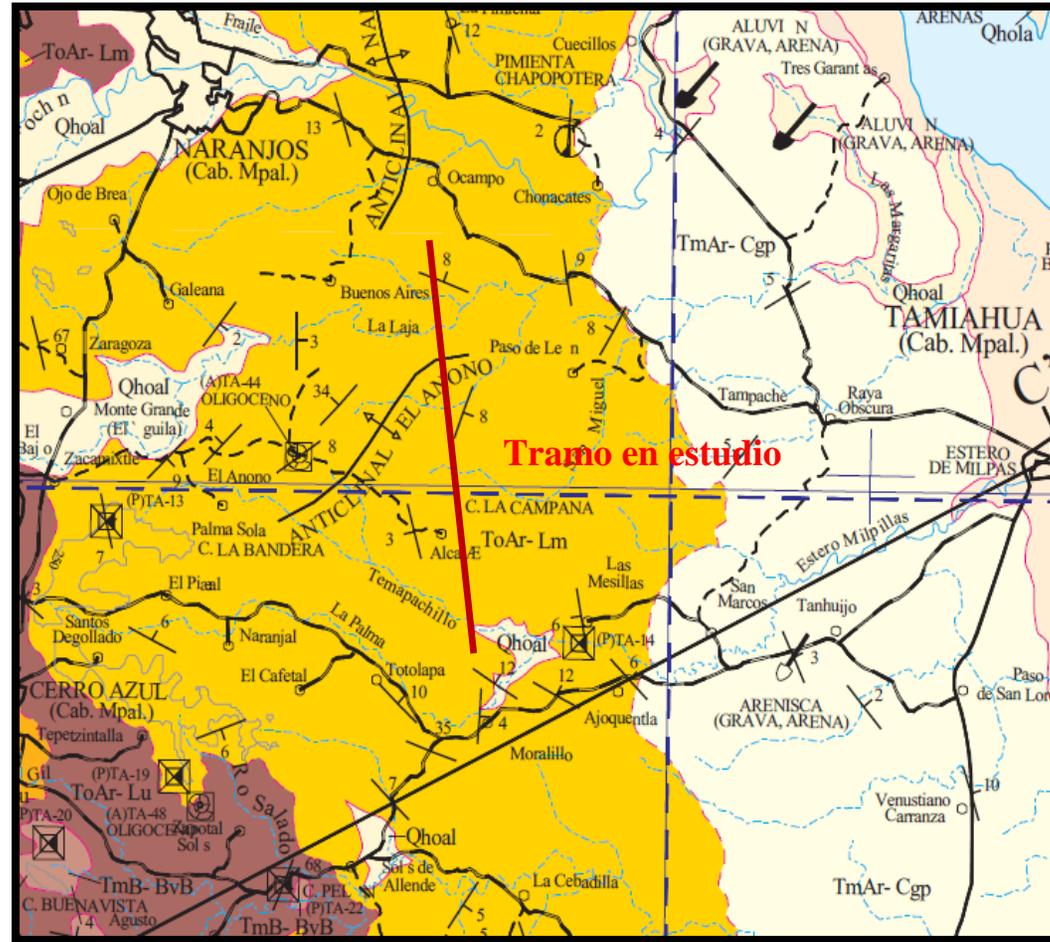
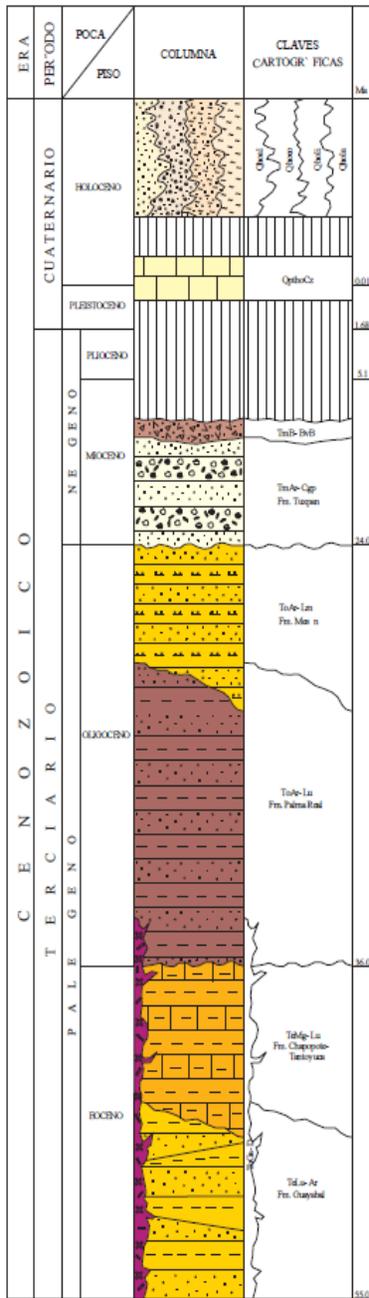


Figura 3.2. Localización de la zona de estudio en la carta geológico-minera Tamiahua F14-9 (Escala 1:250,000).

3.3. Zonificación Geotécnica

La adquisición de los tendidos de refracción y el cálculo de sus propiedades elásticas son la base para el cálculo del espectro de diseño por sismo. El espectro de diseño por sismo sirve para conocer los parámetros bajo los que se debe diseñar y construir las estructuras para resistir, como mínimo, los efectos de los movimientos sísmicos del terreno sobre las que se desplantan. Por lo tanto es importante mencionar e incluir un poco de información de la zonificación geotécnica de la zona que estudié, como lo describo a continuación.

La República mexicana se encuentra dividida en cuatro regiones sísmicas, esta zonificación se elaboró para servir de apoyo en el diseño sísmico de estructuras. Dicha clasificación se realizó en base a los registros históricos de la frecuencia de sismos y la intensidad de los mismos, los cuales datan de aproximadamente inicios de siglo.

Estas regiones sísmicas reflejan que tan frecuentes son los temblores y cuál es la aceleración máxima del suelo que se espera por la acción de las fuerzas sísmicas.

Como se mencionó anteriormente, nuestro país se divide en cuatro zonas o regiones sísmicas las cuales son:

- **Zona A (Baja sismicidad):** En esta zona no se han registrados ningún sismo de magnitud considerable en los últimos 80 años, ni se esperan aceleraciones del suelo mayores al 10 % de la aceleración de la gravedad.
- **Zona B (Media intensidad):** Esta zona es de moderada intensidad, pero las aceleraciones no alcanzan a rebasar el 70% de la aceleración de la gravedad.
- **Zona C (Alta intensidad):** En esta zona hay más actividad sísmica que en la zona B, aunque las aceleraciones del suelo tampoco sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.
- **Zona D (Muy alta intensidad):** Aquí es donde se han originado los grandes sísmicos históricos, y la ocurrencia de sismos es muy frecuente, además de que las aceleraciones del suelo sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.

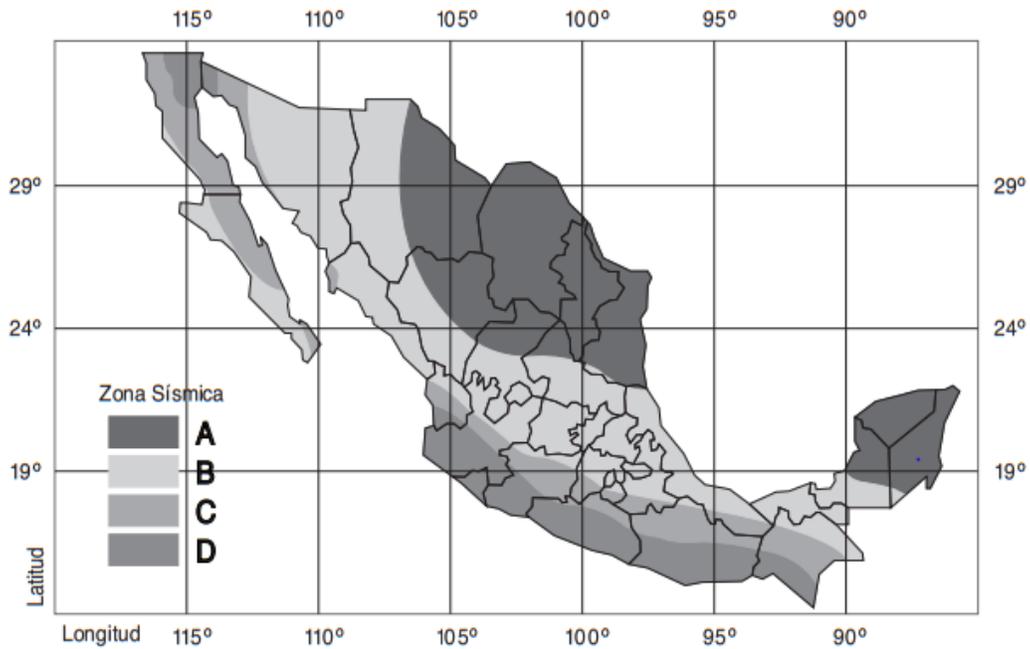


Figura 3.2 Zonificación sísmica (Memoria del Seminario práctico de análisis de los efectos por viento y sismo, 16 al 18 de junio de 2010, Morelia, Mich., Centro Regional de Desarrollo en Ingeniería Civil.)

De acuerdo al análisis en el software PRODISIS v2.3 (CFE), el tramo en estudio se localiza dentro de la **ZONA B** (Véase Figura 2.3), de donde se pudo dividir el área de estudio en dos partes desde el punto de vista de la aceleración del terreno.

La primera con una aceleración de 49 gals y va del kilometraje 36 al 44, mientras que en la segunda se tiene una aceleración de 50 gals y abarca los kilometrajes 44 al 53.

Capítulo 4. Exploración sísmica

4.1 Trabajo de campo realizado

Los trabajos de campo, procesamiento e interpretación para cada uno de los tendidos de refracción los realice con la misma metodología la cual ejemplifico con el perfil sísmico **PS024**.

El arreglo sísmico que utilicé para todos los TRS fue diseñado para alcanzar una profundidad de investigación de 40 metros con una longitud total de 128 m, donde se utilizaron 12 geófonos, en cuyo tendido se efectuaron tres puntos de tiro de fuente sísmica artificial generada con un marro de acero de 20 lb, como se muestra en la Figura 4.1.

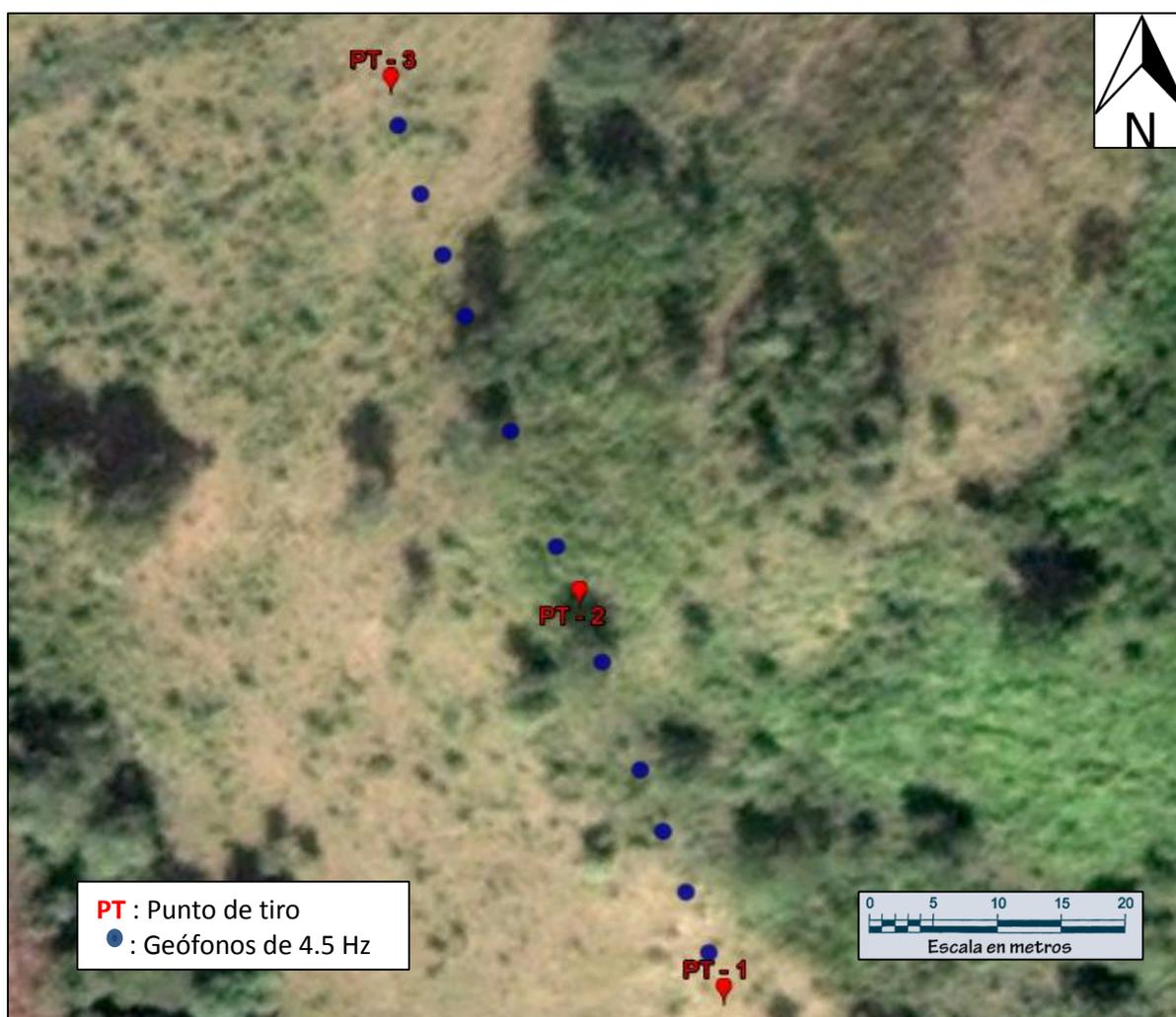


Figura. 4.1. Arreglo sísmico utilizado en el proyecto. Los geófonos se encuentran espaciados 8 y 16 m con sus respectivas fuentes para la generación de ondas sísmicas.

Para realizar esta fase del proyecto se utilizó un sismógrafo que cuenta con un sistema de registro múltiple marca Geometrics, modelo GEODE, de 24 canales. Este sismógrafo se conecta directo a una PC por medio de un puerto USB, desplegando en la PC todas las opciones del arreglo sísmico, y permitiendo introducir todos aquellos parámetros que se deben controlar durante el levantamiento en campo.

4.2 Procesamiento de Datos Geofísicos de TRS

El procesamiento de los datos obtenidos en campo consistió en el análisis y lectura de los sismogramas grabados digitalmente, para lo cual se utilizó el programa Tom-Time (GeoTome, LLC) que permite visualizar el registro sísmico en pantalla y seleccionar los tiempos de arribo, tanto de las ondas longitudinales “P” como transversales “S”. (Figura 4.2)

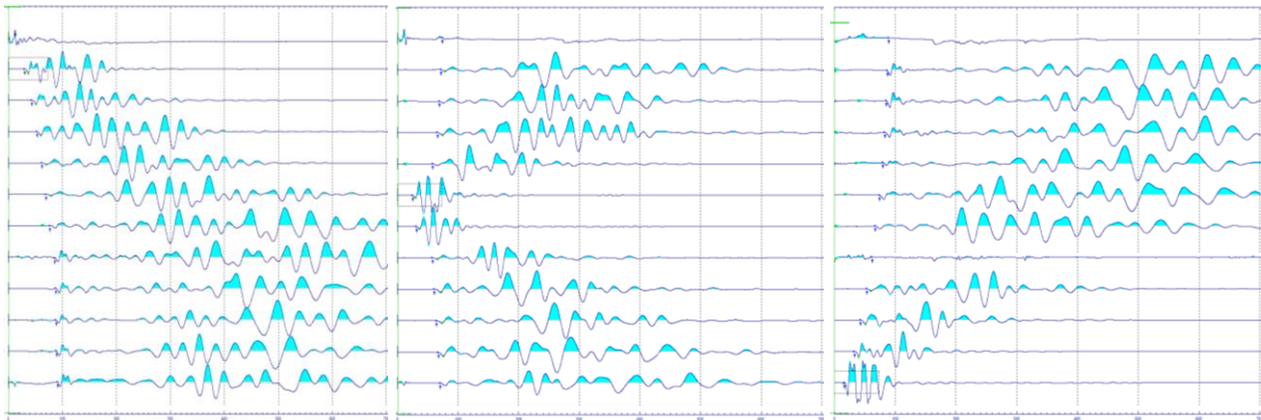


Figura. 4.2 Picado de sismogramas para definir tiempo de arribo de la onda P para cada uno de los tres puntos de tiro del perfil sísmico 024.

Una vez leídos los diferentes tiempos de arribo, se procedió a construir las dromocrónicas, como se muestra en la Figura 4.3, para determinar el número de capas sismoelásticas que conforman el subsuelo somero y sus velocidades de propagación V_p y V_s , correspondientes. Las capas están definidas por los cambio de pendientes en las curvas.

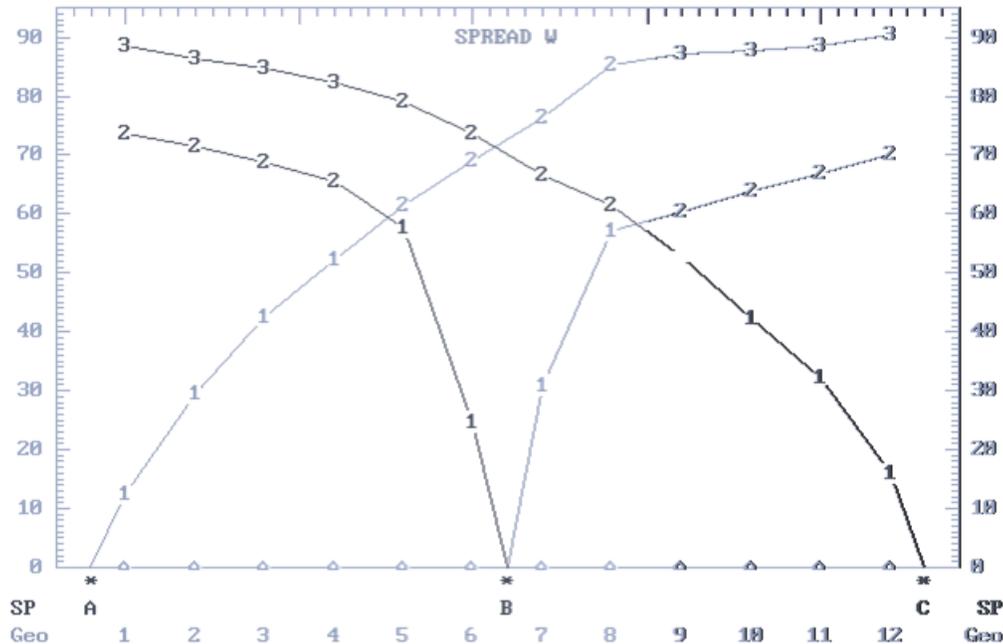


Figura 4.3 Dromocrónicas a partir del procesamiento de los datos del PS024.

4.3 Procesamiento de Datos Geofísicos de MASW1D

El procesamiento consistió en el análisis de los registros obtenidos en campo, haciendo uso del software GEOPSY (Wathelet, 2006) para extraer las curvas de dispersión de las ondas Rayleigh, para ello se utiliza el módulo FK-activo, el cual realiza una transformada en el dominio del espacio para obtener una función dependiente del número de onda k , posteriormente calcula la velocidad de fase y finalmente despliega las curvas de dispersión; una para cada punto de excitación. Los resultados de este proceso para el tiro 1 de la línea ejemplo, se muestran en la Figura 4. 4. En esa figura se muestran los máximos espectrales asociados a los trenes de ondas superficiales de PT1. En el diagrama de la misma figura he seleccionado la curva de dispersión. En esa figura también muestro el límite de confiabilidad, como regla general, se puede derivar los límites de longitud de onda del arreglo con la abertura seleccionada, mediante $d_{max} \sim D$ y $d_{min} \sim \pi D/N$, siendo N el número de sensor, obteniendo: $\lambda_{max} \sim D > \pi D/N > \lambda_{min}/2$.

La curva de dispersión promedio y/o representativa, es invertida para obtener el perfil unidimensional de onda de corte.

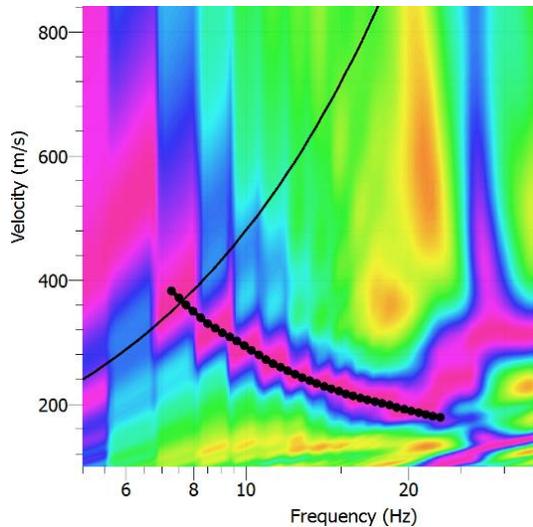


Figura 4.4 Curva de dispersión obtenida a partir del procesamiento de los datos del PS024. La línea punteada es el picado de la curva de dispersión, mientras que la línea continua marca el límite de confiabilidad.

El proceso de inversión tuvo lugar en el módulo *Dinver* de GEOPSY, el cual genera un conjunto aleatorio de modelos de velocidad de onda S, con base al modelo obtenido en el procesamiento del TRS, los cuales se comparan con la curva de dispersión medida arrojando un valor de misfit (ajuste del error) y el mejor modelo.

Finalmente, determiné los módulos elásticos dinámicos de los estratos que constituyen el subsuelo; para ello utilicé las relaciones derivadas de la propagación de ondas en medios continuos, la cual establece que los parámetros elásticos dinámicos de los materiales son función de las velocidades de propagación de las ondas sísmicas longitudinal (V_p) y transversal o de cortante (V_s) que se propagan a través de él.

Las ecuaciones que me permitieron determinar estos parámetros elásticos son:

Relación de Poisson

$$\nu = \frac{0.5 \left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}{\left(\frac{V_p}{V_s} \right)^2 - 1}$$

Módulo de corte

$$G = \rho V_s^2$$

Módulo de Young

$$E = 2\rho V_s^2(1 + \nu)$$

Tras el procesamiento y la obtención las velocidades V_p y V_s correspondientes a cada uno de las unidades sismoestratigraficas, determiné el grado de arabilidad del subsuelo de acuerdo con el Manual de Rendimiento de Caterpillar, Edición 25.

Capítulo 5. Resultados

Los resultados de este reporte consisten en el modelo 2D de velocidad de onda P y modelo 1D o perfil de velocidad de la onda S, una tabla de valores de constantes elásticas, y el dictamen de arabilidad basado en la tabla de arabilidad para un desgarrador D8R del Manual de Caterpillar (Ver anexo I), que comúnmente se emplea en la toma de decisiones en lo referente a excavaciones y movimiento de materiales.

En el perfil sísmico, el cual se muestra en la Figura 5.1, observamos que la línea de exploración tiene una dirección SE-NW; tras su procesamiento e interpretación se identificaron tres unidades sismoestratigráficas, las cuales se describen a continuación.

La primera unidad se asocia a materiales arcillo arenosos café y arenosos limosos del mismo color, presenta un espesor medio de 8 metros, tiene una velocidad de onda longitudinal de 396 m/s y una velocidad de onda de corte de 180 m/s; por lo que se clasifica como 100% arable.

Subyaciendo de manera concordante se encuentra la segunda unidad, ubicada bajo 8 metros de profundidad, la cual se asocia a arcilla café de consistencia dura, presenta un espesor medio de 16 metros, tiene una velocidad de onda longitudinal de 2,057 m/s y una velocidad de onda de corte de 421 m/s; por lo que se clasifica como desgarrable con bajos rendimientos o marginal.

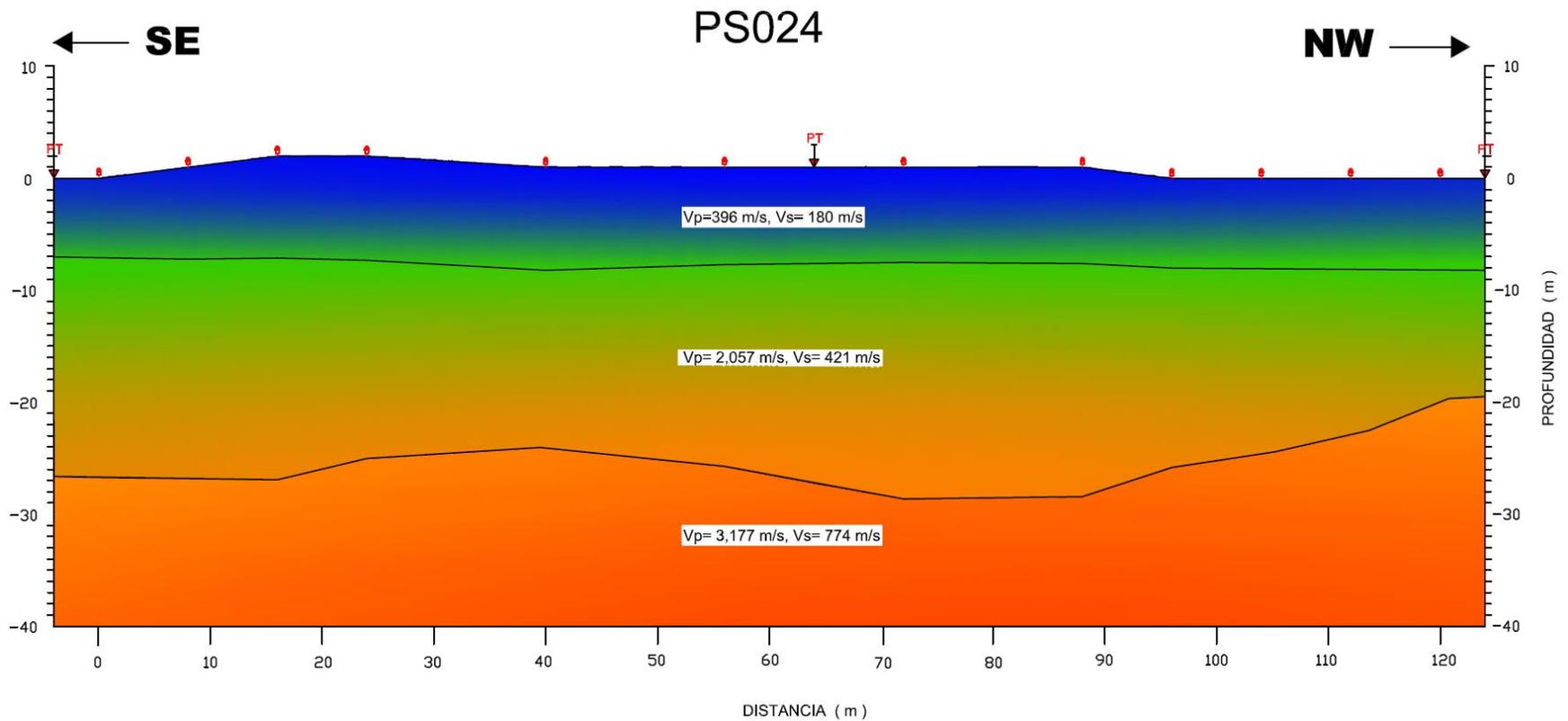
Finalmente, la tercera unidad que se asocia posiblemente a roca lutita, se presenta a partir de una profundidad media de 24 m y su espesor es indefinido por medio de esta técnica, tiene una velocidad de onda longitudinal de 3,177 m/s y una velocidad de onda de corte de 77 m/s; por lo que se clasifica como no desgarrable o no arable.

Con base en los resultados anteriores, se determinaron los módulos elásticos dinámicos de los materiales presentes en el subsuelo de este punto, mismos que se indican en la Tabla 1.

Tabla 1. Propiedades elásticas dinámicas del PS024.

Capa	Vp (m/s)	Vs (m/s)	Densidad (ton/m ³)	Relación de Poisson	Cortante (kg/cm ²)	Elasticidad (kg/cm ²)
1	396	180	1.93	0.37	637	1,746
2	2,057	421	1.80	0.48	3,252	9,614
3	3,177	774	2.00*	0.47	12,214	35,870

*Pesos volumétricos estimados



UNIDAD GEOSÍSMICA	POSIBLE CORRELACIÓN GEOLÓGICA	VELOCIDAD DE ONDA P (m/s)	VELOCIDAD DE ONDA S (m/s)	CALIDAD DE MATERIAL	ARABILIDAD CON DESGARRADOR DBR
ToAr-Lm	Arcilla arenosa y arena limosa color marrón (Formación Mesón)	396	180	Suelo suelto	100 % Arable
ToAr-Lm	Arcilla marrón de consistencia dura (Formación Mesón)	2,057	421	Suelo muy compacto	Marginal
ToAr-Lu	Roca lutita gris (Formación Palma real)	3,177	774	Roca de buena calidad	No desgarrable

Figura 5.1 Perfil sísmico obtenido a partir del procesamiento de los datos del PS024.

Capítulo 6. Conclusiones

Con base a la experiencia que adquirí desarrollando el puesto de *PASANTE DE INGENIERA GEOFÍSICA*, concluyo lo siguiente:

- Es importante plantear objetivos claros, ya que la adquisición, procesamiento e interpretación dependerán completamente de estos.
- Tener antecedentes académicos robustos es parte vital para un buen desarrollo del proyecto, en algunas ocasiones, la eficiencia con la que resuelven de problemas de campo depende totalmente de los antecedentes teóricos que tengamos.
- La geología y la geofísica son ciencias interrelacionadas, es necesario contar con el contexto geológico de donde queramos aplicar geofísica.
- El informe es la presentación del trabajo realizado, por lo tanto es igual de importante que la adquisición, el procesamiento e interpretación.
- Como líder de brigada, el trabajo de tu equipo (bueno o malo) será visto como tuyo. Así que, el trabajo en equipo es vital.

Finalmente, el trabajo de un Ingeniero Geofísico de campo es muy integral ya que no solo requiere de conocimiento de geofísica sino de desarrollar habilidades tanto técnicas como personales.

Referencias

- [1]... Gonzales-Herrera, Raúl. (2013), *La estructura de velocidades y su relación con el peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas*; Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, vol. 30, No. 1.
- [2]... González, Luis I. (2004), *Ingeniería Geológica*. Ed. Pearson Prentice Hall, Madrid.
- [3]... Orellana, Ernesto. (1972), *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*; Paraninfo; Madrid; pp. 60-109.
- [4]... Park Seismic LLC. (2007), Surface Wave Survey Method, Sitio web:
<http://parkseismic.com/SurfaceWaveSurvey.html>
- [5]... Park Seismic LLC. Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), página web:
<http://www.masw.com>
- [6]... Servicio Geológico Mexicano, 2010, Carta Geológico-Minera Tamiahua F14-9, Esc. 1:250,000, primera edición.
- [7]... Manual de rendimiento Caterpillar, Edición 25, Caterpillar Inc., 2009.

ANEXO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Los estudios sísmicos son una parte de los estudios geofísicos que están basados en la teoría de la elasticidad; su objetivo es deducir las propiedades elásticas de los materiales midiendo la respuesta que estos tienen ante perturbaciones llamadas ondas sísmicas.

Las ondas sísmicas son un tipo de onda elástica que se desplazan en el interior de la tierra por medio de perturbaciones de las partículas que componen los materiales del subsuelo.

Las ondas sísmicas utilizadas en un estudio pueden tener dos tipos de fuentes, activas o pasivas. Las fuentes activas son aquellas que generan ondas sísmicas por medio de un impacto en superficie, mientras que las pasivas generan ondas por actividades naturales y/o culturales. Muchos de los estudios sísmicos implementados a través de la historia han sido de fuente activa.

Existen tres tipos principales de estudios que utilizan las ondas sísmicas: refracción, reflexión y ondas superficiales, dependiendo del tipo específico de onda que se analiza. Cada tipo de estudio sísmico utiliza un tipo específico de onda y un patrón de arribo específico al registro multicanal.

Tendido de Refracción Sísmica (TRS).

Las ondas sísmicas no se propagan a la misma velocidad en diferentes horizontes refractores del subsuelo, la medición del intervalo de tiempo que transcurre desde que se genera el impulso (mediante la fuente de energía), hasta su recepción en los geófonos, nos permitirá construir una gráfica de tiempo-distancia a la cual se le conoce como dromocrónica, la cual nos da la posibilidad determinar la velocidad de propagación de las ondas en el terreno, así como la estructura del terreno.

Cabe resaltar, que no forzosamente debe coincidir con los contactos geológicos, debido a que la velocidad de la onda también depende de la compactación del terreno, porosidad de la roca, saturación de fluidos, etc. Debido a que nuestro terreno no es homogéneo, las velocidades variarán lateralmente como en profundidad.

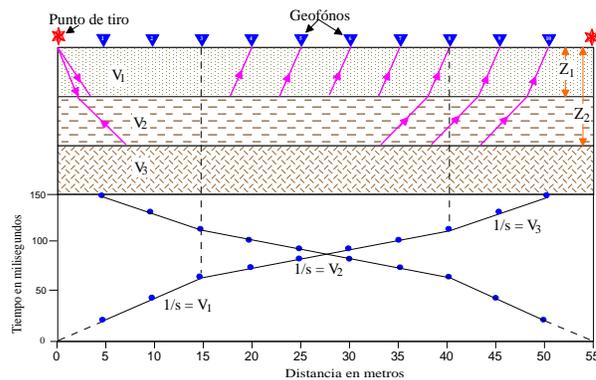


Figura 1. Curva dromocrónica para el caso de tres capas (Modificado de Sheriff et al., 1991).

Cabe mencionar que las diferentes velocidades de propagación de las ondas longitudinales nos permiten inferir el tipo de material. No obstante que los parámetros obtenidos con este método son muy precisos, pudiera darse el caso que el modelo sísmico no fuera totalmente correlacionable con la geología del sitio, debido fundamentalmente a que las capas del subsuelo no satisfagan cualquiera de las siguientes condiciones:

- Las velocidades de propagación P o S de cada una de las capas o estratos deben incrementarse con la profundidad.
- Cada una de las capas debe tener un espesor suficiente, mayor que la longitud de onda P o S, para poder ser detectadas.
- El material no debe encontrarse sometido a filtración de agua y/o presencia, agrietamientos, fracturamientos, así como otros factores que puedan afectar la velocidad de onda.

El método de refracción se fundamenta teóricamente en:

- La ley de Snell o ley de la refracción: Los rayos refractados se hallan en el plano de incidencia (Figura 2) y se encuentran regidos por la siguiente ecuación:

$$n_1 \cdot \text{sen} \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen} \theta_2$$

Donde: n_1 y n_2 , son constantes adimensionales de los medios 1 y 2 y se les denomina índice de refracción.

$$\theta_1 = \theta_1' = \theta_2$$

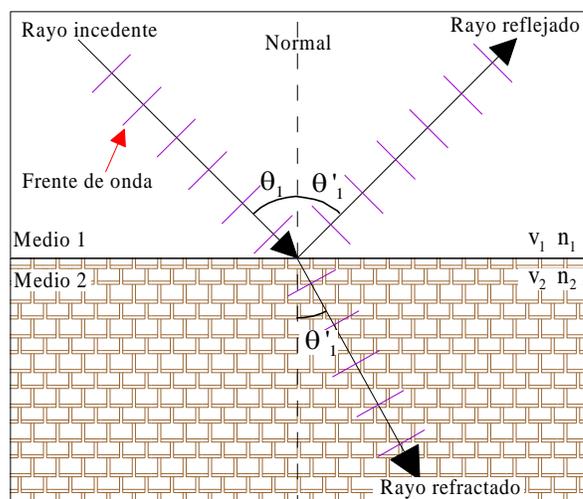


Figura 2. Representación gráfica de dos medios diferentes por los cuales viaja un rayo de energía (Modificado de Sheriff et al., 1991).

- b) Principio de Huygens: La teoría de Huygens está basada en una construcción geométrica que nos permite saber dónde un frente de onda se hallará en cualquier momento futuro, si conocemos su posición actual. Todos los frentes de onda pueden considerarse como frentes puntuales en la generación de ondas esféricas secundarias, de acuerdo a lo siguiente (Figura 3):

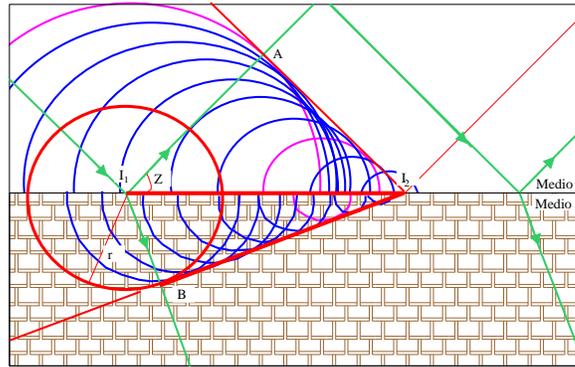


Figura 3. Principio de Huygens (Modificado de Walter Fendt, 1998).

- c) Principio de Fermat: Un rayo de energía que pasa de un punto fijo a otro seguirá la trayectoria de menor tiempo requerido (Figura 4). El tiempo total t que tarda en llegar el rayo de energía el punto A al punto B está dado por:

$$t = \frac{L_1}{v_1} + \frac{L_2}{v_2}$$

Donde: L , es la longitud total del rayo de energía; es decir, que se define como:

$$L = n_1 L_1 + n_2 L_2$$

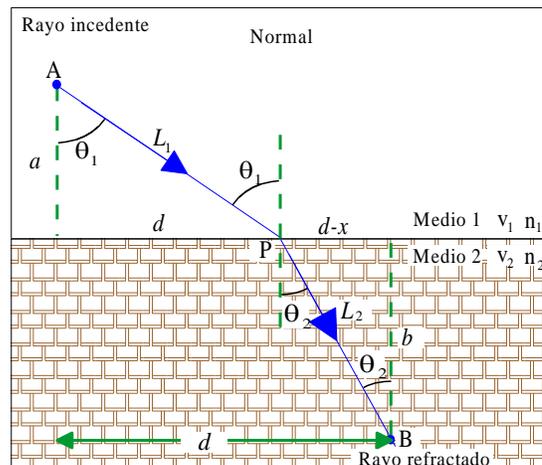


Figura 4. Refracción de una onda de energía analizada con el principio de Fermat (Modificado de Sheriff et al., 1991).

El principio de Fermat: Establece básicamente que el tiempo que tarda el rayo de energía en recorrer APB debe ser mínimo.

En la práctica, la sismología de refracción utiliza aquellas ondas que generamos artificialmente que se han refractado con un ángulo crítico.

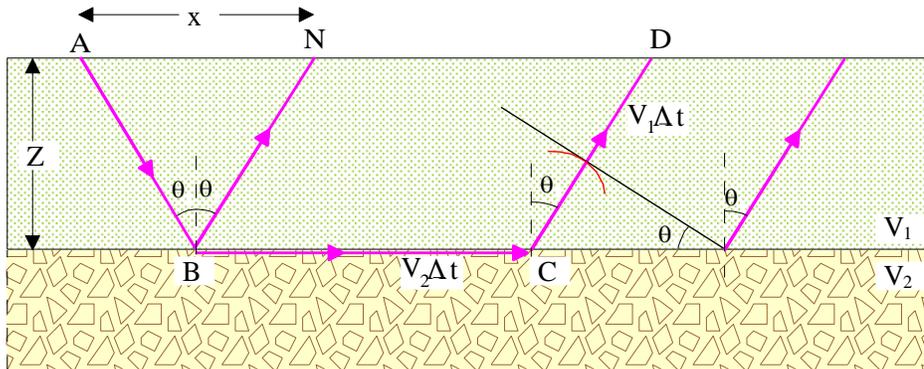


Figura 5. Frente de onda emergiendo del refractor en ángulo crítico (Modificado de Sheriff et al., 1991).

Es decir, de acuerdo a la Figura 5 la propagación de la onda P parte del origen al incidente refractor sobre la interface donde se produce el ángulo crítico, durante la refracción la onda viaja por debajo de la interface de los medios generando una onda plana, de acuerdo al principio de Huygens los puntos por donde pasa la onda P se convierten en nuevos frentes de onda, los cuales se emiten a la superficie.

El sismograma que se interpreta contendrá los primeros arribos la onda directa y después la onda refractada, las cuales tendrán diferentes pendientes; según el número de capas que se puedan interpretar serán el número de pendientes en nuestra onda refractada.

La onda directa siempre será aquella que pase por el origen y cuya pendiente es el inverso de la velocidad de la primera capa:

$$T = \frac{x}{v_1}$$

Esta onda es la primera perturbación que registran los geófonos más cercanos a la fuente, instantes después la onda refractada que es de mayor velocidad superará el tiempo de la onda directa, invirtiéndose así el tiempo de llegada. Esto se debe principalmente a que la velocidad aumenta con la profundidad.

En cuanto a la onda refractada se debe tomar el total del tiempo de viaje que está dado por:

$$T = T_{AB} + T_{BC} + T_{CD}$$

Esta ecuación para el caso de dos capas estará dada por:

$$T = \frac{z}{v_1 \cos \theta_c} + \frac{x - 2z \tan \theta_c}{v_1 \cos \theta_c} + \frac{z}{v_1 \cos \theta_c}$$

$$T = \frac{x}{v_2} + 2z \left[\frac{\sqrt{v_2^2 - v_1^2}}{(v_1)(v_2)} \right]$$

Donde θ_c , representa el ángulo crítico.

La ecuación inmediatamente anterior representa la recta cuya pendiente es la inversa de la velocidad en el segundo medio, donde el segundo término es la ordenada al origen de la dromocrónica que guarda la relación con las velocidades de un medio y la profundidad.

Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW 1D)

Cuando las ondas sísmicas son generadas, un tipo especial de onda se propaga por la superficie, esta onda es llamada onda superficial, cuya profundidad de penetración depende de la longitud de onda; entre mayor sea la longitud de onda, mayor será su penetración en el subsuelo.

Debido a esta propiedad, las ondas superficiales son usualmente dispersivas, poseen diferentes frecuencias y tienen diferentes velocidades de propagación en comparación con las ondas de cuerpo. Generalmente se producen dos tipos de ondas superficiales, Rayleigh y Love. Teóricamente, la propiedad de dispersión es función de diversos parámetros, entre ellos la densidad del material y las variaciones de las velocidades de onda de corte y onda compresional con la profundidad. De estos parámetros, la variación de velocidad de onda de corte es el factor más influyente. Debido a esto, las ondas de superficie son muy usadas para deducir la velocidad de onda de corte (V_s) en materiales cercanos a la superficie.

El Análisis Multicanal de Ondas Superficiales (MASW por sus siglas en inglés) es uno de los muchos métodos que se usan dentro de los estudios de propiedades sísmicas para evaluar las condiciones elásticas del subsuelo, generalmente utilizado en ingeniería geotécnica.

Inicialmente, el MASW mide las ondas sísmicas superficiales generadas por diferentes tipos de fuentes sísmicas, tales como un golpe de marro, analiza las velocidades de propagación de las ondas superficiales y concluye deduciendo las variaciones de

velocidad de onda cortante (V_s), las que son las principales responsables de la velocidad de propagación de las ondas superficiales. La velocidad de la onda de corte es una constante elástica y está estrechamente relacionada con al módulo de Young. Bajo varias circunstancias, V_s es un indicador directo de la rigidez del suelo y puede ser usada para calcular la capacidad de carga del mismo. Después de un procedimiento simple, la información final sobre V_s puede representarse en formato 1-D, 2-D y 3-D.

Donde la separación entre receptores determinará la profundidad mínima de estudio (ecuación 1), mientras que la profundidad máxima estará en función de la longitud total (ecuación 2), de la siguiente manera:

$$Z_{min} = kdx; \quad 0.3 \leq k \leq 1.0 \dots(1)$$

$$Z_{max} = mL; \quad 0.3 \leq m \leq 1 \quad \dots(2)$$

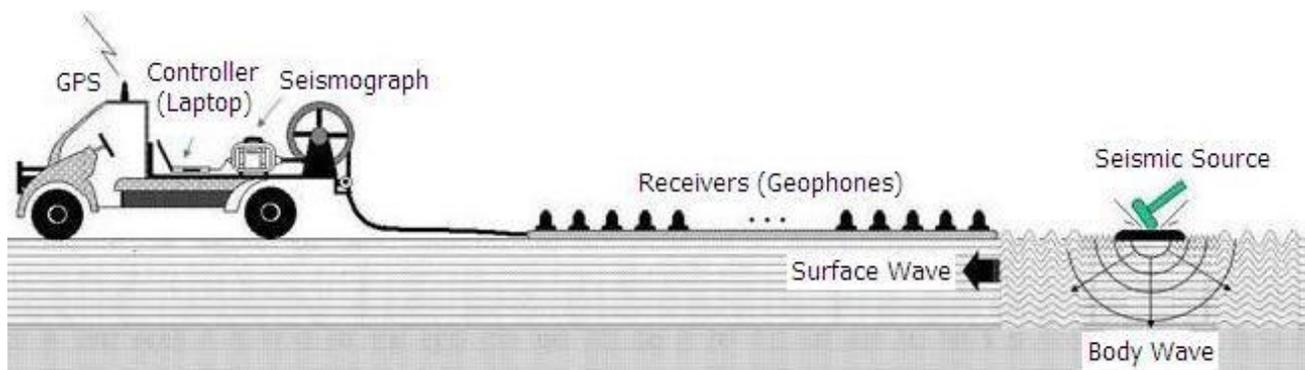


Figura 6. Adquisición de campo para prueba MASW.

Arabilidad

Para la remoción de los materiales que conforman un camino, una ladera, un trazo de canal, etc., es necesario conocer su grado de arabilidad, a fin de seleccionar eficientemente el tipo de tractor a emplear, los tiempos de operación, los tramos que requieren preparación, la cantidad de explosivo, el número de brigadas o frentes, etcétera.

La característica del material que permite definir estas condiciones, es la velocidad de transmisión de las ondas longitudinales. Por lo tanto, mediante estudios de Refracción Sísmica, es factible reconocer aquellos materiales que para ararlos y/o removerlos requieren de una maquinaria especial, o bien, los materiales que deben fragmentarse previamente con el uso de explosivos.

La eficiencia de los tractores en la remoción de los materiales varía con el tipo de material y la capacidad del tractor. En la programación adecuada de este tipo de trabajos se usan las

gráficas publicadas por Caterpillar para sus tractores, las cuales son complementarias en la obtención de una rentabilidad óptima. En la Figura 7. se presentan los parámetros de arabilidad de diferentes tipos de roca contra la velocidad de transmisión de las ondas elásticas compresionales (V_p) para el equipo D8R, que comúnmente se emplea en la toma de decisiones en lo referente a excavaciones y movimiento de materiales.

D8R

- Desgarrador No. 8 de un vástago o de vástagos múltiples
- Estimado usando las velocidades de las ondas sísmicas

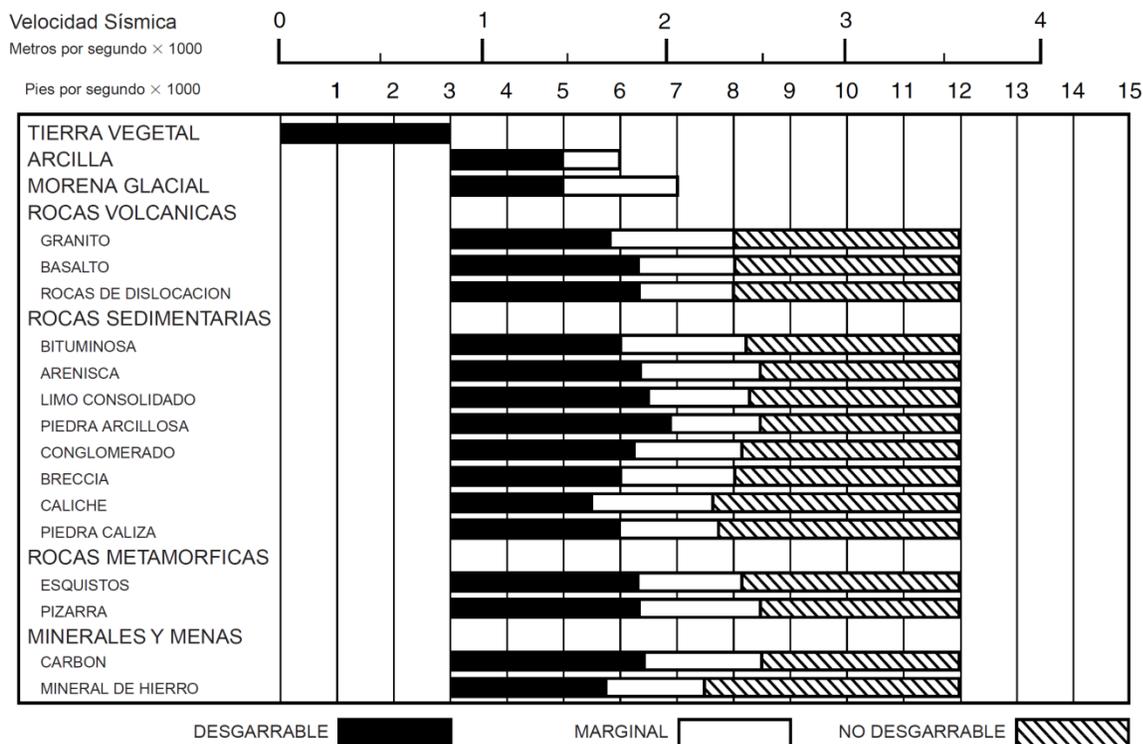


Figura 7. Tabla de arabilidad para un tractor D8R. (Manual de rendimiento Caterpillar, 2009)

ANEXO II

**REPORTE FOTOGRÁFICO DE LAS ACTIVIDADES DEL
PROYECTO CONSTRUCTIVO DE LA AUTOPISTA TUXPAN –
TAMPICO.**



Equipo usado para la adquisición de datos sísmicos.



Sensor de 4.5 Hz, empleado para la adquisición de datos sísmicos.



Sonda sísmica empleada para adquirir datos sísmicos.



Conexión del equipo Geode a la sonda sísmica, para la adquisición de TRS # PS024



Generando fuente sísmica para la adquisición del TRS.



Instalación de equipo para la adquisición de TRS # PS024.