



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN "CIENCIAS DE LA TIERRA"

**COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR
MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS
APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA**

PRÁCTICAS PROFESIONALES

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA GEOFÍSICA

Presenta:

MAGDA MAGALY CRUZ MONDRAGÓN

Asesor:

M. en C. MARCOS ROBERTO CHAVACÁN ÁVILA



Ciudad de México, diciembre 2019

INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Presente

Bajo protesta de decir verdad el (la) (los) que suscribe MAGDA MAGALY CRUZ MONDRAGÓN manifiesto ser autor (a) (es) y titular de los derechos morales y patrimoniales de la obra titulada "COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA", en adelante "LA TESIS" y de la cual se adjunta copia, por lo que por medio del presente y con fundamento en el artículo 27 fracción II, inciso b) de la Ley Federal del Derecho del Autor, otorgo al Instituto Politécnico Nacional, en adelante EL IPN, autorización no exclusiva para comunicar y exhibir públicamente total o parcialmente en medios digitales (Publicación en línea) "La Tesis" por un periodo de (un año) contado a partir de la fecha de la presente autorización, dicho periodo se renovará automáticamente en caso de no dar aviso expreso a "EL IPN" de su terminación.

En virtud de lo anterior, "EL IPN" deberá reconocer en todo momento mi calidad de autor de "La Tesis"

Adicionalmente, y en mi calidad de autor y titular de los derechos morales y patrimoniales de "La Tesis", manifiesto que la misma es original y que la presente autorización no contraviene ninguna otorgada por el suscrito respecto de "La Tesis", por lo que deslindo de toda responsabilidad a el IPN en caso de que el contenido de "La Tesis" o la autorización concedida afecte o viole derechos autorales, industriales, secretos industriales, convenios o contratos de confidencialidad o en general cualquier derecho de propiedad intelectual de terceros y asumo las consecuencias legales y económicas de cualquier demanda o reclamación que pueda derivarse del caso.

Ciudad de México, 4 de diciembre de 2019

Atentamente



MAGDA MAGALY CRUZ MONDRAGÓN



**Exploración, Perforación y Estudios del Subsuelo
S.A de C.V.**

Ciudad de México, a 1° de octubre del 2018

Ing. Roberto Loo Guzmán

Coordinador del programa académico de Ing. Geofísica

Instituto Politécnico Nacional

PRESENTE

Asunto: Carta de **Aceptación** de Prácticas Profesionales

La alumna cuyos datos se mencionan a continuación ha sido aceptada para realizar su estancia de prácticas profesionales en la empresa EXPLORACIÓN, PERFORACIÓN Y ESTUDIOS DEL SUBSUELO, S.A. DE C.V., para colaborar en el departamento de sísmica con el proyecto "Aplicación de técnicas sísmicas como apoyo geotécnico al proyecto de construcción de una sucursal Bodega Aurrera"

PRACTICANTE: Magda Magaly Cruz Mondragón
NÚMERO DE BOLETA: 2012390077
CARRERA: Ingeniería Geofísica
PERIODO: 01 de octubre del 2018 al 03 de abril del 2019
HORARIO: Lunes a viernes de 09:00 a 15:00 hrs.
HORAS A CUBRIR: 720 hrs.

ACTIVIDADES POR DESARROLLAR:

- Operación y manejo del equipamiento sísmico
- Adquisición en campo de técnicas sísmicas.
- Procesamiento e interpretación de las metodologías sísmicas
- Elaboración de informes geofísicos.

Agradezco su atención, y le envío un cordial saludo.

ING. DAVID CAMARGO GÚZMAN

Director General



Insurgentes Norte, No. 1895,
Col. Tepeyac, Insurgentes, G.A.M.
Ciudad de México, C.P. 07020

Tel.: (0155) 24-89-00-02 y 24-89-00-01
Cel.: 044-55-2363-8716
ventas@epyesa.com www.epyesa.com



**Exploración, Perforación y Estudios del Subsuelo
S.A de C.V.**

Ciudad de México, a 4 abril del 2019

Ing. Roberto Loo Guzmán
Coordinador del programa académico de Ing. Geofísica
Instituto Politécnico Nacional
PRESENTE

Asunto: Carta de **Conclusión** de Prácticas Profesionales

Por este medio hago de su conocimiento que la **C. Magda Magaly Cruz Mondragón**, estudiante del programa académico de **Ing. Geofísica** con número de boleta 2012390077 ha concluido satisfactoriamente sus prácticas profesionales en la empresa EXPLORACIÓN, PERFORACIÓN Y ESTUDIOS DEL SUBSUELO, S.A. DE C.V., colaborando en el departamento de sismica en el proyecto "Aplicación de técnicas sísmicas como apoyo geotécnico al proyecto de construcción de una sucursal Bodega Aurrera", durante el periodo del 01 de Octubre del 2018 al 03 de Abril del 2019, cubriendo un total de 720 hrs.

Sin otro particular, agradezco su atención, envío a usted un cordial saludo.

ING. DAVID CAMARGO GÚZMAN
Director General



Insurgentes Norte, No. 1895,
Col. Tepeyac, Insurgentes, G.A.M.
Ciudad de México, C.P. 07020

Tel.: (0155) 24-89-00-02 y 24-89-00-01
Cel.: 044-55-2363-8716
ventas@epyesa.com www.epyesa.com



Instituto Politécnico Nacional
"La Técnica al Servicio de la Patria"

ESCUELA SUPERIOR DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
UNIDAD TICOMÁN

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruiz"
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

EP Y T/220/2019.

Asunto
Registro de Tema

CDMX, 07 de junio de 2019.

C. MAGDA MAGALY CRUZ MONDRAGON
PASANTE DEL PROGRAMA ACADÉMICO DE
INGENIERÍA GEOFÍSICA
PRESENTE

A continuación comunico a usted, el tema del trabajo que deberá desarrollar para su examen profesional, por la opción de **PRÁCTICAS PROFESIONALES**:

**"COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE
CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES
SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA".**

Hago de su conocimiento que tiene seis meses a partir de esta fecha para desarrollarlo, de acuerdo al reglamento de titulación del I.P.N.

ATENTAMENTE

"La Técnica al Servicio de la Patria"

Ing. Fernando Rodríguez Chávez
Subdirector Académico.

FRCH/gach*



UNIDAD TICOMÁN
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA



Folio

EP Y T/492/2019.

Asunto

Aprobación de tesis.

"2019, Año del Caudillo del Sur, Emiliano Zapata"
60 años de la Unidad Profesional Adolfo López Mateos
70 Aniversario del CECyT No. 3 "Estanislao Ramírez Ruz"
60 años de XEIPN Canal Once, orgullosamente politécnico
60 Aniversario del CECyT No. 4 "Lázaro Cárdenas"

CDMX, 12 de noviembre de 2019.

ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, hacemos constar que el Tema de Tesis Profesional, por la opción de **Prácticas Profesionales**, **"COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA"**- presentado por la pasante del Programa Académico de Ingeniería Geofísica, C. **MAGDA MAGALY CRUZ MONDRAGON**, fue revisado y aprobado por los suscritos considerándolo ampliamente desarrollado, por lo tanto, esa Subdirección a su cargo, puede señalar fecha para realizar el Examen Oral.

TITULARES



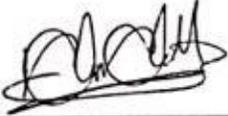
ING. ROBERTO LOO GUZMAN



ING. EFREN MURILLO CRUZ



ING. ALEJANDRO MENDOZA MARAVILLAS



ING. OMAR CRISTIAN CHAVEZ HERNANDEZ



M. en C. MARCOS ROBERTO CHAVACAN AVILA



FOLIO NO* DIE/227/ 05/2019.

CDMX, a 6 de junio del 2019

ING. FERNANDO RODRÍGUEZ CHÁVEZ
SUBDIRECTOR ACADÉMICO.
PRESENTE

At'n. Lic. Guadalupe Álvarez Chávez
Área de titulación

Por este conducto, hago constar que efectuaré la revisión del trabajo escrito como asesor interno de la **C. Magda Magaly Cruz Mondragón**, con número de boleta **2012390077**, pasante de la carrera de **Ingeniería Geofísica** quién se titulará por la opción de **Titulación por Prácticas Profesionales** el tema de Tesis **"COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA"**

Sin otro particular, agradezco su atención, envío a usted un cordial saludo.



M. en C. Marcos Roberto Chavacán Ávila



Axcana toseli tiitztoqueh
tohuaya nemih toteotzitzin
tech yolchicahuah yaotecameh
tech tlahlamictia huehuetlacameh.
Tihnequi chichahuac timonelhuayotiseh.

Tihnequi timoyolchicahuaseh
tihnequi tinextiseh totlahlamiquilis.

No estamos solos
los Dioses caminan con nosotros
los guerreros nos fortalecen
recibimos consejos de los ancianos.

Queremos fortalecer nuestras raíces
deseamos fortalecer nuestros corazones
y difundir nuestra sabiduría.

Fragmento de *Yancuic Anahuac cuicatl/Canto nuevo de Anáhuac*.
Hernández N. (1994)

A mis padres

Agradecimientos

A mi familia. A mamá y papá, por su amor incondicional. A mis hermanos, por ser mi apoyo más leal. Gracias por permitirme crecer y creer que soy capaz de todo. Su esfuerzo y sacrificio lo llevo siempre en mente y tengo muy en claro que este logro fue gracias a su apoyo y motivación constante, es pues, un éxito colectivo. Los amo.

Agradezco profundamente al M. en C. Marcos Roberto Chavacán Ávila, por sus cátedras tan amenas, por la paciencia y por su voto de confianza. Me ha enseñado que el conocimiento no sirve de nada si no es compartido. Gracias por permitirme trabajar con usted y por la solidaridad en los momentos de sobrecarga, es para mí un ejemplo de ética profesional.

Al equipo de PGS. Al Ing. Benjamín Silva por su disposición en la resolución de mis dudas de geotecnia, así como al Ing. Teófilo Galeana y a mi amiga Iridian, por ayudarme en los conceptos básicos de mecánica de suelos.

Al Ing. David Camargo y al Ing. Claudio Lezama por todas las facilidades que me dieron para realizar mis trámites de titulación, y a todo el equipo de EPYESA que me ha apoyado a crecer profesionalmente.

A mis sinodales, los ingenieros Roberto Loo, Efrén Murillo, Alejandro Maravillas y Omar Hernández, por su apoyo en la revisión de este trabajo, agradezco sus comentarios y el tiempo invertido.

Al Instituto Politécnico Nacional, por ser mi alma máter y darme la experiencia de ser politécnica. A la facultad de Ciencias de la Tierra, a mis profesores y compañeros de la ESIA que contribuyeron a mi formación personal y académica. ¡Huelum!

ÍNDICE

RESUMEN	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Objetivos y alcances	4
2. ANTECEDENTES	6
2.1 Localización de los estudios	6
2.2 Geología local	7
3. MARCO TEÓRICO	13
3.1 Generalidades	13
3.2. Métodos Sísmicos aplicados	17
3.2.1 Sísmica de refracción.....	17
3.2.2 MASW.....	22
3.2.3 Downhole	25
3.3 Pruebas de Penetración Standard.....	30
4. METODOLOGÍA.....	33
4.1 Metodología MASW	33
4.1.1 Adquisición de datos	33
4.1.2 Procesamiento e inversión de datos.....	34
4.2 Metodología Downhole.....	39
4.2.1 Adquisición de datos	39
4.2.2 Procesamiento e inversión de datos.....	41
4.3 Ecuaciones empíricas de correlación	52
4.3.1 Vs a partir de N.....	52
5.INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	61
5.1 Comparación de Vs obtenidas con métodos sísmicos	61
5.2 Comparación de Vs obtenidas con métodos sísmicos y métodos empíricos	64
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	74
Referencias bibliográficas	78
ANEXOS.....	81

RESUMEN

Debido a que una importante cadena transnacional de tiendas de supermercado plantea expandirse en diferentes puntos de la República Mexicana, dicha empresa requirió de una caracterización del subsuelo que permitiera determinar las condiciones litológicas en las áreas donde se desplantarán las estructuras. Parte importante de esta investigación del subsuelo es la determinación de la velocidad de onda de corte (V_s) con el fin de que este valor sirva de apoyo geotécnico en el desarrollo del proyecto constructivo.

Para alcanzar los resultados propuestos se implementó una brigada de exploración geofísica para ejecutar un ensayo sísmico de Downhole o bien en algunos casos un tendido sísmico para realizar un análisis multicanal de ondas superficiales (MASW por sus siglas en inglés). Con el fin de realizar una comparación entre estas dos técnicas sísmicas y su correlación con el sondeo de penetración estándar, se realizaron ambas técnicas en tres sitios ubicados en diferentes puntos del país. Adicionalmente se utilizaron ecuaciones empíricas de correlación que calcularon una V_s a partir del conteo de número de golpes (N) reportado por los sondeos de penetración estándar realizados previamente.

Al realizar las comparaciones correspondientes se observó que los resultados obtenidos con las técnicas geofísicas tuvieron una mayor congruencia con lo reportado por la mecánica de suelos, mientras que las ecuaciones obtuvieron resultados limitados, proponiendo por tanto diferentes modelos para complementar la determinación de las velocidades de onda de corte representativas de los sitios de estudio.

En conclusión, los resultados geofísicos resultaron una herramienta útil, pues obtuvieron resultados que se correlacionaron adecuadamente con la descripción geotécnica, mientras que las correlaciones tuvieron que ser complementadas, pues produjeron resultados limitados.

ABSTRACT

An important multinational retail corporation that operates a chain of supermarkets has plans of expanding its stores over Mexico and for this reason the mentioned company requires a subsurface characterization to determine lithological conditions at the sites where superstructures will be founded. An important stage in this subsoil investigation is the determination of the Shear-Wave velocity (V_s) in order to support the geotechnical design of the constructive project.

To obtain the projected results, a geophysical exploration brigade was implemented to perform a Downhole Seismic Test or in some cases a seismic spread to carry out a Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW). Both techniques were applied at three different sites over the country to compare their results and analyze their correlation to the Standard Penetration Test (SPT). Additionally, empirical relationships were used to calculate V_s from the number of blows (N) reported during the SPT previously performed at each site.

Comparison of the obtained results showed a better correlation between the soil mechanics description and the V_s values resulting from the geophysical techniques, while the empirical relationships results were limited and had to be complemented with different models proposed in this work to determine more accurately the shear-wave velocities representative for the study sites.

It can be concluded that geophysical values were a useful tool to determine results that were adequately correlated to the geotechnical description while the data obtained from the empirical relationships was limited and had to be complemented.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo de un proyecto constructivo implica la ejecución de diversos estudios encaminados a la viabilidad y perdurabilidad de la obra a proyectarse, por lo que las normativas que regulan estos trabajos se actualizan constantemente con el fin de prevenir y/o mitigar futuros daños colaterales que pudiesen afectar directa o indirectamente a las superestructuras.

Entre los estudios más comunes para caracterizar el subsuelo previo al desarrollo constructivo se encuentran los obtenidos con pruebas directas, como lo son los sondeos mecánicos, o bien los realizados indirectamente, como lo son los estudios geofísicos.

La geofísica toma un papel importante en proyectos geotécnicos, puesto que pueden determinarse propiedades elásticas imprescindibles en los cálculos geotécnicos, tal como lo es la velocidad de onda de corte, que permite evaluar cualitativamente la rigidez de los materiales, así como realizar una clasificación de los tipos de suelos en donde se plantean emplazar las estructuras.

No obstante, aún en la actualidad existe incertidumbre sobre la existencia de las técnicas geofísicas, y de los parámetros que pueden obtenerse con ellas, por lo que es común que en los proyectos con enfoques geotécnicos no siempre se cuente con estos tipos de estudios, y se recurra a obtener la velocidad de onda de corte por medio de correlaciones establecidas a partir del número de golpes del ensayo de penetración estándar (SPT).

En los siguientes puntos del siguiente trabajo se detallarán los resultados de mecánica de suelos y geofísicos, así como cálculos empíricos correspondientes a sitios de estudio en Tamazunchale, San Luis Potosí; Cd. Victoria, Tamaulipas y Cd. Guerrero, Chihuahua; puesto que en estos lugares se pretenden construir locales comerciales de cadenas de supermercados y se requiere de una caracterización del subsuelo a fin de cumplir con las normativas de seguridad.

1.1 Objetivos y alcances

Esta tesis tiene el propósito de presentar los resultados de un estudio geofísico realizado con metodologías sísmicas, estudiando diferentes puntos de interés. Los objetivos se enuncian a continuación:

- Determinar las condiciones litológicas, estratigráficas y tipo de material de las zonas de estudio.
- Determinar las velocidades de onda de corte y espesores, a través de dos metodologías sísmicas: El análisis multicanal de Ondas Superficiales (MASW, por sus siglas en inglés) y el ensayo sísmico de pozo en la modalidad de

Downhole. Posteriormente, hacer una comparación entre los resultados de ambas técnicas.

- Utilizar ecuaciones de correlación para obtener velocidades de onda de corte a partir del número de golpes obtenidos con sondeos de penetración estándar.
- Realizar una comparación de las velocidades de onda de corte obtenidas con métodos geofísicos y de las obtenidas con ecuaciones de correlación y a partir de ello analizar los resultados conseguidos, obteniendo conclusiones y recomendaciones.

2. ANTECEDENTES

2.1 Localización de los estudios

Una importante empresa transnacional plantea expandir sus sucursales de supermercados, en tres puntos de la República Mexicana, la ubicación de cada uno se describe a continuación.

El primer sitio se ubica al sureste de San Luis Potosí, específicamente en el municipio de Tamazunchale. El siguiente sitio se localiza aproximadamente a 340 km del mencionado anteriormente y se ubica en el municipio de Ciudad Victoria, estado de Tamaulipas. Por último, el tercer sitio se localiza al noroeste de la república, en el Municipio de Vicente Guerrero, perteneciente al estado de Chihuahua. La ubicación de los tres sitios estudiados se ilustra en la Figura 2.1.

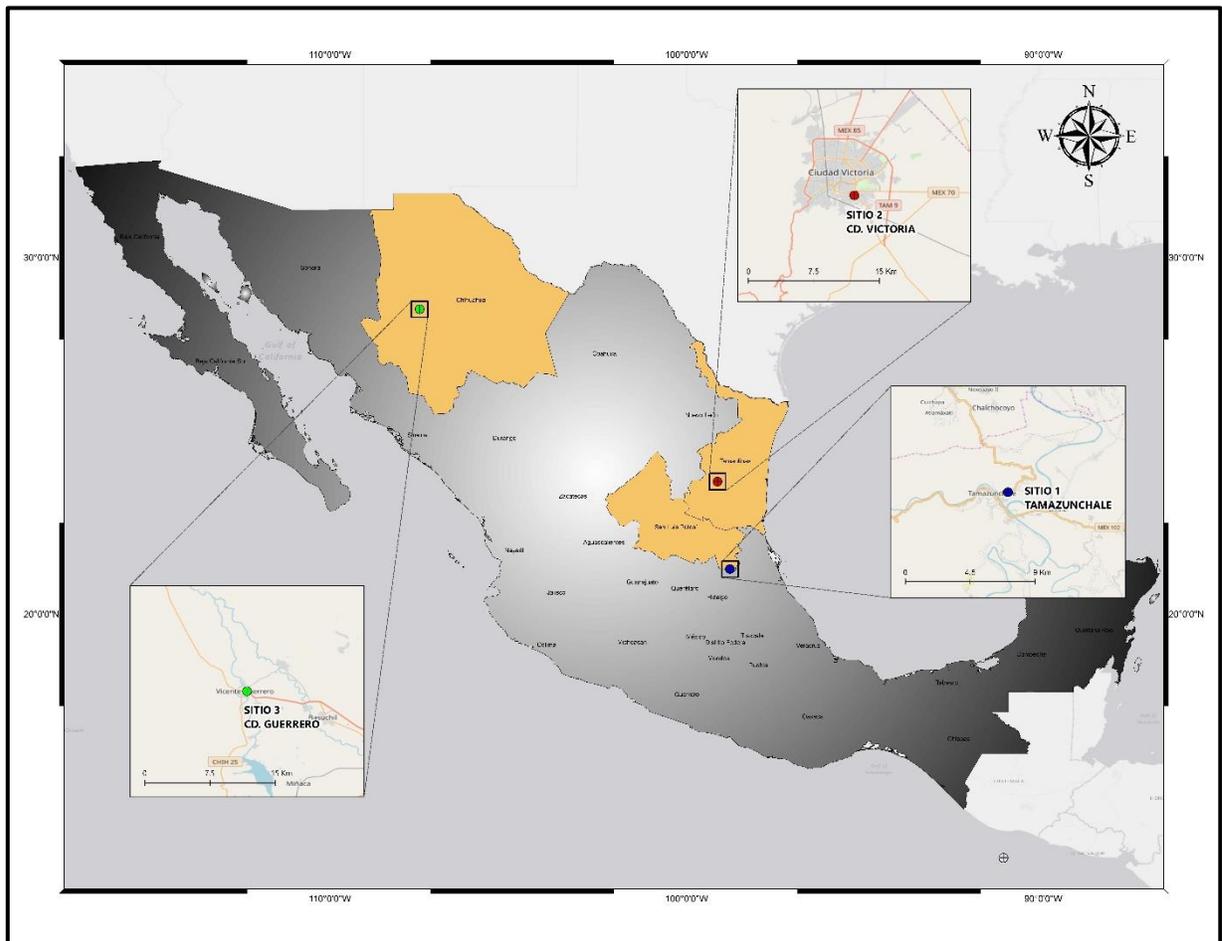


Figura 2.1 Ubicación de los sitios en donde se realizaron los ensayos sísmicos.

2.2 Geología local

- *Sitio 1: "Tamazunchale"*

De acuerdo con la carta geológica-minera "Ciudad Valles" con escala 1:250,000 (SGM, 1997), el área de estudio se encuentra en un ambiente metasedimentario, donde geomorfológicamente el área se encuentra en una etapa de senectud temprana. En la columna estratigráfica Figura 2.2 se observa que estratigráficamente se encuentran expuestas rocas con edades que varían del Jurásico al Reciente, siendo que las rocas predominantes en el área son calizas y lutitas del Cretácico, como se ilustra en el plano geológico de la Figura 2.3.

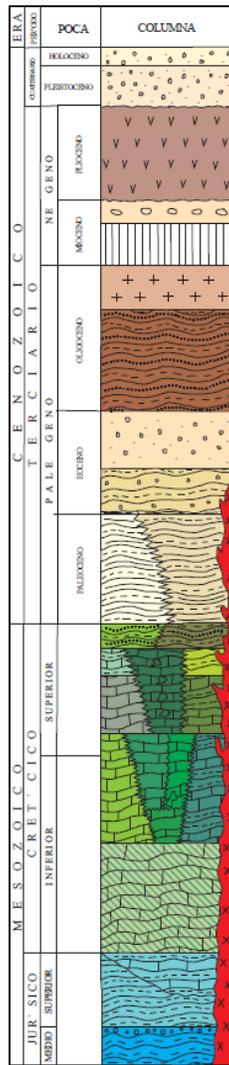


Figura. 2.2 Columna estratigráfica de la carta geológica minera "Ciudad Valles" (SGM, 1997)

Localmente, el punto donde se realizó el proyecto se emplaza sobre rocas de cuenca (arenisca-lutita) correspondientes a la formación Chicontepec (Dumble, 1918), que se encuentran sobreyacidas a su vez por depósitos continentales y/o aluviales, con diferente granulometría, producto de la erosión de las rocas preexistentes.

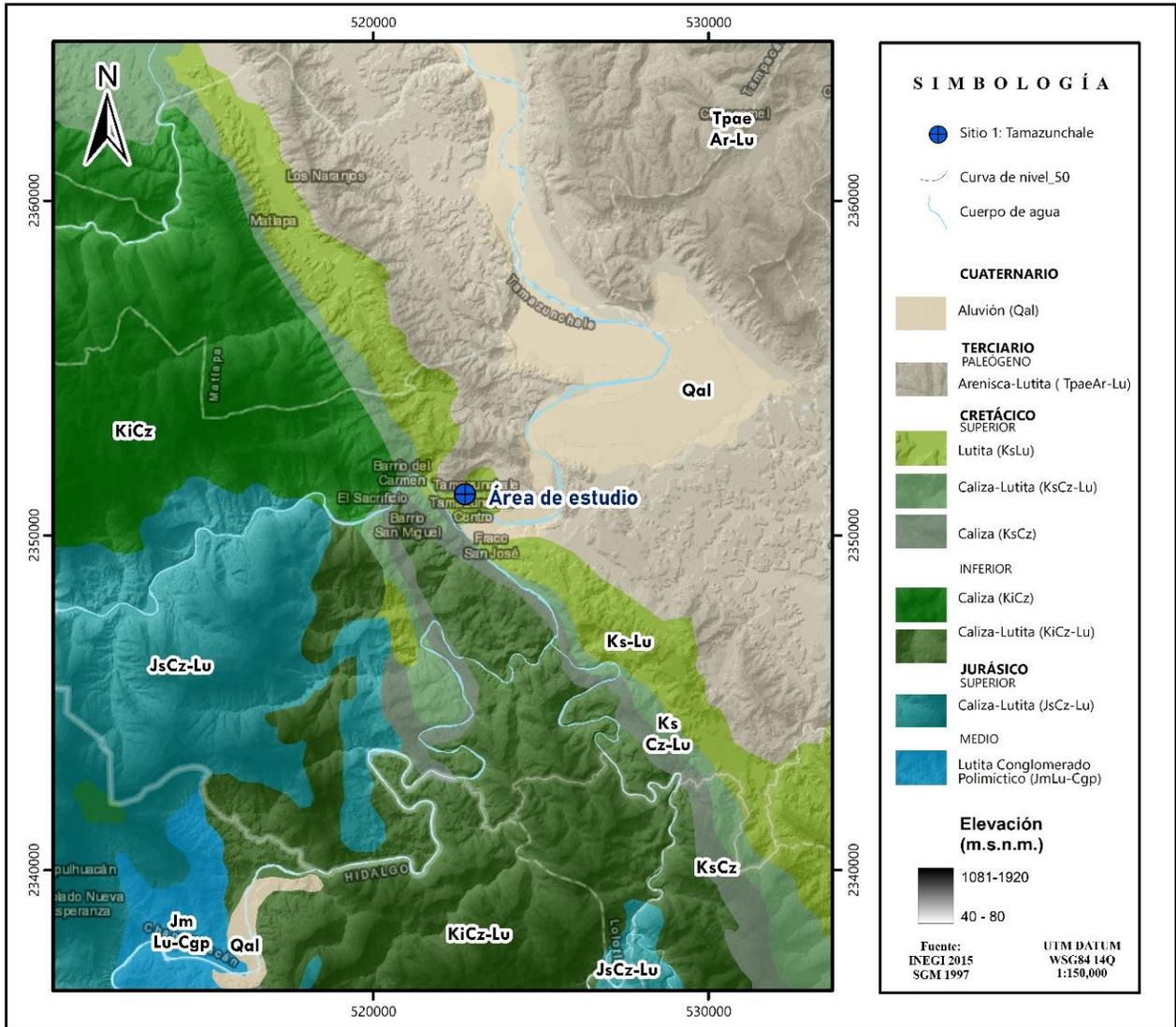


Figura.2.3 Localización del sitio 1 (Tamazunchale) en el contexto geológico.

- Sitio 2: "Cd. Victoria"

De acuerdo con el Atlas de Riesgo del municipio de Cd. Victoria, en el sitio afloran rocas sedimentarias y metamórficas de edades de Precámbricas a Terciarias, en su mayoría calizas y lutitas, y en menor grado gneises, cubiertos ocasionalmente por depósitos de origen aluvial del Cuaternario (Figura 2.4).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

Los rasgos geomorfológicos que predominan en la región son extensas llanuras interrumpidas por lomeríos de baja elevación.

Localmente, el sitio en donde se realizó el proyecto se emplaza sobre el “Conglomerado Reynosa”, constituido por sedimentos continentales con granulometrías que varían de gravas a arcillas, cuyos espesores varían de 10 a 30 m. Se distribuye ampliamente al norte y este del municipio, así como en la zona urbana (Figura 2.5). Su depósito se efectuó en un medio continental, donde ríos y arroyos acarrearón los sedimentos hacia las partes bajas, dando origen a grandes abanicos deltaicos.

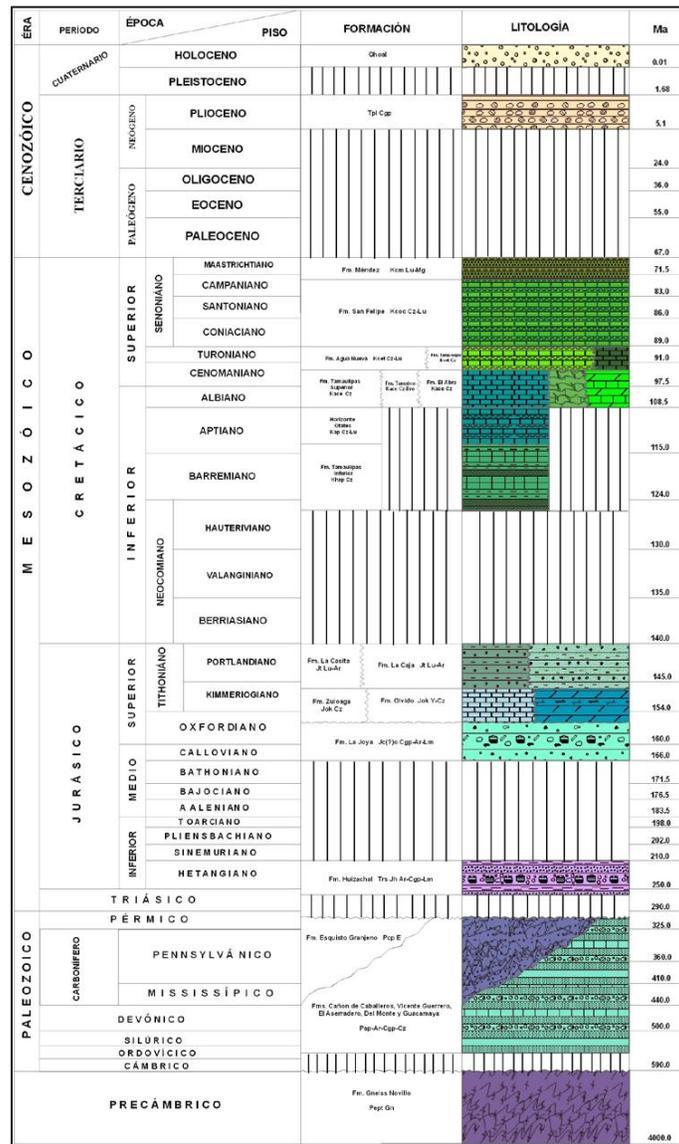


Figura 2.4 Columna estratigráfica del municipio de Cd. Victoria, tomado del Atlas de Riesgo de Cd. Victoria.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

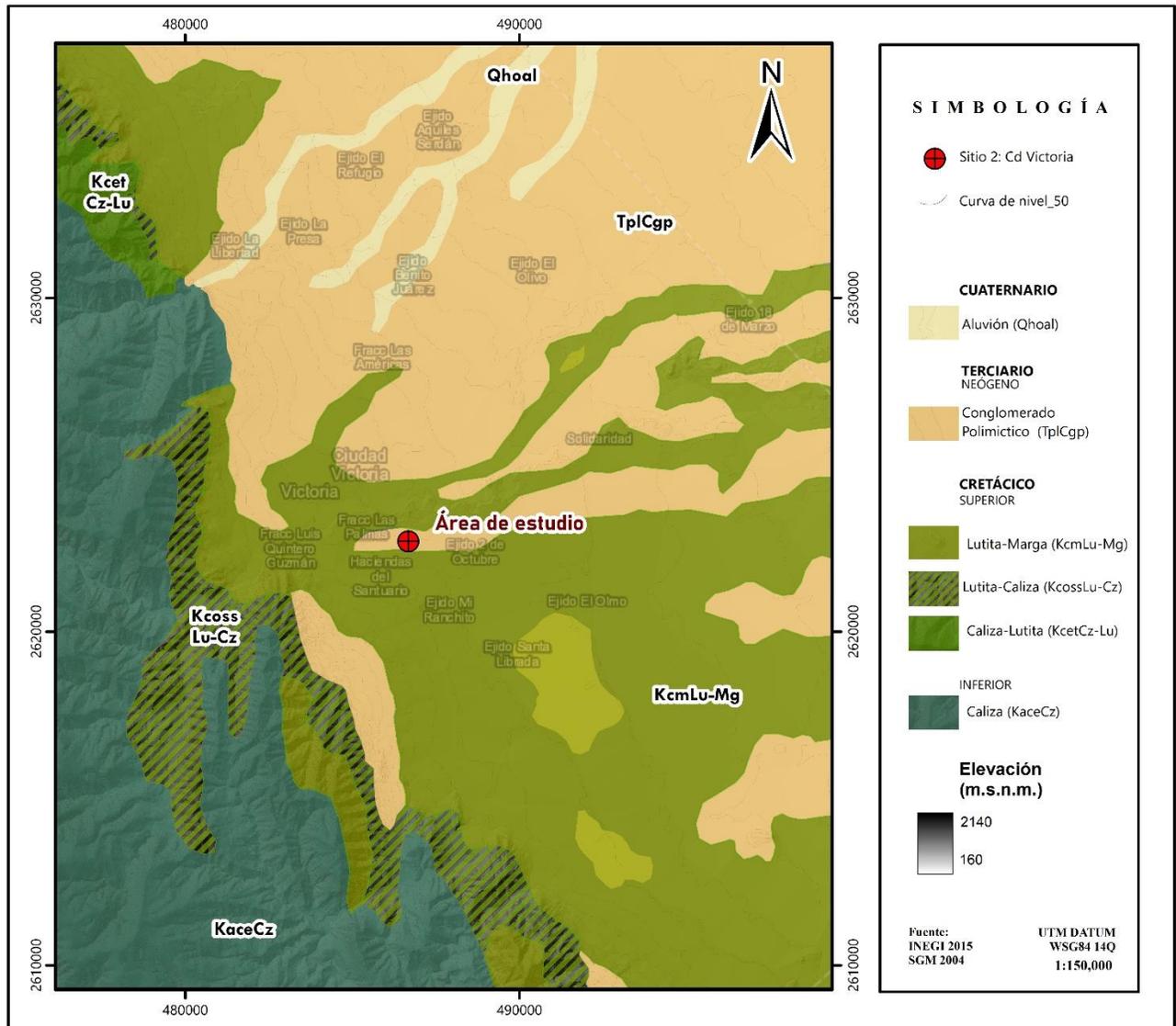


Figura 2.5 Pano geológico local correspondiente al sitio 2 (Cd. Victoria).

- . Sitio 3 "Cd. Guerrero"

De acuerdo con la carta geológica-minera de Chihuahua, con escala 1:250,00 (SGM,1997) la columna estratigráfica que conforma la porción centro-occidental del estado de Chihuahua, se encuentra constituida por un complejo metamórfico de gneises en la parte basal, cubierto discordantemente por una potente secuencia sedimentaria que abarca desde el Pérmico hasta el Cretácico (Figura 2.6).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

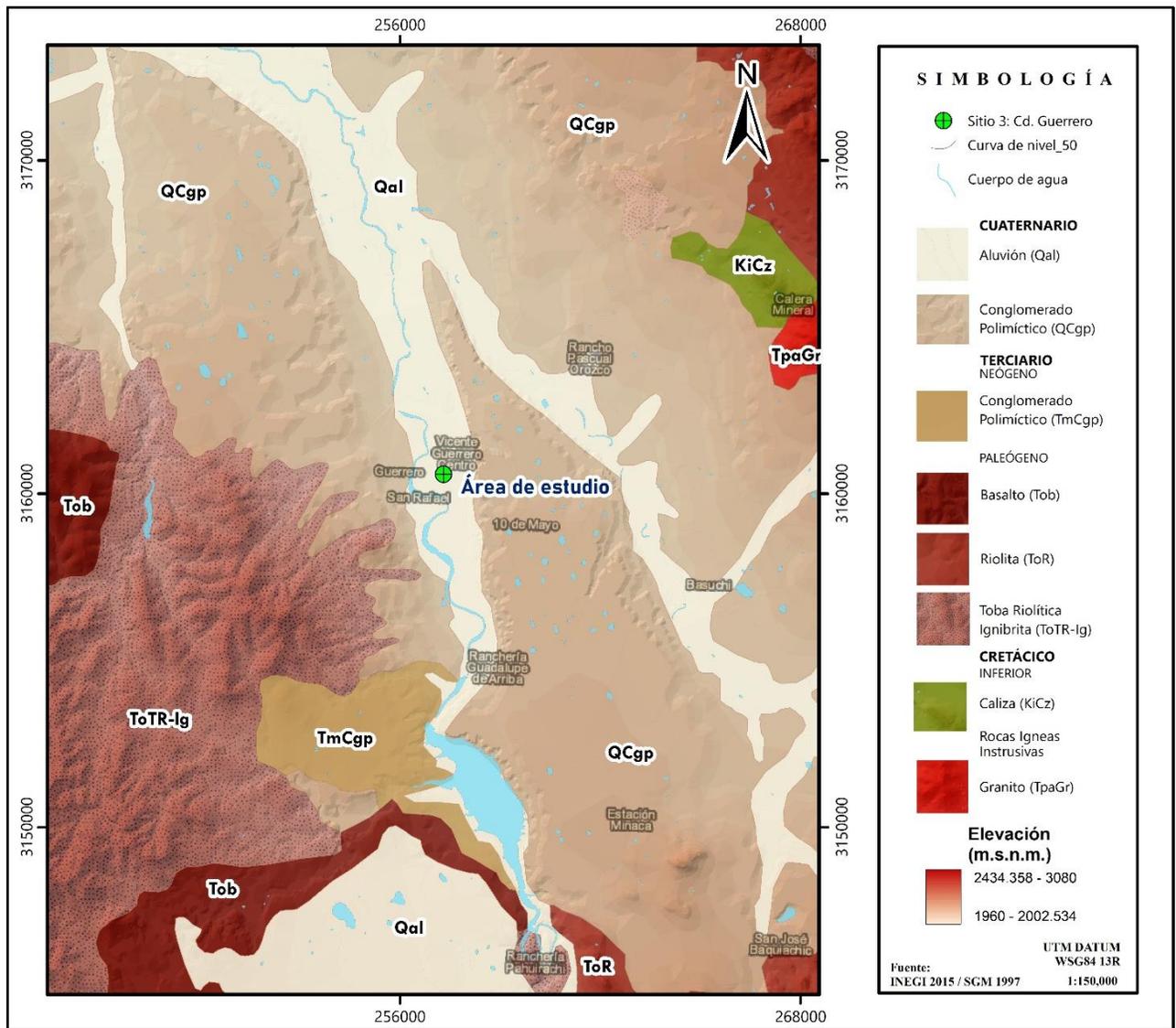


Figura 2.7 Contexto geológico del sitio 3 (Cd. Guerrero).

3. MARCO TEÓRICO

3.1 Generalidades

La prospección geofísica auxilia en la delimitación de cuerpos y/o estructuras geológicas mediante el contraste que existe entre alguna de sus propiedades físicas con las del medio en el que se encuentran. Existen metodologías fundamentadas en diversas propiedades físicas que permiten realizar una caracterización del subsuelo en función de la propiedad aplicada. Una de estas propiedades es la elasticidad.

La manera más común de definir un cuerpo elástico es cuando a la superficie externa de un cuerpo sólido se le aplican fuerzas que pretenden deformarlo, sin embargo, existen fuerzas internas dentro del mismo cuerpo que se resisten a cambiar de forma y tamaño. Cuando se dejan de aplicar estas fuerzas y el cuerpo retorna a su forma original, se dice que se trata de un cuerpo con elasticidad.

De acuerdo con Sheriff y Geldart, (1991) *“Un cuerpo perfectamente elástico es aquel que se recupera completamente después de ser deformado. Las rocas se pueden considerar perfectamente elásticas sin error apreciable, ya que las deformaciones son pequeñas”*.

Los terremotos generan perturbaciones en la Tierra que la someten a deformaciones, estas perturbaciones producen ondas mecánicas conocidas como ondas sísmicas y su propagación a través del planeta es físicamente posible debido a que es un cuerpo sólido que puede sufrir una deformación interna.

Los métodos sísmicos son técnicas de exploración geofísica que estudian la propagación de las ondas a través de la Tierra, de manera general cuando el planeta es perturbado por una onda sísmica se generan dos grupos principales de ondas: ondas de cuerpo y ondas superficiales. Las primeras se desplazan a través del interior de la Tierra y las segundas viajan sobre la parte externa de la Tierra. Las ondas de cuerpo a su vez se subdividen en Ondas P (Ondas compresionales) y Ondas S (Ondas de cizalla), por su modo de viajar a través de los materiales.

Ondas compresionales (Ondas P): son las que se propagan a mayor velocidad, viajan aproximadamente 1,7 veces más rápido que las Ondas S (Tarbuck *et al.*, 2005) y por consecuencia son siempre las primeras en registrarse, por lo que son conocidas también como ondas primarias y/o longitudinales, ya que se comprimen y expanden en el mismo plano que su dirección de movimiento (Figura 3.1, izquierda). Se propagan a través de los sólidos y de los líquidos.

Ondas de corte (Ondas S): Son conocidas así puesto que causan deformaciones por cizallamiento cuando viajan a través del material. También se les conoce como ondas secundarias, ya que son las segundas en registrarse y ondas transversales,

puesto que provocan un desplazamiento perpendicular respecto a su dirección de propagación (Figura 3.1, derecha). La componente vertical de la onda S suele denotarse como SV, mientras que la componente horizontal se denota como SH. Estas ondas viajan únicamente a través de sólidos debido a que los líquidos no pueden soportar los esfuerzos de cizalla. Además de la diferencia de velocidad con respecto a las ondas P, las ondas S tienen una amplitud ligeramente mayor que éstas.

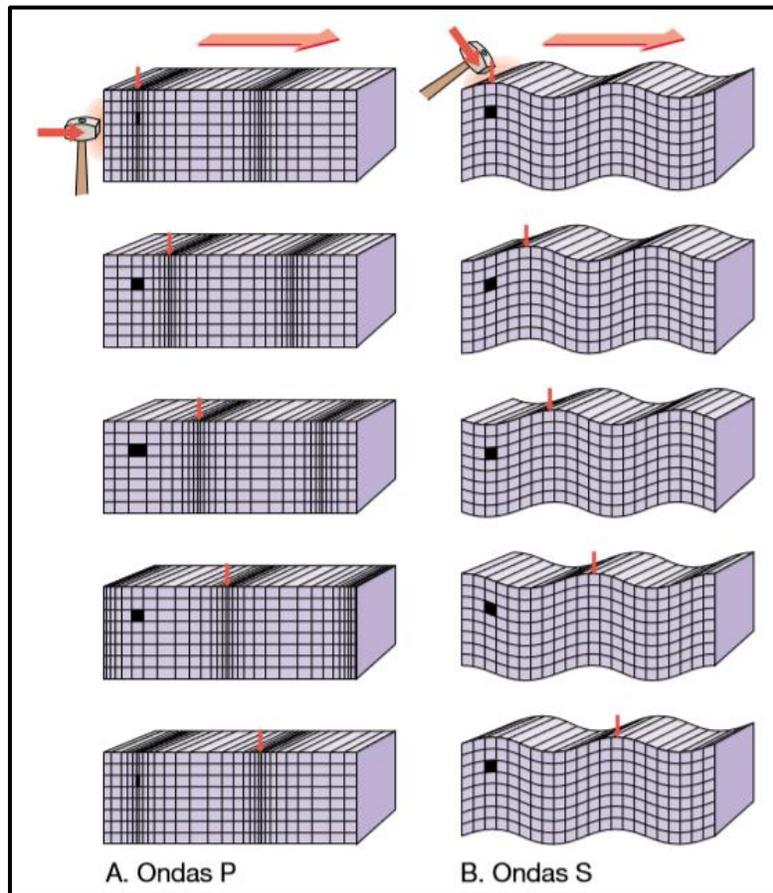


Figura 3.1 Transmisión de las ondas P y las ondas S a través de un sólido. A. El paso de las ondas P hace que el material experimente compresiones y expansiones alternadamente. B. El paso de las ondas S produce un cambio de forma sin modificar el volumen del material. Dado que los líquidos se comportan elásticamente cuando son comprimidos (recuperan su forma original cuando cesa el esfuerzo), transmitirán las ondas P. (Tomado de O. M. Phillips, *The Heart of the Earth*, San Francisco, Freeman, Cooper y Co., 1968).

Por otra parte, existen las ondas superficiales, las cuales arriban después que las ondas de cuerpo, y son resultado de la interacción de las ondas de cuerpo con las capas superficiales de la tierra (Krammer,1996). A pesar de que este tipo de ondas no tienden a adentrarse a capas profundas, ya que su amplitud decrece exponencialmente con la profundidad, son casi enteramente responsables del daño y de la destrucción que causan los terremotos,

debido a que su baja frecuencia provoca resonancia en los edificios. Al igual que las ondas de cuerpo, las ondas superficiales se dividen en dos tipos: Ondas Rayleigh y Ondas Love (Figura 3.2).

Ondas Rayleigh: Son producidas por la polarización radial de las ondas P y SV, y su interacción con la superficie terrestre (Shearer, 2009). Tienen un movimiento similar al de las ondas S, en donde la trayectoria que describen las partículas del medio en el que se propagan es elíptica, horizontal y vertical simultáneamente y ocurre en el plano de propagación de la onda, es decir, las partículas del material se mueven describiendo una elipse en dirección opuesta a la dirección de propagación de la energía, es decir en forma de elipse retrógrada.

Ondas Love: Este tipo de ondas resultan la interferencia constructiva de múltiples reflexiones de ondas SH en la superficie libre (Shearer, 2009), es decir representan a las ondas que quedan atrapadas dentro de la capa superficial. El movimiento de sus partículas es paralelo a la superficie, pero perpendicular a la dirección de propagación, como las ondas S. No tiene componente vertical, dado que son polarizadas horizontalmente, por lo tanto, no se registran en los sensores verticales.

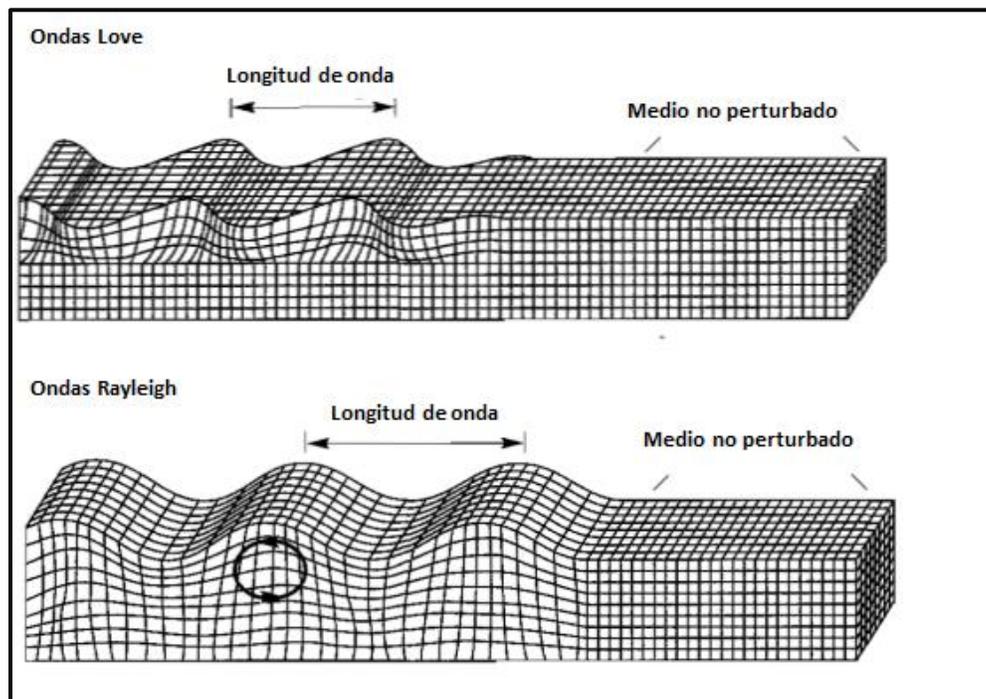


Figura 3.2 El desplazamiento asociado con las Ondas Love (arriba) es perpendicular a la dirección de propagación y paralelo a la superficie de la Tierra; el desplazamiento asociado con las ondas Rayleigh (abajo) se encuentra en el plano paralelo a la dirección de propagación, y perpendicular a la superficie de la Tierra (Kramer, 1996).

Tanto las ondas de cuerpo como las superficiales contienen valiosa información para la determinación de diferentes parámetros que sirven de apoyo a proyectos de ingeniería civil, por lo que existen diversas técnicas enfocadas a la detección de cada onda en particular, en el siguiente apartado se mencionan tres técnicas: El método de sismica de refracción que permite obtener la velocidad de onda compresional (V_p); la técnica de MASW que permite obtener la velocidad de onda de corte (V_s) y finalmente, la técnica de downhole permite obtener velocidades compresionales y de cizalla simultáneamente.

3.2. Métodos Sísmicos aplicados

3.2.1 Sísmica de refracción

Las ondas sísmicas varían su velocidad de propagación en respuesta a los cambios en las propiedades físicas de los materiales y la profundidad en la que se encuentren, siendo que, generalmente la velocidad aumenta respecto con la profundidad. La trayectoria que realizan las ondas sísmicas a través de las distintas capas del subsuelo consiste en un desplazamiento sobre la horizontal para posteriormente girar hacia arriba y retornar a la superficie.

El método de refracción consiste en medir los tiempos de viaje de las ondas de compresión generadas por una fuente de energía artificial (Figura 3.3), este método supone que la trayectoria que realizan las ondas elásticas al recorrer las diferentes capas del subsuelo obedece las mismas reglas que gobiernan la propagación de los rayos de luz a través de medios transparentes. El principio de Huygens establece que cada punto sobre un frente de onda se puede contemplar como una nueva fuente de ondas, este principio ayuda a explicar cómo se transmiten las perturbaciones en la Tierra (Sheriff *et al.*,1991)

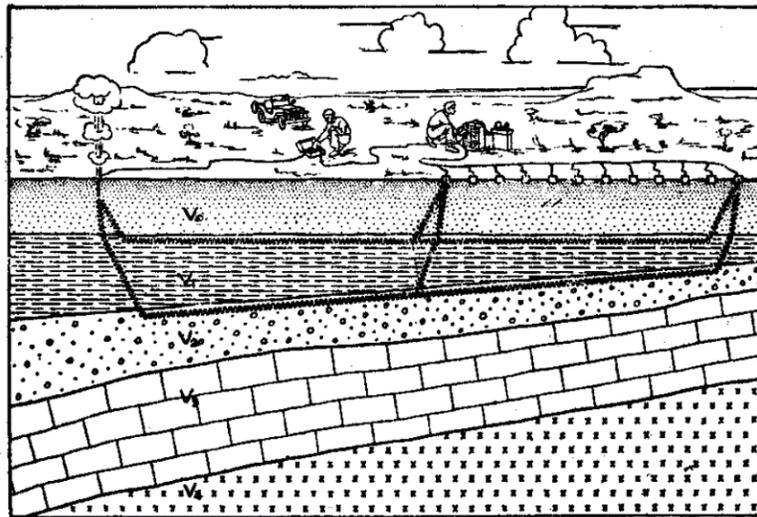


Figura 3.3 Representación esquemática del Método de refracción (Bello, 1961).

La refracción que sufre un rayo de luz o un impulso sísmico al pasar de un material a otro depende de la relación de las velocidades de transmisión de los dos materiales. La ley fundamental que describe la refracción de los rayos de la luz es la ley de Snell.

De acuerdo con la ley de Snell, el fenómeno de refracción sucede cuando un haz de luz incide sobre una superficie límite entre dos medios distintos, en donde una parte de la energía luminosa se ve reflejada, y otra parte entra en el segundo medio, el cambio en dirección del rayo transmitido se denomina refracción (Tipler, 2010).

Según la ley de Snell, si la onda viaja desde un medio de baja velocidad a un medio de alta velocidad, la onda se refracta alejándose de la normal. Por el contrario, se refracta hacia la normal si la onda pasa de un medio de velocidad alta a un medio de baja velocidad (Figura 3.4 izq.). Cuando el ángulo de incidencia es igual al ángulo crítico en la interfaz, la onda refractada se desplaza a lo largo de la interfaz entre los dos materiales, a esta interfaz se le conoce como refractor.

La refracción crítica es la condición en la cual el ángulo refractado es de 90 grados. Después de ser refractada críticamente, la señal viaja en el medio inferior a la velocidad del medio inferior, pero esencialmente a lo largo del contacto entre los dos medios. La ley de Snell indica que la refracción crítica puede ocurrir solo en un límite que muestra un aumento en la velocidad con la profundidad a través de él (Figura 3.4, derecha).

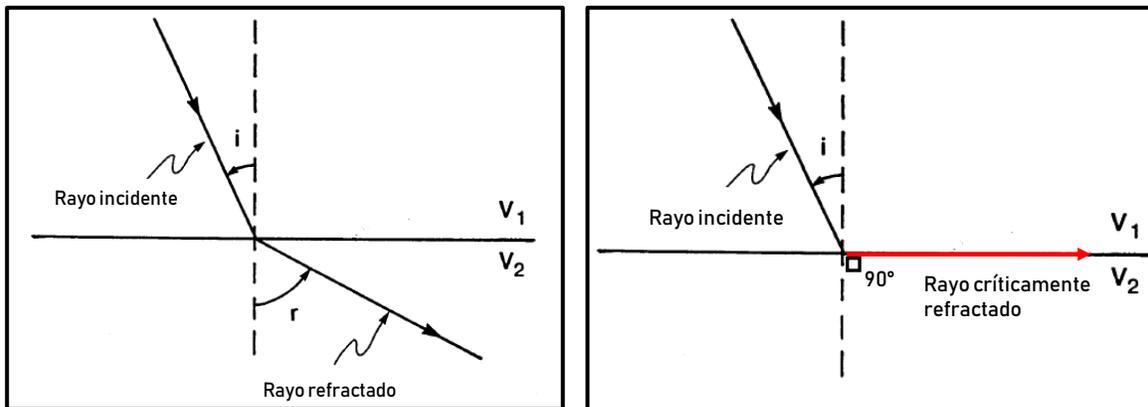


Figura. 3.4 Diagrama que ilustra la trayectoria que siguen los rayos en términos de la Ley de Snell al pasar por dos medios con diferente velocidad (V_1 y V_2), “ i ” denota el ángulo de incidencia y “ r ” el ángulo del rayo refractado, ambos respecto a la normal. (modificado de Lankston “High resolution refraction data acquisition and interpretation”, 1990).

A menudo la interpretación de refracción se basa únicamente en los primeros arribos, sobre todo porque esto permite la determinación precisa de los tiempos de viaje (Sheriff, *et al.*, 1991). Esta suposición se apoya en el Principio de Fermat, en el que se indica que la trayectoria en la que los rayos de luz van de un punto a otro consiste en un tiempo de recorrido mínimo.

La aplicación del método en campo consiste en levantamientos de “tendidos de sísmica de refracción” los cuales requieren para su realización de una fuente sísmica, un cable de disparo, geófonos, cable de geófonos y un sismógrafo, donde los geófonos y el sismógrafo deben estar alineados (ASTM D5777-00), tal como lo esquematiza la Figura 3.5

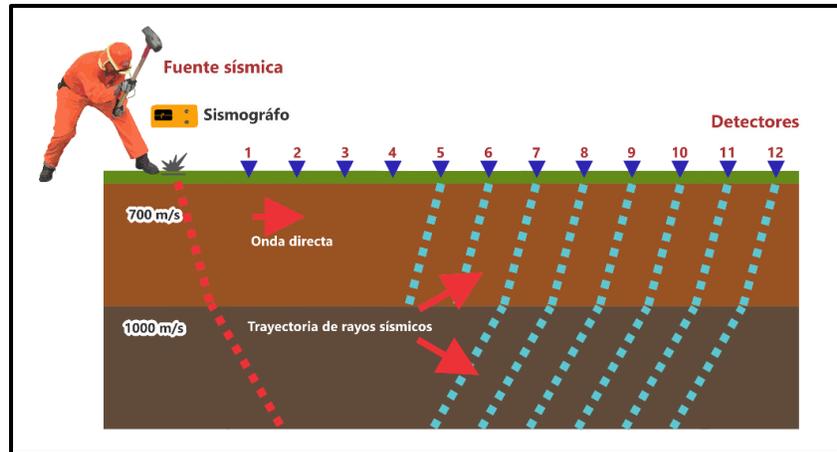


Figura 3.5 Esquemática de un tendido de sismica de refracción, se observan doce geófonos alineados con la fuente sísmica (en este caso, impactos al suelo con un marro) y con el sismógrafo. Se muestra la refracción de las ondas y el retorno de éstas hacia la superficie.

La fuente sísmica puede ser un marro, un dispositivo mecánico que golpee el suelo o una fuente de impacto como explosivos. La elección de la fuente a utilizar estará en función de los alcances del estudio, por ejemplo, se empleará el uso de explosivos cuando se busquen refractores muy profundos, sin embargo, en la mayoría de los proyectos civiles que es en donde mayormente se emplean estos estudios, la profundidad de investigación requerida no es mayor a los 30 m.

En lo que respecta a los geófonos, son enterrados en el suelo, procurando un firme contacto, para posteriormente conectarlos al cable de los geófonos, que finalmente se conecta a un sismógrafo. Cuando los geófonos detectan el arribo de las ondas generadas por el impacto del marro con el suelo, éstos convierten la energía mecánica en energía eléctrica, la cual recorre el cable sísmico para finalmente ser almacenada, amplificada y digitalizada en el sismógrafo.

El tiempo que tarda la onda sísmica en viajar desde la fuente de energía sísmica hasta los geófonos se le conoce como tiempo de viaje y se determina a partir de cada forma de onda, y su unidad de medida está en milisegundos.

La velocidad en la que se transmiten las ondas sísmicas es un buen indicador de las características geotécnicas de los materiales ya que, a medida que los materiales se degradan y aumenta el grado de alteración, la velocidad disminuye, por lo que el grado de alteración de las rocas condiciona en definitiva la velocidad de propagación de las ondas sísmicas (Vallejo, 2002). A continuación, se muestran los intervalos de velocidades en metros sobre segundo (m/s) para distintos materiales y rocas del subsuelo (Tabla 3.1).

Tabla 3.1 Valores típicos de velocidad para distintos materiales del subsuelo (Vallejo, 2002).

Velocidad de ondas P en km/s							
	0	1	2	3	4	5	6
Aire	0	0.3					
Agua		1.5					
Hielo			2.5				
Suelo				0.5			
Arenas				1.5			
Arcillas				2.0			
Esquistos				3.0			
Areniscas				3.5			
Calizas				4.0			
Dolomias				4.5			
Sal				5.0			
Yeso				3.5			
Anhidrita				4.5			
Granito				5.5			
Gneiss				6.0			
Basalto				6.5			

Los tiempos de viaje son graficados contra la distancia, idealizando rectas que son denominadas “dromocronas” y representan los primeros arribos contra la distancia (Figura 3.6), donde cada dromocrona representa un refractor, no obstante, lo normal es que los refractores no sean planos y por lo tanto los tiempos de llegada no representen una línea recta.

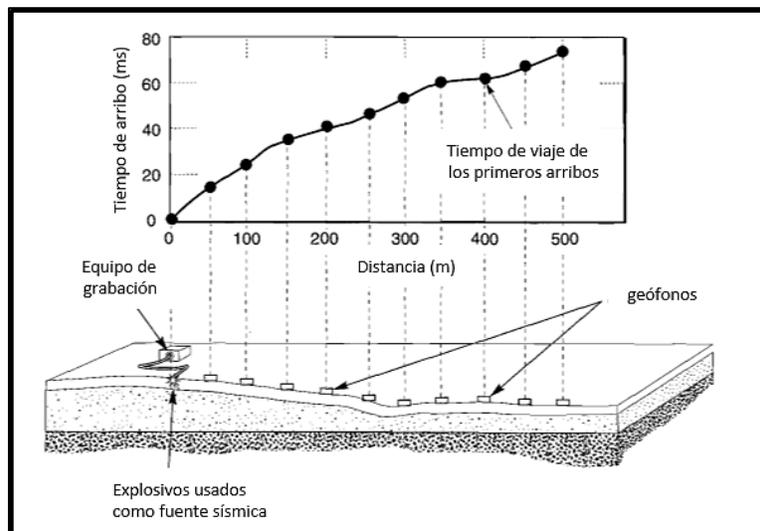


Figura 3.6 Ejemplo de tiempos de llegada de las ondas P a los distintos geófonos (Redpath, 1973).

Con el recíproco de las pendientes de las rectas es posible determinar la velocidad aparente, mientras que a partir de ésta y de los tiempos de intercepción se calcula la profundidad de cada refractor, así como se ilustra en la Figura 3.7.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

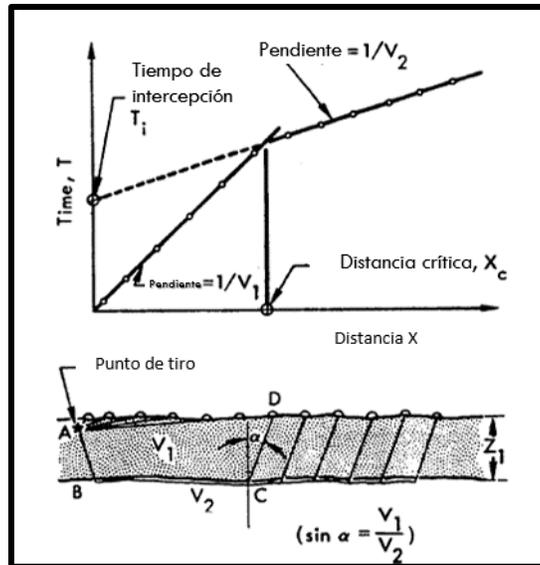


Figura 3.7 Ejemplo de dos capas refractoras y su correspondiente dromocrona (Redpath, 1973)

Una vez calculados las velocidades y espesores de los diferentes refractores se realiza un modelo representativo del sitio explorado, en donde se representan los diferentes refractores y sus velocidades de propagación, un ejemplo de dicho modelo se observa en la Figura 3.8. De manera general un modelo geosísmico presenta incrementos en su velocidad conforme se gana profundidad, sin embargo, existen excepciones donde se dan alternancias de variaciones de compacidad y velocidad de propagación de ondas.

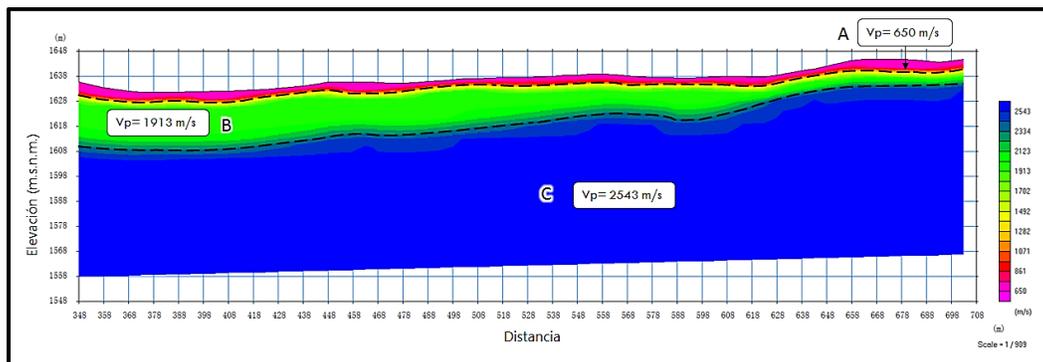


Figura. 3.8 Esquemización de un modelo geosísmico.

3.2.2 MASW

El método de Multichannel Analysis of Surface Waves (MASW), utiliza la propiedad de dispersión de las ondas superficiales con el fin de obtener un perfil de velocidad de onda de corte (V_s) en 1D y/o 2D.

Esta técnica consiste en el registro de frecuencias en el rango de 3-30 Hz obtenidas a través de un sistema multicanal (de 12 o más canales), el cual permite la grabación de ondas superficiales generadas por una fuente activa (Park C, *et. al.* 2007).

En el caso de la técnica de MASW activa (utilizada en este proyecto) las ondas superficiales son generadas a través de impactos al suelo, tal como sucede en la refracción sísmica, en donde más de dos tercios de la energía sísmica total generada corresponde a las ondas superficiales (Ondas Rayleigh) (Miller R., *et al.* 1999).

Teóricamente la velocidad de propagación (velocidad de fase) de las ondas de Rayleigh será la misma siempre en un semiespacio homogéneo, mientras que en un medio heterogéneo (por ejemplo, estratificado horizontalmente) la velocidad de fase es dependiente de la frecuencia o longitud de onda (Ver Figuras 3.9 y 3.10). A esta propiedad se le conoce como dispersión.

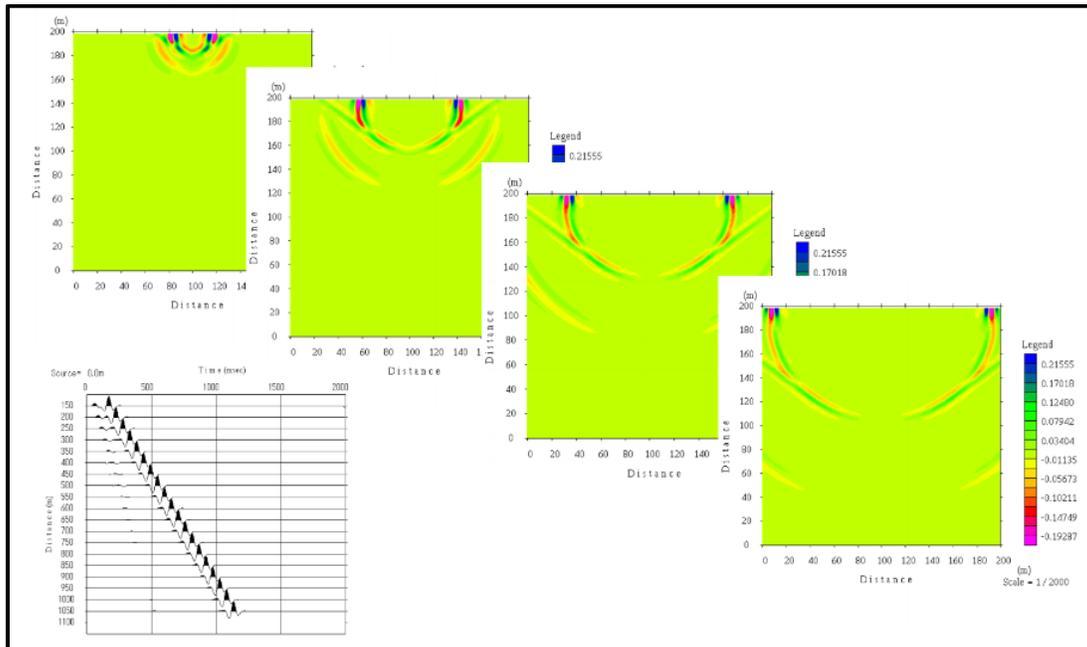


Figura 3.9 Propagación de las ondas Rayleigh en un medio semi homogéneo (Hayashi, 2003).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

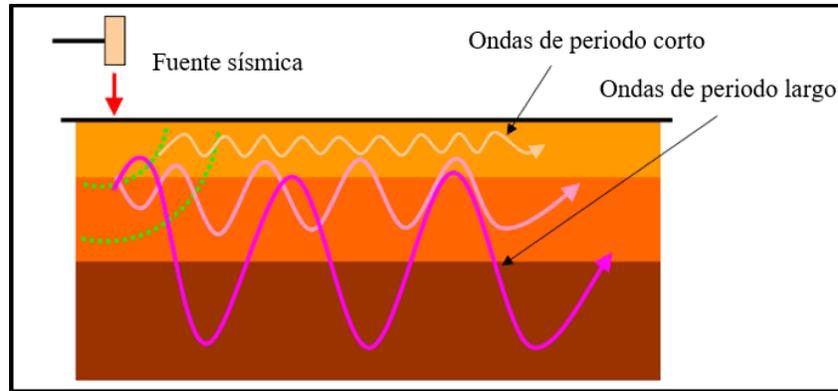


Figura 3.10 Propagación de las ondas Rayleigh en un medio heterogéneo. Se puede observar que las velocidades de fase difieren en frecuencia en ondas de periodo corto y de largo periodo. (Hayashi, 2003).

Con un sistema multicanal, las propiedades de dispersión se pueden obtener mediante una transformación del campo de onda que convierte directamente el registro multicanal en un gráfico en el que se puede apreciar un patrón de dispersión específico (Park C., et. al. 2007). Al gráfico que muestra la variación de la velocidad de fase con la frecuencia se conoce como curva de dispersión o curva de velocidad de fase (Figura 3.11)

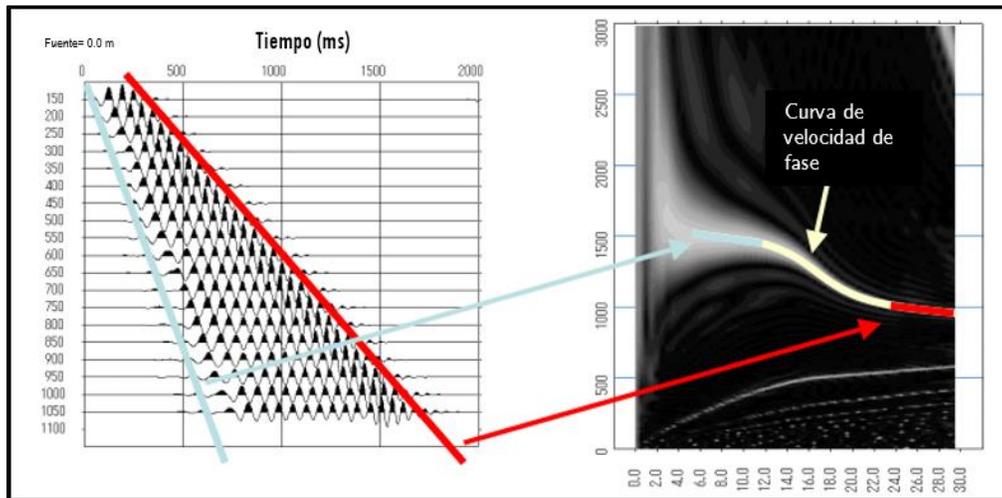


Figura 3.11 Gráfico de frecuencia contra velocidad que representa la velocidad de fase (Hayashi, 2003).

La curva de dispersión suele presentarse como una curva suave o recta, cuya tendencia no presenta cambios drásticos ya que en teoría representa un promedio de las velocidades del modelo, por lo que su distribución se centrará en el centro del tendido sísmico.

Otra característica que relaciona la curva de dispersión y el tendido sísmico es la longitud del segundo, puesto que el rango de frecuencias en el que se presenta la curva de dispersión está directamente relacionado con el espaciamiento mínimo y máximo de los receptores del tendido (Ver figura 3.12).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

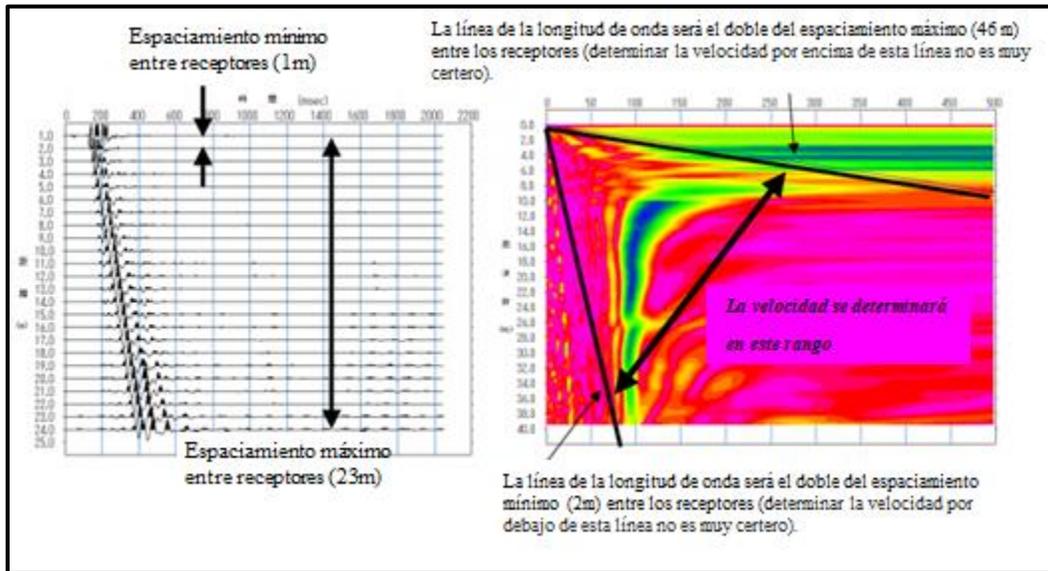


Figura 3.12 Gráfico de frecuencia contra velocidad que representa la velocidad de fase (Hayashi, 2003).

Posteriormente, y con el fin de obtener las velocidades de onda de corte, la curva de dispersión se somete a un proceso de inversión por medio de mínimos cuadrados, donde el objetivo del proceso de inversión es generar un modelo de suelo estratificado horizontalmente y de propiedades elásticas compatibles con las observaciones de terreno (Figura 3.13). En éste, como en diversos métodos geofísicos, el proceso de inversión no contiene una solución, es decir, existen muchos modelos estratigráficos que pueden explicar el comportamiento observado (Humire, *et al* 2015).

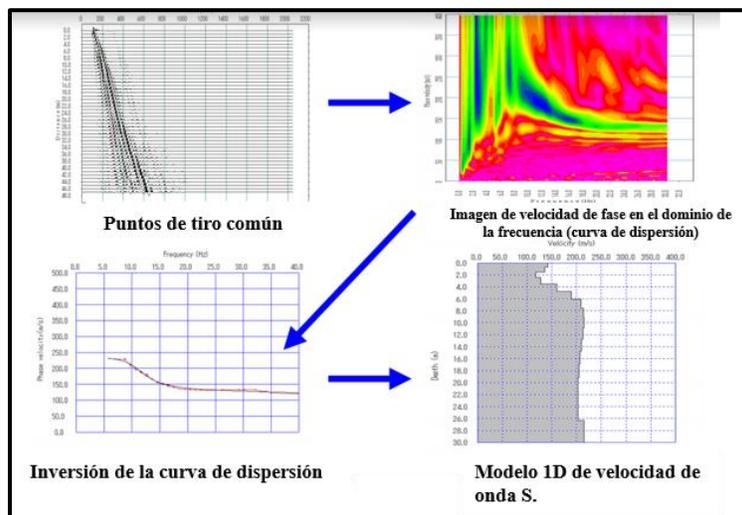


Figura 3.13 Obtención de un modelo unidimensional de onda de corte a partir de la inversión de la curva de dispersión extraída (Hayashi, 2003).

3.2.3 Downhole

Esta técnica se basa en los principios de la sismica de refracción, por lo que se asume que el medio a caracterizar es lateralmente homogéneo (ASTM D7400-17) y las trayectorias de onda se comportan según la ley de refracción de Snell.

A diferencia de un tendido de sismica de refracción, en la técnica de downhole existe únicamente un sismodetector comúnmente conocido como geófono de pozo, el cual es introducido a una perforación realizada *ex profeso*. Este receptor tiene como objetivo detectar el arribo de las ondas efectuadas desde superficie, hasta los diferentes horizontes del subsuelo existentes a lo largo de la columna del pozo, generando así sismogramas a cotas determinadas, tal como lo esquematiza la Figura 3.14.

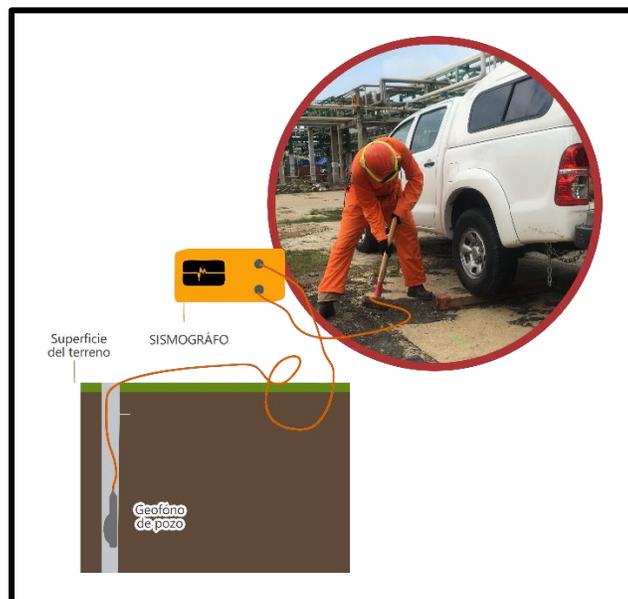


Figura 3.14. Ilustración esquemática del ensayo sísmico de Downhole (Adaptada de Crice, 2002).

Una de las principales diferencias que presenta la sismica de pozo en comparación con la sismica de refracción convencional, es que con esta segunda existe la dificultad para determinar el arribo de la onda S, caso contrario con las técnicas sísmicas realizadas “in situ”, tal como lo son el downhole y el crosshole, puesto que dada la instrumentación y metodología que estas técnicas conllevan, es posible obtener con mayor facilidad la identificación de las ondas transversales.

En este trabajo nos enfocaremos en la técnica de downhole, por lo que a continuación se describirá la metodología de la técnica.

Pozo para Downhole

La norma pertinente sugiere que el pozo destinado a la realización del ensaye sea entubado con tubería de PVC hidráulico de 3" de diámetro, se encuentre libre de obstáculos y que el espacio anular entre la perforación y el tubo sea cementado con una mezcla de bentonita-cemento, para asegurar que el tubo haga buen contacto con el medio circundante. La profundidad del pozo dependerá del objetivo del proyecto, no obstante, la mayoría de los pozos para la prueba tienen por lo menos 30 m de longitud, aunque también es común que la perforación se detenga a la profundidad en la que se encuentra la roca o cuando los números de golpes de la prueba SPT superen los 50 golpes sobre el avance.

En lo que respecta a las especificaciones del geófono de pozo utilizado en este tipo de pruebas, se considera que debe tener al menos tres componentes, una vertical y dos horizontales, dispuestas ortogonalmente formando una matriz triaxial, es decir, montadas en ángulos rectos y selladas en un paquete cilíndrico (Ver figura 3.15). Esta configuración permite identificar la llegada tanto de las ondas compresionales (por medio de la componente vertical) como de las de cizalla (por medio de las componentes horizontales).

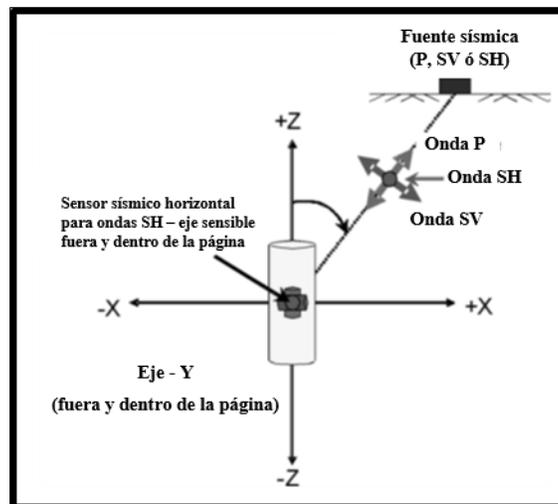


Figura 3.15 Direcciones de movimiento de partículas de las ondas del cuerpo de la fuente que impactan en un paquete de sensores triaxiales (Modificado de la norma ASTM Standard D 7400 08).

Otro aspecto muy importante a considerar es la fijación del geófono a la pared del pozo, ya que es recomendable que se mantenga completamente inmóvil durante la toma de datos, pues de otra forma, el geófono se estaría moviendo durante la toma de datos, provocando señales de mala calidad. Usualmente, los geófonos se sujetan con vejigas inflables, pistones, brazos mecánicos, etc., anclándose y desanclándose en los puntos de interés, estos intervalos generalmente son de un metro, a manera de tener una buena resolución y poder identificar pequeñas capas que no son posibles detectar con la sísmica de refracción, sin embargo, se pueden usar otros intervalos de acuerdo con las condiciones del sitio y el propósito del estudio.

Para obtener mejores resultados la norma sugiere realizar la prueba en dos etapas: una donde se generen las ondas transversales (Ondas S) y posteriormente en una segunda ejecución, las ondas compresionales (Ondas P).

La generación de la Onda S requiere de un elemento longitudinal (por ejemplo un polín de madera) que puede ser sujetado por el eje de las ruedas de un vehículo, o bien de una manera que permita que la viga no se mueva al realizar los impactos laterales al polín; se recomienda además, que la viga esté protegida con capuchones de metal en los extremos para evitar que se deteriore al realizar los golpes, puesto que para producir ondas polarizadas se realizan golpes de lado izquierdo y de lado derecho del polín (Ver figura 3.16, izquierda). Para la generación de ondas P se realizan golpes verticalmente a una placa de acero al carbón, de la misma forma en que se usa en la ejecución de un Tendido de Refracción Sísmica (Ver figura 3.16, derecha).

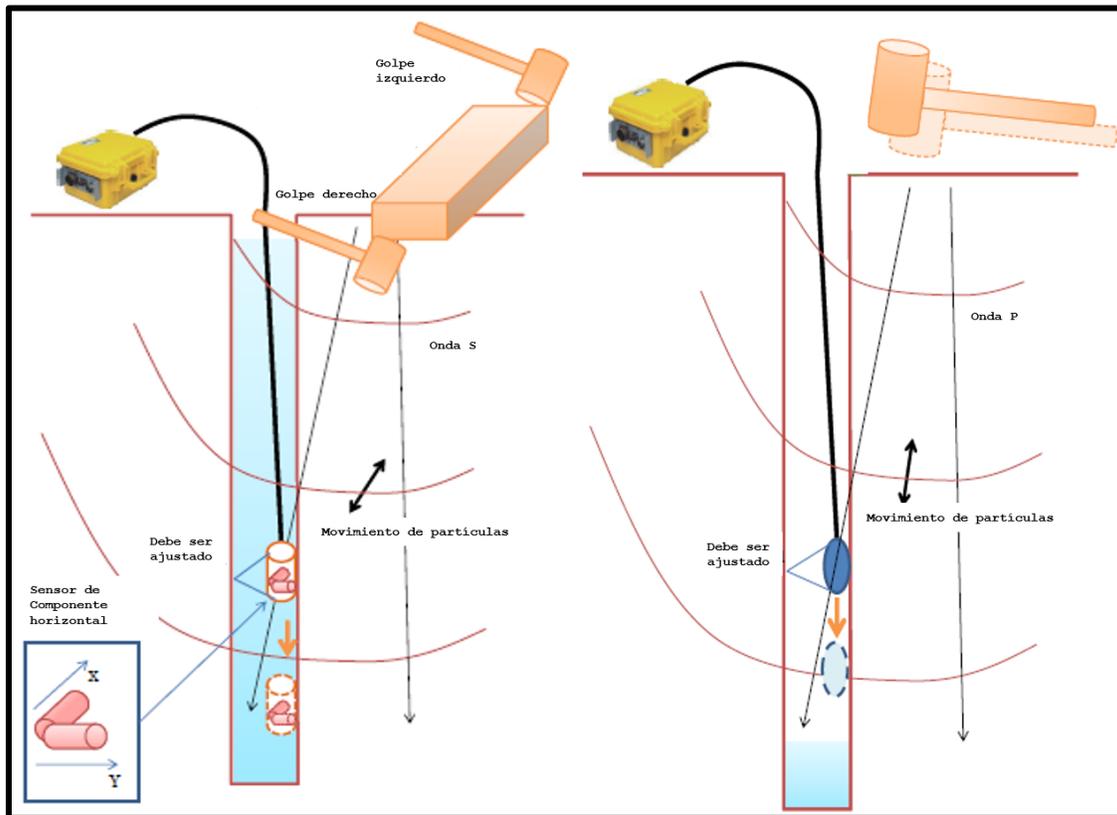


Figura 3.16. Esquemización de los impactos laterales para la generación de ondas S (Izquierda) y de impactos verticales para la generación de ondas P (derecha). (Modificada de SeisImager/DH Manual Volumen 1.2, 2013)

Al realizar el levantamiento en campo el equipo se debe disponer de manera adecuada, colocando el polín preferentemente con dirección al Norte, a una distancia de 1 a 3 m desde el centro de la viga al pozo (ASTM- D7400-17). La placa donde se realizarán los golpes

verticales puede colocarse en el extremo opuesto de la ubicación del polín, equidistantemente a tres metros del pozo, tal como lo ilustra la figura 3.17.

La norma sugiere que el geófono cuente con un mecanismo de orientación que permita que se oriente al norte de modo que el eje de un transductor horizontal sea paralelo al eje largo del polín, y se facilite así la identificación de la onda S.

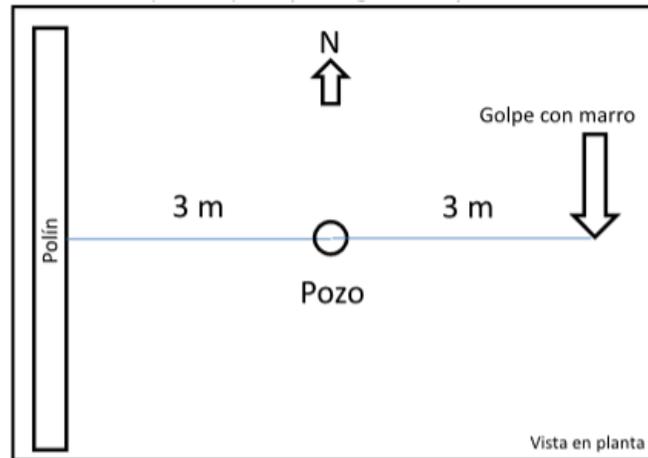


Figura 3.17. Configuración recomendada para la prueba de downhole.

Con el fin de obtener datos de calidad y de mejorar la relación señal-ruido, es recomendable que se apilen las trazas registradas por el sismógrafo, ejecutando de 3 a 5 golpes o impactos, o bien los que sean necesarios, a fin de obtener un registro consistente y reproducible, tomando en cuenta que un mayor número de golpes extenderá el tiempo de duración del ensaye. Una vez que se hayan registrado los datos, es importante realizar una inspección visual de los sismogramas obtenidos, tanto de la onda P, como los de la onda S, para verificar principalmente el efecto de polarización de la onda y la calidad de los datos, buscando también la mayor relación señal/ruido que se pueda obtener.

Procesamiento

Los tiempos de llegada (o tiempos de tránsito) se trazan en función de sus respectivas profundidades (Figura 3.18). La pendiente de la curva de tiempo de viaje representa la velocidad de propagación de la onda en esa cota (Kramer, 1996).

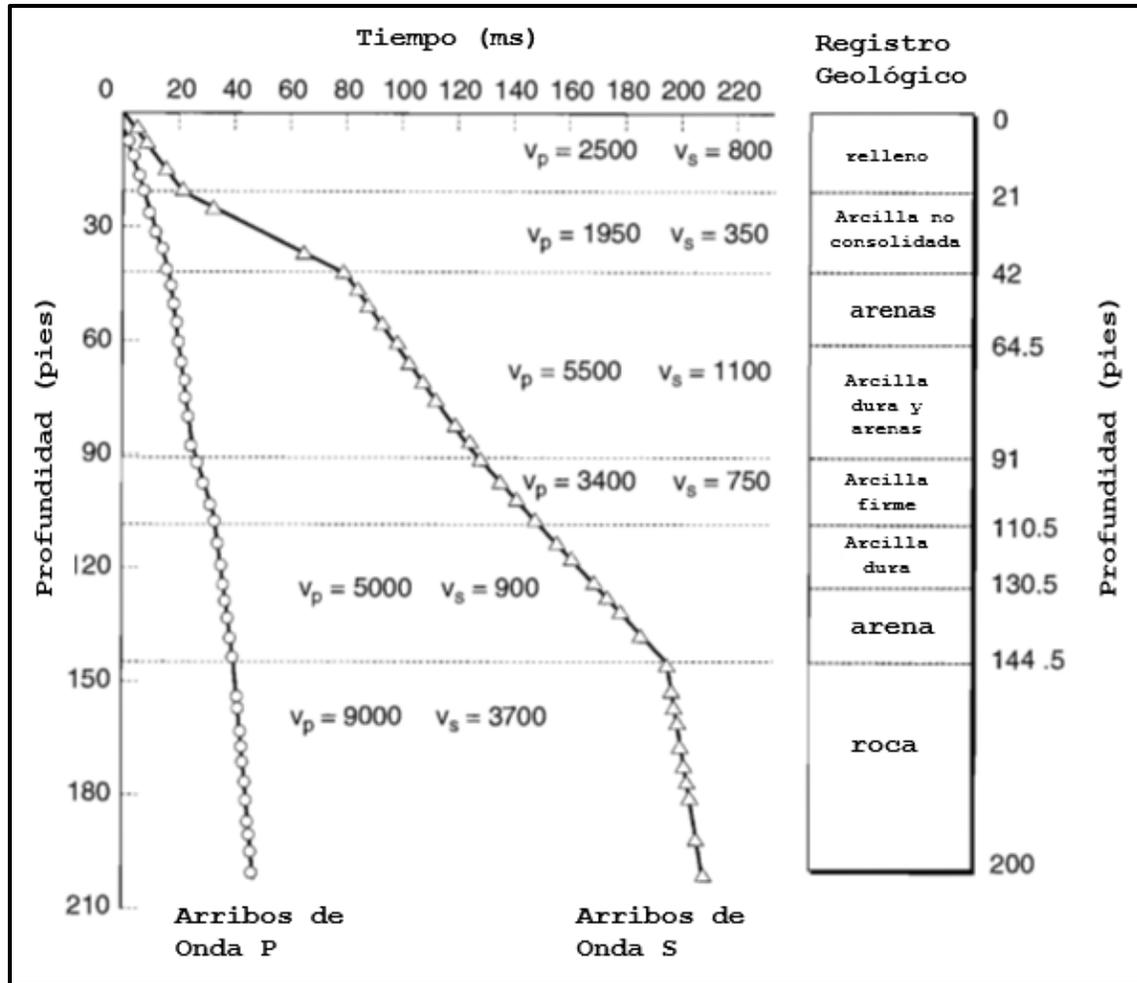


Figura 3.18. Dromocrónicas obtenidas de una prueba realizada en San Francisco (Schwarz & Musser, 1972).

Las velocidades de la onda P y la onda S están directamente relacionadas con las constantes geotécnicas elásticas de la relación de Poisson, el módulo de corte, el módulo de volumen y el módulo de Young. Los perfiles de velocidad de onda P y onda S son esenciales en los diseños de cimientos geotécnicos. Otro uso importante de las velocidades de onda de corte estimadas en el diseño geotécnico es en la evaluación de la licuefacción de los suelos.

3.3 Pruebas de Penetración Standard

Los sondeos geotécnicos se caracterizan por su pequeño diámetro y por la ligereza, versatilidad y facilidad de desplazamiento de las máquinas. Los procedimientos de perforación dependen de la naturaleza del terreno, del tipo de muestreo y testificación que se vaya a realizar (Vallejo L., 2002). Los más usuales son los sondeos a rotación, los sondeos helicoidales y los sondeos a percusión. En este trabajo nos enfocaremos en el sondeo de percusión ejecutado con la prueba de penetración estándar (SPT, por sus siglas de inglés: Standard Penetration Test).

Esta prueba fue desarrollada por la “Raymond Concrete Piles Inc.”; su utilidad se hizo común debido a las investigaciones y correlaciones realizadas por el Dr. Karl Von Terzaghi, entre otros, luego de realizar una serie de estudios a una muestra inalterada de suelo, realizando innumerables ensayos en arenas, limos y arcillas, después de los cuales fijó las especificaciones que rigen dicha prueba (Rogers, 2004). El método ganó popularidad, ya que es posible obtener información valiosa del subsuelo, y datos que permiten a su vez realizar correlaciones para determinar otros parámetros del suelo.

El ensayo de penetración estándar (SPT) consiste en el hincado de un dispositivo para obtener muestras (muestreador de media caña o tubo partido), denominado penetrómetro estándar (Ver figura 3.19), con el cual es posible obtener muestras alteradas de suelo para poder realizar una inspección visual y al tacto, sin embargo, con toda la ventaja que el muestreo sugiere, éste no es el objetivo principal de la prueba, más bien es el de proporcionar la resistencia a la penetración del terreno, es decir, la resistencia del material; éste y otros parámetros resultantes, permiten estimar el comportamiento mecánico del subsuelo bajo la aplicación de cargas de una superestructura.

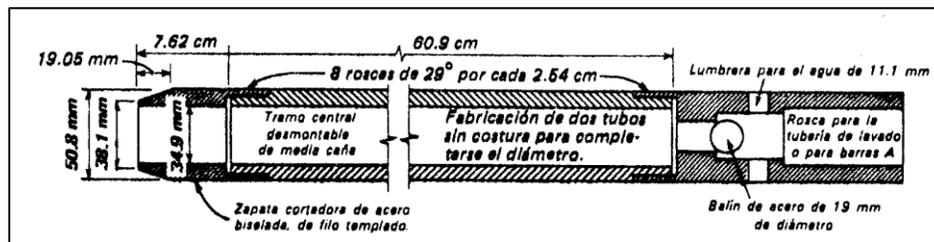


Figura 3.19. Dimensiones estándar para el penetrómetro, de acuerdo con la norma ASTM D1586-M18. Modificado por González G., 1999.

El ensayo consiste en hincar el muestreador 45 cm en el fondo de una perforación, mediante un martinete de 63.5 kg que se deja caer libremente de una altura constante de 76 cm y que golpea a una masa endurecida acoplada a unos de los tubos de perforación (NM D1586-84). El sondeo avanzará gradualmente para permitir el muestreo continuo o mixto, de acuerdo con lo definido por el geotecnista responsable. La esquematización de la prueba, (utilizando un martinete automático), se puede apreciar en la figura 3.20.

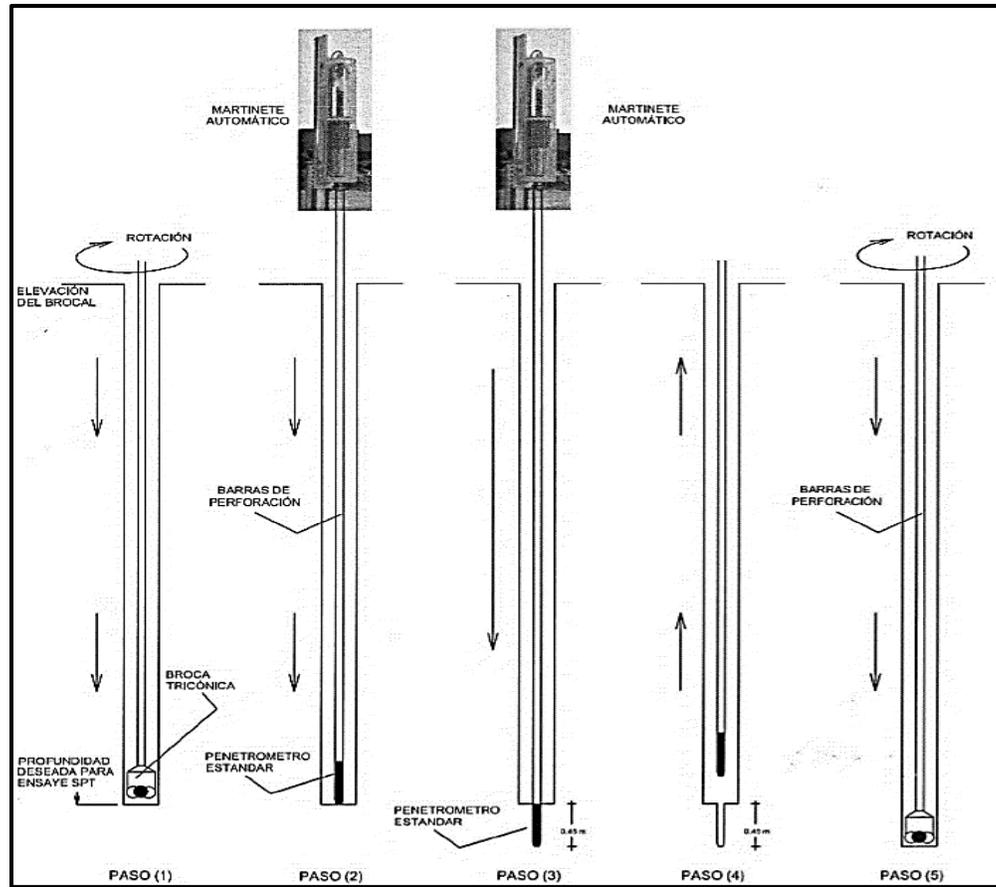


Figura 3.20. Secuencia gráfica para la realización de la prueba de penetración estándar. Tomada del Procedimiento CFE 10100-78 (2013)

De acuerdo con la norma establecida, se cuenta el número de golpes (N) necesarios para avanzar los 30 cm centrales del tubo muestreador (es decir, los intervalos de 0.15 m a 0.45 m) debido a que no se consideran los primeros y los últimos 15 cm del tubo por las alteraciones que llega a tener la muestra. Al valor de N se le conoce como la resistencia a la penetración del terreno. Los posibles resultados de esta prueba pueden presentarse en dos formas:

- NSPT: Un número entero adimensional igual a la cantidad de golpes necesarios para que el muestreador penetre en el terreno los últimos 30 cm.
- Rechazo: donde N es mayor de 50 golpes/ 15 cm, más de 100 golpes/pie o 10 golpes sin ningún avance.

Es importante mencionar que, aunque la prueba se denomina “estándar”, el ensayo tiene muchas variantes y fuentes de diferencia, siendo la energía que llega al penetrómetro la principal. No obstante, para casi todas estas variantes hay factores de corrección, tales como son la corrección por energía, corrección por confinamiento, entre otros (González, 1999).

Al finalizar la exploración requerida, se extrae el muestreador del fondo e inmediatamente la muestra se debe clasificar de acuerdo con el criterio de campo del SUCS (Sistema Unificado de Clasificación de Suelos, ASTM D2487-17) y posteriormente ser colocado en una bolsa de polietileno de 3 " (CFE 101100-78), con el fin de que mantengan su humedad. El control de las muestras obtenidas se lleva controladamente en el registro de campo correspondiente.

Posteriormente al sellado de las muestras, éstas se deben de colocar en cajas de madera o cartón para su traslado y disposición al laboratorio

Los perfiles estratigráficos obtenidas de las pruebas de SPT realizadas en los puntos de interés, se pueden consultar en el anexo A del presente trabajo.

4. METODOLOGÍA

4.1 Metodología MASW

4.1.1 Adquisición de datos

Para la adquisición de los datos sísmicos, se utilizó un sismógrafo marca *Geometrics*, Modelo Geode de 24 canales, equipado con Laptop y software; incluye disco de grabación, selector de filtros, amplitudes y grado de sensibilidad para cada traza (Ver Fotografía 4.1), geófonos de componente vertical de 4.5 Hz de frecuencia natural y como fuente de energía se utilizó un marro de 16 lb; así como los accesorios concernientes al equipo de trabajo.



Fotografía 4.1 Equipo de exploración geosísmica utilizada en los puntos de medición de MASW.

El levantamiento de los datos en campo consistió en la ejecución de un tendido de 30 m de longitud con 12 geófonos espaciados a 2.5 m entre sí correspondiente al sitio de Cd. Guerrero (Fotografía 4.1) y dos tendidos de 60 m de longitud con 24 geófonos espaciados a 5 m entre sí, realizados en los sitios de Tamazunchale (Fotografía 4.2) y Cd. Victoria (Fotografía 4.3)



Fotografía 4.2 (Izquierda) Tendido realizado en Tamazunchale y Fotografía 4.3 (derecha) Levantamiento de datos en el Sitio 2, Cd. Victoria.

En los tendidos se registraron impactos de un marro de 16 lbs sobre una placa metálica en los extremos de las líneas (a 5 y 10 m de distanciamiento del primer y último geófono de cada tendido). Se considera teóricamente que, al ser un promedio del tendido, la medición de MASW se ubica en el centro de éste, tal como lo esquematizan las Figuras 4.1. y 4.2.

Cabe mencionar que el centro del tendido se ubicó en el punto donde se encontraba la perforación para el ensaye downhole.

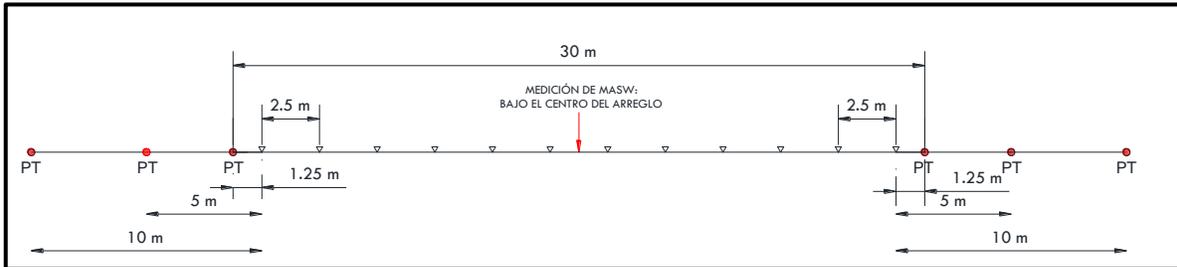


Figura 4.1 Esquematización del tendido de 30 m de longitud realizado en el punto de Cd. Guerrero.

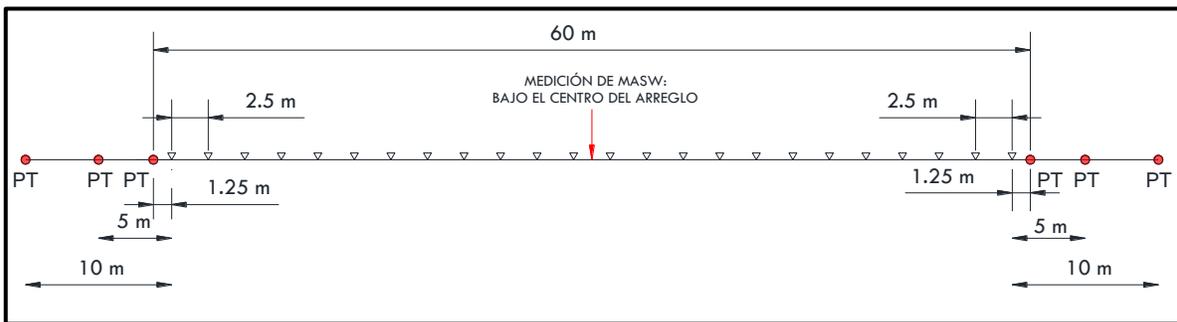


Figura 4.2 Esquema del arreglo utilizado en los puntos de Tamazunchale y Cd. Victoria (tendidos de 60 m de longitud).

4.1.2 Procesamiento e inversión de datos

Para el procesamiento de los datos se utilizaron los softwares: SeisImager/PickWin (programa de visualización de sismogramas), SeisImager/SW (programa de análisis de Ondas Superficiales) y SeisImager/WEq (programa de inversión de Ondas Superficiales), comercializados todos por la empresa estadounidense *Geometrics Incorporated*.

El procesado de datos de Dispersión de Ondas Superficiales (MASW), para los datos obtenidos en este proyecto fue el siguiente:

- 1) A través del software *PickWin* se visualizaron los sismogramas obtenidos en cada punto de tiro realizado en los tendidos, con el fin de verificar el contenido de la señal sísmica, esto es, el registro de ondas superficiales generadas con el impacto con el marro. Los sismogramas obtenidos en los tres puntos de interés se observaron sin ruido (se ilustran en las Figuras 4.3, 4.4 y 4.5).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

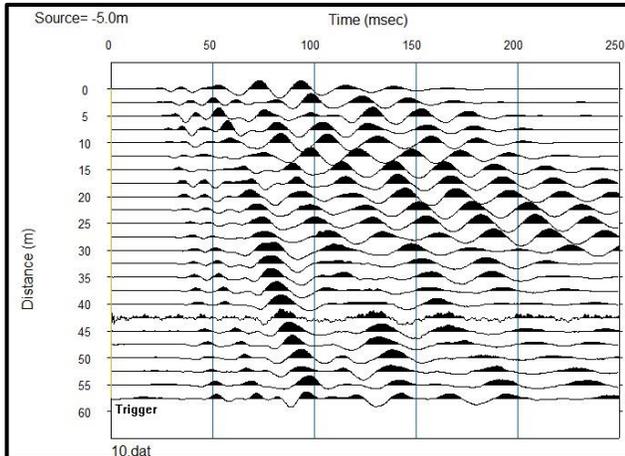


Figura 4.3 Sismograma resultante del tiro externo en el punto de Tamazunchale

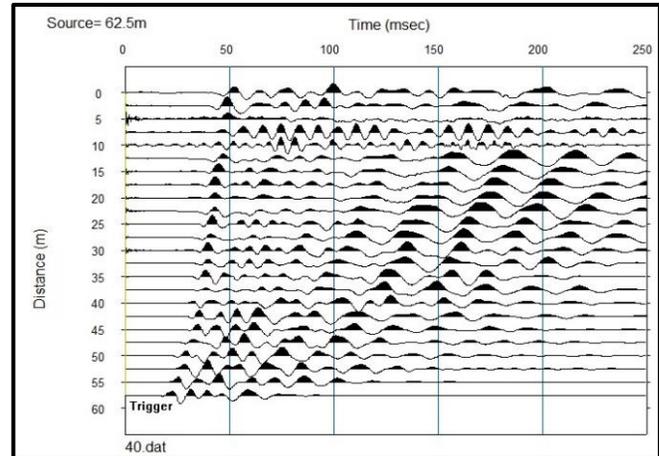


Figura 4.4 Sismograma obtenido del tiro final del tendido de MASW en el punto de Cd. Victoria.

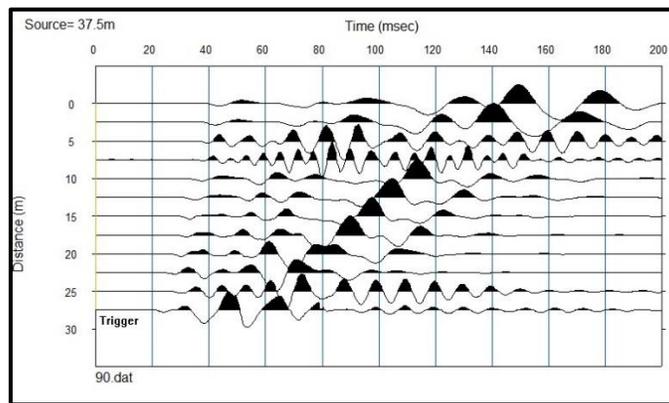


Figura 4.5 Sismograma obtenido del tiro externo de la línea de MASW ubicada en Cd. Guerrero.

- 2) Mediante el programa ya mencionado, de forma automatizada se calcularon los coeficientes de correlación espacial normalizados; obteniendo una imagen con las velocidades de fase para cada frecuencia, calculadas de cada coeficiente de correlación, que es la imagen en el dominio de interés (Frecuencia contra Velocidad de Fase). En esta curva se midieron las velocidades de fase correspondientes al modo fundamental de propagación de las ondas sísmicas superficiales de Rayleigh para ir formando la curva de dispersión correspondiente.

El picado (identificación) de la curva para los puntos de interés se muestra en las Figuras 4.6, 4.7 y 4.8.

- 3) La curva de dispersión seleccionada contiene información a diferentes frecuencias y, por tanto, detalla las diferentes profundidades de investigación obtenidas en cada arreglo. A partir de la curva de dispersión se obtiene el modelo 1D de velocidad de onda S.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

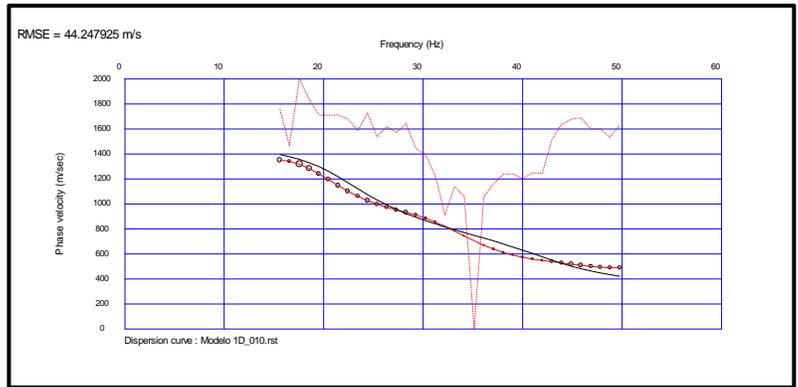
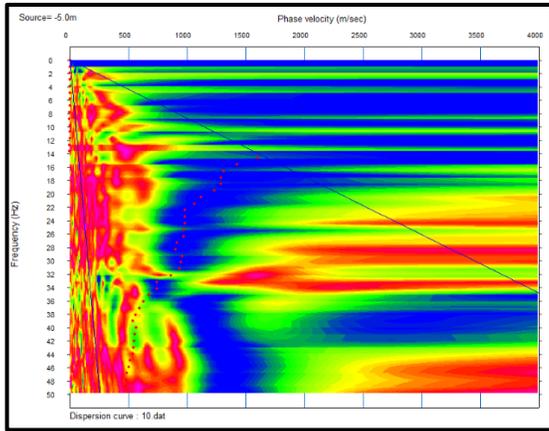


Figura 4.6 Curva de dispersión obtenida para el sitio en Tamazunchale.

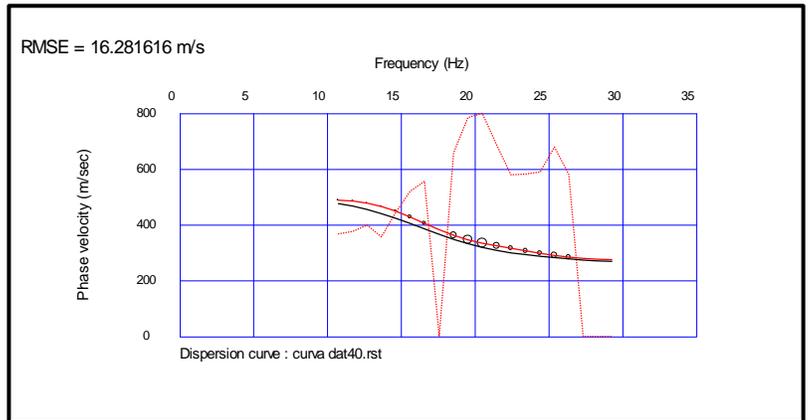
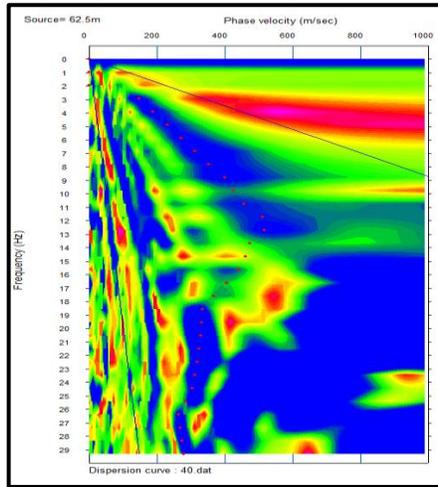


Figura 4.7 Identificación de la curva de dispersión en Cd. Victoria.

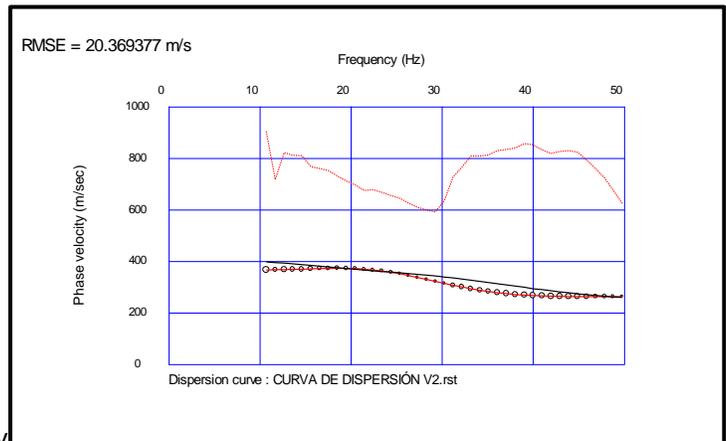
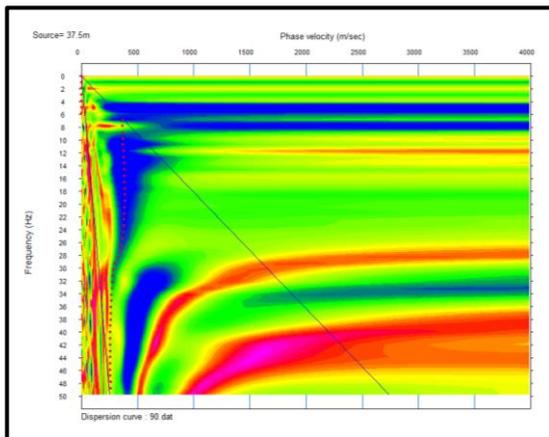
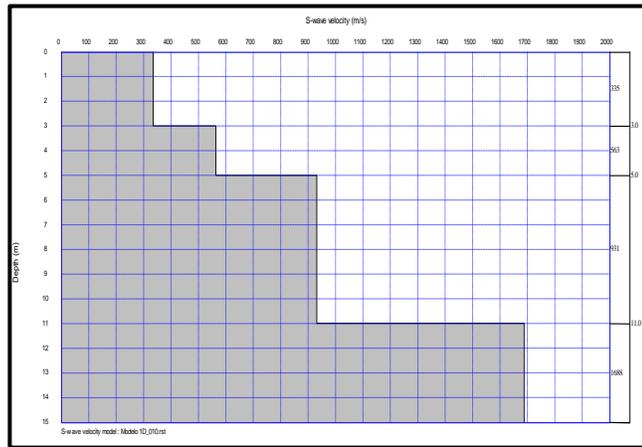


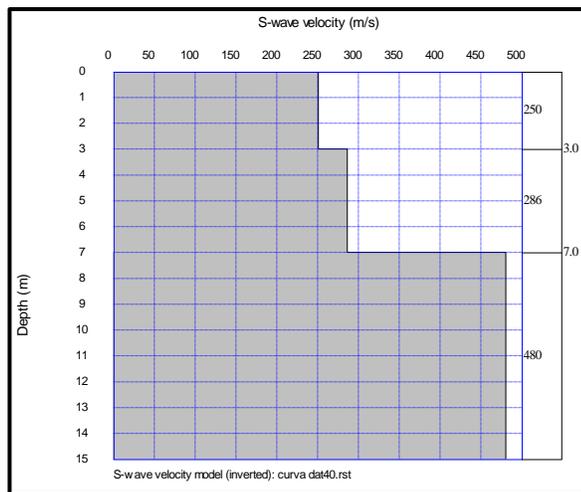
Figura 4.8 Curva de dispersión obtenida en Cd. Guerrero.

- 4) El modelo inicial de V_s se genera a partir de la información de la curva de velocidad de fase, considerando que la profundidad de penetración es aproximadamente un tercio de la longitud de onda asociada a cada velocidad de fase medida. El procedimiento asigna 'n-1' capas de espesor constante o variable. Un proceso iterativo de inversión no lineal hace una estimación de la velocidad de corte para cada capa. Para seleccionar el modelo final de onda S se verifica el error medio cuadrático (RMS) que para este proyecto fue siempre menor a 10% y el ajuste de los datos en forma visual, es decir, que la curva de dispersión calculada ajuste a la curva de dispersión observada. Los modelos unidimensionales de onda de corte obtenidos en este proyecto se ilustran en las figuras 4.9, 4.10 y 4.11.



Z (m)	V_s (m/s)
0 - 3	335
3 - 5	563
5 - 11	931
11 - 18	1688

Figura 4.9 Modelo unidimensional de onda de corte correspondiente a la medición de MASW en Tamazunchale.



Z (m)	V_s (m/s)
0 - 3	250
3 - 7	286
7 - 15	480

Figura 4.10 Modelo unidimensional de onda de corte correspondiente a la medición de MASW en Cd. Victoria.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

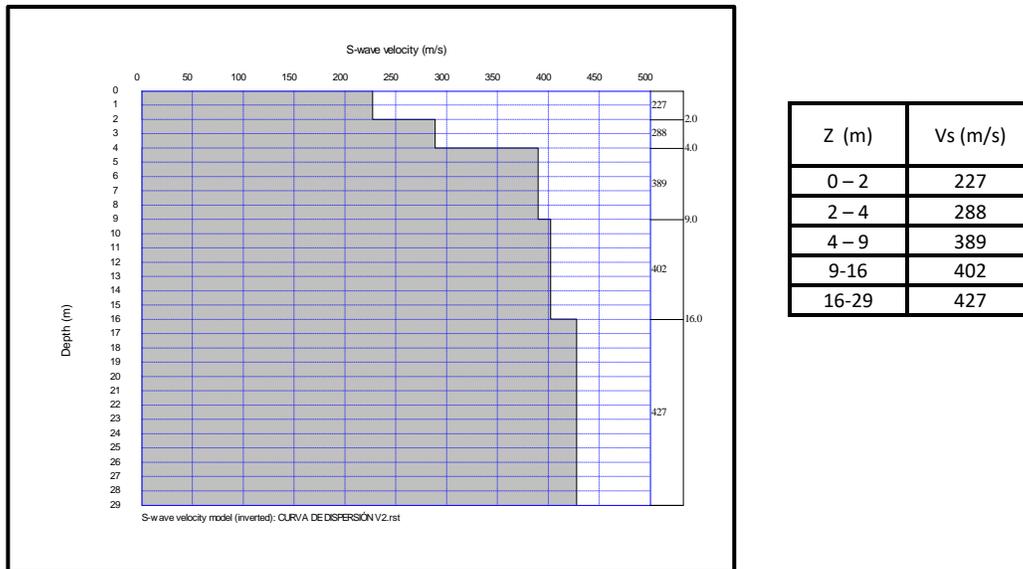


Figura 4.11 Modelo unidimensional de onda de corte correspondiente a la medición de MASW en Cd. Guerrero

4.2 Metodología Downhole

4.2.1 Adquisición de datos

En los ensayos de Downhole se utilizó de la misma manera el sismógrafo marca *Geometrics*, Modelo Geode de 24 canales, con el instrumental ya descrito en el punto 4.1.1.

Primeramente, se utilizó un geófono de tres componentes modelo BHG-3 marca *Geostuff*, que es un geófono de pozo direccionable que incluye un fleje movido por un motor para fijar el geófono contra la pared del pozo (ilustrado en la fotografía 4.4). El fleje es una banda de acero que se comprime y expande por un pistón movido por un motor interno. Se tiene un panel de control en superficie para poder fijar el geófono en cada metro. De esta forma el geófono queda completamente inmóvil durante la toma de datos, pues de otra forma, el geófono se estaría moviendo durante la toma de datos, provocando señales de mala calidad.

Este modelo también incluye un servomecanismo que rota los componentes del geófono hasta que los componentes horizontales se alinean con el azimut deseado, esto se logra debido a que el geófono contiene una brújula de tipo “fluxgate” que permite orientar a los componentes horizontales del geófono. Se complementa con un controlador en superficie marca *Geostuff*, el cual manda una señal al geófono para que se oriente de forma automática en la dirección deseada (Fotografía 4.5).



Fotografía 4.4 Geófono de pozo modelo BHG-3, de la Marca *Geostuff*



Fotografía 4.5 Controlador en superficie, Marca *Geostuff*

Se utilizó también un sismodetector modelo SSBH (Marca *SARA*) de 5 componentes (1 vertical y 4 horizontales) que incluye un pistón movido por un motor para fijar el geófono contra la pared del pozo (Fotografía 4.6).

Como lo sugiere la norma ASTM D7400-17 para obtener mejores resultados se generaron de manera independiente los dos trenes de onda necesarios: En una primera prueba, mientras se descendía el geófono de pozo, se produjeron ondas transversales (Ondas S) y

en una segunda ejecución, cuando el geófono ascendía, se produjeron las ondas compresionales (Ondas P).



Fotografía 4.6. Geófono de pozo modelo SSBH, Marca SARA. (Utilizado en Cd. Guerrero).

Para la generación de ondas P se utilizó un marro de 16 lb para golpear una placa de acero al carbón de la misma forma en que se usa en la ejecución de un Tendido de Refracción Sísmica, se produjeron tres golpes (stacks) que se fueron apilando para formar un registro. Los registros de las ondas fueron tomados a cada metro de la longitud total de los diferentes pozos. Cabe mencionar que se hicieron las repeticiones necesarias en cada metro de la columna del pozo, con el fin de obtener un sismograma de buena calidad.

La generación de la onda S se realizó con el uso de un polín de madera, el cual fue sujetado por medio de un vehículo Pick-Up (Ver Fotografía 4.7 y 4.8) Para producir ondas polarizadas se realizan golpes del lado izquierdo y del lado derecho, (de igual manera, se aplican tres golpes para formar un registro), de tal forma que juntando ambos registros se observe la polarización de las ondas S (ver ejemplo en la Figura 4.12).



Fotografía 4.7. Uso del vehículo Pick-Up para sostener el polín con el eje trasero. (Sitio 2: Cd. Victoria)



Fotografía 4.8. Generación de impactos al polín, para posteriormente golpear el lado contrario (Sitio 1: Tamazunchale).

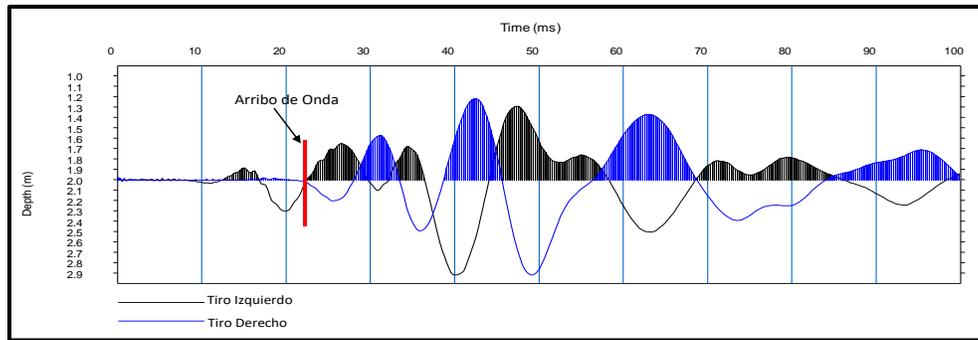


Figura 4.12 Sismograma de campo, mostrando el registro sísmico de componentes horizontales (Sismograma tomado del sitio de Tamazunchale, a la profundidad de 2 m). Se puede observar la polarización de la onda S, gracias a que se realizan golpes horizontales en sentidos opuestos.

4.2.2 Procesamiento e inversión de datos.

Los datos de campo fueron registrados sin el uso de ningún tipo de filtro. La calidad de la señal registrada en campo permitió utilizar todos los registros sin filtro, por lo que el trabajo de gabinete se realizó de la siguiente manera:

Primeramente, conforme las anotaciones realizadas en campo, se ordenan los registros obtenidos para cada metro correspondientes a la onda P, y a la onda S, respectivamente.

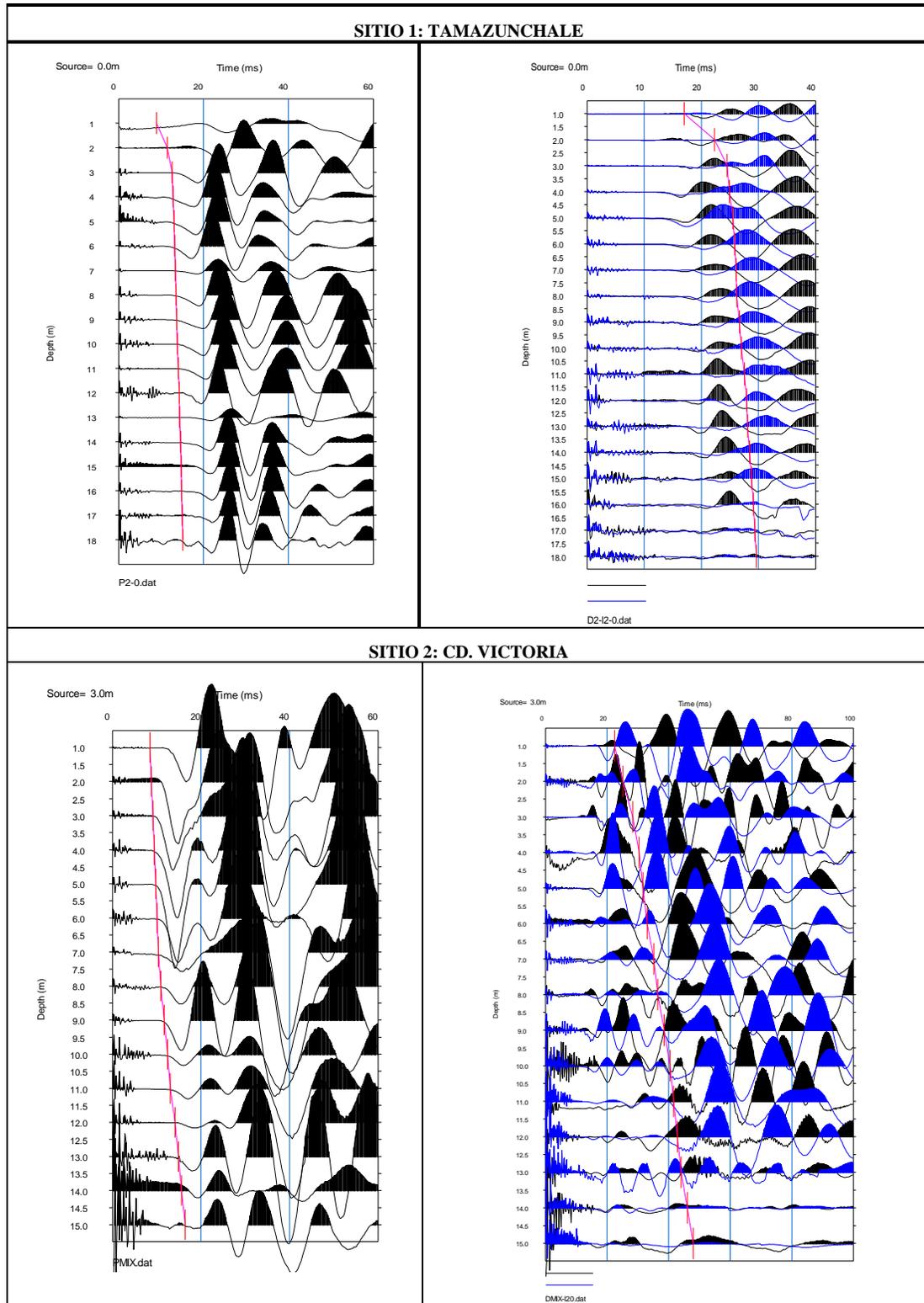
Una vez ordenados los datos, con ayuda del módulo de downhole del software *Pickwin* se proceden a enlistar los datos conforme su respectiva profundidad, con el fin de generar un archivo que contenga todas las mediciones realizadas, esto es, el sismograma que represente la longitud total de la columna del pozo.

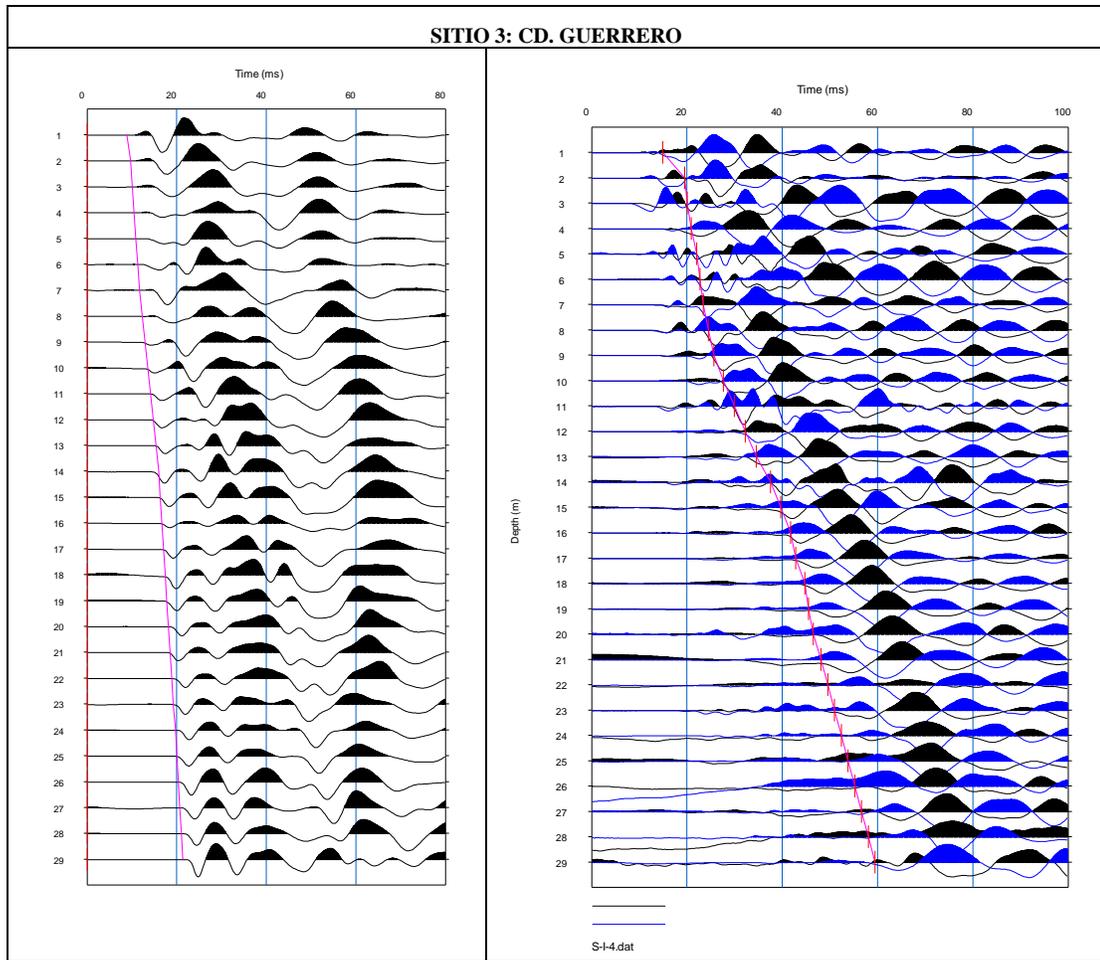
El sismograma correspondiente a la onda P, tendrá únicamente una componente (la vertical), mientras que el de la onda S, será un sismograma compuesto por dos componentes, es decir, las componentes horizontales de los golpes contrarios generados en el polín.

Posteriormente, con los sismogramas completos de onda P y de onda S, se procede a realizar simultáneamente el picado de los tiempos de arribo para cada onda. En el siguiente apartado (Tabla 4.1) se presentan los sismogramas resultantes para cada sitio, y la curva del picado del tiempo de tiempo de arribo para cada onda.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

Tabla 4.1. En la figura de la columna izquierda se observan los sismogramas usados para la identificación de la onda P, mientras que en la columna de la derecha se muestran los sismogramas compuestos usados para la identificación de la onda S. Las líneas verticales en rojo muestran la identificación de los arribos.





La siguiente etapa del procesamiento consistió en calcular tiempos de arribo corregidos a la vertical (T_c) a partir de los tiempos de arribo absolutos (T_a) leídos en los sismogramas y graficar estos últimos contra la profundidad, generando así las llamadas Curvas de Distancia-Tiempo y a partir de las cuales se calculan las velocidades de propagación de la onda P y la onda S. Se pudo emplear este método “directo” debido a que no se observaron adelantos en las ondas S.

A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la prueba de downhole, las siguientes tablas (Tabla 4.2, 4.3 y 4.4) muestran los parámetros utilizados para el cálculo de las velocidades medidas a cada metro de profundidad explorada por el pozo y el coeficiente de Poisson (Sheriff,1995) correspondiente para cada cota.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

Tabla 4.2 Tiempos leídos de los sismogramas (Arribo), así como tiempos corregidos a la vertical (T_c) ambos en milisegundos; velocidades de intervalo a cada metro (V_p y V_s en metros sobre segundo) y relación de Poisson para el pozo del ensaye. (CD. GUERRERO).

SITIO 1 TAMAZUNCHALE									
Z (m)	Onda P				Onda S				Poisson
	Offset P (m)	Arribo (ms)	T_c (ms)	Velocidad P (m/s)	Offset S (m)	Arribo (ms)	T_c (ms)	Velocidad S (m/s)	
1	3	8.9	2.8144	355	3	17.8	17.8	178	0.3
2	3	11.45	6.3513	174	3	22.5	22.5	94	0.3
3	3	12.55	8.8742	579	3	24.55	24.55	311	0.3
4	3	12.8	10.24	3029	3	25	25	1683	0.3
5	3	13.05	11.19	3324	3	25.5	25.5	1662	0.3
6	3	13.2	11.806	5848	3	25.8	25.8	2924	0.3
7	3	13.35	12.271	6050	3	26.1	26.1	3025	0.3
8	3	13.5	12.64	6188	3	26.4	26.4	3094	0.3
9	3	13.65	12.95	6286	3	26.7	26.7	3143	0.3
10	3	13.8	13.218	6356	3	27	27	3178	0.3
11	3	14.1	13.603	3205	3	27.6	27.6	1602	0.3
12	3	14.25	13.825	6450	3	27.9	27.9	3225	0.3
13	3	14.4	14.031	6482	3	28.2	28.2	3241	0.3
14	3	14.55	14.227	6508	3	28.5	28.5	3254	0.3
15	3	14.7	14.415	6528	3	28.8	28.8	3264	0.3
16	3	14.85	14.596	6545	3	29.1	29.1	3273	0.3
17	3	15	14.772	6559	3	29.4	29.4	3280	0.3
18	3	15.15	14.944	6571	3	29.7	29.7	3285	0.3

Tabla 4.3 Tiempos leídos de los sismogramas (Arribo), así como tiempos corregidos a la vertical (T_c) ambos en milisegundos; velocidades de intervalo a cada metro (V_p y V_s en metros sobre segundo) y relación de Poisson para el pozo del ensaye. (CD. Victoria).

SITIO 2 CD. VICTORIA									
Z (m)	Onda P				Onda S				Poisson
	Offset P (m)	Arribo (ms)	T_c (ms)	Velocidad P (m/s)	Offset S (m)	Arribo (ms)	T_c (ms)	Velocidad S (m/s)	
1	3	8.5	2.7	373	3	22.4	7.10	141	0.4
2	3	8.8	4.9	1353	3	25.1	13.92	167	0.5
3	3	9.1	6.5	1944	3	28.4	20.06	195	0.5
4	3	9.5	7.6	2311	3	30.4	24.32	373	0.5
5	3	9.8	8.4	2536	3	31.7	27.15	659	0.5
6	3	10.1	9.1	2677	3	33.0	29.54	644	0.5
7	3	10.4	9.5	3497	3	35.2	32.33	423	0.5
8	3	10.9	10.2	1658	3	36.4	34.13	726	0.4
9	3	11.7	11.1	1240	3	38.5	36.57	450	0.4
10	3	12.6	12.1	1059	3	40.4	38.73	504	0.4
11	3	13.1	12.6	1923	3	41.6	40.15	818	0.4

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

12	3	14.2	13.8	880	3	43.6	42.25	499	0.3
13	3	14.9	14.5	1389	3	44.8	43.65	778	0.3
14	3	15.6	15.3	1395	3	46.1	45.04	774	0.3
15	3	16.5	16.2	1088	3	48.0	47.06	507	0.4

Tabla 4.4 Tiempos leídos de los sismogramas (Arribo), así como tiempos corregidos a la vertical (Tc) ambos en milisegundos; velocidades de intervalo a cada metro (Vp y Vs en metros sobre segundo) y relación de Poisson para el pozo del ensaye. (CD. Guerrero).

SITIO 3 CD. GUERRERO									
Z (m)	Onda P				Onda S				Poisson
	Offset P (m)	Arribo (ms)	Tc (ms)	Velocidad P (m/s)	Offset S (m)	Arribo (ms)	Tc (ms)	Velocidad S (m/s)	
1	3	8.83	2.8	358.3	3	15.8	5.0	200	0.3
2	3	9.67	5.4	525.7	3	19.5	10.8	120	0.5
3	3	10.07	7.1	1581.3	3	20.2	14.3	910	0.3
4	3	10.48	8.4	1879.8	3	20.9	16.7	1082	0.3
5	3	10.88	9.3	2062.5	3	22.0	18.9	755	0.4
6	3	11.28	10.1	2177.4	3	22.7	20.3	1253	0.3
7	3	11.68	10.7	2252.6	3	23.4	21.5	1297	0.3
8	3	12.29	11.5	1536.9	3	24.5	22.9	844	0.3
9	3	12.91	12.2	1525.7	3	25.6	24.3	857	0.3
10	3	13.52	13.0	1542.9	3	27.6	26.5	468	0.4
11	3	14.14	13.6	1555.8	3	29.9	28.9	417	0.5
12	3	14.76	14.3	1565.7	3	32.3	31.3	420	0.5
13	3	15.38	15.0	1573.5	3	34.6	33.7	422	0.5
14	3	15.97	15.6	1663.5	3	37.5	36.7	327	0.5
15	3	16.33	16.0	2697.5	3	39.7	38.9	464	0.5
16	3	16.69	16.4	2704.5	3	41.8	41.0	465	0.5
17	3	17.05	16.8	2710.3	3	42.8	42.1	952	0.4
18	3	17.42	17.2	2715.1	3	44.8	44.2	499	0.5
19	3	17.78	17.6	2719.2	3	45.5	44.9	1359	0.3
20	3	18.14	17.9	2722.7	3	46.5	46.0	988	0.4
21	3	18.51	18.3	2725.7	3	48.1	47.7	604	0.5
22	3	18.87	18.7	2728.3	3	49.6	49.1	698	0.5
23	3	19.23	19.1	2730.6	3	51.0	50.5	699	0.5
24	3	19.72	19.6	2025.0	3	52.4	52.0	699	0.4
25	3	20.05	19.9	3057.0	3	53.8	53.4	700	0.5
26	3	20.37	20.2	3058.8	3	55.2	54.9	700	0.5
27	3	20.70	20.6	3060.3	3	56.7	56.3	700	0.5
28	3	21.02	20.9	3061.7	3	58.1	57.7	701	0.5
29	3	21.35	21.2	3063.0	3	59.5	59.2	701	0.5

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

A partir de estos parámetros se construyeron las curvas de Distancia-Tiempo correspondientes, graficando la profundidad contra el tiempo corregido a la vertical. Por medio del análisis de los cambios de sus pendientes y con apoyo de los perfiles estratigráficos correspondiente a cada pozo, se llegó a la interpretación mostrada en las Figuras 4.13, 4.14 y 4.15.

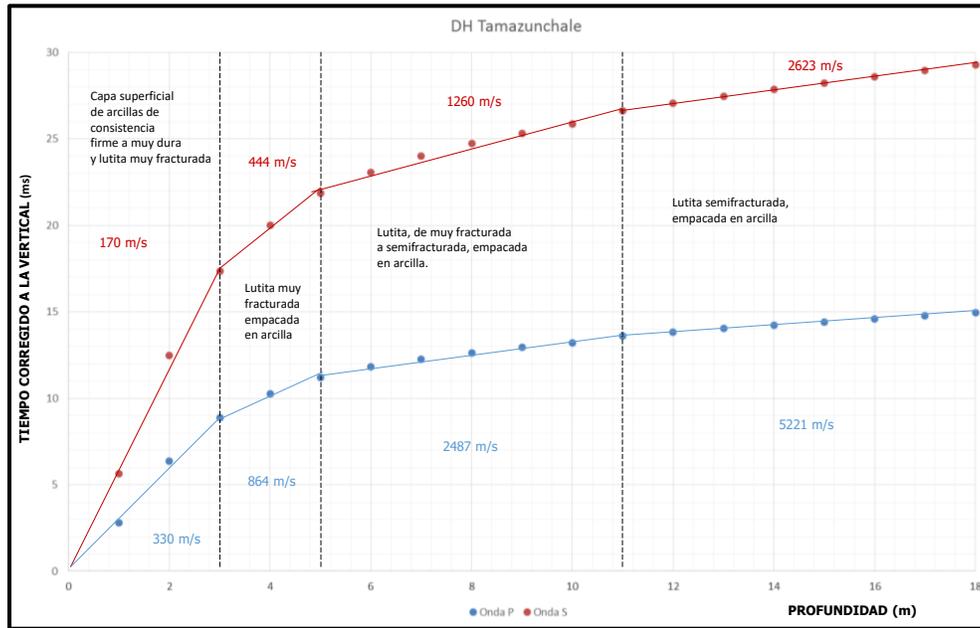


Figura 4.13. Dromocrónicas obtenidas a partir de los datos de Downhole con las velocidades sísmicas promedio calculadas y su correlación con el corte geotécnico descrito. (Tamazunchale).

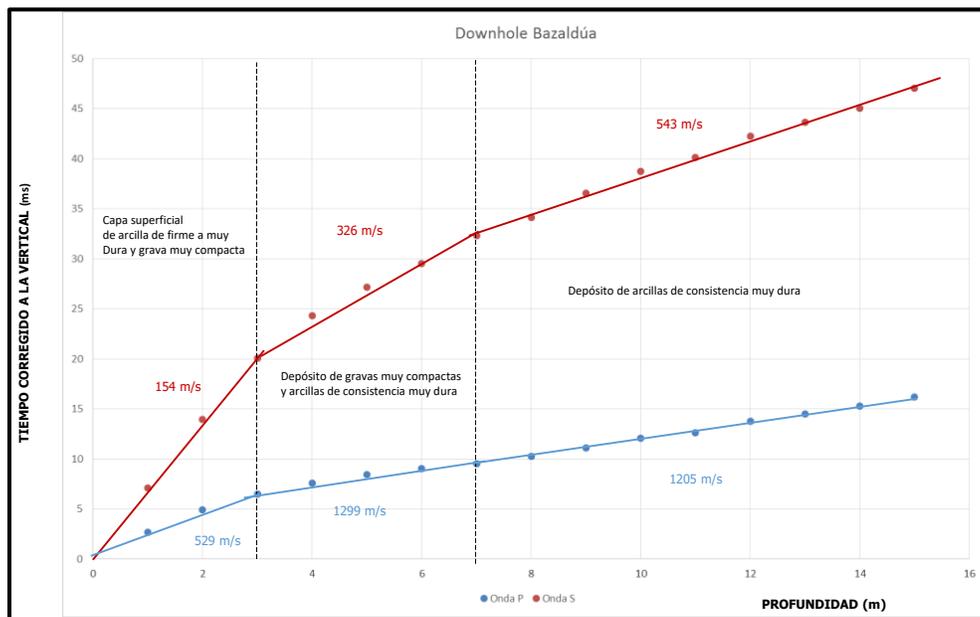


Figura 4.14. Dromocrónicas obtenidas a partir de los datos de Downhole con las velocidades sísmicas promedio calculadas y su correlación con el corte geotécnico descrito. (Cd. Victoria).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

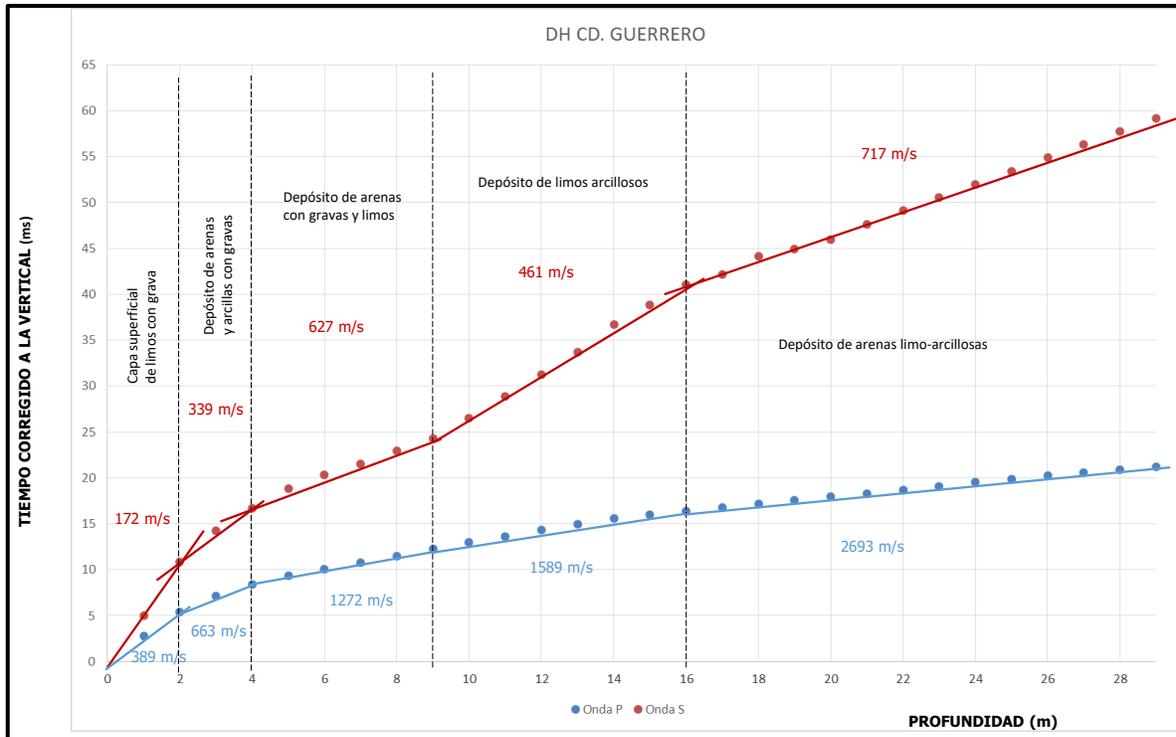


Figura 4.15. Dromocrónicas obtenidas a partir de los datos de Downhole con las velocidades sísmicas promedio calculadas y su correlación con el corte geotécnico descrito. (Cd. Guerrero).

En una tercera etapa, se correlacionaron las velocidades registradas con la información reportada en el perfil estratigráfico del pozo para realizar la integración geológica y definir las unidades geosísmicas.

Finalmente, como cuarta etapa se introdujeron todos los datos anteriores en el software PS-Log para usarlos como modelo inicial y que el software genere el modelo de velocidades, el cual se realiza con ayuda del módulo DH de *SeisImager* (2013), el cual analiza las trayectorias de las ondas y de las partículas del subsuelo que son desplazadas por las mismas, de esta forma calcula el ángulo del cual provienen las ondas y de ser necesario rota los sismogramas para alinearlos con la fuente sísmica, el resultado se muestra en las figuras 4.16, 4.17 y 4.18.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

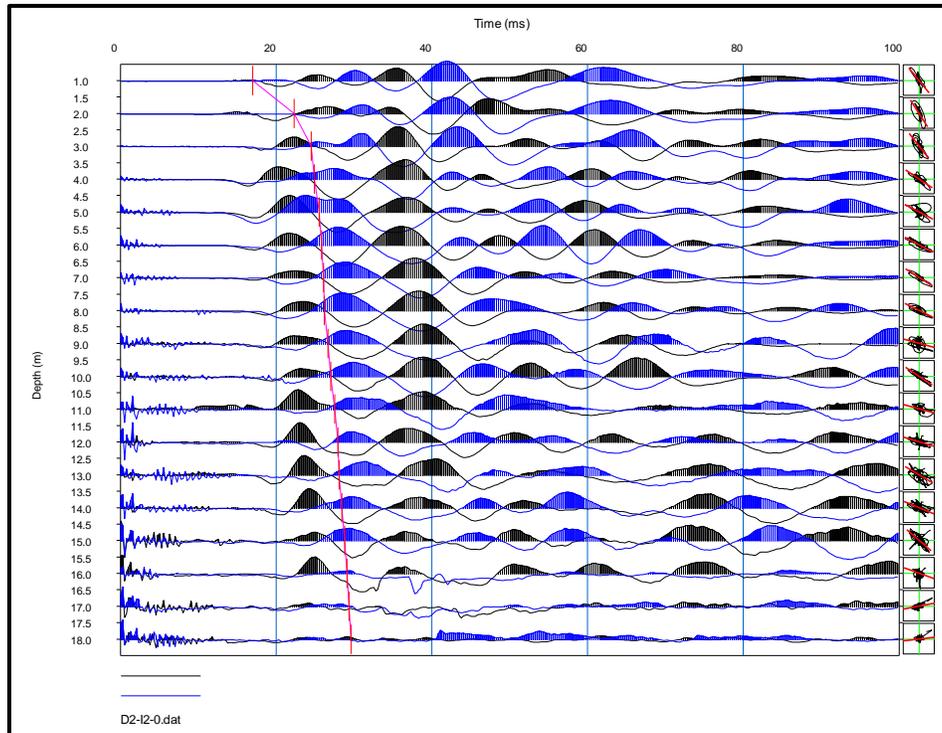


Figura 4.16. Sismogramas rotados en la dirección de la fuente sísmica para el Downhole realizado y las trayectorias del movimiento de partículas a cada metro usadas para calcular el ángulo para rotar cada sismograma en dirección de la fuente para obtener más claramente la polarización de la onda S. En línea roja se indican los arribos de la Onda S usados para calcular las gráficas de Distancia-Tiempo (Figura 4.13).

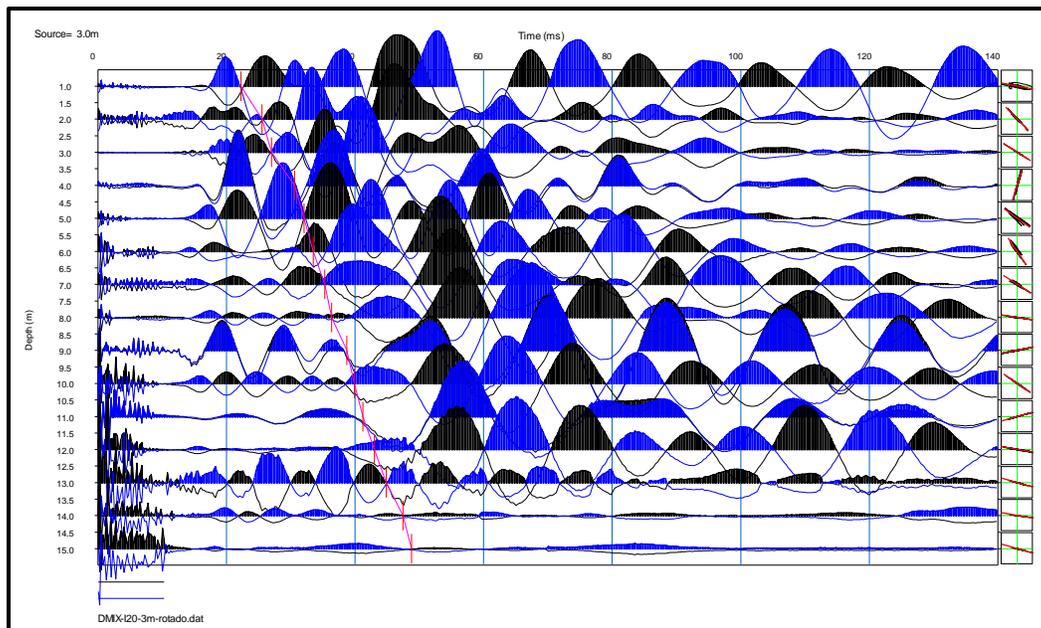


Figura 4.17. Sismogramas rotados en la dirección de la fuente sísmica para el Downhole realizado y las trayectorias del movimiento de partículas a cada metro usadas para calcular el ángulo para rotar cada sismograma en dirección de la fuente para obtener más claramente la polarización de la onda S.

S. En línea roja se indican los arribos de la Onda S usados para calcular las gráficas de Distancia-Tiempo (Figura 4.14).

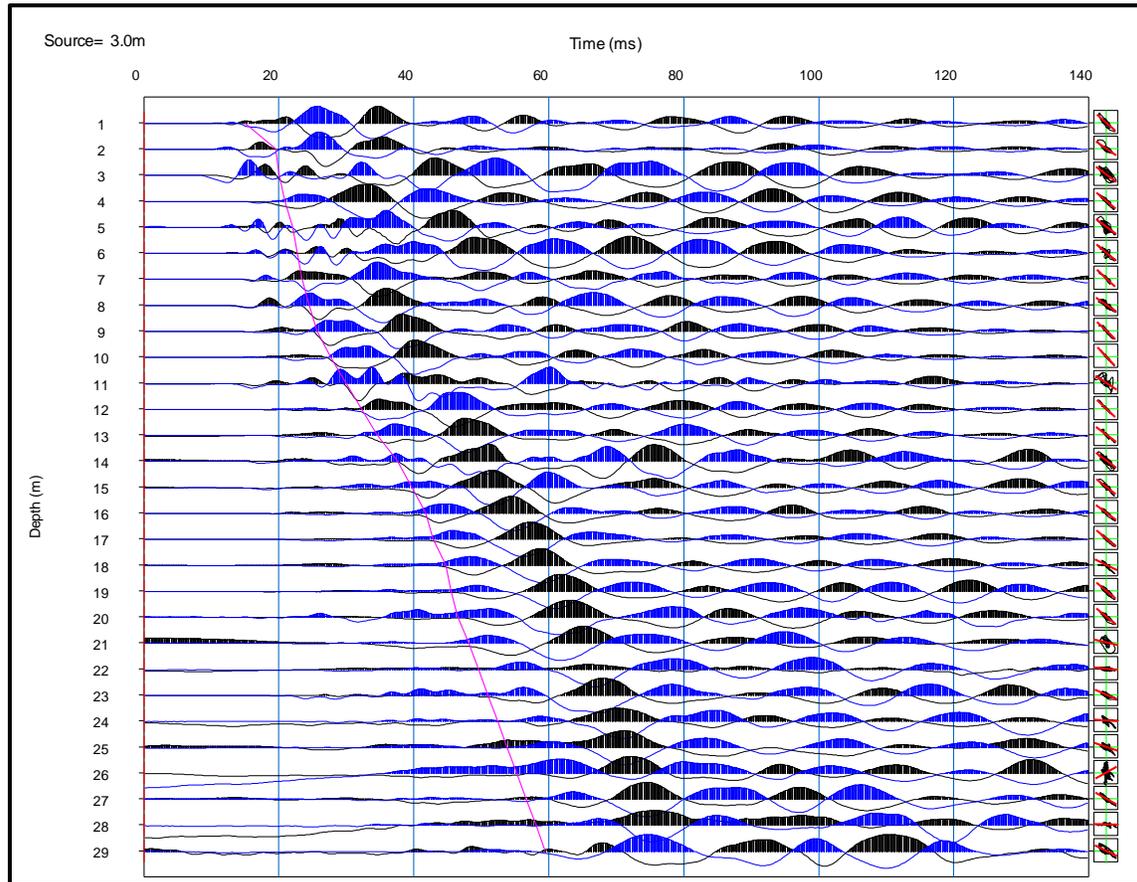


Figura 4.18 Sismogramas rotados en la dirección de la fuente sísmica para el Downhole realizado y las trayectorias del movimiento de partículas a cada metro usadas para calcular el ángulo para rotar (en caso necesario) cada sismograma en dirección de la fuente para obtener más claramente la polarización de la onda S. En línea roja se indican los arribos de la Onda S usados para calcular las gráficas de Distancia-Tiempo (Figura 4.15).

Una vez con los arribos de onda S identificados se ingresan en el software PS-Log para que, a partir de los sismogramas y dichos arribos, así como las profundidades calculadas del análisis de las dromocrónicas se puede llegar al modelo final que considera tanto los sismogramas, como los arribos, las profundidades y las trayectorias del movimiento de partícula de cada metro estudiado a lo largo de la profundidad libre del pozo (Figuras 4.19, 4.20 y 4.21).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

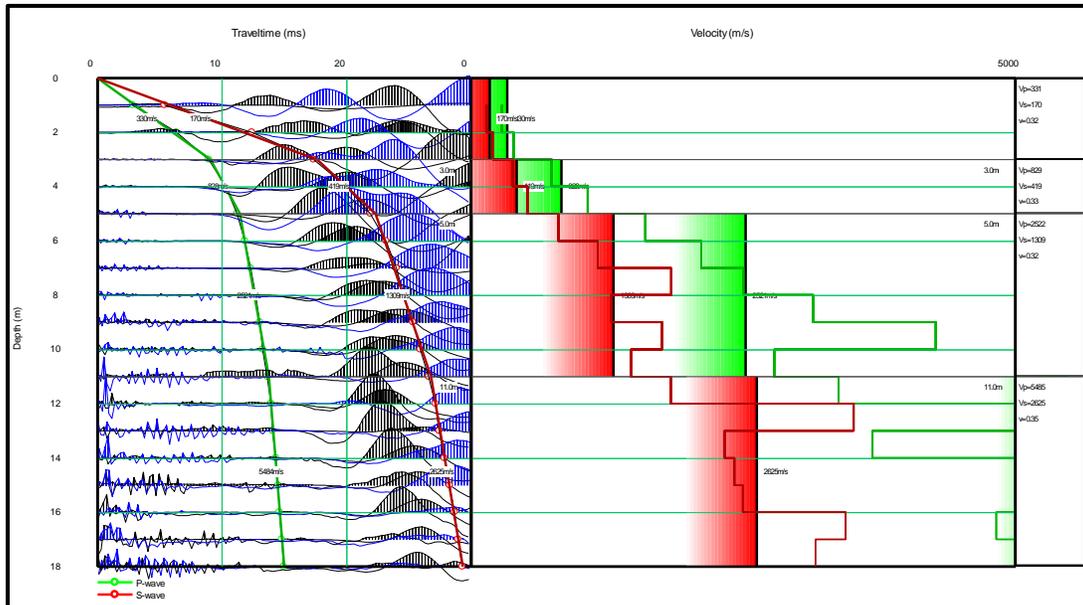


Figura 4.19. Modelo de velocidades sísmicas obtenidas a partir de los sismogramas rotados en la dirección de la fuente sísmica y las trayectorias del movimiento de partículas a cada metro usadas para calcular el ángulo para rotar cada sismograma en dirección de la fuente para obtener más claramente la polarización de la onda S (Sitio 1, Tamazunchale).

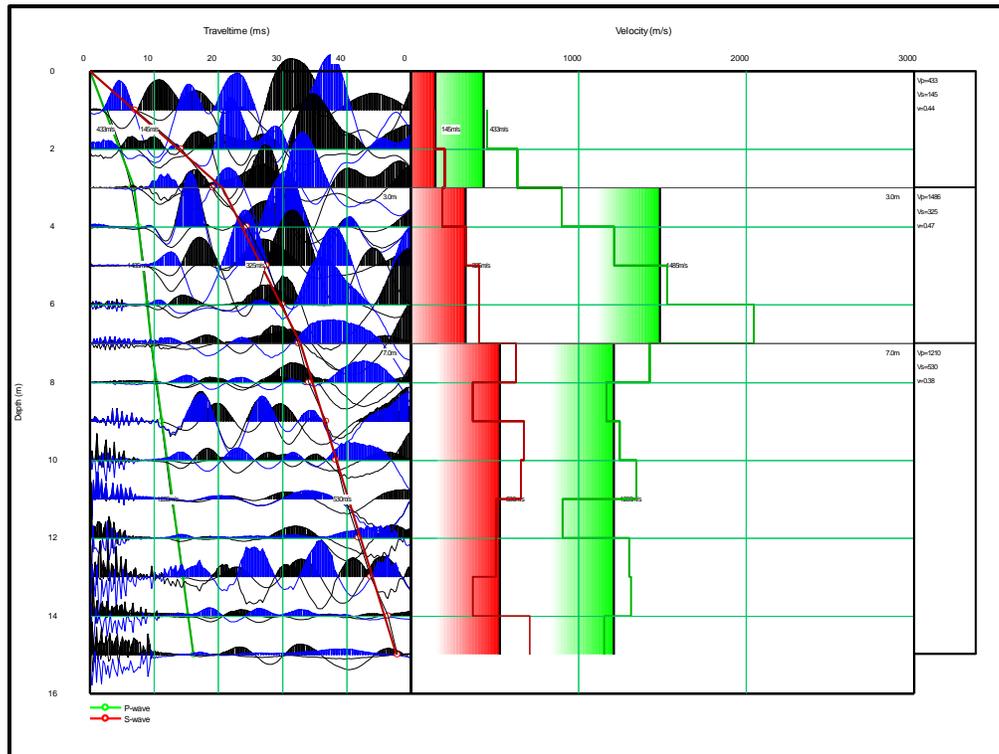


Figura 4.20. Modelo de velocidades sísmicas obtenidas a partir de los sismogramas rotados en la dirección de la fuente sísmica y las trayectorias del movimiento de partículas a cada metro usadas para calcular el ángulo para rotar cada sismograma en dirección de la fuente para obtener más claramente la polarización de la onda S (Sitio 2, Cd. Victoria).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

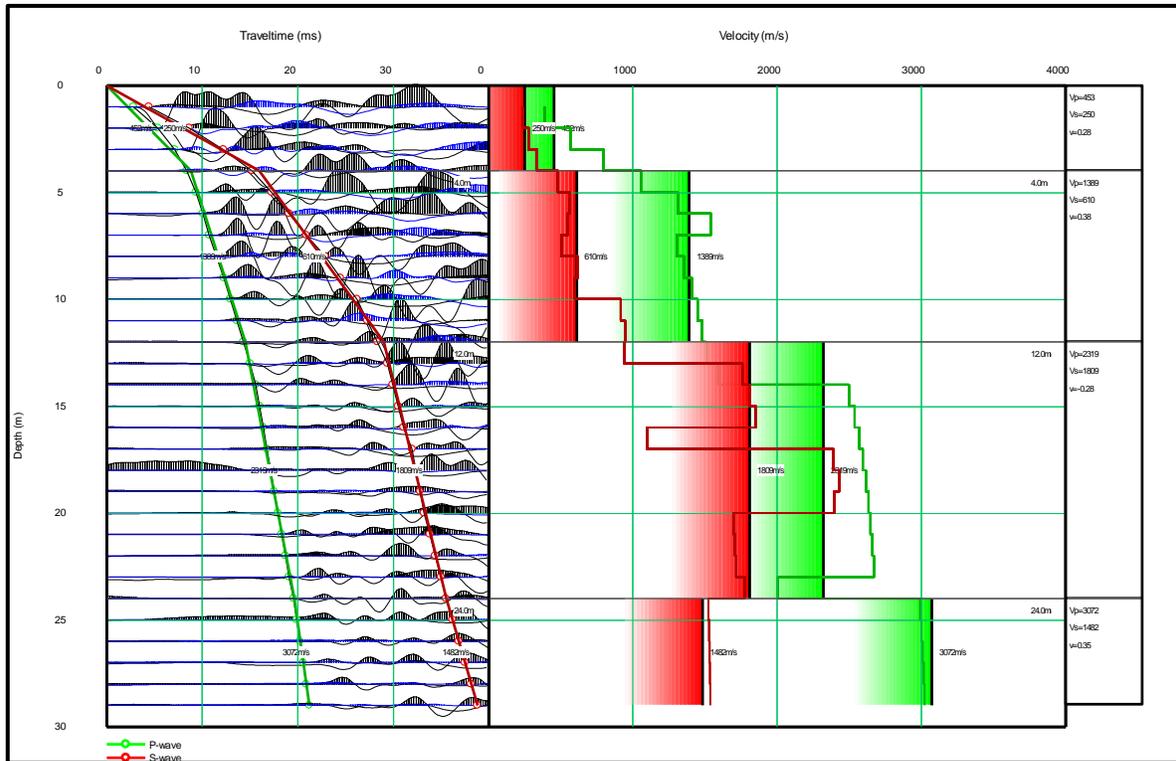


Figura 4.21. Modelo de velocidades sísmicas obtenidas a partir de los sismogramas rotados en la dirección de la fuente sísmica y las trayectorias del movimiento de partículas a cada metro usadas para calcular el ángulo para rotar cada sismograma en dirección de la fuente para obtener más claramente la polarización de la onda S (Sitio 3 Cd. Guerrero).

4.3 Ecuaciones empíricas de correlación

Pese que el valor de velocidad de onda de corte es imprescindible en caracterizaciones geotécnicas, muchas veces los estudios encaminados a su determinación no son realizados en los proyectos, por lo que se recurre a obtener este valor mediante correlaciones realizadas por diversos investigadores; en la siguiente tabla se muestran las ecuaciones utilizadas en el presente trabajo:

Tabla 4.5 Ecuaciones empíricas de correlación del valor N del SPT con la velocidad de ondas de corte V_s .

Autores	Año de publicación	Ecuación
Imai y Yoshimura	1970	$V_s = 76N^{0.33}$
Ohba y Toriumi	1970	$V_s = 84N^{0.31}$
Ohta y Goto	1978	$V_s = 85.34N^{0.348}$
Japan Road Association	2002	$V_s = 100N^{1/3}$

4.3.1 V_s a partir de N

Con la información de los SPT's realizados por la mecánica de suelos, se registró el número de golpes (N) para cada cota de la longitud total del pozo, para posteriormente sustituir este valor en las ecuaciones de la Tabla 4.5.

Es necesario señalar que algunos de estos perfiles muestran espesores con cincuenta golpes continuos, registrando si el avance es total o menor a 30 cm. A partir de esto, se infiere que los estratos son más competentes y/o con una mayor rigidez cuando se reporta un avance menor a 30 cm, por ello, con la finalidad de calcular una N representativa de dichos casos, se utilizó la siguiente proporción:

$$N = (50 * 30) / \text{avance reportado} \quad \text{Ec. 1}$$

Es importante resaltar que esta relación es únicamente orientativa y suele emplearse en correlaciones empíricas como las concernientes a este estudio.

Los perfiles estratigráficos correspondientes a cada sitio se pueden consultar en el Anexo A, al final de este trabajo.

- **Sitio Tamazunchale**

En la tabla 4.6 se muestra el valor de N reportado en el SPT, así como el calculado de la relación descrita con anterioridad. Se puede apreciar que a partir de los 3 metros y hasta

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

los 14 m, se registran 50 golpes con pequeños avances, estimando que el terreno es muy rígido, siendo que a partir de los 15 m el muestreo se realizó con barril, no teniendo un valor de N.

En la Tabla 4.7 se muestran los parámetros utilizados como base para el cálculo de las ecuaciones empíricas.

Tabla 4.6 Número de golpes (N) reportados en el SPT realizado en Tamazunchale (izquierda) y Tabla 4.7 (derecha) parámetros utilizados para el cálculo de velocidades a partir del valor de N.

Profundidad (m)	N reportada en el SPT	N equivalente
1	19	19
2	33	33
3	50/25	60.00
4	50/13	115.38
5	50/9	166.67
6	50/10	150.00
7	50/9	166.67
8	50/8	187.50
9	50/10	150.00
10	50/9	166.67
11	50/5	300.00
12	50/8	187.50
13	50/11	136.36
14	50/9	166.67
15	Barril	-
16	Barril	-
17	Barril	-
18	Barril	-

SITIO: TAMAZUNCHALE				
Ecuaciones empíricas de correlación				
Imai y Yoshimura (1970)				
A	N	b	N^b	$V_s = A (N^b)$
76	19	0.33	2.642339934	200.82
76	33	0.33	3.170367448	240.95
76	60	0.33	3.861801195	293.50
76	115	0.33	4.786634727	363.78
76	136.36	0.33	5.063452119	384.82
76	150	0.33	5.225286595	397.12
76	166.67	0.33	5.410195436	411.17
76	187.5	0.33	5.624584164	427.47
76	300	0.33	6.568255136	499.19
Ohba y Toriumi (1970)				
84	19	0.31	2.491228802	209.26
84	33	0.31	2.956237497	248.32
84	60	0.31	3.558171589	298.89
84	115	0.31	4.353277283	365.68
84	136.36	0.31	4.589368894	385.51
84	150	0.31	4.727029257	397.07
84	166.67	0.31	4.884001684	410.26
84	187.5	0.31	5.065594182	425.51
84	300	0.31	5.860134568	492.25
Ohta y Goto (1978)				
85.34	19	0.348	2.786161285	237.77
85.34	33	0.348	3.376314167	288.13
85.34	60	0.348	4.157158997	354.77
85.34	115	0.348	5.213421618	444.91
85.34	136.36	0.348	5.531858636	472.09
85.34	150	0.348	5.718468829	488.01
85.34	166.67	0.348	5.932071644	506.24
85.34	187.5	0.348	6.180227223	527.42
85.34	300	0.348	7.278438163	621.14
Japan Road Association (2002)				
100	19	0.33	2.668401649	266.84
100	33	0.33	3.20753433	320.75
100	60	0.33	3.914867641	391.49
100	115	0.33	4.862944131	486.29
100	136.36	0.33	5.147096739	514.71
100	150	0.33	5.313292846	531.33
100	166.67	0.33	5.503248769	550.32
100	187.5	0.33	5.723571213	572.36
100	300	0.33	6.694329501	669.43

Posteriormente, se graficaron las velocidades calculadas con las ecuaciones empíricas (Figura 4.22), no obstante, se puede observar que, a partir de los 15 m, no se pudo calcular Vs al no tener un valor de N.

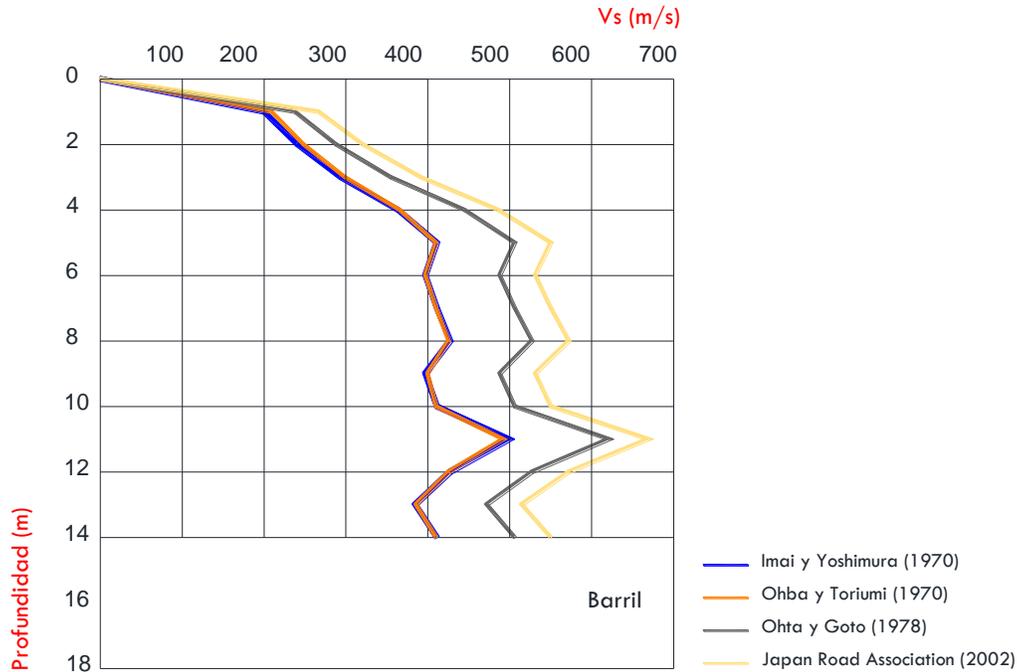


Figura 4.22 Modelo 1- Tamazunchale, en éste se muestra la distribución de Vs resultante de las ecuaciones empíricas, calculadas hasta los 14 m.

La gráfica anterior se realizó considerando estrictamente la información del SPT, sin embargo, con el fin de obtener velocidades de onda de corte hasta los 18 m reportados por la columna del pozo se propone un segundo modelo que considera que a partir de los 15 m se detecta la roca (motivo por el cual fue cambiado el muestreador). Bajo esta condición y tomando en cuenta nuevamente la proporción de N anteriormente descrita se puede suponer que, al contacto con la roca, la herramienta avanza únicamente 1 cm al realizar 50 golpeteos, pudiendo calcular un valor de N para los tres metros faltantes, como a continuación se describe:

$$N = \frac{50 \cdot 30}{1} = 1500 \quad \text{Ec. 2}$$

Por lo que el valor de Vs para el intervalo de 15 a 18 m para los diferentes autores de las ecuaciones empíricas sería el siguiente:

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

Tabla 4.8 Parámetros utilizados para el cálculo de velocidades a partir de la suposición de que el avance es 50/1.

SITIO: TAMAZUNCHALE				
Ecuaciones empíricas de correlación				
Imai y Yoshimura (1970)				
A	N	b	N^b	$V_s = A (N^b)$
76	1500	0.33	11.171465	849.03
Ohba y Toriumi (1970)				
84	1500	0.31	9.651355	810.71
Ohta y Goto (1978)				
85.34	1500	0.348	12.743237	1087.51
Japan Road Association (2002)				
100	1500	0.33	11.447142	1144.71

Calculando la velocidad de este último intervalo, se pudo obtener la siguiente gráfica denominada como "Modelo 2"

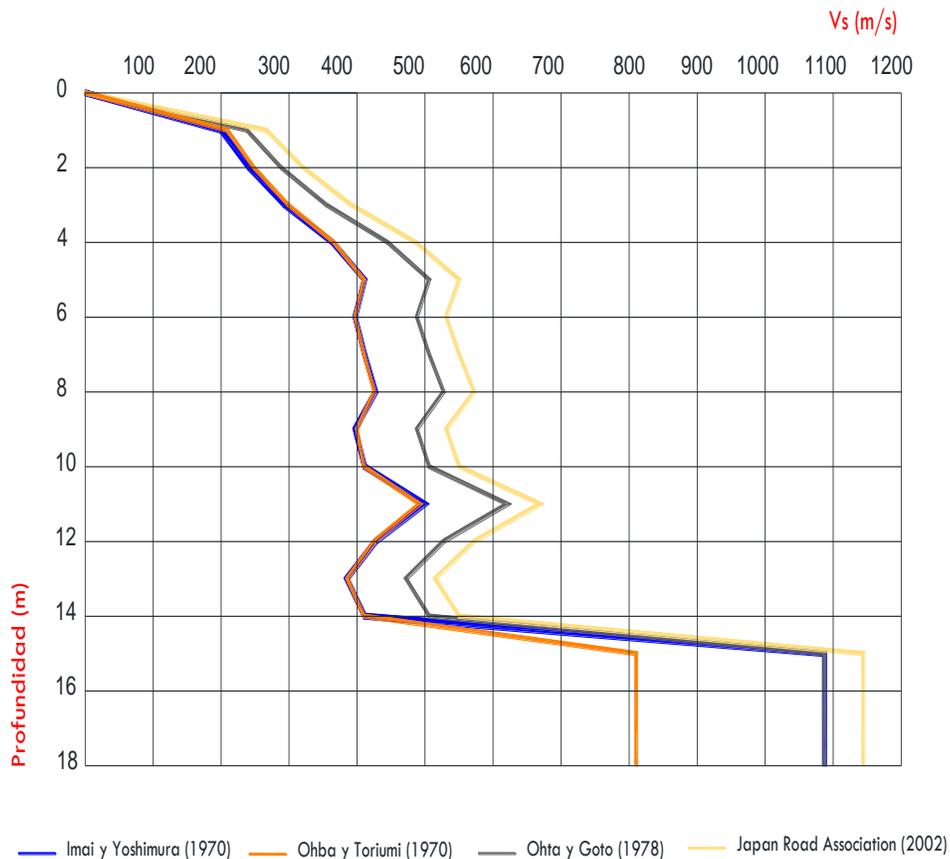


Figura 4.23 Modelo 2- Tamazunchale, calculando V_s a partir de la asunción de que se avanza 1 cm a los 50 golpes.

- **Sitio Cd. Victoria**

En el perfil estratigráfico de este punto se puede observar que el valor de N se reporta como 50 a partir de los 2 m, y que se registran los diferentes avances realizados a los 50 golpeteos, por lo que se calculó una N equivalente para casi todo el sondeo, tal como lo muestra la Tabla 4.9; posteriormente este valor se sustituyó en las ecuaciones empíricas, obteniendo las velocidades de onda de corte de la tabla 4.10.

Tabla 4.9 (Izquierda) Número de golpes reportados en el SPT realizado en Tamazunchale (izquierda) y Tabla 4.10 (derecha) parámetros utilizados para el cálculo de velocidades a partir del valor de N.

Profundidad (m)	N reportada en el SPT	N equivalente
1	21	21.00
2	50/15	100.00
3	50/10	150.00
4	50/6	250.00
5	50/10	150.00
6	50/6	250.00
7	50/4	375.00
8	50/11	136.36
9	50/6	250.00
10	50/8	187.50
11	50/5	300.00
12	50/11	136.36
13	50/10	150.00
14	50/7	214.29
15	50/9	166.67

SITIO CD. VICTORIA				
Ecuaciones empíricas de correlación				
Imai y Yoshimura (1970)				
A	N	b	N^b	V_s
76	21.00	0.33	2.73	207.56
76	100.00	0.33	4.57	347.39
76	136.36	0.33	5.06	384.83
76	150.00	0.33	5.23	397.12
76	166.67	0.33	5.41	411.17
76	187.50	0.33	5.62	427.47
76	214.29	0.33	5.88	446.73
76	250.00	0.33	6.18	470.04
76	300.00	0.33	6.57	499.19
76	375.00	0.33	6.57	499.19
Ohba y Toriumi (1970)				
84	21.00	0.31	2.57	215.86
84	100.00	0.31	4.17	350.17
84	136.36	0.31	4.59	385.51
84	150.00	0.31	4.73	397.07
84	166.67	0.31	4.88	410.25
84	187.50	0.31	5.07	425.51
84	214.29	0.31	5.28	443.49
84	250.00	0.31	5.54	465.20
84	300.00	0.31	5.86	492.25
84	375.00	0.31	6.28	527.51
Ohta y Goto (1978)				
85.34	21.00	0.348	2.88	246.20
85.34	100.00	0.348	4.97	423.79
85.34	136.36	0.348	5.53	472.09
85.34	150.00	0.348	5.72	488.01
85.34	166.67	0.348	5.93	506.24
85.34	187.50	0.348	6.18	527.42
85.34	214.29	0.348	6.47	552.51
85.34	250.00	0.348	6.83	582.96
85.34	300.00	0.348	7.28	621.14
85.34	375.00	0.348	7.87	671.30
Japan Road Association (2002)				
100	21.00	1/3	2.76	275.89
100	100.00	1/3	4.64	464.16
100	136.36	1/3	5.15	514.71
100	150.00	1/3	5.31	531.33
100	166.67	1/3	5.50	550.32
100	187.50	1/3	5.72	572.36
100	214.29	1/3	5.98	598.41
100	250.00	1/3	6.30	629.96
100	300.00	1/3	6.69	669.43
100	375.00	1/3	7.21	721.12

La Figura 4.24 muestra el comportamiento de V_s contra profundidad, de acuerdo con lo obtenido en las tablas anteriores.

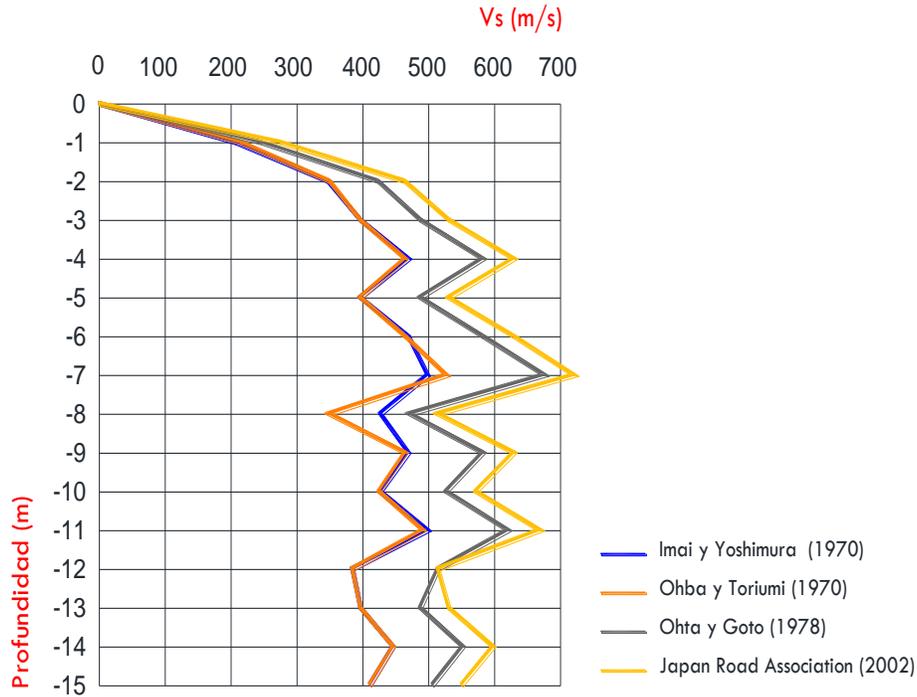


Figura 4.24 Distribución de V_s resultantes de las ecuaciones empíricas.

- **Sitio Cd. Guerrero**

Finalmente, en este sitio el SPT avanzó únicamente ocho metros, registrando los siguientes números de golpes:

Tabla 4.11 Número de golpes reportados en el SPT (izquierda) y su equivalencia calculada en los diferentes avances.

Profundidad (m)	N reportada en el SPT	N equivalente
1	18	18.00
2	50/13	115.38
3	50/17	88.24
4	50/20	75.00
5	50/18	83.33
6	50/10	150.00
7	50/15	100.00
8	25	25.00

A partir de esta información, se sustituyeron los valores correspondientes en las ecuaciones empíricas, obteniendo las siguientes velocidades conforme a cada autor:

Tabla 4.12 Parámetros utilizados en las ecuaciones empíricas y Vs resultante para cada valor de N registrado.

SITIO CD. GUERRERO				
Ecuaciones empíricas de correlación				
Imai y Yoshimura (1970)				
A	N	b	N^b	V_s
76	18.00	0.33	2.60	197.27
76	25.00	0.33	2.89	219.85
76	75.00	0.33	4.16	315.92
76	83.33	0.33	4.30	327.10
76	88.23	0.33	4.39	333.33
76	100.00	0.33	4.57	347.39
76	115.38	0.33	4.79	364.19
76	150.00	0.33	5.23	397.12
Ohba y Toriumi (1970)				
84	18.00	0.31	2.45	205.79
84	25.00	0.31	2.71	227.85
84	75.00	0.31	3.81	320.29
84	83.33	0.31	3.94	330.92
84	88.23	0.31	4.01	336.84
84	100.00	0.31	4.17	350.17
84	115.38	0.31	4.36	366.05
84	150.00	0.31	4.73	397.07
Ohta y Goto (1978)				
85.34	18.00	0.348	2.73	233.34
85.34	25.00	0.348	3.07	261.60
85.34	75.00	0.348	4.49	383.42
85.34	83.33	0.348	4.66	397.73
85.34	88.23	0.348	4.75	405.72
85.34	100.00	0.348	4.97	423.79
85.34	115.38	0.348	5.22	445.43
85.34	150.00	0.348	5.72	488.01
Japan Road Association (2002)				
100	18.00	1/3	2.62	262.07
100	25.00	1/3	2.92	292.40
100	75.00	1/3	4.22	421.72
100	83.33	1/3	4.37	436.78
100	88.23	1/3	4.45	445.19
100	100.00	1/3	4.64	464.16
100	115.38	1/3	4.87	486.84
100	150.00	1/3	5.31	531.33

En la Figura 4.25 se observa la distribución de las Vs resultantes de la tabla 4.12.

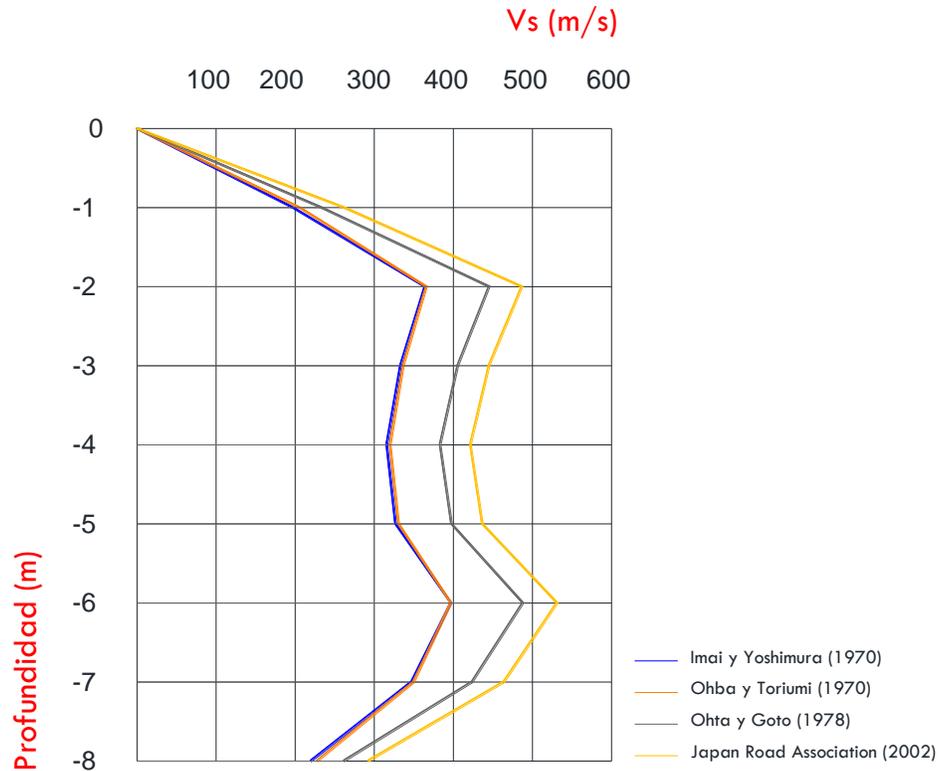


Figura 4.25 Modelo 1-Cd. Guerrero". Distribución de Vs resultantes de las ecuaciones empíricas, calculadas hasta la profundidad de 8 m.

En este punto es prudente mencionar que la prueba de downhole realizada en el sitio profundiza 30 m, asumiendo que el sondeo mecánico se detuvo al registrar seis metros continuos con 50 golpes, ya que de acuerdo con la norma, la prueba SPT se puede detener al registrar los 50 golpes o al contacto con la roca. Por lo anterior, se puede considerar que a partir de los 8 m y hasta los 30 m de la columna total del pozo, el área presentaría una velocidad concerniente a la de una roca, es decir, de acuerdo con el IBC (2009) una Vs de 762 m/s (como mínimo). Bajo esta premisa, al igual que el sitio Tamazunchale, se propuso un modelo que considera el espesor faltante (en este caso 22 m), con la limitativa de que la velocidad de onda de corte es constante y no se puede calcular con las ecuaciones empíricas, tal como lo muestra la Figura 4.26.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

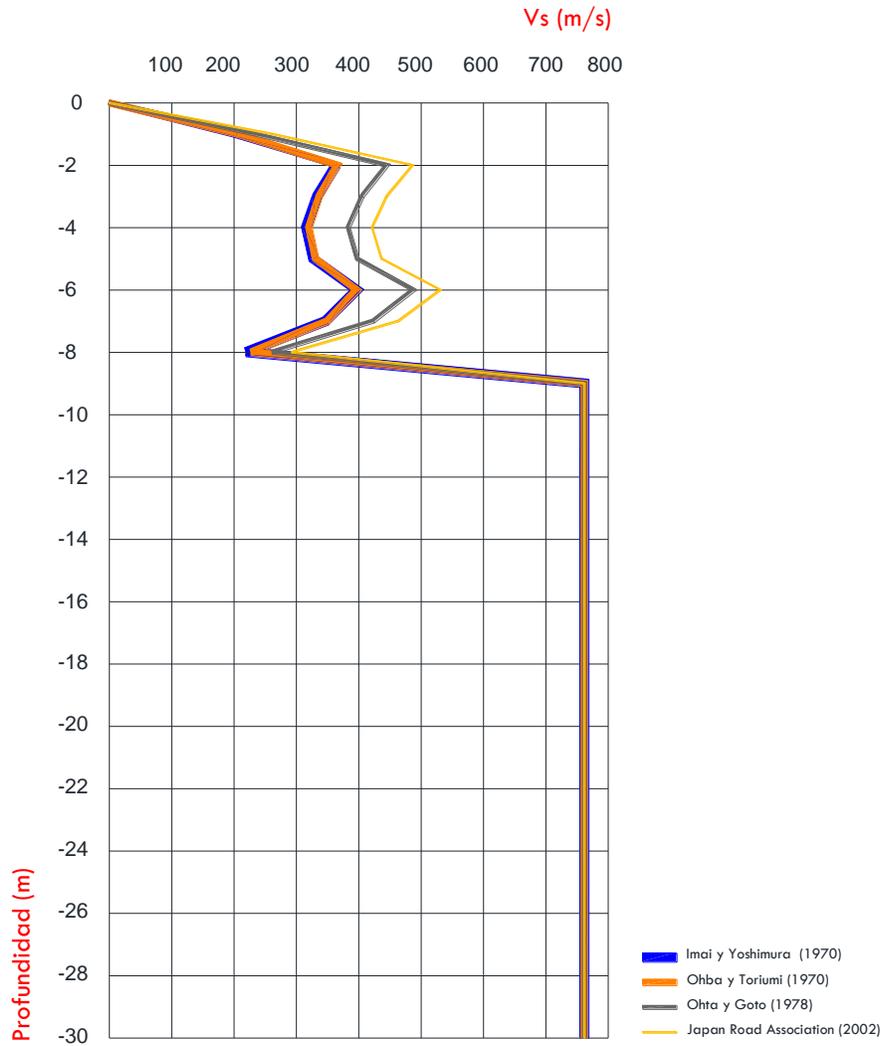


Figura 4.26 "Modelo 2- Cd. Guerrero", Distribución de V_s resultantes de las ecuaciones empíricas calculadas hasta la profundidad de 8 m; se observa una velocidad constante de 762 m/s a partir de los 9 m.

5. INTEGRACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Comparación de Vs obtenidas con métodos sísmicos

En este apartado se muestran los resultados de velocidad de onda de corte obtenidas a partir de los tendidos de sísmica activa (MASW) y de los ensayos de sísmica de pozo (Downhole). Para tener un punto de comparación, estas velocidades han sido clasificadas de acuerdo con el IBC (2009):

Tabla 5.1 Clasificación sísmica de suelos (IBC, 2009)

Perfil de suelo	Velocidad de onda de corte (m/s)
Roca Dura	$V_s > 1524$
Roca	$762 < V_s \leq 1524$
Roca suave y/o suelo muy denso	$366 < V_s \leq 762$
Suelo rígido	$183 \leq V_s \leq 366$
Suelo suave	$V_s < 183$

A partir de esta clasificación se realiza un análisis comparativo del comportamiento sísmico para los intervalos geosísmicos detectados, tal como se describe a continuación.

- **Sitio Tamazunchale**

En este punto se detectaron cuatro unidades geosísmicas, en donde el ensayo de MASW registró velocidades de onda de corte de 335 m/s a 1668 m/s, mientras que el ensayo de Downhole caracterizó a la zona con Vs de 170 a 2623 m/s, tal como se muestra a continuación.

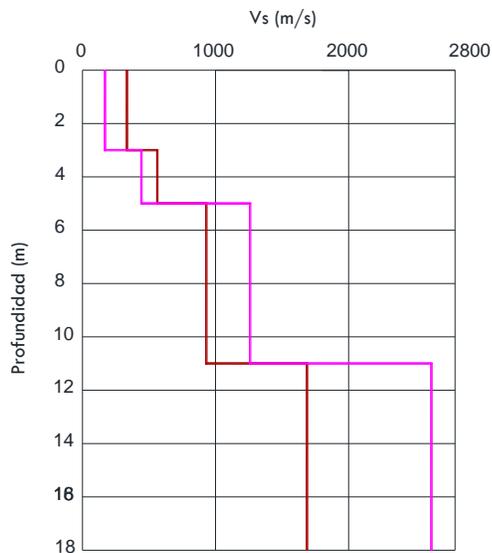


Figura 5.1 Perfil de Vs contra profundidad, graficados con los resultados de MASW (café) y el ensayo de Downhole (magenta).

Tabla 5.2 Comparación de velocidades de onda de corte obtenidas con dos metodologías sísmicas y su clasificación de suelos, pertenecientes al sitio Tamazunchale.

MASW			DOWNHOLE		
Z (m)	Vs (m/s)	Tipo de suelo (IBC, 2009)	Z(m)	Vs (m/s)	Tipo de Suelo (IBC, 2009)
0-3	335	Suelo rígido	0-3	170	Suelo suave
3-5	563	Roca suave y/o suelo muy denso	3-5	444	Roca suave y/o suelo muy denso
5-11	931	Roca	5-11	1260	Roca
11- 18	1688	Roca dura	11-18	2623	Roca Dura

De acuerdo con los resultados obtenidos puede observar que únicamente los primeros tres metros de la columna del pozo no se perfilan como el mismo tipo de suelo, puesto que la prueba de MASW, clasifica los tres primeros metros como suelo rígido, mientras que en el ensaye downhole los clasifica como suelo suave. No obstante, a partir de los cinco metros, ambas técnicas detectan la roca (de 5 a 11 m) y posteriormente la roca dura (11 a 18 m).

- **Sitio Cd. Victoria**

Se caracterizó la zona con tres unidades geosísmicas, de acuerdo con los resultados del ensaye de MASW el sitio presenta velocidades de onda de corte entre 250 y 480 m/s y de 154 a 543 m/s respecto con lo resultante del ensaye de Downhole, tal como se muestra en la Tabla 5.3. En comparativa con el sitio de Tamazunchale, el rango de velocidades es menos variable, ya que en este sitio las Vs obtenidas de ambas pruebas muestran una mayor similitud (Ver figura 5.2).

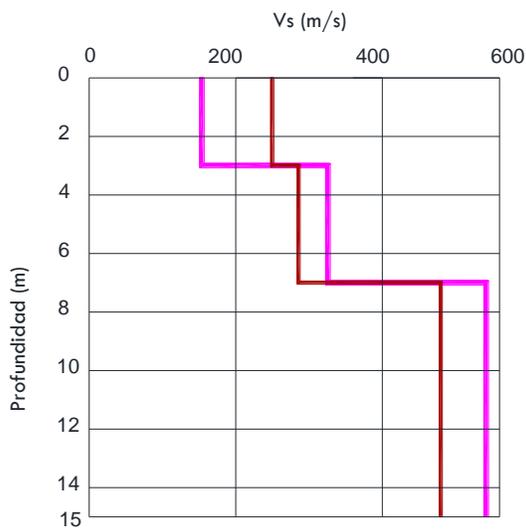


Figura 5.2 Perfil de Vs contra profundidad, graficados con los resultados de MASW (café) y el ensaye de Downhole (magenta)

Tabla 5.3 Comparación de velocidades de onda de corte obtenidas con dos metodologías sísmicas y su clasificación de suelos, pertenecientes al punto de Cd. Victoria.

MASW			DOWNHOLE		
Z (m)	Vs (m/s)	Tipo de suelo (IBC, 2009)	Z(m)	Vs (m/s)	Tipo de Suelo (IBC, 2009)
0-3	250	Suelo rígido	0-3	154	Suelo suave
3-7	286	Suelo rígido	3-7	326	Suelo rígido
7-15	480	Roca suave y/o suelo muy denso	7-15	543	Roca suave y/o suelo muy denso

Conforme estos resultados, se puede apreciar que al igual que el sitio anterior, los primeros tres metros y/o la primera capa geosísmica, es clasificada de manera diferente por las dos técnicas, esto es debido a la capa superficial presenta 250 m/s de acuerdo con el ensaye MASW (clasificado como suelo rígido), mientras que el ensaye downhole la detecta con 154 m/s (dentro de la clasificación de suelo suave). No obstante, las siguientes capas geosísmicas, se clasifican como el mismo perfil de suelo pese a presentar velocidades sísmicas diferentes.

• **Sitio Cd. Guerrero**

En esta zona los 29 m se delimitaron como cinco unidades geosísmicas, cuyos intervalos se muestran en la Tabla 5.4. Las Vs detectadas con el ensaye de MASW estuvieron dentro del rango de 227 a 427 m/s, es decir, no varían significativamente, mientras que con el ensaye downhole, las velocidades ocupan un rango mayor que van desde los 172 m/s a los 717 m/s. La Figura 5.3 muestra la comparación de las velocidades de onda de corte obtenidas con estas dos técnicas sísmicas.

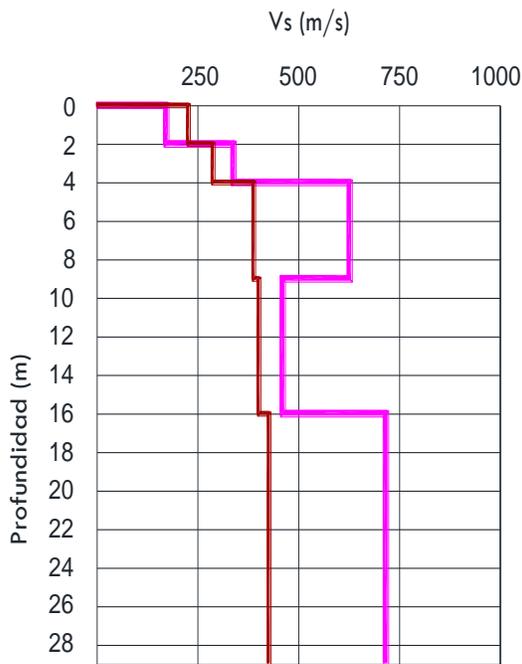


Figura 5.3 Perfil de Vs contra profundidad, graficados con los resultados de MASW (café) y el ensaye de Downhole (magenta).

Tabla.5.4 Comparación de velocidades de onda de corte obtenidas con dos metodologías sísmicas y su clasificación de suelos, pertenecientes al punto de Cd. Guerrero.

MASW			DOWNHOLE		
Z (m)	Vs (m/s)	Tipo de suelo (IBC, 2009)	Z(m)	Vs (m/s)	Tipo de Suelo (IBC, 2009)
0-2	227	Suelo rígido	0-2	172	Suelo suave
2-4	288	Suelo rígido	2-4	339	Suelo rígido
4-9	389	Roca suave y/o suelo muy denso	4-9	627	Roca suave y/o suelo muy denso
9-16	402	Roca suave y/o suelo muy denso	9-16	461	Roca suave y/o suelo muy denso
16-29	427	Roca suave y/o suelo muy denso	16-29	717	Roca suave y/o suelo muy denso

Acorde con los resultados descritos con anterioridad, se puede apreciar que cuatro de las cinco unidades geosísmicas se perfilan como el mismo tipo de suelo (de los 2 a los 29 m), y que únicamente la primera capa (de los 0 a los 2 m) no se clasifica como el mismo tipo de suelo, denominándose suelo rígido y suelo suave de acuerdo con el ensaye de MASW y Downhole, respectivamente.

5.2 Comparación de V_s obtenidas con métodos sísmicos y métodos empíricos

En este último apartado, se comparan las velocidades de onda de corte obtenidas con las tres diferentes metodologías aplicadas, su perfil de suelo y finalmente, se realiza una correlación con la descripción geotécnica reportada en las pruebas de SPT realizadas en cada sitio.

Cabe mencionar que las velocidades de onda de corte obtenidas con las correlaciones fueron promediadas de acuerdo con los espesores que reportaron los métodos sísmicos.

- Sitio Tamazunchale

En la figura 5.4 se observa el graficado de las velocidades de onda de corte contra profundidad, donde cada metodología aplicada se identifica con líneas de diferente color. De manera general, se aprecia que las V_s resultantes de las ecuaciones empíricas son significativamente más lentas que las obtenidas a partir de los métodos sísmicos, ya que las primeras se mantienen en un rango de 200 a 600 m/s, mientras que las segundas se encuentran entre 200 y 2000 m/s.

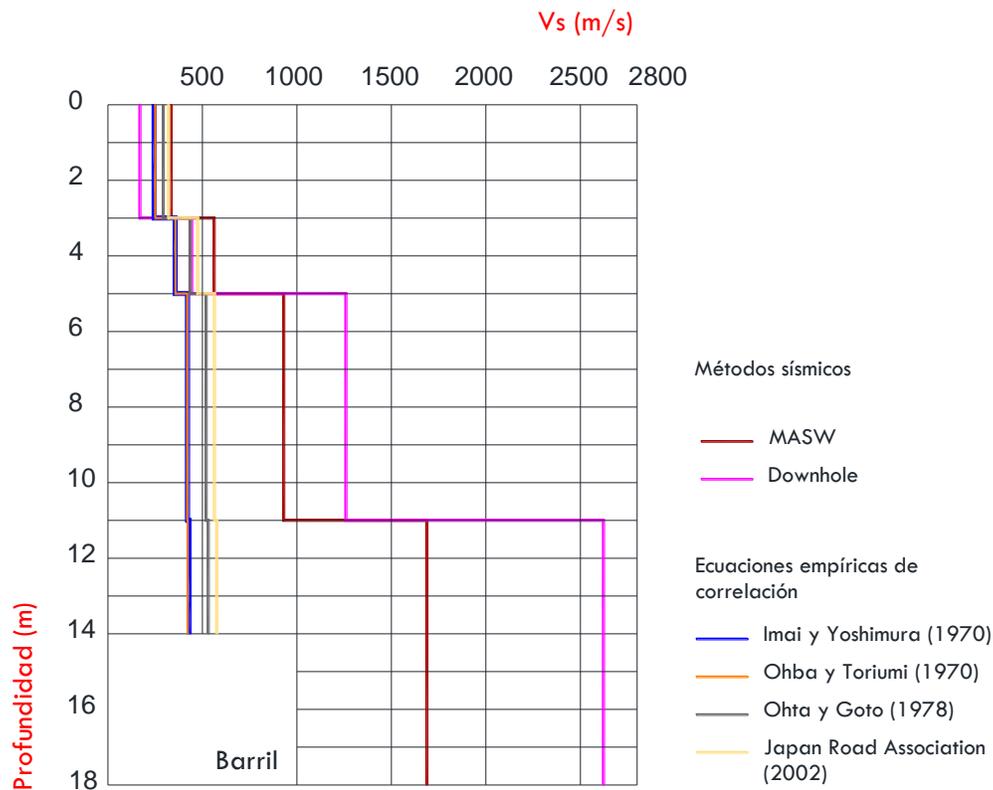


Figura 5.4 "Modelo 1" Perfil de V_s contra profundidad, graficados con los resultados de las diferentes metodologías aplicadas. Se puede observar que la distribución de V_s calculada con las correlaciones profundizan hasta los 14 m, debido a la ausencia de datos a partir de esta profundidad.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

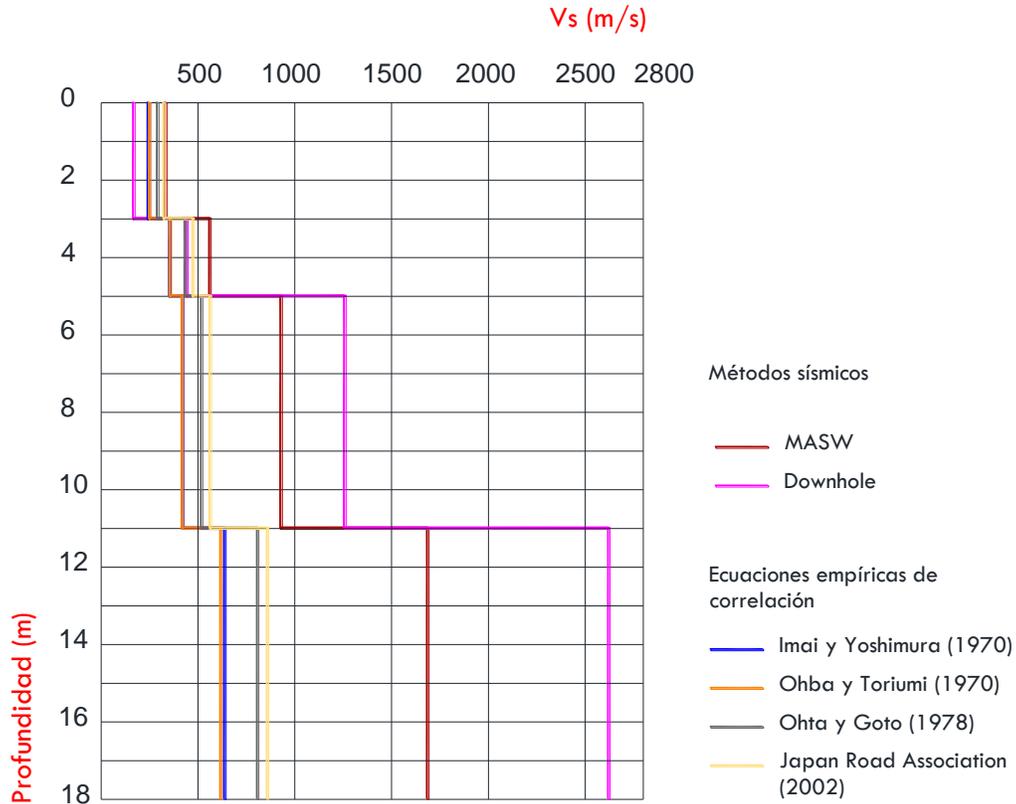


Figura. 5.5 “Modelo 2” Perfil de Vs contra profundidad, graficados con los resultados de las diferentes metodologías aplicadas. En esta gráfica los valores de Vs obtenidos con las ecuaciones se calcularon hasta los 18 m gracias a una proporción estimada para calcular N.

A partir de las gráficas anteriores, se realizó una clasificación de suelos (IBC,2009) para cada unidad geosísmica, en donde cada perfil de suelo se identifica con el cambio de tonalidades amarillas a café. En la Tabla 5.5 se muestran las capas, espesores, Vs y perfil de suelo realizado para el “Modelo 1”, además de anexar la descripción geotécnica reportada por el SM.

Por otra parte, los valores concernientes al “Modelo 2”, se muestran en la Tabla 5.6. Cabe mencionar que dicho modelo varía únicamente en la capa base, ya que este espesor es únicamente el que tenía la limitativa de valores, analizados en la Figura 5.4.

Tabla 5.5 Clasificación de suelos a partir de las velocidades de onda de corte de las unidades geosísmicas correspondientes al “Modelo 1-Tamazunchale”

UNIDADES GEOSÍSMICAS CORRESPONDIENTES AL “MODELO 1 – TAMAZUNCHALE”							
Descripción geotécnica	Z (m)	Métodos sísmicos		Ecuaciones de correlación			
		MASW	DH	Imai y Yoshimura (1970)	Ohba y Toriumi (1970)	Ohta y Goto (1978)	Japan Road Associaton (2002)
Capa superficial de arcillas de consistencia firme a muy dura y lutita muy fracturada	0-3	335	170	245	252	294	326
Lutita muy fracturada empacada en arcilla	3-5	563	444	356	358	435	476
Lutita, de muy fracturada a semifracturada, empacada en arcilla.	5-11	931	1260	422	420	520	565
Lutita semifracturada, empacada en arcilla	11-14	1688	2623	430	428	532	577

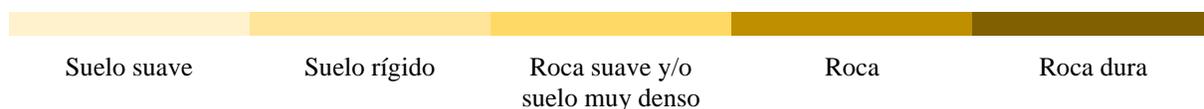
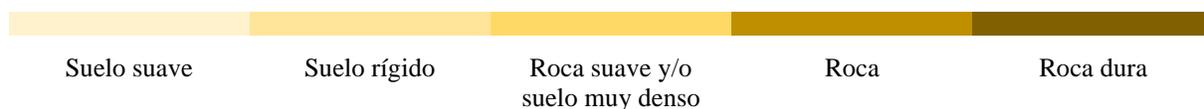


Tabla 5.6 Clasificación de suelos para las unidades geosísmicas correspondientes al “Modelo 2-Tamazunchale”

UNIDADES GEOSÍSMICAS CORRESPONDIENTES AL “MODELO 2 – TAMAZUNCHALE”							
Descripción geotécnica	Z (m)	Métodos sísmicos		Ecuaciones de correlación			
		MASW	DH	Imai y Yoshimura (1970)	Ohba y Toriumi (1970)	Ohta y Goto (1978)	Japan Road Associaton (2002)
Capa superficial de arcillas de consistencia firme a muy dura y lutita muy fracturada	0-3	335	170	245	252	294	326
Lutita muy fracturada empacada en arcilla	3-5	563	444	356	358	435	476
Lutita, de muy fracturada a semifracturada, empacada en arcilla.	5-11	931	1260	422	420	520	565
Lutita semifracturada, empacada en arcilla	11-18	1688	2623	640	620	810	861



Conforme a los resultados anteriores se determinó que tanto en el Modelo 1 como en el 2, todas las metodologías (a excepción de la sísmica de pozo) clasifican los tres primeros metros como suelo rígido, puesto que el downhole perfila esta unidad como suelo suave; geotécnicamente este es un cambio considerable debido a que el cálculo de cimentación en los primeros metros varía significativamente de suelos suaves a suelos rígidos.

Siguiendo la secuencia, el intervalo de los 3 a los 5 m registrado en los dos modelos se clasifica como suelo rígido conforme a las ecuaciones propuestas en 1970 y que, de acuerdo con los autores contemporáneos y las metodologías sísmicas, dichas velocidades conciernen a una roca suave y/o suelo muy denso. Desde el punto de vista geotécnico los cálculos para ambos perfiles de suelos son muy similares, lo cual es congruente con sus velocidades sísmicas, ya que existe una diferencia entre ellas de tan solo 200 m/s.

Posteriormente, la tercera unidad ubicada a la profundidad de 5 y hasta los 11 m se clasifica como roca en los modelos anteriores, esto de acuerdo con la velocidad de onda de corte obtenida con los métodos sísmicos y como roca suave y/o suelo muy denso conforme los autores de las ecuaciones empíricas. Geotécnicamente, ambas clasificaciones pueden definirse como roca y, dado que la descripción geotécnica reporta lutita con diferente grado de fracturamiento, además de encontrarse empacada en arcilla, probablemente este sea el motivo de la variación de velocidades y consecuentemente, el cambio de perfil de suelo.

Finalmente, la capa que funge como basamento en el Modelo 1 se perfila como roca dura (V_s resultantes de métodos sísmicos) y como roca suave y/o suelo muy denso (V_s resultantes de ecuaciones empíricas). Con base en la descripción geotécnica, se infiere que existe una mayor congruencia con el perfil de suelo asignado a las velocidades de onda de corte obtenidas con las ecuaciones, puesto que para que la lutita se perfile como una roca dura, no tendría que presentar fracturamiento. No obstante, desde la perspectiva de los cálculos geotécnicos, la variación en la clasificación de la roca es relativa, al considerarse que geotécnicamente una velocidad mayor a 762 m/s concierne a una roca, considerándose un terreno firme.

Por otra parte, la capa base del modelo 2 se clasifica como una roca dura según los métodos sísmicos, como una roca suave y/o suelo muy denso conforme Imai y Yoshimura y Ohba y Toriumi, y como una roca de acuerdo a las ecuaciones propuestas por Ohta y Goto y Japan Road Association. Esta variación en el rango de velocidades (y por lo tanto en la clasificación de suelos), es producto de las velocidades promediadas hasta los 18 m, en donde N se calculó bajo la premisa de que la herramienta solo avanzó un centímetro al golpear 50 veces, por lo que es lógico que se promediara una velocidad mayor al considerar un mayor espesor.

- Sitio “Cd Victoria

En la Figura 5.6 se observa la distribución de Vs contra profundidad, resultante de las diferentes metodologías aplicadas. Al igual que el sitio anterior, se observa que las Vs correspondientes a los métodos sísmicos ocupan un rango más amplio que el de las ecuaciones empíricas, no obstante, las velocidades de todas las metodologías no varían drásticamente como en Tamazunchale, manteniéndose en el rango de 200 a 600 m/s, aproximadamente.

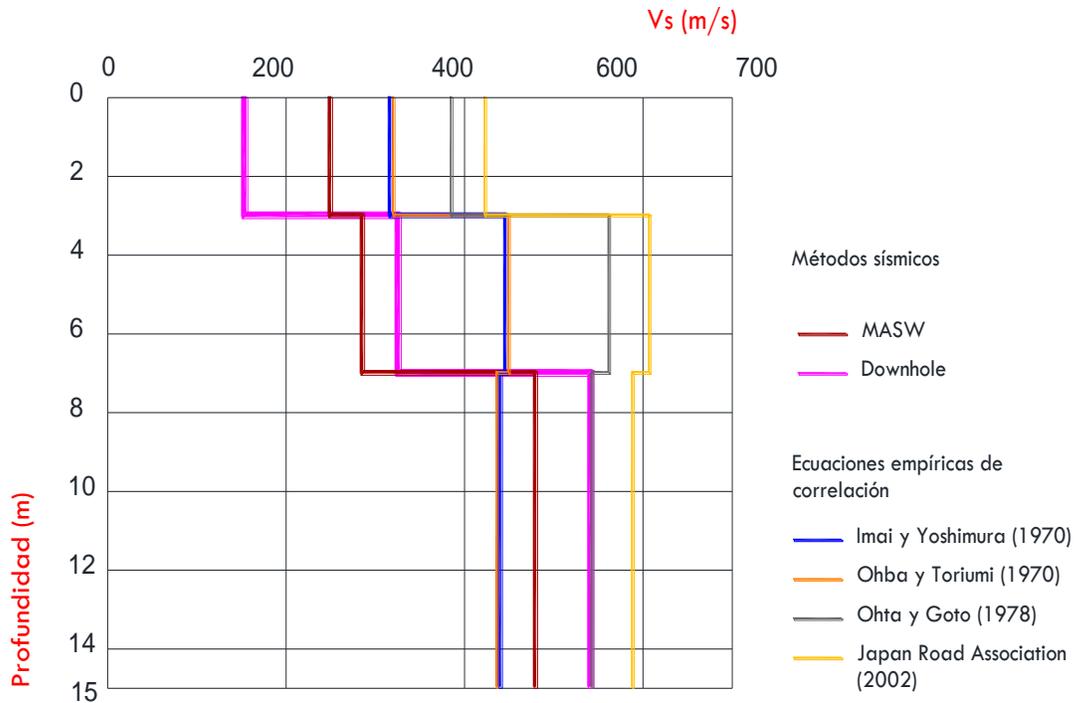


Figura 5.6 Perfil de Vs contra profundidad, graficados con los resultados de las diferentes metodologías aplicadas en Cd. Victoria.

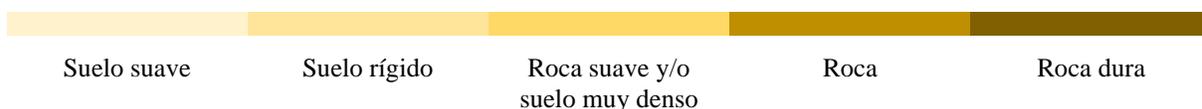
A partir de estas velocidades se realizó una clasificación de suelos (IBC,2009), además de correlacionarlas con la descripción geotécnica reportada en el sitio. Los espesores, velocidades y perfiles de suelo para cada unidad geosísmica, se resumen en la Tabla 5.7.

De manera general se observa que la clasificación realizada va de suelos suaves a roca suave y/o suelo muy denso, no registrándose velocidades concernientes a una roca y/o roca dura, esto es congruente con la descripción geotécnica reportada puesto que se reportan depósitos de diferente consistencia/compacidad.

El análisis de variación de velocidades obtenidas y clasificación de suelo conforme a cada metodología se describe a continuación.

Tabla 5.7 Clasificación de suelos para las unidades geosísmicas correspondientes a Cd. Victoria.

UNIDADES GEOSÍSMICAS DETECTADAS EN EL PUNTO DE CD. VICTORIA							
Descripción geotécnica	Z (m)	Métodos sísmicos		Ecuaciones de correlación			
		MASW	DH	Imai y Yoshimura (1970)	Ohba y Toriumi (1970)	Ohta y Goto (1978)	Japan Road Associaton (2002)
Capa superficial de arcilla de firme a muy dura y grava muy compacta	0-3	250	154	317	321	386	424
Depósito de gravas muy compactas y arcillas de consistencia muy dura	3-7	286	326	447	450	563	609
Depósito de arcillas de consistencia muy dura	7-15	480	543	440	437	544	589



Acorde a estos resultados, la primera capa es clasificada como suelo únicamente por la sísmica de pozo, mientras que el ensaye de MASW, Imai y Yoshimura y Ohba y Toriumi la perfilan como un suelo rígido. Por su parte, Ohta y Goto y Japan Road Associaton la clasifican como una roca suave y/o suelo muy denso. De manera estricta, el cambio relevante entre dicha clasificación sería el obtenido con el ensaye de donwhole, ya que los calculos geotécnicos varían considerablemente en las capas superficiales tratándose de un suelo suave.

En lo que respecta al segundo estrato, el perfil de suelo asignado se muestra más uniforme, clasificándose como suelo rígido (conforme lo obtenido con los métodos sísmicos) y como roca suave y/o suelo muy denso (de acuerdo a las Vs resultantes de las ecuaciones empíricas). Geotécnicamente ambos perfiles podrían considerarse como el mismo estrato, dado que un suelo rígido y un suelo muy denso presentan una rigidez competente, además, considerando que esta capa tiene contenido granular (gravas) y fino (arcillas), cualquiera de estos dos suelos es estratigráficamente congruente con la descripción geotécnica.

Por último, la capa base es perfilada como el mismo tipo de suelo de acuerdo con las velocidades registradas en los métodos sísmicos y las ecuaciones empíricas, por lo que el depósito de arcillas de consistencia muy dura es perfilado como una roca suave y/o suelo muy denso.

- Sitio Cd Guerrero

Las velocidades de onda de corte resultantes de las metodologías aplicadas fueron graficadas contra profundidad, donde la Vs representativa de cada método se identifica con líneas de diferente color. Al igual que en Tamazunchale, en este sitio se proponen dos modelos, el primero considerando únicamente la información del SPT (hasta los 8 m) y un segundo modelo propuesto, con el que se calcularon valores hasta los 29 m de la longitud total del pozo.

Considerando lo anterior, el primer modelo muestra que para los métodos sísmicos se calcularon velocidades hasta los 29 m de la columna total del pozo, mientras que las velocidades resultantes de las ecuaciones pudieron graficarse únicamente hasta los 8 m (Figura 5.7) debido a que no se tiene información de número de golpes que puedan sustituirse en las ecuaciones

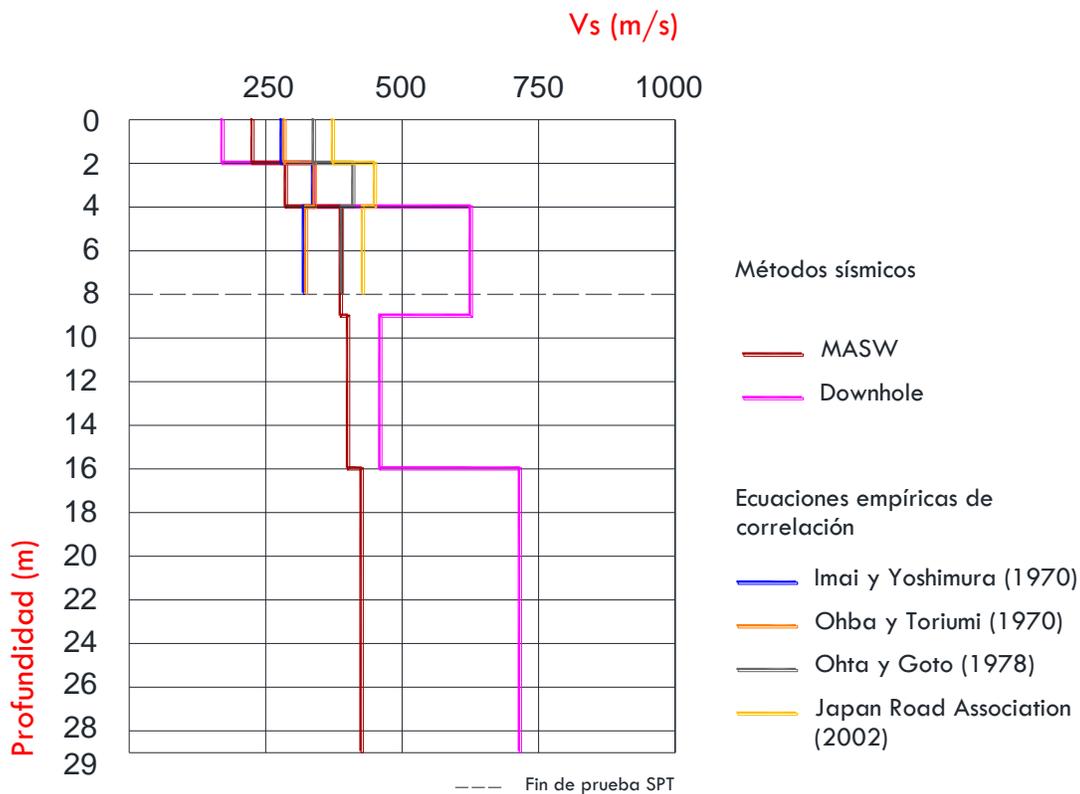


Figura 5.7 “Modelo 1-Cd. Guerrero” Perfil de Vs contra profundidad, graficados con los resultados de las diferentes metodologías aplicadas. Se puede observar que la distribución de Vs calculada con las correlaciones profundiza hasta los 8 m, esto debido a la ausencia de datos (número de golpes) a partir de esta profundidad.

Con el fin de poder realizar una correlación hasta la profundidad deseada, se hicieron las consideraciones detalladas en el apartado 4.3, obteniendo una velocidad constante para las ecuaciones a partir de los 9 m, como lo ilustra la Figura 5.8. Es importante mencionar que este modelo es cualitativo, y que los valores de Vs a partir de los 9 y hasta los 29 m, no

fueron calculados con las ecuaciones, por lo que se asume que todos los autores obtienen el mismo valor de velocidad de onda de corte.

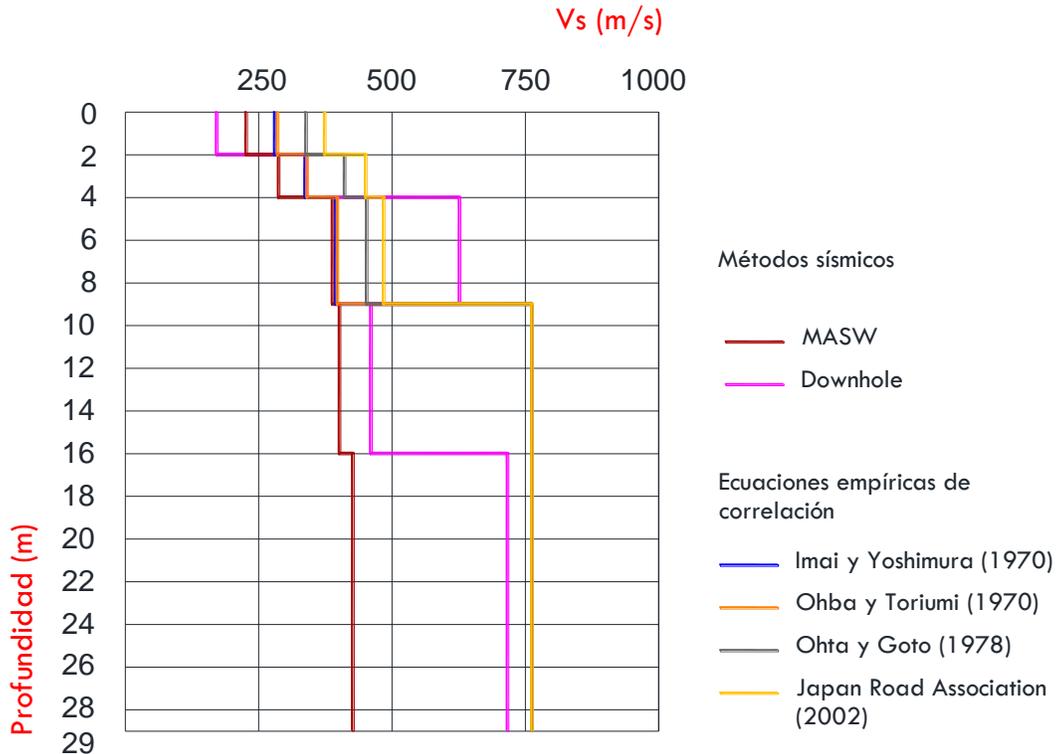


Figura 5.8 “Modelo 2-Cd. Guerrero” Perfil de V_s contra profundidad, graficados con los resultados de las diferentes metodologías aplicadas, con fines interpretativos, se consideró una V_s constante para las ecuaciones a partir de los 9 m de profundidad.

A partir de las gráficas anteriores, se realizó una clasificación de suelos (IBC,2009) para cada unidad geosísmica, en donde cada perfil de suelo se identifica con el cambio de tonalidades, cuyo perfil se indica en la parte inferior de cada tabla.

Las características de espesores, velocidades y clasificación de suelos para el “Modelo 1”, se resume en la Tabla 5.8, y las correspondientes al “Modelo 2” se muestran en la Tabla 5.9. En ambas tablas se anexa la descripción geotécnica reportada por el SM, que como se ha venido mencionado profundiza únicamente hasta los 8 m, por lo que se carece de descripción geotécnica para las dos últimas capas geosísmicas.

De manera general se observa que las velocidades de onda de corte mínimas detectadas se correlacionan a un suelo suave y las máximas se asocian con una roca suave y/o suelo muy denso, no detectándose la roca y/o la roca dura.

Tabla 5.8 Clasificación de suelos a partir de las velocidades de onda de corte de las unidades geosísmicas correspondientes al “Modelo 1-Cd. Guerrero”

UNIDADES GEOSÍSMICAS DETECTADAS EN EL PUNTO DE CD. GUERRERO							
Descripción geotécnica	Z (m)	Métodos sísmicos		Ecuaciones de correlación			
		MASW	DH	Imai y Yoshimura (1970)	Ohba y Toriumi (1970)	Ohta y Goto (1978)	Japan Road Associaton (2002)
Capa superficial de limos con grava	0-2	227	172	281	286	340	374
Depósito de arenas y arcillas con gravas	2-4	288	339	338	341	412	451
Depósito de arenas con gravas y limos	4-8	389	627	321	325	391	429

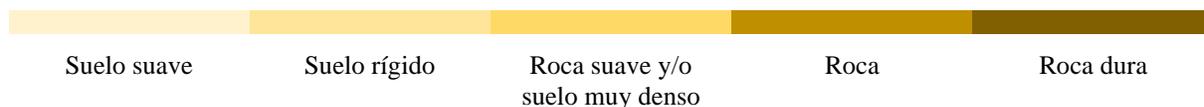
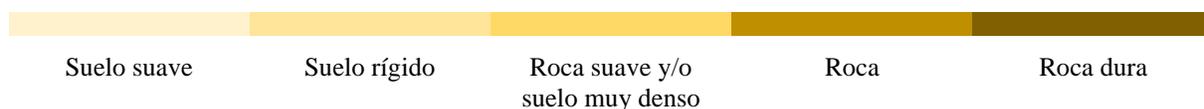


Tabla 5.9 Clasificación de suelos a partir de las velocidades de onda de corte de las unidades geosísmicas correspondientes al “Modelo 2-Cd. Guerrero”.

UNIDADES GEOSÍSMICAS DETECTADAS EN EL PUNTO DE CD. GUERRERO							
Descripción geotécnica	Z (m)	Métodos sísmicos		Ecuaciones de correlación			
		MASW	DH	Imai y Yoshimura (1970)	Ohba y Toriumi (1970)	Ohta y Goto (1978)	Japan Road Associaton (2002)
Capa superficial de limos con grava	0-2	227	172	281	286	340	374
Depósito de arenas y arcillas con gravas	2-4	288	339	338	341	412	451
Depósito de arenas con gravas y limos	4-9	389	627	395	472	516	542
-	9-16	402	461	762	762	762	762
-	16-29	427	717	762	762	762	762



De acuerdo con las tablas anteriores se observa que las primeras dos capas se clasifican con los mismos perfiles de suelo en ambos modelos, puesto que se usó la misma información en el cálculo de V_s , dicha clasificación va de la siguiente manera:

Únicamente el ensaye downhole perfila los primeros dos metros como suelo suave, mientras que la técnica de MASW y tres pares de autores (Imai y Yoshimura, Ohba y Toriumi y Ohta y Goto) perfilan esta capa como suelo rígido, y sólo la Japan Road Association la clasifica como roca suave y/o suelo muy denso. Tomando en consideración la descripción geotécnica, únicamente la clasificación resultante del downhole, no presentaría una congruencia ya que la presencia de gravas no suele atribuirse a un suelo suave, sería más bien clasificada como suelo rígido o muy denso, como lo perfilaron el resto de las metodologías.

Posteriormente, el estrato localizado de los 2 a los 4 m presenta una clasificación más homogénea, puesto que los métodos sísmicos y las ecuaciones propuestas en los 70's perfilan las velocidades resultantes como un suelo rígido. Por otro lado, Ohta y Goto (1978) y la Japan Road Association obtuvieron velocidades clasificados como roca suave y/o suelo muy denso. Geotécnicamente ambas clasificaciones pueden correlacionarse con la descripción de la mecánica de suelos.

La tercera capa tiene diferentes espesores, ya que el modelo 1 considera la profundidad del SPT mientras que el modelo 2, considera el espesor reportado por la sísmica. Se calculó de esta manera con el fin de evitar que la velocidad del modelo 1 decreciera al promediar la nula velocidad del metro faltante. Considerando lo anterior, el tercer estrato del modelo 1 es clasificado como un suelo rígido (conforme Imai y Yoshimura y Ohba y Toriumi) y como roca suave y/o suelo muy denso (de acuerdo con los métodos sísmicos, Ohta y Goto y la Japan Road Association), ambos perfiles son congruentes con lo reportado por la geotecnia, considerando la matriz del depósito.

Por otra parte, el modelo 2 clasifica esta tercera capa, como una roca suave y/o suelo muy denso según lo obtenido con todas las metodologías, este perfil de suelo, como se mencionó anteriormente, es pertinente a lo reportado en la descripción geotécnica.

Finalmente las capas detectadas desde los 9 m, hasta los 29, solo fueron clasificadas por el modelo 2, pues es el que se propuso y que estima que se detectaron velocidades mínimas de 762 m/s, que son en teoría el rango mínimo de una roca y el rango máximo para una roca suave y/o suelo suave, sin embargo, analizando las V_s obtenidas con los métodos sísmicos, se consideró conveniente clasificarlo como una roca suave y/o un suelo muy denso.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En el presente trabajo se aplicaron metodologías sísmicas mediante las técnicas de MASW y Downhole, con el objetivo de obtener la distribución de la velocidad de corte contra profundidad en puntos donde se plantea la construcción de tiendas departamentales, a fin de que esta información sirva de apoyo geotécnico para el desarrollo del proyecto.

Además de caracterizar la zona de acuerdo con sus propiedades elásticas, se obtuvieron los espesores y profundidades de los estratos, mismos que se correlacionaron con la información geotécnica reportada por sondeos realizados previamente.

Debido a que el ensaye downhole es una medición *in situ* y que permite obtener las velocidades de las ondas de cuerpo (V_p y V_s), se le considera una técnica integral por lo que se tomaron como base los espesores reportados con este método, pretendiendo que la única variable a comparar en las técnicas sísmicas y en las ecuaciones empíricas, sea la velocidad de onda de corte.

Los resultados obtenidos para cada sitio se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 6.1 Velocidades de onda de corte obtenidas en los tres sitios de estudio, obtenidos con las metodologías sísmicas aplicadas.

TAMAZUNCHALE			CD. VICTORIA			CD. GUERRERO		
Z (m)	MASW	DH	Z (m)	MASW	DH	Z (m)	MASW	DH
	Velocidad de onda de corte			Velocidad de onda de corte			Velocidad de onda de corte	
0-3	335	170	0-3	250	154	0-2	227	172
3-5	563	444	3-7	286	326	2-4	288	339
5-11	931	1260	7-15	480	543	4-9	389	627
11- 18	1688	2623	-	-	-	9-16	402	461
-	-	-	-	-	-	16-29	427	717

En la tabla anterior se puede observar que, pese a que las metodologías sísmicas se realizaron en el mismo punto, los resultados no fueron los mismos, esto se atribuye principalmente a los siguientes aspectos:

- Cada técnica parte del análisis de diferentes tipos de onda, es decir, el ensaye de MASW analiza las ondas superficiales para posteriormente obtener V_s , mientras que el downhole la obtiene a partir de la polarización de las ondas de cuerpo, específicamente de la Onda S.
- El ensaye multicanal realiza un promedio de las mediciones registradas a lo largo de un tendido lineal; el ensaye downhole en cambio, consiste en una medición puntual

que se realiza directamente sobre un barreno preparado específicamente a los alcances del estudio.

- Las cotas de espaciamento usadas entre los receptores varían entre cada técnica, siendo que los intervalos de medición del geófono de pozo se dispusieron a cada metro, mientras que el espaciamento entre los receptores del ensaye MASW fue de 2.5 m.

No obstante, incluso tomando en consideración las diferencias técnicas, se observó que los resultados obtenidos son en su mayoría similares, y que las velocidades son congruentes tanto con los perfiles de suelo como con la descripción geotécnica, a excepción de la capa superficial de los tres sitios registrada con el downhole, cuyas velocidades se aprecian subestimadas, esto se asume según lo reportado por la mecánica de suelos; por lo que se concluye de manera general que la técnica de MASW ofrece una mejor certeza en las capas superficiales, mientras que la técnica de downhole muestra una mayor certidumbre a profundidad, lo cual se denota con claridad en la exploración de Tamazunchale, ya que fue el único sitio donde la mecánica de suelos detectó la roca y en donde el ensaye downhole perfiló dichos estratos como tal, mientras que el ensaye de MASW lo clasificó como una roca suave y/o un suelo muy denso.

Posteriormente, en una segunda etapa del estudio, se obtuvieron velocidades de onda de corte por medio de ecuaciones empíricas de correlación. Estos cálculos fueron posibles gracias a información proporcionada por la mecánica de suelos y que consistió básicamente en el análisis de perfiles stratigráficos resultantes de pruebas de penetración estándar realizadas previamente en los sitios.

El cálculo de Vs obtenido de las ecuaciones propuestas por cuatro autores (*) fue el siguiente:

Tabla 6.2 Velocidades de onda de corte calculadas a partir de ecuaciones empíricas de correlación.

TAMAZUNCHALE					CD. VICTORIA					CD. GUERRERO				
Z (m)	Autores (*)				Z (m)	Autores (*)				Z (m)	Autores (*)			
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
	Velocidad de onda de corte					Velocidad de onda de corte					Velocidad de onda de corte			
0-3	245	252	294	326	0-3	317	321	386	424	0-2	281	286	340	374
3-5	356	358	435	476	3-7	447	450	563	609	2-4	338	341	412	451
5-11	422	420	520	565	7-15	440	437	544	589	4-8	321	325	391	429
11- 14	430	428	532	577	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

(*) 1 Imai y Yoshimura (1970), 2 Ohba y Toriumi (1970), 3 Ohta y Goto (1978); 4 Japan Road Association (2002)

De acuerdo con los resultados anteriores, se puede observar que los cálculos no se pudieron realizar para todos los estratos, debido a que la prueba se detuvo antes de alcanzar la longitud total del pozo, por lo que estrictamente hablando no se cuenta con valores de N para calcular las velocidades de los últimos estratos en dos de los sitios estudiados.

Con el objetivo de estimar las velocidades faltantes, se propusieron modelos en los que se asume que la prueba se detuvo al encontrar la roca, tal como lo supone la norma concerniente al método, asumiendo esto, en un primer caso (Tamazunchale) se estima que el equivalente a la prueba de barril es avanzar un centímetro a los 50 golpes, mientras que en un segundo caso (Cd. Guerrero) se infiere que la velocidad corresponde a 762 m/s (la de una roca, de acuerdo con el IBC, 2009); bajo estas premisas se obtuvieron nuevos valores de N y se estimaron velocidades de onda de corte, respectivamente. Los parámetros obtenidos son los siguientes:

Tabla 6.3 Velocidades de onda de corte calculadas a partir de ecuaciones empíricas de correlación y bajo premisas del interprete.

TAMAZUNCHALE					CD. VICTORIA					CD. GUERRERO				
Z (m)	Autores (*)				Z (m)	Autores (*)				Z (m)	Autores (*)			
	1	2	3	4		1	2	3	4		1	2	3	4
0-3	245	252	294	326	0-3	317	321	386	424	0-2	281	286	340	374
3-5	356	358	435	476	3-7	447	450	563	609	2-4	338	341	412	451
5-11	422	420	520	565	7-15	440	437	544	589	4-9	395	472	516	542
11- 18	640	620	810	861						9-16	762	762	762	762
										16-29	762	762	762	762

(*) 1 Imai y Yoshimura (1970), 2 Ohba y Toriumi (1970), 3 Ohta y Goto (1978); 4 Japan Road Associaton (2002)

Considerando los resultados de las ecuaciones empíricas, se concluye que éstos son satisfactorios únicamente en los modelos propuestos, ya que existe una congruencia con los perfiles de suelo y la descripción geotécnica reportada; sin embargo, los modelos resultantes de los cálculos realizados estrictamente con los números de golpes reportados, se consideran insuficientes, además de que no existe una concordancia con el perfil de suelo asignado y la litología descrita por la mecánica de suelos.

Por lo anterior se recomienda utilizar correlaciones preferentemente cuando la prueba SPT se realice específicamente en depósitos, tal como lo especifica la norma D1586-11, ya que de existir boleos y/o roca, no se tendrá un valor de N que sustituir en las ecuaciones. No obstante, es importante mencionar que incluso aplicándola únicamente en suelos existe la posibilidad de que se calculen velocidades constantes si es que se reportan espesores continuos con 50 golpes, lo cual es muy común en dichas pruebas; en estos casos, se

recomienda adicionalmente calcular una N representativa de aquellos estratos en los que se cumplan los 50 golpes pero que se realicen diferentes avances, ya que teóricamente esta diferencia es indicativa de un contraste de rigidez en los estratos.

Por último, al hacer una correlación de los métodos geofísicos y los métodos empíricos, se observó que los primeros ofrecen la ventaja de que profundizaron la longitud total del pozo, la cual fue realizada de acuerdo con los alcances del proyecto constructivo de casa sitio. La aplicación de las técnicas sísmicas, además, no tiene una “limitativa” en cuanto a perfiles de suelo y/o roca, obteniendo resultados característicos en ambos ambientes, incluso más favorables en la presencia de la roca; mientras que las ecuaciones empíricas son más representativas en perfiles de suelo. Esto no significa que se limiten únicamente a depósitos, ya que si se considera la información procedente del SPT mismo, por ejemplo, un cambio en el muestreador u otra información adicional, se pueden realizar diferentes estimaciones siempre y cuando los resultados sean congruentes con lo reportado por la prueba directa, no obstante, se enfatiza que estos cálculos deben realizarse con prudencia y trabajando con toda la información con la que se pueda disponer, puesto que el método en sí ya se basa en análisis experimentales y no están sustentados teóricamente como los métodos geofísicos.

Es por esto que se recomienda la aplicación de los métodos sísmicos, ya que logran obtener una caracterización óptima del subsuelo, que como se mencionó en el capítulo anterior, mediante el uso de las velocidades de onda de corte resultantes del estudio sísmico se tendrá una información valiosa y de gran apoyo en el diseño constructivo de las obras, en este caso, de las tiendas comerciales, cuyo diseño afín a las condiciones del suelo en que se cimientan salvaguardará principalmente la seguridad de las personas, así como la integridad de las estructuras.

Finalmente, se espera que, con las continuas mejoras del Manual de Obras Civiles en México, este tipo de estudios sean rigurosamente necesarios en los proyectos constructivos, o bien que sean la pauta para análisis estructurales avanzados, sobre todo en nuestro país, el cual se encuentra ubicado en una de las zonas de mayor sismicidad en el mundo y por ello la importancia de construir estructuras que resistan adecuadamente los efectos de los terremotos cobra una mayor relevancia.

Referencias bibliográficas

- ASTM Standard D 5777-00, 2000. *Guide for using the seismic refraction method for subsurface*. ASTM International.
- ASTM Standard D 7400 08, 2008. *Standard Test Methods for Downhole Seismic Testing*. ASTM International.
- ASTM Standard D 1586-11, 2011 *Standard Test Method for Standard Penetration Test (SPT) and Split-Barrel Sampling of Soils*. ASTM International
- Bello, G. (1961). *Exploración sismológica por el método de refracción*. [Traducido al español de The Refraction Method of Seismic Prospecting]. (Boletín S-210).
- Castillo, A. (2007) Revista Épsilon. *Correlación entre el valor N del ensayo de penetración estándar y velocidad de ondas de corte para arcillas en Bogotá-Colombia*.
- CFE (2013) *Exploración directa con obtención de muestras del suelo prueba de penetración estándar*. (Procedimiento 10100-78).
- Crice, D. (2011). Near-surface, downhole shear-wave surveys: a primer. *The leading Edge*.
- González, A. (1999) Estimativos de parámetros efectivos de resistencia con el SPT. *X Jornadas geotécnicas de la Ingeniería Colombiana*.
- Hayashi K. (2003) *Data acquisition and Analysis of Active and Passive Surface Wave Methods*. Short Course; OYO Corporation.
- Humire, F., Sáez E. & Leyton F. (2015) “*Manual de aplicación de técnicas geofísicas basadas en ondas de superficie para la determinación del parámetro Vs30*” Instituto de la Construcción.
- International Building Code (IBC) (2009) International Code Council, Inc.
- Imai y Yoshimura, Y. (1970) *Elastic Wave Velocity and Soil Properties in Soft Soil*. Tsuchi-to-Kiso
- Japan Road Association (2002) *Specifications for Highway Bridges, Part V, Seismic Design*.
- Kramer, S. (1996). *Geotechnical earthquake engineering*. Washington: Prentice-Hall Inc.,
- Lankston, R. (1990) *High Resolution refraction data acquisition and interpretation*. Geo-Compu-Graph, Inc.

- Miller, R., Xia J., Park, C. & Ivanov J. (1999). Multichannel analysis of surface waves to map bedrock. *Geological Survey, U.S.*
- Ohba, S. & Toriumi (1970) I. *Dynamic Response Characteristics of Osaka Plain*. Proc. Annual Meeting A.I.J.
- Ohta, Y. & Goto, N. (1978) *Empirical shear wave velocity equations in terms of characteristics soil indexes*, Earthq, Eng, Struc,
- Ordóñez, A., Lermo, J., Ordóñez J., Martínez J. & Angulo J, (2012) *Correlación entre el número de golpes (N) del ensayo de penetración estándar y la velocidad de ondas de corte (Vs) para las arcillas de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas.*
- Park C., Miller R., Xia J. & Ivanov J. (2007). Multichannel analysis of Surface waves (MASW) – active and passive method. *The leading Edge*.
- Protección Civil de Tamaulipas. *Atlas de riesgos del municipio de Victoria, estado de Tamaulipas*. Recuperado de <https://www.tamaulipas.gob.mx/proteccioncivil/wp-content/uploads/sites/36/2011/12/ATLAS-DE-RIESGOS-DE-VICTORIA.pdf>
- Redpath, B (1973) *Seismic Refraction Exploration for Engineering site investigations*.
- Rogers, D. (2004) Notes on the Standard Penetration Test. *Advanced Engineering Geology & Geotechnics*.
- Schwarz & Musser (1972). *Various techniques for making in situ shear wave velocity measurements - a description and evaluation*.
- SeisImager/2D (2009) Manual Versión 3.3.
- SeisImager/DH (2013) Manual Versión 1.2. *Windows Software for Analysis of Downhole Seismic*.
- SeisImager/SW (2009) Manual Versión 3.0. *Windows Software for Analysis of Surface Waves*.
- SGM (1997). *Carta geológico-minera Cd. Valles*, Escala 1:250,00 Hoja F14-8 S.L.P., QRP., VER., HGO. Y GTO.
- SGM (2004). *Carta geológico-minera Cd. Victoria*, Escala 1:250,00 Hoja F14-2, TAMPS., N.L. y S.L.P.
- SGM (1997). *Carta geológico-minera Chihuahua*, Escala 1:250,00 Hoja H13-10, Chihuahua.

Shearer, P. (2009) *Introduction to Seismology*. Second Edition. New York: Cambridge University.

Sheriff, R., & Geldart L. (1991) *Exploración sísmológica* [Traducido al español de Exploration seismology]. México: Limusa.

Tarback, E. & Lutgens F. (2005) *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física*. [Traducido al español de Earth an introduction to physical geology]. Madrid;México: Prentice Hall.

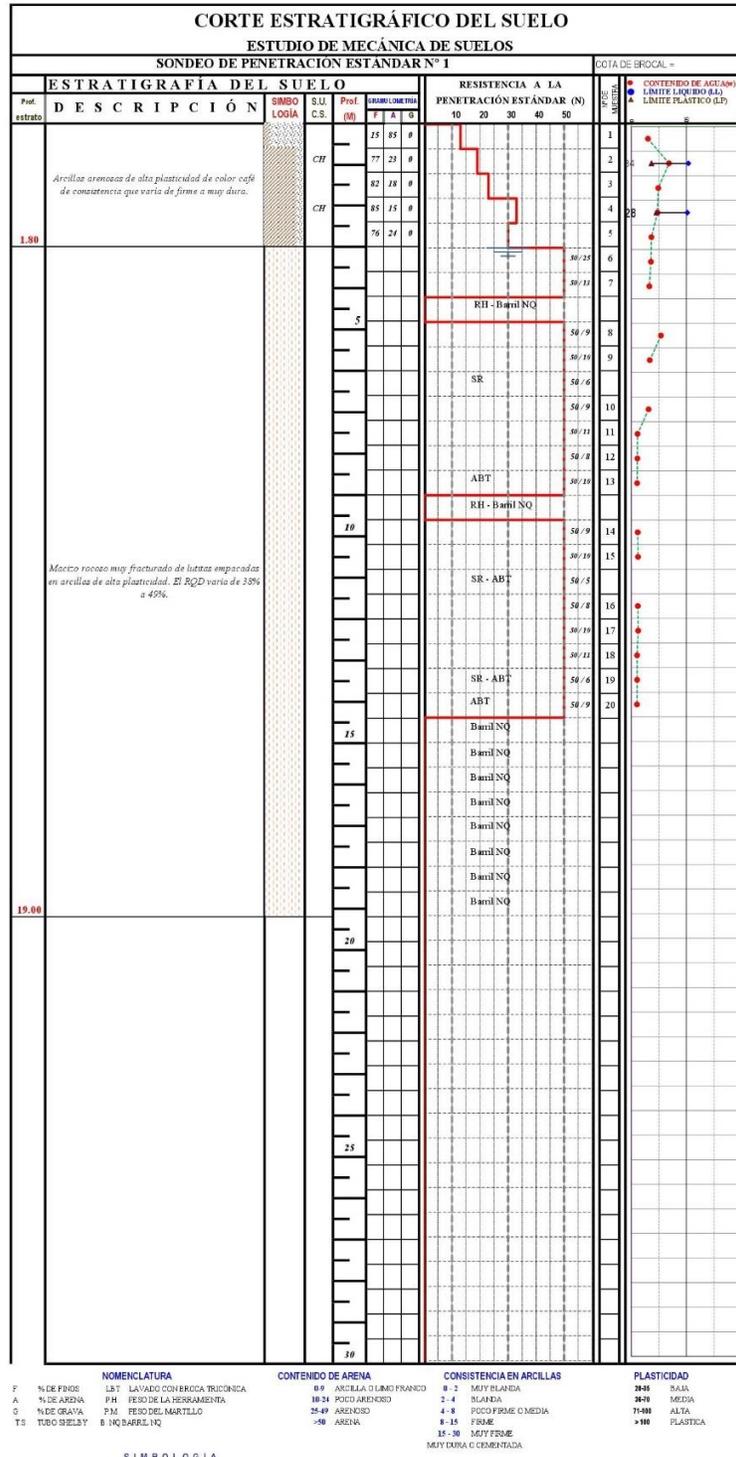
Tipler, P., Mosca G. (2010) *Física para la ciencia y la tecnología* [Traducido al español de Physics for scientists and engineers] Barcelona: Reverté.

Vallejo, L., Ferrer M., Ortuño L. & Oteo C. (2002) *Ingeniería geológica*. Madrid: Prentice Hall.

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA

ANEXOS

PERFILES ESTRATIGRAFICOS.



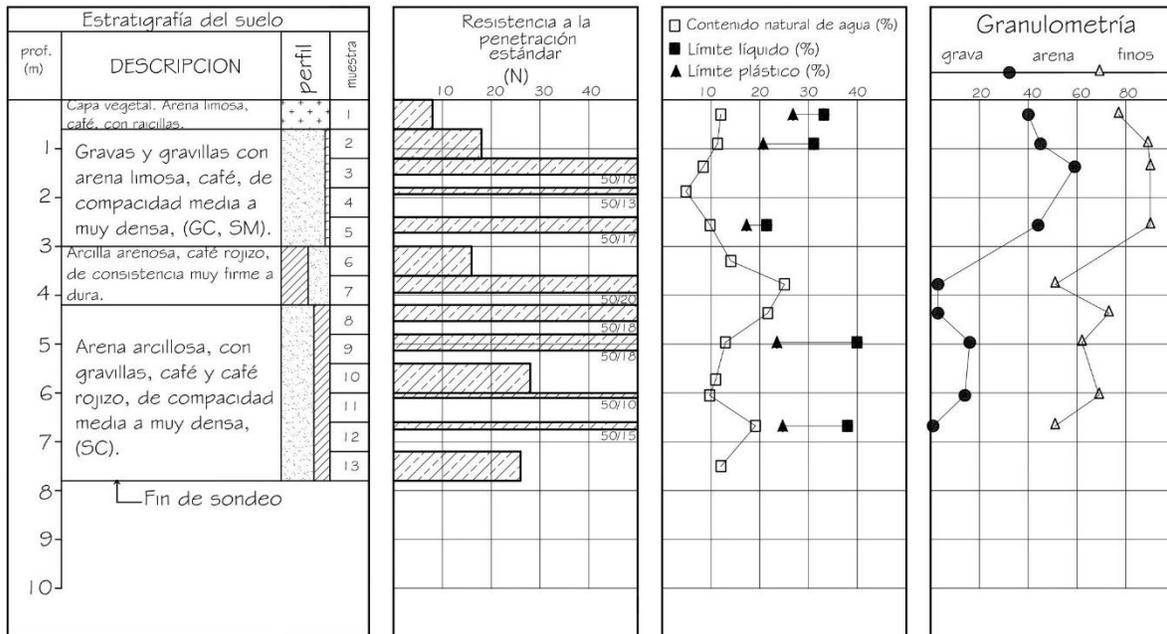
Anexo 1. Perfil estratigráfico correspondiente al SPT realizado en el punto 1 (Tamazunchale).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA



Anexo 2. Perfil estratigráfico correspondiente al SPT realizado en el punto 2 (Cd. Victoria).

COMPARACIÓN DE VELOCIDADES DE ONDA DE CORTE OBTENIDAS POR MEDIO DE CORRELACIONES EMPÍRICAS Y MÉTODOS SÍSMICOS APLICADOS EN TRES SITIOS DE LA REPÚBLICA MEXICANA



Anexo 3. Perfil estratigráfico correspondiente al SPT realizado en el punto 3 (Cd. Guerrero).