



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estimación de la estructura de
velocidades de cortante (VS)
en estaciones acelerográficas
de la cuenca de México**

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniero Geofísico

P R E S E N T A

Pavel Augusto Austria Mejia

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Jorge Aguirre González



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2025



**PROTESTA UNIVERSITARIA DE INTEGRIDAD Y
HONESTIDAD ACADÉMICA Y PROFESIONAL
(Titulación con trabajo escrito)**



De conformidad con lo dispuesto en los artículos 87, fracción V, del Estatuto General, 68, primer párrafo, del Reglamento General de Estudios Universitarios y 26, fracción I, y 35 del Reglamento General de Exámenes, me comprometo en todo tiempo a honrar a la institución y a cumplir con los principios establecidos en el Código de Ética de la Universidad Nacional Autónoma de México, especialmente con los de integridad y honestidad académica.

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado ESTIMACION DE LA ESTRUCTURA DE VELOCIDADES DE CORTANTE (VS) EN ESTACIONES ACELEROGRAFICAS DE LA CUENCA DE MEXICO que presenté para obtener el título de INGENIERO GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

En consecuencia, acepto que la falta de cumplimiento de las disposiciones reglamentarias y normativas de la Universidad, en particular las ya referidas en el Código de Ética, llevará a la nulidad de los actos de carácter académico administrativo del proceso de titulación.

PAVEL AUGUSTO AUSTRIA MEJIA
Número de cuenta: 317147483

AGRADECIMIENTOS

Al Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM) por las facilidades brindadas durante mi estancia en el departamento de Ingeniería Sismológica de la Torre de Ingeniería.

Al Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación e Innovación Tecnológica (PAPIIT), que en el marco del proyecto IT102923, me otorgó una beca estudiantil que impulsó el desarrollo de mi proyecto de investigación y a su vez mi titulación.

A la Red Acelerográfica del Instituto de Ingeniería (RAII-UNAM) por los datos sísmicos proporcionados, producto de las labores de instrumentación y procesamiento de la Unidad de Instrumentación Sísmica que distribuyen los datos a través del Sistema de Base de Datos Acelerográficos.

Al Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (CIRES) por proporcionarme datos sísmicos de la Red Acelerográfica de la Ciudad de México(RACM).

Al Dr. Fumiaki Nagashima por haber elaborado y proporcionado el programa utilizado para la inversión de la estructura de velocidades.

Al Dr. Jorge Aguirre González por la oportunidad de desarrollar mi tesis de licenciatura bajo su tutela, así como por su paciencia y enseñanzas como mi profesor y director de tesis.

A la Facultad de Ingeniería de la UNAM y a los profesores de la carrera de Ingeniería Geofísica por contribuir en mi formación como ingeniero y por transmitirme sus conocimientos y pasión por la geofísica.

DEDICATORIAS

A mi pareja, Yamileet, por apoyarme y amarme incondicionalmente, y por la linda fortuna de haber comenzado como compañeros de aula y haber terminado como compañeros de vida.

A mi hermana, Rebeca, por su comprensión y empatía que me demuestran que no estoy solo y que siempre habrá alguien para aconsejarme.

A mi hermano, Emiliano, por su carisma y solidaridad, y por demostrarme que tengo un cómplice en la vida.

A mi abuela, Verónica, por su cariño y aliento que me proveen de energía para alcanzar mis metas.

A mi padre, Danao, por cuidarme y sustentarme desde niño, permitiendo desarrollarme tanto profesional como personalmente.

A mis amigos por su lealtad y las risas compartidas que me recuerdan que todos los ámbitos de mi vida son igual de importantes.

RESUMEN

La cuenca de México es una región con condiciones geológicas y geotécnicas complejas, cuya estructura sedimentaria genera una fuerte amplificación de las ondas sísmicas. Este fenómeno la convierte en una zona de alto peligro sísmico, especialmente en regiones como la zona lacustre, donde se concentra una parte significativa de la infraestructura urbana. En este sentido, es fundamental caracterizar las estructuras del subsuelo para comprender cómo se propagan y amplifican las ondas sísmicas, contribuyendo en el desarrollo de un diseño estructural más seguro.

Siguiendo esta necesidad, se caracterizaron estructuras de velocidad de cortante (V_s) en 38 estaciones acelerográficas ubicadas en la cuenca de México pertenecientes a la red acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (RAII-UNAM) y a la red acelerográfica de la Ciudad de México a cargo del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (RACM-CIRES). Para ello, se utilizaron registros de eventos sísmicos ($M_c = 3.9 - 8.2$), en el periodo de 1964 a 2024, que debían cumplir con criterios de calidad como una clara definición del arribo de onda S y buena resolución.

Implementando el método propuesto por Nagashima et al. (2014), se usaron ventanas de 20.48 s a partir del inicio de la onda S para calcular el cociente espectral de eventos sísmicos EHVR observado (Earthquake Horizontal to Vertical spectral Ratio). Con esta información, se empleó el método de inversión HHS (Hybrid Heuristic Search) que aseguraba una diferencia mínima entre el cociente observado y un cociente teórico calculado bajo el contexto de la teoría de campo difuso, del cual se tomaban las velocidades de onda de corte para crear el perfil de V_s . Se realizaron 35 inversiones independientes por estación con base en la técnica antes planteada para garantizar la caracterización del perfil con mejor ajuste en cada estación.

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis principal, demostrando que es posible caracterizar estructuras de velocidad de onda S mediante el cálculo e inversión de cocientes espectrales EHVR. Las estructuras de V_s caracterizadas mostraron ser coherentes con la zonificación geotécnica y consistentes con modelos de referencia. Aunque el método implementado siempre brindó buenos resultados para el rango de 0.5 – 5 Hz, la calidad de los registros y la cantidad de eventos fueron factores determinantes en la robustez y confiabilidad de los perfiles. Se observó que la mayoría de los periodos dominantes fueron congruentes con los esperados por la zonificación sísmica, y las secciones de V_s generadas representaron adecuadamente la geomorfología general de la cuenca de México.

La metodología usada en este trabajo de tesis demostró ser eficaz para la caracterización del subsuelo en zonas sísmicamente activas y sus resultados aportan información valiosa para el análisis de la respuesta sísmica local.

ABSTRACT

The Mexico Basin is a region with complex geological and geotechnical conditions, where its sedimentary structure leads to strong seismic wave amplification. This phenomenon makes it a high seismic risk zone, particularly in areas such as the lacustrine zone, which hosts a significant portion of the urban infrastructure. In this context, subsurface characterization is essential to understand how seismic waves propagate and amplify, contributing to the development of safer structural designs.

In response to this need, shear-wave velocity (V_s) structures were characterized at 38 accelerographic stations located in the Mexico Basin, which belong to the Accelerometric Network of the Institute of Engineering at the National Autonomous University of Mexico (RAII-UNAM) and the Accelerometric Network of Mexico City managed by the Center for Seismic Instrumentation and Registration (RACM-CIRES). To achieve this, seismic event records ($M_c = 3.9\text{--}8.2$), spanning from 1964 to 2024, were used. These records had to meet quality criteria such as a clear S-wave arrival and good signal resolution.

Implementing the method proposed by Nagashima et al. (2014), 20.48-second windows from the S-wave onset were used to compute the earthquake horizontal-to-vertical spectral ratio (EHVR). This information was then used in the HHS heuristic inversion method, which minimizes the difference between the observed EHVR and a theoretical one computed within the diffuse field theory framework. The inversion yielded shear-wave velocity values used to construct V_s profiles. A total of 35 independent inversions were carried out per station to ensure the best-fitting model characterization.

The results confirmed the main hypothesis, demonstrating that it is possible to characterize shear-wave velocity structures using EHVR spectral ratio computation and inversion. The resulting V_s profiles were consistent with geotechnical zonation and matched well with reference models. Although the method consistently provided reliable results in the 0.5–5 Hz range, the quality and number of available seismic records proved to be critical in the robustness and reliability of the V_s profiles. Most of the fundamental periods identified aligned with those expected from seismic zonation, and the generated V_s cross-sections adequately represented the general geomorphology of the Mexico Basin.

The methodology implemented in this thesis proved effective for subsurface characterization in seismically active areas, and its results provide valuable insights for local seismic response analysis.

TABLA DE CONTENIDO

ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
ÍNDICE DE TABLAS.....	10
INTRODUCCIÓN.....	11
OBJETIVOS.....	13
OBJETIVO GENERAL	13
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	14
1.1. ONDAS DE CUERPO	14
1.2. COCIENTES ESPECTRALES	16
1.2.1. Cocientes espectrales H/V	16
1.2.2. Cocientes espectrales $EHVR$	18
1.3. TEORÍA DE CAMPO DIFUSO	19
1.4. INVERSIÓN.....	21
1.4.1. Algoritmos genéticos	22
1.4.2. Cristalización simulada.....	23
CAPÍTULO 2: ZONA DE ESTUDIO	24
2.1. LOCALIZACIÓN.....	24
2.2. MARCO GEOLÓGICO.....	25
2.2.1. Geomorfología.....	25
2.2.2. Geología regional.....	27
2.3. ZONIFICACIÓN GEOTÉCNICA.....	28
2.4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA.....	30
CAPÍTULO 3: ESTACIONES Y DATOS DE ESTUDIO.....	32
3.1. DESCRIPCIÓN DE ESTACIONES	32
3.1.1. Instrumentación.....	33
3.2. DESCRIPCIÓN DE DATOS	34
3.2.1. RAII-UNAM.....	34
3.2.2. RACM-CIRES.....	35
CAPÍTULO 4: PREPROCESAMIENTO.....	37
4.1. ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS.....	37
4.2. CÁLCULO DE COCIENTES ESPECTRALES.....	40
CAPÍTULO 5: INVERSIÓN.....	44
CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	49
6.1. ANÁLISIS DE EFECTIVIDAD DEL MÉTODO	49
6.2. EVALUACIÓN DEL PERIODO DOMINANTE.....	52
6.3. IDENTIFICACIÓN DEL BASAMENTO INGENIERIL.....	54

6.4. COMPARACIÓN CON MODELOS PREVIOS	56
6.4.1. Estación CDAO	56
6.4.2. Estación DFRO	57
6.4.3. Estación DM12.....	58
6.4.4. Estación SCT2	59
6.4.5. Estación TACY.....	60
6.5. PRESENTACIÓN DE SECCIONES DE VS	61
6.5.1. Sección TACY – AE02	62
6.5.2. Sección CUP4 – AE02.....	64
CONCLUSIONES.....	67
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO	73
MAPA DE LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES DE ESTUDIO	73
ESTRUCTURAS DE VELOCIDAD DE ONDA S Y AJUSTE DE COCIENTES ESPECTRALES	74
Estaciones de la RAI-UNAM.....	74
Estaciones de la RACM-CIRES.....	80

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Movimiento de ondas P y S	14
Figura 2. Sismograma con clara identificación de los distintos tipos de ondas y sus fases	16
Figura 3. Metodología a seguir para el cálculo de cocientes espectrales	17
Figura 4. Cociente espectral resultante calculado a partir de un registro de ruido sísmico de la estación JA43 ubicada en la Ciudad de México.....	18
Figura 5. Localización de la zona de estudio	24
Figura 6. Distribución geográfica de los antiguos lagos de la cuenca de México.....	25
Figura 7. Geomorfología de la zona de estudio dentro de la cuenca de México.....	26
Figura 8. Diagrama geológico de la cuenca de México	28
Figura 9. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México y áreas aledañas.....	30
Figura 10. Zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas	31
Figura 11. Localización de estaciones de estudio	32
Figura 12. Descripción de Archivo Estándar de Aceleración ASA2.0	34
Figura 13. Ejemplo de acelerograma descartado y apto de la estación AU11	38
Figura 14. Acelerograma con arribo de onda S de la estación AP68.....	39
Figura 15. Cocientes espectrales con desviación estándar de las estaciones CU01 y CDAO.....	42
Figura 16. Comportamiento de los residuales de la estación CUP4.....	46
Figura 17. Ajuste de los cocientes espectrales de la estación DFRO.....	47
Figura 18. Perfiles de velocidad de onda S de la estación SCT2	48
Figura 19. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación TLHD	50
Figura 20. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación JC54.....	50
Figura 21. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación CO47	51
Figura 22. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación CUP5	53
Figura 23. Perfiles de Vs invertidos y perfil de Vs interpretado de la estación CDAO	56
Figura 24. Perfiles de Vs invertidos de la estación DFRO y perfil de Vs de pozo 12	57
Figura 25. Perfiles de Vs invertidos de la estación DM12 y perfil de Vs de pozo 11.....	58
Figura 26. Perfiles de Vs invertidos y perfil de Vs interpretado de la estación SCT2.....	59
Figura 27. Perfiles de Vs invertidos de la estación TACY y perfil de Vs de pozo 14	60
Figura 28. Localización de secciones de velocidad de onda S.....	61
Figura 29. Sección de velocidad de onda S TACY – AE02.....	62
Figura 30. Comparación de sección de Vs TACY – AE02 superficial con sección de Vs B – A' ...	63
Figura 31. Sección de velocidad de onda S CUP4 – AE02.....	64
Figura 32. Comparación de sección de Vs CUP4 – AE02 superficial con sección de Vs A – A'	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Características de acelerógrafos más utilizados en ambas redes acelerográficas.....	33
Tabla 2. Información de las 14 estaciones de estudio de la RAII-UNAM.....	35
Tabla 3. Información de las 26 estaciones de estudio de la RACM-CIRES.	36
Tabla 4. Reporte del análisis de registros sísmicos de las estaciones de estudio.	40
Tabla 5. Revisión de zona sísmica y periodo dominante calculado de las estaciones de estudio.	43
Tabla 6. Reporte de profundidad del basamento ingenieril de las estaciones de estudio.....	55

INTRODUCCIÓN

La cuenca de México es una región con alto interés en el estudio de la respuesta sísmica a causa de sus condiciones geológicas y estructurales particulares, ya que se conforma de una secuencia compleja de depósitos lacustres, aluviales y materiales volcánicos, sobre una base de rocas más rígidas. Estas características generan fuertes contrastes de impedancia sísmica que favorecen a los fenómenos de amplificación del movimiento del terreno, los cuales han sido muy estudiados debido a los daños importantes en la zona metropolitana durante eventos como los sismos de 1985 y 2017. Por ello, caracterizar la estructura del subsuelo en esta región es fundamental para comprender cómo se propagan y amplifican las ondas sísmicas.

Uno de los principales parámetros físicos que influyen en la propagación y amplificación de las ondas sísmicas es la velocidad de onda de corte (V_s). El conocimiento preciso de estructuras de V_s es necesario para estudios de microzonificación sísmica, evaluación de riesgos y diseño estructural seguro. En este sentido, se han desarrollado diferentes métodos para generar perfiles de V_s , destacando aquellos que permiten inferir la estructura del subsuelo a partir de la respuesta espectral generada por eventos sísmicos.

Aun con el conocimiento generado en las últimas décadas, se puede afirmar que gran parte de la cuenca de México carece de una caracterización detallada de perfiles de velocidad de onda S. Específicamente, la zona geotécnica III (zona de lago) ubicada dentro de la cuenca, se distingue por una alta amplificación sísmica debido a la abundante presencia de materiales blandos, lo que incrementa el riesgo estructural ante la ocurrencia de sismos. La falta de estructuras de V_s en esa y las demás zonas geotécnicas limita la evaluación del riesgo sísmico local, por lo que se necesita ampliar el conocimiento sobre la estructura del subsuelo en puntos estratégicos.

En este contexto, la presente tesis tiene como objetivo general caracterizar estructuras de velocidad de onda S en estaciones acelerográficas localizadas en la cuenca de México mediante el cálculo e inversión de cocientes espectrales EHVR obtenidos con registros de eventos sísmicos. Esta caracterización es valiosa porque permite entender mejor el comportamiento sísmico local y contribuye a la toma de decisiones en el ámbito de la ingeniería sísmica.

La hipótesis central en la que se basa este trabajo, es que es posible recuperar estructuras de velocidad de onda de corte a partir de la inversión de cocientes espectrales EHVR obtenidos con registros sísmicos. Se parte del supuesto de que al usar predominantemente las ondas S de los registros para el cálculo de cocientes espectrales, se garantiza que dichos cocientes contengan la información suficiente para representar la estructura del subsuelo bajo las estaciones acelerográficas.

La metodología aplicada en este estudio sigue el enfoque propuesto por Nagashima et al. (2014) basado en los resultados de Kawase et al. (2011) dentro del marco de la teoría de campo difuso. El método inicia con el análisis de acelerogramas disponibles de las estaciones acelerográficas, los cuales deben tener una clara definición del arribo de la onda S porque se utiliza la fase de dicha onda para el cálculo de los cocientes espectrales EHVR. Posteriormente, se lleva a cabo la inversión de los cocientes mediante la técnica HHS que combina algoritmos genéticos con cristalización simulada. Este procedimiento busca minimizar la diferencia entre el cociente promedio observado y el cociente teórico calculado con base en una ecuación derivada de la teoría del campo difuso. La inversión parte de un modelo inicial que considera una estructura en capas con parámetros ajustables, siendo la velocidad de onda S el parámetro a estimar.

El contenido de la tesis se organiza en seis capítulos. En el capítulo 1 se presenta el marco teórico, donde se abordan los conceptos primordiales en los que se basa esta investigación, tales como ondas de cuerpo, cocientes espectrales de microtemores (H/V) y de eventos sísmicos (EHVR), la teoría de campo difuso y los principios de la inversión. Por su parte, en el capítulo 2 se caracteriza la zona de estudio, incluyendo su localización, el contexto geológico general, y las zonificaciones geotécnica y sísmica de la región de interés dentro de la cuenca de México. En esa línea, el tercer capítulo expone la ubicación y la descripción de las estaciones de estudio, así como el proceso mediante el cual se obtuvieron los datos utilizados en esta investigación.

Avanzando sobre el tratamiento de los datos obtenidos que condujeron a los hallazgos de la tesis, en el capítulo 4 se describe detalladamente el desarrollo correspondiente al preprocesamiento, desde el análisis de registros acelerográficos hasta el cálculo de los cocientes espectrales EHVR. De esta manera, el capítulo 5 aborda el proceso de inversión, donde se describen las herramientas empleadas, la configuración para comenzar el procedimiento y los tipos de resultados obtenidos. Así, el último capítulo está dedicado a la presentación de los resultados y a la profundización de diversas discusiones a partir de ellos. Estas se refieren a una evaluación de la efectividad del método, a los periodos dominantes obtenidos con los cocientes, a la identificación del basamento ingenieril, la comparación de perfiles de Vs con modelos de referencia y la generación de secciones de Vs a partir de las estructuras caracterizadas. Finalmente, la investigación cierra con algunas conclusiones en donde se destaca la riqueza de las técnicas empleadas y el uso futuro que pueden otorgárseles.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Caracterizar estructuras de velocidad de cortante (V_s) en estaciones acelerográficas ubicadas en la cuenca de México mediante el cálculo y la inversión de cocientes espectrales EHVR, empleando registros sísmicos y algoritmos de optimización heurística, con el fin de contribuir al entendimiento de la respuesta sísmica de la región.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Analizar registros sísmicos de la red acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (RAII-UNAM) y de la red acelerográfica de la Ciudad de México a cargo del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (RACM-CIRES), asegurando criterios de calidad para una buena identificación del arribo de onda S.
2. Calcular los cocientes espectrales de cada estación acelerográfica mediante el método EHVR.
3. Implementar un método de inversión heurístico basado en algoritmos genéticos y cristalización simulada para ajustar cocientes espectrales teóricos a observados y determinar estructuras de V_s .
4. Evaluar la congruencia de los resultados obtenidos a partir de múltiples inversiones por estación y analizar la efectividad y las limitaciones del método.
5. Interpretar los resultados obtenidos haciendo una correlación en términos geofísicos y geológicos.
6. Comparar las estructuras de V_s obtenidas con otros modelos determinados en estudios previos con el fin de destacar similitudes, diferencias y unificar la información.

CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO

1.1. ONDAS DE CUERPO

Una onda sísmica es una onda mecánica que transmite la energía generada por diversas fuentes sísmicas, tales como terremotos, explosiones, erupciones volcánicas o actividades humanas. Este tipo de ondas ha sido ampliamente estudiado, ya que permite obtener información sobre la estructura de la Tierra, y se registran mediante instrumentos especializados como los sismógrafos (Havskov & Ottemöller, 2010). Las ondas sísmicas se dividen en dos grupos principales: las ondas de cuerpo y las ondas superficiales.

Las ondas de cuerpo se caracterizan por viajar en el interior de la Tierra, por viajar más rápido que las ondas de superficie y por propagarse en todas las direcciones, siendo catalogadas en ocasiones como ondas libres (Kulháněk, 1990). A su vez, hay dos tipos de ondas de cuerpo que son las ondas compresionales P y las ondas de corte S. A continuación se mencionan algunas de sus características.

- **Ondas P:** también llamadas ondas longitudinales o primarias, son siempre las primeras en llegar a la estación de registro y se propagan a través de cuerpos sólidos y líquidos.
- **Ondas S:** también llamadas ondas transversales o secundarias, llegan en un tiempo intermedio entre las ondas P y las ondas superficiales y no se propagan a través de fluidos.

Como se aprecia en la Figura 1, el movimiento de cada tipo de onda es distinto con respecto a la dirección de propagación de la onda. En el caso de las ondas P se presenta un cambio en el volumen porque el movimiento es hacia atrás y hacia adelante y paralelo a la dirección de propagación, de manera análoga a las ondas sonoras. Por su parte, las ondas S generan un cizallamiento y se desplazan en planos perpendiculares a la dirección de propagación, de manera análoga a las ondas electromagnéticas (Kulháněk, 1990).

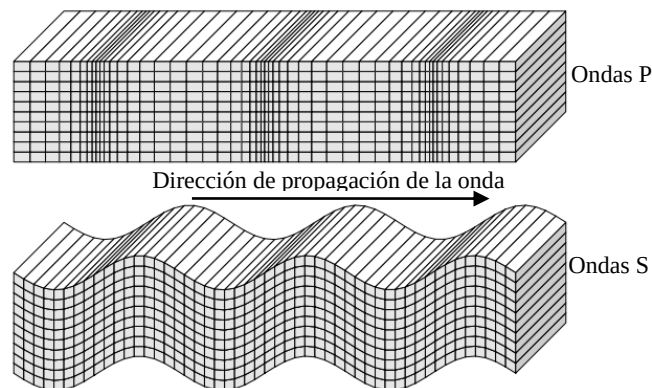


Figura 1. Movimiento de ondas P y S (Shearer, 2009).

De acuerdo con una demostración realizada por Lay y Wallace (1995), la descripción de las ondas de cuerpo puede obtenerse partiendo de la ecuación de onda (1) obtenida con base en la Ley de Hooke y en la segunda Ley de Newton.

$$\rho \ddot{u} = (\lambda + 2\mu)\nabla(\nabla \cdot u) - \mu(\nabla \times \nabla \times u). \quad (1)$$

A partir del Teorema de Helmholtz se puede representar al campo de desplazamiento u en términos de un potencial vectorial Ψ y un potencial escalar φ (ecuación 2) con el fin de separar la ecuación de onda y encontrar la solución asociada a las ondas P y las ondas S (Shearer, 2009).

$$u = \nabla\varphi + \nabla \times \Psi, \quad (2)$$

donde φ es un campo no rotacional y Ψ es un campo no divergente, lo que físicamente significa que para el potencial escalar φ no existe un movimiento cortante, mientras que el potencial vectorial Ψ implica que no hay cambios de volumen.

Sustituyendo la ecuación (2) en (1) y usando identidades vectoriales se llega a la ecuación (3).

$$\nabla[(\lambda + 2\mu)\nabla^2\varphi - \rho\ddot{\varphi}] + \nabla \times [\mu\nabla^2\Psi - \rho\ddot{\Psi}] = 0. \quad (3)$$

Esta última ecuación se puede satisfacer si cada término entre paréntesis se iguala a cero independientemente (ecuación 4), encontrando así la solución asociada a cada tipo de onda de cuerpo.

$$\nabla^2\varphi - \frac{1}{\alpha^2}\ddot{\varphi} = 0 \quad y \quad \nabla^2\Psi - \frac{1}{\beta^2}\ddot{\Psi} = 0, \quad (4)$$

donde α y β corresponden con las velocidades de onda P y onda S respectivamente y están definidas en términos de la densidad volumétrica ρ y los parámetros de Lamé λ y μ :

$$\alpha = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad y \quad \beta = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (5)$$

Dado que λ y μ son positivos, puede inferirse que la onda P se presenta antes que la onda S y considerando un sólido de Poisson ($\lambda = \mu$) se determina que la onda P es 1.73 veces más veloz, lo cual se ve reflejado en los registros sísmicos (Havskov & Ottemöller, 2010). A pesar de ello, la velocidad de propagación de las ondas de cuerpo estará determinada por la densidad y los módulos elásticos del medio por el que se propaguen. En la Figura 2 se muestra un ejemplo de sismograma con los arribos de las ondas de cuerpo (P y S), así como las fases de cada tipo de onda, incluyendo las superficiales.

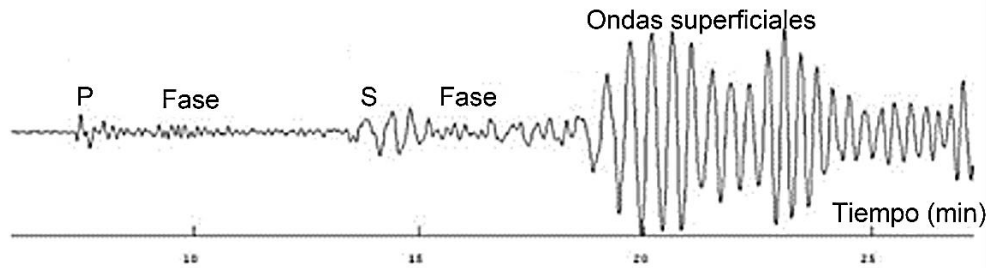


Figura 2. Sismograma con clara identificación de los distintos tipos de ondas y sus fases (Havskov & Ottemöller, 2010).

1.2. COCIENTES ESPECTRALES

1.2.1. Cocientes espectrales H/V

Los cocientes espectrales H/V son un método introducido por Nogoshi e Igarashi en 1971 basándose en los estudios que realizaron Kanai y Tanaka en 1961 (Lermo et al., 2020). Esta técnica se lleva a cabo haciendo uso de registros de ruido sísmico que, de acuerdo con Nakamura (2000), se compone tanto de ondas superficiales como de ondas de cuerpo, pero no se sabe con exactitud en qué proporciones. Algo que sí se sabe con certeza es que el ruido sísmico es generado por fuentes naturales (oleaje, viento, etc.) y antropogénicas (actividad industrial, tránsito vehicular, etc.).

Inicialmente, se tenía mucha desconfianza en el uso de microtemores por la falta de teoría sobre su composición. Además, estos registros presentaban diferencias con respecto a los registros de sismos y tenían una dificultad para evitar los efectos de la fuente. Sin embargo, a principios de la década de 1990, esta situación comenzó a cambiar con la creciente afirmación de que el método H/V permitía conocer la respuesta del sitio (Bard, 1999).

Pese a la falta de claridad teórica del método, hay dos argumentos en los que diversos investigadores concuerdan para la técnica H/V. La primera es que está relacionado con la elipticidad de las ondas Rayleigh por su predominio en la componente vertical y la segunda es que muestra un pico notorio que indica la frecuencia fundamental para sitios donde existe un alto contraste de impedancia entre las capas profundas y las superficiales (Bard, 1999).

Al realizar cocientes espectrales H/V se requieren registros de ruido sísmico en tres direcciones para un único sitio: dos horizontales (NS y EW) y una vertical (V). Como se describe en la Figura 3, la metodología consiste en obtener el espectro de amplitud de Fourier de las 3 componentes, calcular la media cuadrática de los espectros de amplitud de las componentes horizontales y hacer el cociente de dicha media con el espectro de amplitud de la componente vertical. Para obtener un único H/V representativo, se debe repetir la metodología antes mencionada para un número particular de ventanas que se distribuyen a lo largo del registro y finalmente hacer un promedio con todos los cocientes espectrales obtenidos.

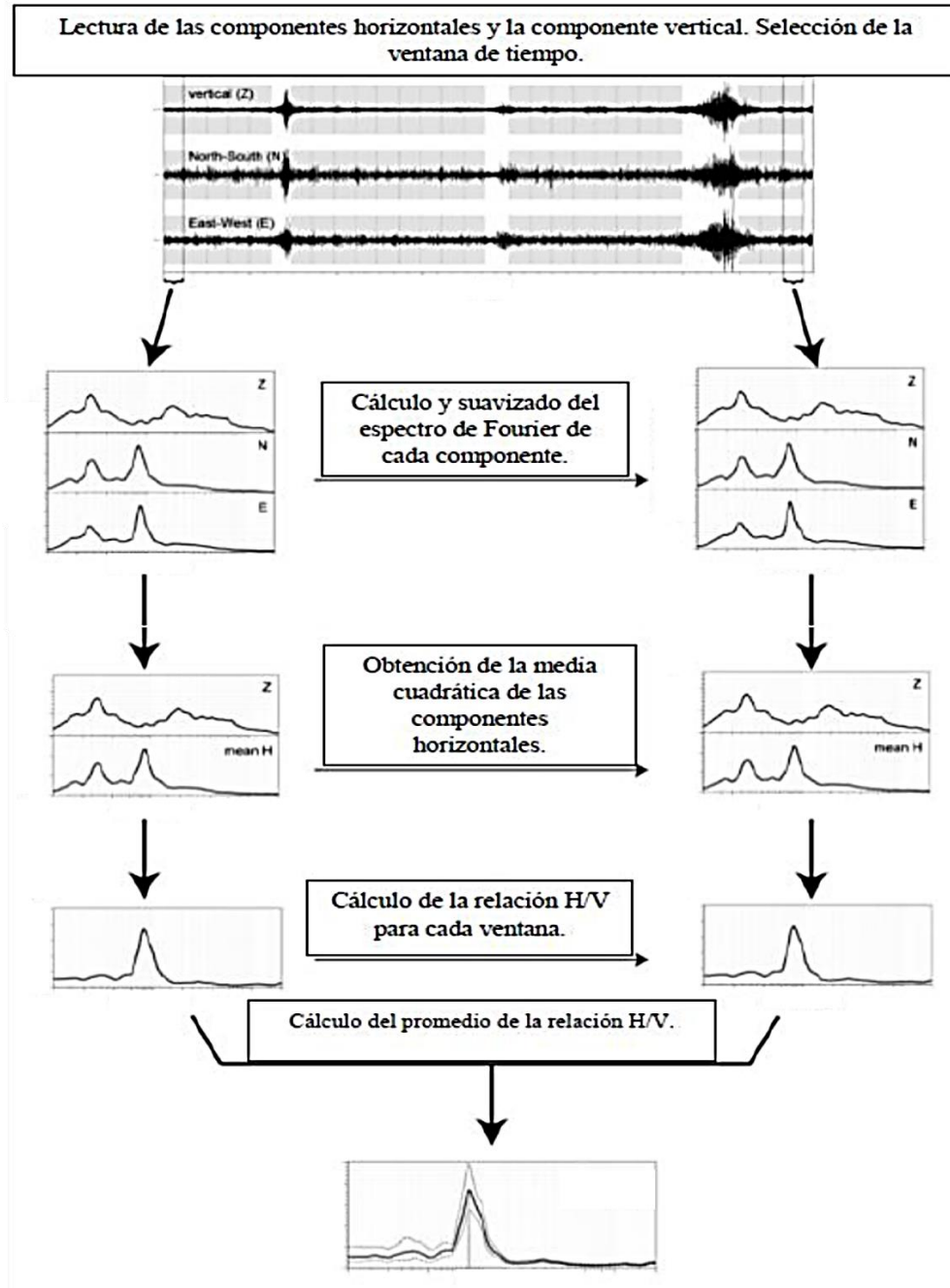


Figura 3. Metodología a seguir para el cálculo de cocientes espectrales (Lermo et al., 2020).

La Figura 4 es un ejemplo de cómo en el cociente espectral resultante aparece un pico de amplitud máxima característico que tiene asociada la frecuencia fundamental, la cual es inversa al periodo de vibración. Por ello, este método permite obtener información importante del medio como el periodo dominante y su amplificación que no debe entenderse como la función de amplificación real para la onda S (Bard, 1999). Es importante mencionar que cuando hay un contraste de impedancia alto, habrá una mejor claridad en el pico de la frecuencia fundamental porque las ondas quedan atrapadas entre las capas.

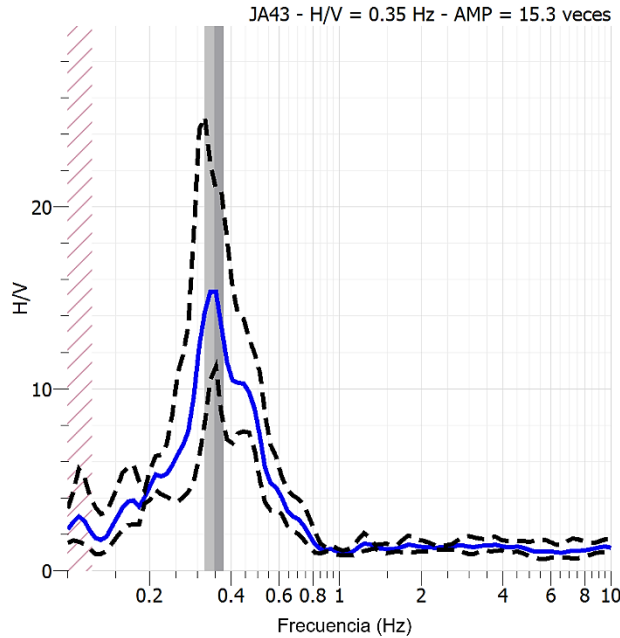


Figura 4. Cocciente espectral resultante calculado a partir de un registro de ruido sísmico de la estación JA43 ubicada en la Ciudad de México.

En la actualidad es sumamente necesario conocer las condiciones geológicas locales para contrarrestar el riesgo de daño estructural debido a la ocurrencia de sismos. En este sentido, el uso de la técnica H/V ha aumentado por los pocos recursos que se necesitan y por la versatilidad que presenta. No obstante, se debe tener claridad en los alcances y limitaciones del método para hacer interpretaciones realistas sobre las características del medio.

A pesar de que la técnica de cocientes espectrales H/V no formó parte del proceso principal en este trabajo de tesis, sí es de gran importancia mencionarla porque brinda las bases necesarias para entender y usar el método de cocientes espectrales de eventos sísmicos EHVR, el cual es parte del método propuesto por Nagashima et al. (2014).

1.2.2. Cocientes espectrales EHVR

La técnica de cocientes espectrales EHVR es similar a la técnica H/V pero su diferencia recae en que se utilizan registros de sismos en lugar de ruido sísmico. Lermo y Chávez-García (1993) fueron los primeros en presentar resultados que respaldan la idea de que se puede conocer la respuesta del sitio al calcular cocientes espectrales de la parte de las ondas S de registros sísmicos sin necesidad de utilizar una estación de referencia.

Gutiérrez y Singh (1992) mencionan que en algunos casos los resultados obtenidos al usar microtemores son bastante razonables con respecto a los obtenidos con registros de sismos, sin embargo, esto no es algo que se cumple siempre. Tal es el caso de Field y Jacob (1995) en el que compararon sus resultados con los de Lermo y Chávez-García (1993) y encontraron que la frecuencia fundamental concuerda al usar ambos métodos pero la amplitud del pico difiere en varios casos.

Debido a las limitaciones y a la falta de unicidad de la teoría del ruido sísmico, se cree que los resultados obtenidos con la técnica H/V deben seguir siendo puestos en duda y por ello, utilizar registros de sismos para el cálculo de cocientes espectrales puede ser la opción más fiable (Gutiérrez & Singh, 1992). Aunque esto sea lo óptimo, no es posible aplicar la técnica EHVR en cualquier lugar porque existen zonas con nula o baja sismicidad, lo que implica una limitación de este método. De igual forma, otra limitación es el caso contrario en el que hay sitios altamente sísmicos donde interesa conocer el efecto de amplificación pero la densidad de estaciones es muy baja o incluso nula.

Para el cálculo de cocientes espectrales EHVR en una estación, se seleccionan ventanas de la parte más representativa e intensa de la onda S en las 3 componentes de un evento sísmico (NS, EW y V). Posteriormente, se obtiene el espectro de amplitud de Fourier de las ventanas en las 3 componentes, se calcula la media cuadrática de los espectros de amplitud de las componentes horizontales y se hace el cociente de dicha media con el espectro de amplitud de la componente vertical. La fórmula que resume esta parte de la metodología se muestra en la ecuación (6).

$$\text{Cociente espectral de un evento} = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{V}. \quad (6)$$

Finalmente, el cociente espectral EHVR se define promediando los cocientes espectrales de varios eventos sísmicos, donde entre mayor sea la cantidad de eventos, mayor confiabilidad y robustez tendrá la definición del cociente promedio. De acuerdo con las conclusiones de Field y Jacob (1995), utilizar un mayor número de eventos sísmicos disminuye la incertidumbre y en su caso mejoró la concordancia de sus cocientes H/V y EHVR.

Lo que se obtiene es un cociente espectral similar al mostrado en la Figura 4, que de igual forma contendrá información del periodo de vibración del sitio y su factor de amplificación. Además de dicha información, Kawase et al. (2011) mostraron que tomando como base la teoría de campo difuso se puede establecer la relación funcional entre el EHVR y las funciones de transferencia para las ondas P y S, lo que admite la realización de inversiones para conocer la estructura del subsuelo a una mayor profundidad.

1.3. TEORÍA DE CAMPO DIFUSO

El subsuelo suele ser un medio muy heterogéneo, compuesto por capas de distintos materiales que difieren en sus propiedades elásticas. Cuando las ondas sísmicas se propagan a través de dicho medio sufren varios fenómenos como dispersión, reflexión y refracción. Con el tiempo, las ondas sísmicas se propagan de una manera tan compleja que parecen “difusas”. Con esto en mente, Shapiro et al. (2000) menciona que el campo de ondas sísmico puede tratarse como un campo difuso cuando la distribución de la energía sísmica es casi isotrópica y cuando dicho campo presenta aleatorización en el dominio de fase debido a la dispersión múltiple.

Kawase et al. (2011) aplicaron los conceptos de campo difuso para analizar registros de sismos y encontraron que, cuando se tiene el supuesto de que el campo sísmico es difuso, se puede calcular la relación EHVR en términos de la parte imaginaria de la función de Green (ecuación 7) para sitios donde el receptor se encuentre en la superficie de un medio con capas horizontales. De esta forma, la teoría permite entender a dicha relación como una propiedad intrínseca del medio.

$$\frac{H(\omega)}{V(\omega)} = \sqrt{\frac{Im[G_{11}^{1D}(0,0;\omega)] + Im[G_{22}^{1D}(0,0;\omega)]}{Im[G_{33}^{1D}(0,0;\omega)]}}, \quad (7)$$

donde ω es la frecuencia angular, $\frac{H(\omega)}{V(\omega)}$ es el cociente espectral promedio y $Im[G_{ij}^{1D}(0,0;\omega)]$ es la parte imaginaria de la función de Green para una estructura 1D, la cual puede escribirse como aparece en la ecuación (8).

$$Im[G(0,0;\omega)] = (4\omega\rho_H c_H)^{-1} |TF(\omega)|^2, \quad (8)$$

donde ρ_H y c_H son la densidad y la velocidad de onda en el basamento respectivamente y $TF(\omega)$ es la función de transferencia para el movimiento generado.

Considerando las dos ecuaciones anteriores y obteniendo una función de transferencia para el movimiento horizontal debido a la onda S, $TF_1(\omega)$, y otra para el movimiento vertical debido a la onda P, $TF_3(\omega)$, se obtiene:

$$\frac{H(\omega)}{V(\omega)} = \sqrt{\frac{\alpha_H |TF_1(\omega)|}{\beta_H |TF_3(\omega)|}}, \quad (9)$$

donde α_H y β_H son la velocidad de onda P y la velocidad de onda S en el basamento respectivamente.

Nagashima et al. (2014) desarrollaron un método basado en los resultados de Kawase et al. (2011) que emplea relaciones EHVR obtenidas de registros sísmicos para caracterizar las estructuras del subsuelo directamente debajo de las estaciones sísmicas. Este enfoque comienza con el cálculo de cocientes espectrales, utilizando predominantemente las ondas S. Posteriormente, a partir de los EHVR calculados, se lleva a cabo la inversión de una estructura en capas con base en la ecuación (9) y el método HHS, el cual integra algoritmos genéticos con cristalización simulada.

Además de lo anterior, pueden tomarse como referencia trabajos recientes como el de Salinas et al. (2014) en el que demuestran que se pueden utilizar registros de movimientos fuertes de sismos para hacer el cálculo e inversión de cocientes espectrales EHVR con el fin de caracterizar la estructura del subsuelo pero a una mayor profundidad que si se trabajara con ruido sísmico.

Campillo y Paul (2003) aplicaron la teoría de campo difuso para correlaciones de largo alcance en la coda sísmica, particularmente en estaciones sísmicas ubicadas en el centro de México. Los principales criterios para seleccionar esta región como óptima fueron su alta actividad sísmica, la disponibilidad de registros de banda ancha de buena calidad y el comportamiento difuso de las ondas, entre otros factores. Con base en estos criterios y la importancia de conocer la dinámica de la zona lacustre de la Cuenca de México, surge la idea llamativa de aplicar el método propuesto por Nagashima et al. (2014) para caracterizar estructuras de velocidad de cortante (V_s) en diferentes localizaciones dentro de la región.

1.4. INVERSIÓN

En geofísica se utilizan métodos para estudiar a los diferentes campos físicos que se propagan en el interior de la Tierra, tal como el campo de ondas sísmicas. En el contexto del análisis de datos geofísicos hay dos enfoques principales que se denominan problema directo y problema inverso (Zhdanov, 2015).

Se conoce como problema directo al modelado numérico de datos geofísicos y tiene la finalidad de construir modelos geológicos que permiten predecir datos geofísicos observables. En otras palabras, se busca obtener la respuesta teórica que se mediría en superficie a partir de conocer la distribución de parámetros físicos del subsuelo. Para ello se utilizan ecuaciones ya establecidas acorde a la propiedad física con la que se esté trabajando.

El objetivo fundamental de la geofísica es caracterizar estructuras geológicas a partir de datos geofísicos, que es difícil debido a la complejidad del interior de la Tierra. Precisamente, el problema inverso consiste en ajustar un modelo mediante algoritmos de optimización para calcular datos teóricos hasta que tengan la menor diferencia con datos observados y así poder inferir cuales son los parámetros físicos del subsuelo.

De acuerdo con Hadamard (1902), un problema está bien planteado si cumple con tres condiciones fundamentales:

- **Existencia:** debe existir mínimo una solución para el problema.
- **Unicidad:** la solución debe ser única.
- **Estabilidad:** la solución debe mantenerse estable respecto a los datos, es decir, que pequeñas variaciones en los datos no generen grandes cambios en la solución.

Cuando alguna de estas condiciones no se cumple, el problema se considera mal planteado. No obstante, con base en los fundamentos de la teoría de problemas mal planteados realizados por Tikhonov (1943), el hecho de que un problema se considere mal planteado no quiere decir que carezca de un sentido físico o matemático. Al contrario, se descubrió que la mayoría de los problemas inversos relacionados con las ciencias de la Tierra son mal planteados y aun así pueden resolverse.

El hecho de que frecuentemente los problemas inversos sean mal planteados, se debe a que los datos con los que se trabajan no son suficientes para recuperar los parámetros, por lo que se recurre a métodos numéricos específicos o técnicas de regularización. En cambio, si se contara con datos suficientes, los problemas serían bien planteados.

El procedimiento propuesto por Nagashima et al. (2014) utiliza el método de inversión HHS que es una combinación de un algoritmo genético y una recristalización simulada. Este método asegura la menor diferencia entre el cociente EHVR promedio observado y un cociente EHVR teórico calculado con base en la ecuación (9) obtenida en el contexto de la teoría de campo difuso. El proceso de inversión parte de un modelo inicial que contiene diferentes parámetros, de entre los que destaca la velocidad de onda S que permite generar perfiles de Vs.

1.4.1. Algoritmos genéticos

En la actualidad, el uso de algoritmos basados en el principio de la evolución ha ido en aumento, de forma que existe un conjunto de estas técnicas al que se le conoce como computación evolutiva. Algunas de las técnicas evolutivas más implementadas son: algoritmos genéticos, programación evolucionaria, estrategias evolutivas y programación genética (Estévez, 1997).

En el caso de los algoritmos genéticos, sus bases fueron establecidas por John Holland en 1962 y se definen como una técnica robusta de búsqueda que se inspira en la teoría de la evolución biológica para que a partir de una población inicial se pueda encontrar la mejor solución a un problema de optimización. Dicha población es un conjunto de individuos compuestos por genes que representan una posible solución al problema y que tendrán que pasar por diferentes procesos con el objetivo de mejorar hasta encontrar al individuo más apto (Gestal et al., 2010).

Los conceptos antes mencionados pueden interpretarse diferente dependiendo del contexto en el que se esté implementando un algoritmo genético. En este sentido, al aplicar esta técnica para una inversión geofísica, el proceso sigue una serie de pasos bien definidos que se plantean a continuación.

- **Codificación de la solución:** se define la estructura de los modelos del subsuelo, donde cada individuo corresponde a un posible modelo solución y sus genes representan los parámetros físicos del subsuelo.
- **Generación de la población inicial:** se crea aleatoriamente un conjunto de modelos iniciales, los cuales representan la primera generación dentro del proceso de optimización.
- **Evaluación:** cada modelo es analizado mediante una función de aptitud que se basa en calcular el residual entre los datos invertidos y los observados con el fin de cuantificar su grado de ajuste.

- **Selección:** se eligen los modelos con mejor ajuste para actuar como padres de la siguiente generación y garantizar la conservación de las mejores soluciones.
- **Cruce:** los modelos seleccionados intercambian sus parámetros para generar nuevos individuos, permitiendo así la exploración de distintas configuraciones del subsuelo.
- **Mutación:** se introducen modificaciones aleatorias en algunos modelos para ampliar la búsqueda y evitar que la optimización converja a soluciones subóptimas.
- **Iteración y evolución:** el proceso se repite a lo largo de múltiples generaciones para afinar las soluciones progresivamente hasta encontrar el modelo que mejor explique los datos observables.

En el caso del método de inversión HHS implementado por Nagashima et al. (2014) en su método desarrollado, el flujo computacional básico funciona principalmente mediante un algoritmo genético.

1.4.2. Cristalización simulada

La cristalización simulada o también llamado recocido simulado es un método probabilístico que se implementa para la resolución de problemas de optimización. Fue propuesto por Kirkpatrick, Gelett y Vecchi en 1983 y por Cerny en 1985, para lo cual se basaron en la aplicación del algoritmo de Metrópolis, contribuyendo así al gran auge de esta técnica llamativa por su habilidad para escapar de los óptimos locales (Yepes, 2017).

El principio de esta técnica es simular el proceso físico que un sólido pasa cuando éste se enfría lentamente hasta congelarse con una energía mínima (Bertsimas & Tsitsiklis, 1993). Con esto en mente es posible plantear una analogía entre las variables utilizadas en una simulación termodinámica y los parámetros usados en un problema de inversión geofísica.

En este método, la temperatura es un parámetro que controla la exploración del espacio de soluciones y que necesita ser ajustado. Se debe comenzar con una temperatura alta para que sea más probable que el algoritmo acepte soluciones peores, lo que ayuda a evitar quedar atrapado en óptimos locales. Posteriormente, se debe ir disminuyendo la temperatura para que la aceptación de soluciones peores se reduzca y con ello se guíe al sistema hacia el óptimo global (Yepes, 2023).

Aplicar cristalización simulada para una inversión geofísica es bastante eficaz porque permite explorar una gama de soluciones posibles sin estancarse en mínimos locales. Para el método de inversión HHS usado por Nagashima et al. (2014), se introduce una cristalización simulada en la operación de cruce del algoritmo genético con el fin de refinar la búsqueda del modelo con mejor ajuste.

CAPÍTULO 2: ZONA DE ESTUDIO

2.1. LOCALIZACIÓN

La Cuenca de México (CM) se ubica en la parte central de México ocupando un área de 9,600 km² aproximadamente y situada a 2,250 m sobre el nivel del mar. Las proporciones de la CM son en promedio de 125 km de largo y 75 km de ancho, lo que define su contorno irregular y alargado de norte a sur (Díaz-Rodríguez, 2006).

La CM abarca los estados de Hidalgo, Tlaxcala, Estado de México y Ciudad de México, por lo que forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana que se extiende de este-oeste por la zona centro de México. Se encuentra limitada por sierras volcánicas y por abanicos y llanuras aluviales, además de que ha pasado por una serie de procesos que la han llevado a ser considerada como una cuenca cerrada (Vázquez-Sánchez & Jaimes-Palomera, 1989).

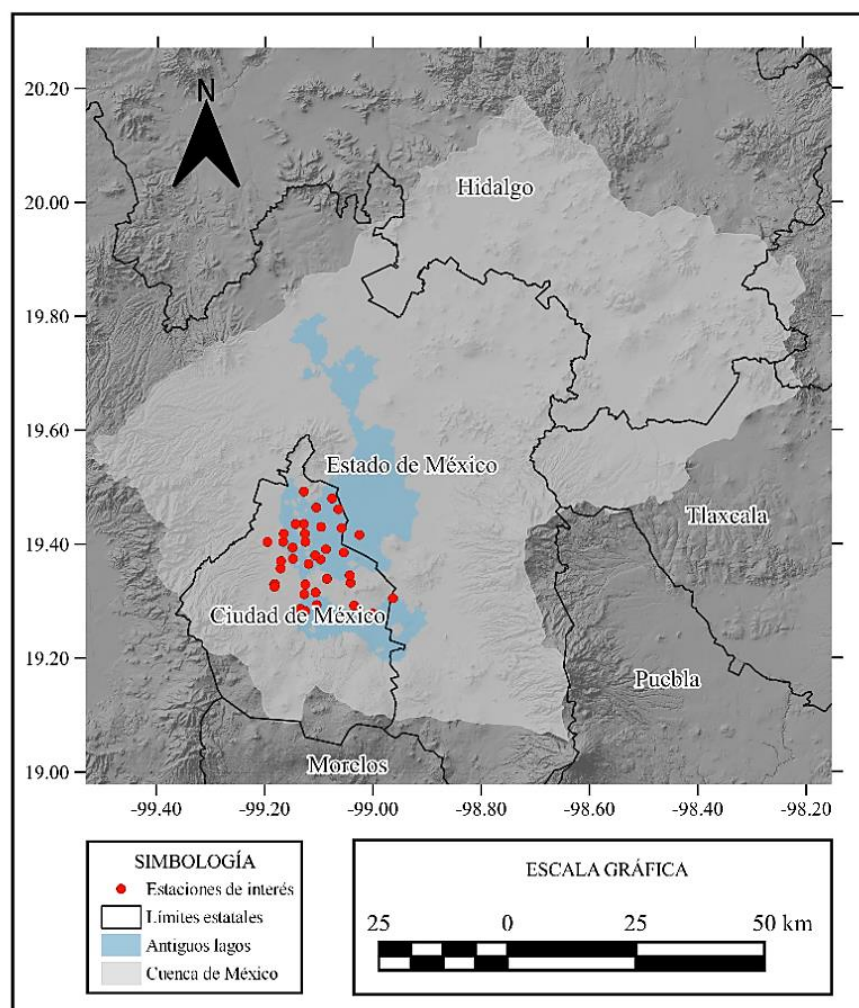


Figura 5. Localización de la zona de estudio.

Como se muestra en la Figura 5, las estaciones de interés están dentro de la CM, principalmente en la Ciudad de México y abarcando una parte de la antigua zona lacustre.

2.2. MARCO GEOLÓGICO

Hace 700,000 años la Cuenca de México se consideraba una cuenca exorreica o abierta porque presentaba un sistema hidrográfico con salida hacia el río Balsas, hasta que la gran actividad volcánica relacionada con la aparición de la sierra de Chichinautzin formó una cortina natural (Díaz-Rodríguez, 2006). Actualmente, la CM es una cuenca endorreica o cerrada porque no tiene ninguna salida natural de agua hacia un caudal mayor.

SIGNOS CONVENCIONALES:

- < 500 M.S.N. Valle
- 500 A 1000 M.S.N. Valle
- 1000 a 2000 M.S.N.
- > 2000 M.S.N. Valle
- Partaguas general de la cuenca
- Partaguas de las subcuencas

25

La CM está limitada por altas montañas pertenecientes a sierras importantes. Al norte se ubican las sierras de Pachuca, Tepoztlan, Guadalupe, Patlachique y Tepozán. Al sur se encuentra la antes mencionada sierra de Chichinautzin. Al este está la sierra Nevada constituida por los volcanes Ixtacihuatl y Popocatepetl. Finalmente al oeste está las sierras de Monte Alto y de las Cruces (Díaz-Rodríguez, 2006).

A map of the study area in Mexico. The map shows the Toluquahuac River flowing from the north towards the south. The river is labeled 'Toluquahuac' in several places. The area is divided into sections by the river and other geographical features. The map includes a latitude line at 19.55°N and a longitude line at 98.50°W. The map also shows the location of Toluquahuac and Coahuila. The map is titled 'Map of the study area'.

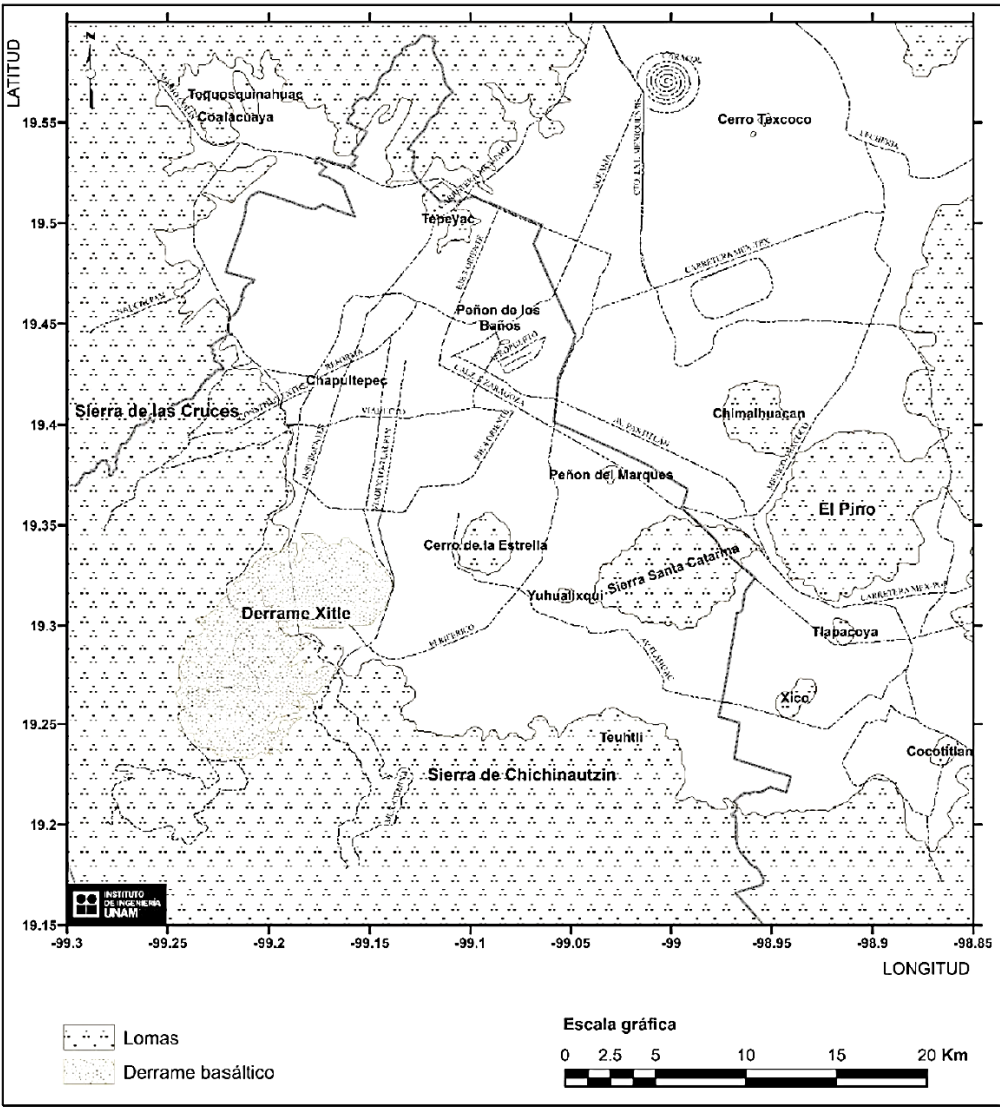


Figura 7. Geomorfología de la zona de estudio dentro de la cuenca de México (Lermo et al., 2020).

2.2.2. Geología regional

La investigación bibliográfica de Díaz-Rodríguez (2006) le permitió unificar información e identificar los principales eventos geológicos a los que se vio sometida la CM. Algunos de estos eventos concuerdan con las fases de evolución geológica de la CM reportadas por Mooser et al. (1996). A continuación se enlistan dichos eventos:

- **Cretácico:** Depósito de calizas, areniscas y lutitas en un ambiente marino de aproximadamente 2,000 m de espesor.
- **Terciario temprano:** Plegamiento y fallamiento normal de rocas marinas que dio origen a un sistema tectónico regional de graben en el centro de la CM.
- **Plioceno-Eoceno:** Depósito de sedimentos volcánicos, fluviales y lacustres en el graben.
- **Oligoceno-Mioceno-Pleistoceno:** Depósito de materiales piroclásticos y flujos de lava de composición intermedia y ácida.
- **Plioceno superior-Pleistoceno:** Depósito de abanicos aluviales y de piamonte en las regiones este y oeste.
- **Pleistoceno:** Erupciones volcánicas de basalto y pómez en la parte central y sur de la cuenca. Esto dio una de las características más importantes de la CM que es el cierre de la cuenca debido al derrame basáltico proveniente del volcán Xitle ubicado en la sierra de Chichinautzin.
- Formación de un ambiente lacustre a causa del cierre de la cuenca.
- Desarrollo de un conjunto de fallas NE-SW bajo los depósitos lacustres y a través del piso de la cuenca.

Con lo anterior, se puede definir que la litología de la CM se conforma en su parte basal por calizas, seguido en la parte superior por rocas como derrames volcánicos, tobas arcillosas, brechas volcánicas, arcillas y arenas tobáceas. De igual forma, se caracteriza por tener su parte central con intercalaciones de depósitos limo-arenosos (aluviales), limo-arcillosos (lacustres) y emisiones de pómez y cenizas que provinieron de los volcanes del sur y que al intemperizar generan arcillas muy compresibles. Finalmente, a pie de las sierras hay grandes depósitos aluviales con composición muy variable (Díaz-Rodríguez, 2006).

La Figura 8 es un diagrama geológico que muestra la estratigrafía y estructura tectónica más reciente de la CM, lo que se dio como resultado de los eventos geológicos antes planteados. En él se destacan algunas unidades y estructuras geológicas presentes en la cuenca como depósitos aluviales y lacustres, plegamientos y sistemas de fallas. Además, se incluyen elementos tectónicos importantes como fosas, cabalgaduras y arcos volcánicos que repercuten en la disposición de los materiales (Santoyo-Villa et al., 2005).

zona de lago y en la segunda hay un contacto entre arcillas lacustres y rocas volcánicas (Santoyo-Villa et al., 2005). Los depósitos profundos están a máximo 20 m de profundidad.

Finalmente, la zona de lago (III) está constituida por abundantes depósitos de arcilla compresible, separados por capas arenosas firmes. Es usual que los depósitos lacustres estén cubiertos por suelos aluviales y rellenos artificiales y que el espesor de todo el conjunto de materiales sea superior a 50 m (GobCDMXM, 2004). Debido a que un gran número de las estaciones estudiadas se ubican en la zona de lago, es conveniente incluir la secuencia estratigráfica de dicha zona reportada por Lermo et al. (2020) basándose en el trabajo de Santoyo-Villa et al. (2005):

- **“Costra superficial (CS):** Rellenos artificiales de espesor variable. Los más gruesos se encuentran en el centro histórico y tienen varios metros de espesor.
- **Formación arcillosa superior (FAS):** Secuencia de arcillas de la zona de lago formada por siete substratos de arcilla, separados por lentes duros. La composición de las arcillas es de blanda a muy blanda, y su espesor varía entre 25 y 50 m.
- **Capa dura (CD):** Es un depósito heterogéneo que se desarrolló en el periodo climático del interglacial Sangamon en el cual predominan limos arenosos con algo de arcilla y gravas ocasionales. Tiene una cementación muy errática y su espesor es variable (es delgada en el centro del lago de Texcoco y alcanza 5 m en sus orillas). La capa dura desempeña un papel importante en las cimentaciones profundas de la Ciudad de México, ya que para muchas estructuras sirve como apoyo de pilotes de punta, de control y de punta penetrante.
- **Formación arcillosa inferior (FAI):** Es una secuencia de estratos de arcilla separados por lentes duros. Su espesor es de unos 15 m al centro del lago y prácticamente desaparece en las orillas.
- **Depósitos profundos (DP):** Constituyen una serie de arenas y gravas aluviales limosas, cementadas con arcillas duras y carbonatos de calcio. La parte superior de estos depósitos, de 1 a 5 m, está más endurecida que la inferior, en donde se encuentran estratos menos cementados y hasta arcillas preconsolidadas.”

El reconocimiento sencillo de las tres diferentes zonas ha permitido mantener dicha zonificación por bastantes años e incluso ser considerada para el Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal (2004). Trabajos como el de Auvinet et al. (2017) con sondeos geotécnicos y el de Juárez-Camarena et al. (2016) con análisis geoestadísticos han permitido añadir ligeras modificaciones, como redefinir las fronteras entre las zonas, para así mantener actualizada la zonificación geotécnica.

Un mapa con la zonificación geotécnica más reciente se presenta en la Figura 9 y se puede apreciar el área que abarca cada una de las tres zonas descritas. Es importante retomar que la zona de lago presenta una gran importancia, por lo que la zona este de la Ciudad de México es de gran interés, tal como se abordará en el siguiente capítulo.

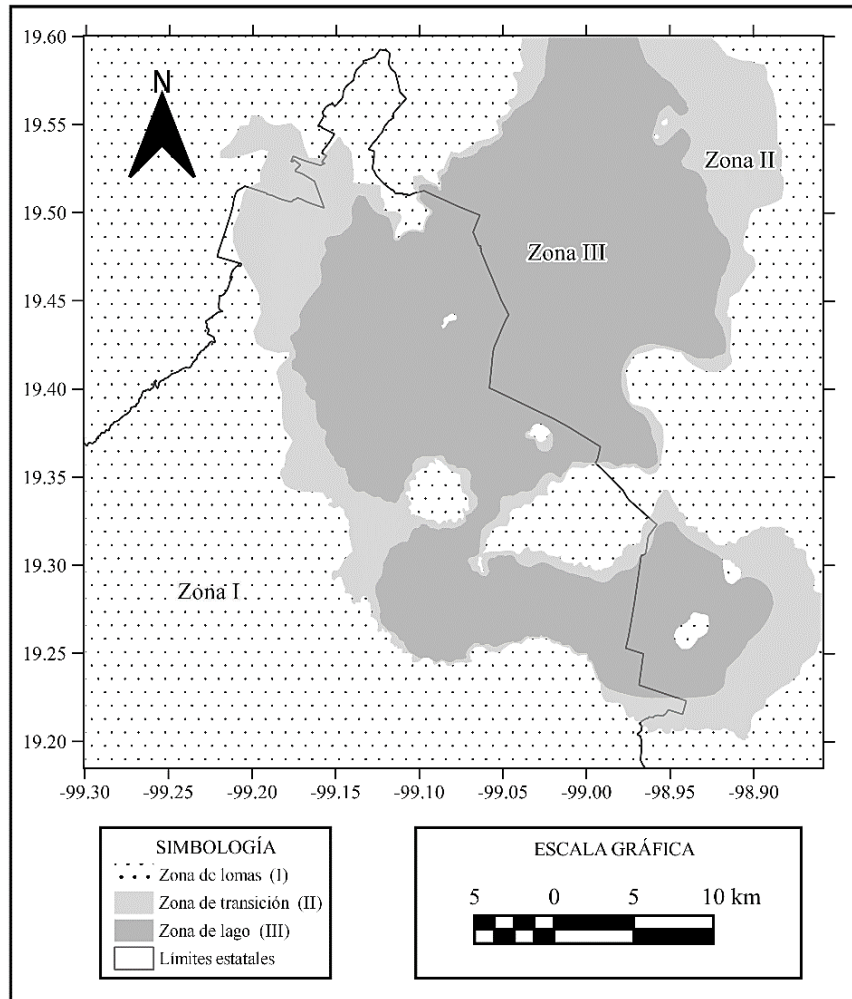


Figura 9. Zonificación geotécnica de la Ciudad de México y áreas aledañas.

2.4. ZONIFICACIÓN SÍSMICA

El concepto de zonificación sísmica se entiende como la división de una región en zonas o áreas con base en su peligro sísmico. Para ello se hace un despliegue espacial de parámetros como el periodo de vibración fundamental o la amplificación relativa a un periodo en particular (Lermo et al., 2020). En regiones donde existe una diferencia notoria en el comportamiento sísmico es fundamental contar con este tipo de información porque permite conocer la influencia que llegan a tener las condiciones geológicas locales en el movimiento del subsuelo al ocurrir un sismo.

Como mencionan Lermo et al. (2020), para realizar una zonificación sísmica se requiere el conocimiento de varias disciplinas de las que destacan la geología, geofísica, geotecnia, ingeniería sismológica, etc. En este sentido, el uso de técnicas geofísicas, como el cálculo de cocientes espectrales H/V con registros de ruido sísmico o la técnica de cocientes espectrales EHVR implementando registros sísmicos de estaciones sismológicas, es óptimo

para la obtención del periodo dominante en diferentes sitios de una región y con ello la realización de mapas de iso-periodos.

En la actualidad, la zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas se hace mediante el periodo dominante de sitio y es coincidente con la zonificación geotécnica descrita en el apartado anterior. Por ello, se mantienen las mismas tres zonas definidas: zona de lomas (I), zona de transición (II) y zona de lago (III). Una consideración importante es que los límites entre las zonas son la curva de 0.5 s de periodo para zona I y zona II, y la curva de 1 s de periodo para zona II y zona III (Lermo et al., 2020).

En la Figura 10 se exhibe el mapa de iso-periodos correspondiente con la zonificación sísmica más actualizada y fue realizado a partir de un total de 2680 datos recolectados. En dicho mapa se nota con las curvas de periodo dominante que el intervalo va desde 0.1 s en el área de las sierras, cerros y volcanes, hasta 5.9 s en el área lacustre, además de que la variación entre las curvas puede ser gradual o abrupta dependiendo del área y de la orientación de estudio (Lermo et al., 2020).

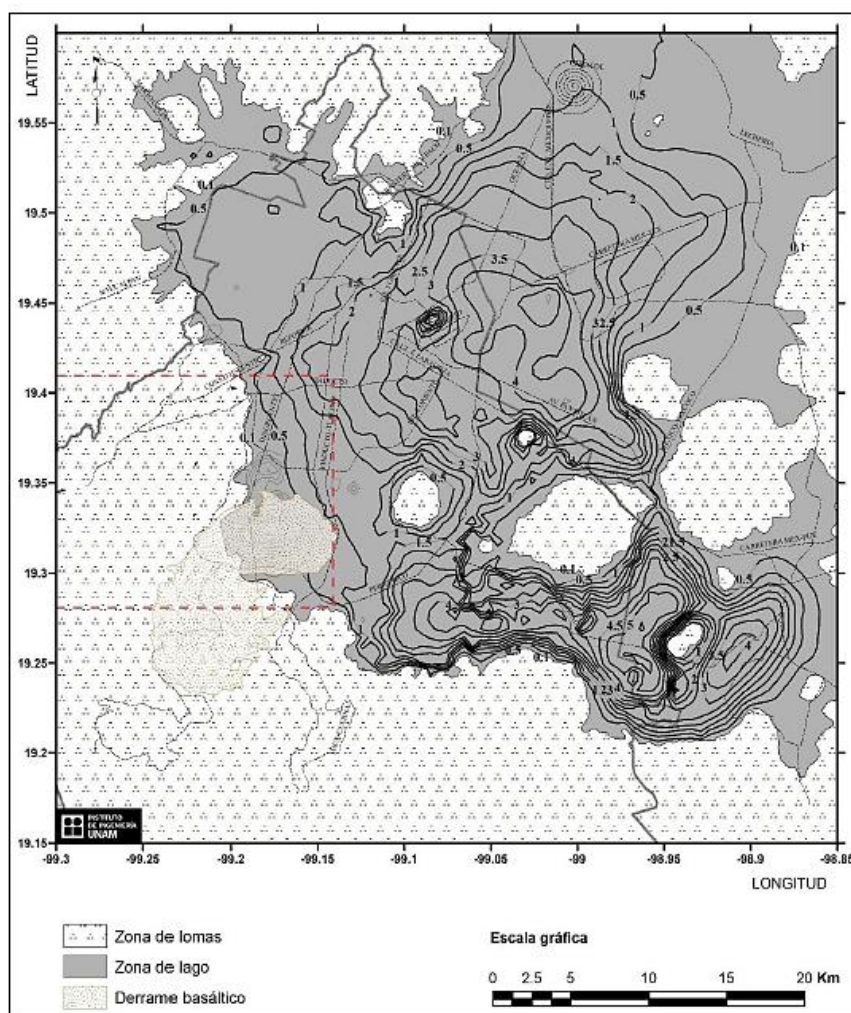


Figura 10. Zonificación sísmica de la Ciudad de México y áreas aledañas (Lermo et al., 2020).

CAPÍTULO 3: ESTACIONES Y DATOS DE ESTUDIO

3.1. DESCRIPCIÓN DE ESTACIONES

En un inicio, se consideraron 40 estaciones acelerográficas ubicadas principalmente en la Ciudad de México, de las cuales 14 pertenecen a la red acelerográfica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (RAII-UNAM) y 26 pertenecen a la red acelerográfica de la Ciudad de México a cargo del Centro de Instrumentación y Registro Sísmico (RACM-CIRES). La Figura 11 contiene la localización y distribución de las estaciones de estudio.

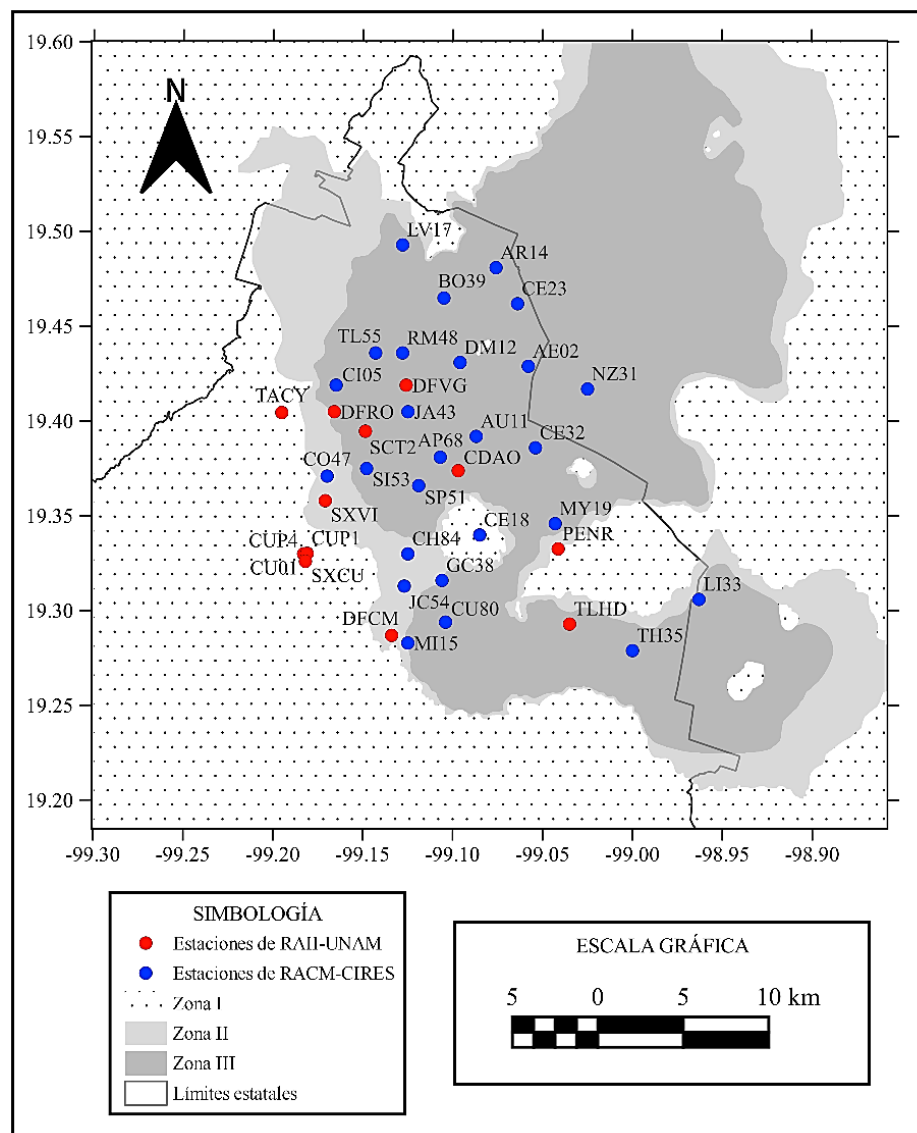


Figura 11. Localización de estaciones de estudio.

Como se muestra en la Figura 11, se usa como base el mapa de zonificación geotécnica presentado en el capítulo anterior con el fin de identificar visualmente en que zona se

ubican las diferentes estaciones de interés. Con esto en mente, se puede resumir que hay 7 estaciones en la zona I, 6 estaciones en la zona II y 27 estaciones en la zona III.

La elección de las estaciones acelerográficas se hizo con base en dos criterios fundamentales. El primero fue la ubicación, ya que se buscó que las estaciones cubrieran en mayor medida la zona de lago por su alto peligro sísmico y que estuvieran bien distribuidas en esa zona, es decir, que no estuvieran tan cercanas unas de otras.

El segundo criterio fue el número de registros de aceleración con los que contaba cada estación debido a que era preferible que las estaciones tuvieran un gran número de registros para que el proceso fuera más robusto. En el caso de las estaciones de la RACM-CIRES esto no representó ninguna dificultad, por el contrario a las estaciones de la RAI-UNAM de las que había un total de 45 estaciones que en su mayoría contaban solamente con 1, 2 o 3 registros. De estas, se hizo una preselección de 20 estaciones que tenían más de 5 registros y finalmente se descartaron algunas por la cercanía de unas con otras para así mantener solo a las 14 estaciones que contaban con mayor número de registros.

3.1.1. Instrumentación

El equipo que se usa en las estaciones acelerográficas es principalmente un acelerógrafo, un sistema de posicionamiento global (GPS) y sistemas de comunicación para la transmisión de datos sísmicos con alta precisión y rapidez.

En los registros de aceleración utilizados se reportaron hasta 20 modelos diferentes de acelerógrafo, siendo en la RAI-UNAM en la que más ha variado el modelo. A continuación se enlistan en la Tabla 1 los modelos de acelerógrafo que más se utilizaron por las diferentes estaciones de ambas redes acelerográficas:

Modelo	Marca	Resolución (bits)
DCA-333R	Terra Technology	12
IDS-3602A	Terra Technology	12
AR-240	UED	n/d
K2	Kinematics	12
SSA-1	Kinematics	12
RADESD	CIRES	n/d
RAD_IO14	CIRES	n/d
RAD-851	CIRES	12

Tabla 1. Características de acelerógrafos más utilizados en ambas redes acelerográficas.

Todos estos modelos de acelerógrafos permitieron registrar la aceleración del terreno en las tres direcciones (NS, EW y V) durante los eventos sísmicos. Otras especificaciones relevantes de estos instrumentos son la asignación de las tres componentes a los canales disponibles, la cual no siempre es la misma, y la frecuencia de muestreo, que en la mayoría de los eventos fue de 100 o 200 muestras por segundo en las estaciones de interés.

3.2. DESCRIPCIÓN DE DATOS

Se utilizaron registros de aceleración en tres componentes pertenecientes a las estaciones antes mostradas de la RAII-UNAM y de la RACM-CIRES. Se descargaron y analizaron 2,760 registros en total que cubren el periodo de 1964 a 2024 y cuyas magnitudes varían entre $M_c = 3.9$ a $M_c = 8.2$.

A los registros de dichas redes se les conoce como Archivo Estándar de Aceleración ASA2.0. y constan de un encabezado y una sección correspondiente a los datos numéricos de aceleración. Por su parte, el encabezado contiene 6 bloques con información referente a: propiedades del archivo, información de la estación, características del instrumento, datos del sismo, datos del acelerograma y comentarios (II-UNAM, 2025). La Figura 12 es un ejemplo general de cómo se visualiza la parte superior de un archivo de aceleración ASA2.0 y pueden notarse los bloques antes mencionados.

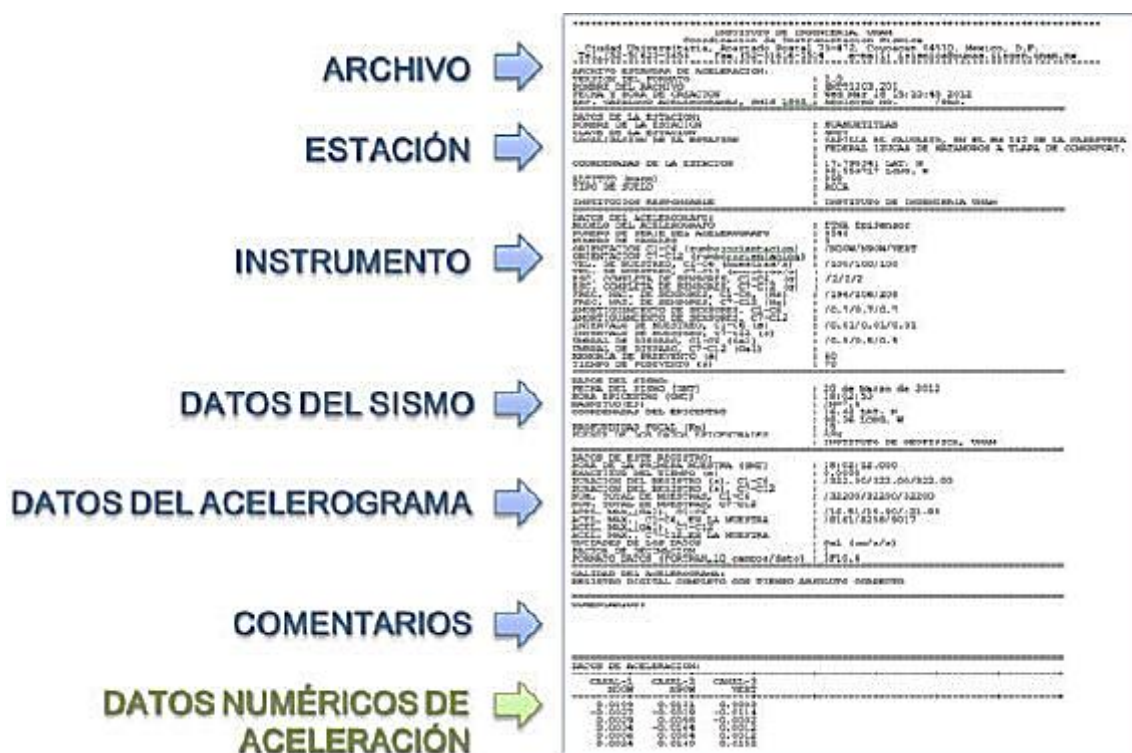


Figura 12. Descripción de Archivo Estándar de Aceleración ASA2.0 (II-UNAM, 2025).

3.2.1. RAII-UNAM

La obtención de los registros de aceleración pertenecientes a las 14 estaciones de la RAI-UNAM fue mediante el sistema de la Base de Datos Acelerográficos de dicha red, elaborado por la Unidad de Instrumentación Sísmica (UISII-UNAM, 2024). El tipo de consulta utilizada consistió en una búsqueda avanzada de acelerogramas donde los principales criterios o filtros fueron la estación y la entidad federativa.

A partir de la búsqueda realizada, el sistema proporcionó el catálogo de las estaciones ubicadas en la Ciudad de México junto con sus registros disponibles. De esta manera, se seleccionaron las 14 estaciones con mayor cantidad de acelerogramas y mejor ubicación, para posteriormente descargar sus registros asociados. Todos los archivos descargados fueron agrupados en carpetas correspondientes a las diferentes estaciones para mantener orden durante el manejo de estos.

El total de acelerogramas descargados de la RAII-UNAM fue de 506, con un promedio de 36 registros por estación que podría considerarse como un número bajo comparado con la cantidad de acelerogramas disponibles en la otra red. La Tabla 2 contiene la clave, nombre y cantidad de registros descargados de las 14 estaciones pertenecientes a esta red.

Clave de la estación	Nombre de la estación	Registros disponibles
CDAO	CENTRAL DE ABASTOS OFICINAS	78
CU01	I de I LAB. INSTRUMENTACION SISMICA	21
CUP1	IDEI PATIO 1	20
CUP4	IDEI PATIO 4	61
CUP5	IDEI PATIO 5	59
DFCM	COLEGIO MADRID	9
DFRO	ROMA SUR	48
DFVG	PREPA 7 LA VIGA	9
PENR	COLONIA QUETZALCOATL	20
SCT2	SCT B-2	61
SXCU	SISMEX CIUDAD UNIVERSITARIA	6
SXVI	SISMEX VIVEROS	11
TACY	TACUBAYA	91
TLHD	TLAHUAC DEPORTIVO	12

Tabla 2. Información de las 14 estaciones de estudio de la RAII-UNAM.

3.2.2. RACM-CIRES

La elección de las 26 estaciones correspondientes a la RACM-CIRES se hizo cuidando que tuvieran una buena distribución geográfica con respecto a las 14 estaciones de la RAII-UNAM que ya se habían seleccionado previamente. Una vez que se eligieron, hubo dos estrategias con las que se obtuvieron los acelerogramas pertenecientes esta red.

La primera se basó en la descarga de registros desde el disco compacto elaborado por el grupo de instituciones que conformaron la Base Mexicana de Datos de Sismos Fuertes (BMDSF, 2000). Al acceder al disco, se hizo una consulta filtrando las estaciones para incluir únicamente las ubicadas en la Ciudad de México y el Estado de México. Esta búsqueda arrojó todos los acelerogramas disponibles ordenados por estación, lo que permitió seleccionar y descargar los registros asociados a las 26 estaciones previamente elegidas.

Con la primera forma de consulta se obtuvieron muy pocos registros por estación debido a que el disco solo contenía acelerogramas registrados hasta antes del año 2000. Por ello, se optó por una segunda estrategia que consistió en usar el sistema web de la RACM (CIRES, 2024). Mediante esta plataforma, se visualizaron e identificaron los eventos sísmicos ocurridos después del 2000 que cumplieran con criterios de calidad para la identificación del arribo de onda S. Durante este proceso, se elaboró una tabla en la que se registraron los eventos que cumplían dichos criterios (filas) y las estaciones de estudio (columnas), marcando aquellas en las que el registro era adecuado. Finalmente, esta tabla se compartió al personal del CIRES con el fin de solicitar la información correspondiente.

Se descargaron en total 2,254 registros de aceleración pertenecientes a la RACM-CIRES, los cuales representan la mayor parte de todos los acelerogramas usados. Cada estación tenía 86 registros en promedio y al igual que en el anterior apartado, se incluye la Tabla 3 con la clave, nombre y cantidad de registros disponibles de las 26 estaciones de dicha red.

Clave de la estación	Nombre de la estación	Registros disponibles
AE02	AEROPUERTO	74
AP68	APATLACO	61
AR14	ARAGON	53
AU11	AUTODROMO	86
BO39	BONDOJITO	98
CE18	CERRO DE LA ESTRELLA	42
CE23	CETIS ARAGÓN	70
CE32	CETIS 57	64
CH84	CULHUACAN	91
CI05	CIBELES	141
CO47	COYOACAN	75
CU80	CUEMANCO	54
DM12	DEPORTIVO MOCTEZUMA	96
GC38	GARCIA CAMPILLO	86
JA43	JAMAICA	79
JC54	JARDINES DE COYOACAN	117
LI33	LICONSA	90
LV17	LINDAVISTA	121
MI15	MIRAMONTES	80
MY19	MEYEHUALCO	102
NZ31	NEZAHUALCOYOTL	103
RM48	RODOLFO MENENDEZ	70
SI53	SAN SIMON	109
SP51	SECTOR POPULAR	112
TH35	TLAHUAC	67
TL55	TLATELOLCO	113

Tabla 3. Información de las 26 estaciones de estudio de la RACM-CIRES.

CAPÍTULO 4: PREPROCESAMIENTO

4.1. ANÁLISIS DE REGISTROS SÍSMICOS

Después del proceso de obtención de los datos de estudio, la primera actividad que se realizó fue el análisis de los registros de aceleración, en la que fundamentalmente se debía definir si un registro podía ser usado o debía ser descartado. Si se presentaba el primer caso, había que identificar el arribo de onda S bajo ciertos criterios.

Para esta parte del preprocesamiento se utilizó un programa de Matlab con el que se podían visualizar y examinar los acelerogramas. El programa hacía la lectura de un solo archivo ASA2.0 desde la sección correspondiente a los datos numéricos de aceleración. Un punto relevante era escribir a qué canal estaba asignada cada una de las tres componentes para que al graficar los datos aparecieran correctamente.

Con la finalidad de visualizar mejor el arribo de la onda S, se agregó un filtro pasa bandas tipo Butterworth de cuarto orden que permitió aislar las señales dentro del rango de 0.5 – 5 Hz, que es donde usualmente se encuentran las ondas S en sismos moderados a fuertes, manteniendo así un buen equilibrio entre atenuar las frecuencias no deseadas y evitar distorsiones de las señales. También, era importante indicar la frecuencia de muestreo reportada en el registro para normalizar las frecuencias de corte con respecto a la frecuencia de Nyquist al aplicar el filtro. Finalmente, el filtrado se realizó usando la función *filtfilt* de Matlab para evitar un desfase en los datos.

Al visualizar los acelerogramas con el programa antes descrito, se debía verificar que cumplieran con ciertos criterios de calidad para su uso. El primero de ellos fue que el registro contuviera el arribo de onda S y su fase, lo cual era una condición fundamental para implementar el método de Nagashima et al. (2014). Este requisito podía evaluarse fácilmente, ya que era bastante evidente cuando los registros no tenían los datos suficientes para contener la fase de onda S e incluso para identificar propiamente al sismo.

Otro criterio, en este caso de descarte, fue que los registros acelerográficos podían presentar señales escalonadas o con apariencia cuadrada que los hacía no aptos para el estudio. Este efecto puede atribuirse a las limitaciones de los instrumentos utilizados, especialmente en los equipos antiguos que tenían una baja resolución en la digitalización o un muestreo inadecuado.

En la Figura 13 se presentan dos acelerogramas pertenecientes a una de las estaciones de estudio. El acelerograma de la izquierda es un ejemplo de un registro descartado por tener datos insuficientes y apariencia cuadrada, mientras que el de la derecha ejemplifica un registro apto porque contiene la información necesaria y no presenta escalonamiento.

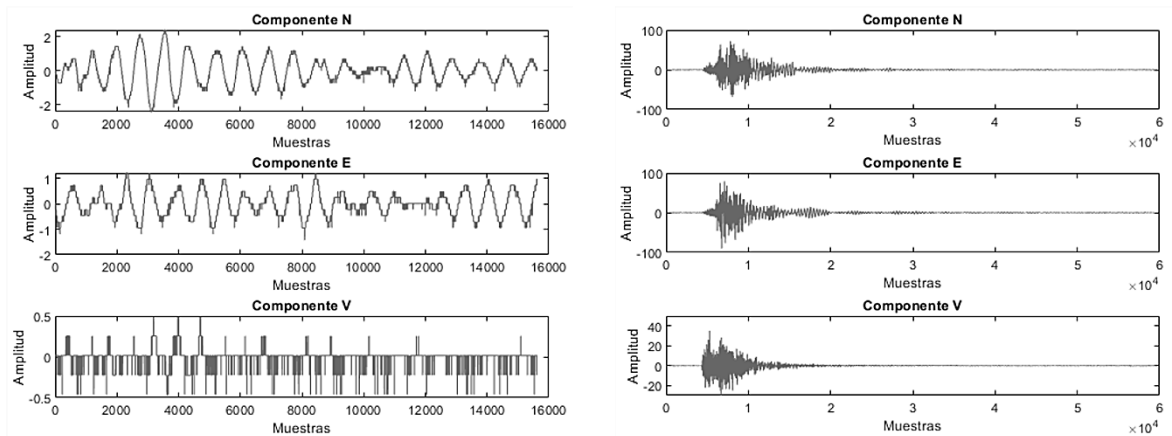


Figura 13. Ejemplo de acelerograma descartado y apto de la estación AU11.

Cuando los registros acelerográficos fueran aptos, se comenzaba con la identificación del arribo de onda S donde se añadiría una ventana de 2,048 muestras para aplicar el método EHVR. Esta actividad del preproceso representó dificultad y una gran inversión de tiempo porque había que observar meticulosamente algunas características en el acelerograma para caracterizar la parte de interés en él. Dichas características se enlistan a continuación:

- **Componentes horizontales:** las ondas S suelen producir mayores movimientos en las direcciones transversales, por lo que el arribo de este tipo de onda puede identificarse mejor en las dos componentes horizontales del acelerograma.
- **Posición:** la llegada de la onda S puede variar dependiendo de la distancia al epicentro, sin embargo, siempre es posterior al arribo de onda P y anterior al de las ondas superficiales. Por ello, se debe buscar el arribo de onda S entre la fase de onda P y el arribo de las ondas superficiales.
- **Cambios de frecuencia:** las ondas sísmicas cubren distintas frecuencias, lo que permite identificar el arribo de onda S después de la fase de onda P porque hay un cambio hacia frecuencias más bajas.
- **Cambios de amplitud:** después del arribo de la onda P, la llegada de la onda S se caracteriza por generar un aumento notable en la amplitud de la señal.

Se utilizó un archivo de Excel con varias hojas correspondientes a cada estación donde se fue reportando a los registros descartados y a los registros aptos con el número de muestra asociado a la llegada de la onda S que se detectó y marcó. Además, se fueron guardando las figuras de los acelerogramas con sus respectivos picados de arribo de onda S para llevar un mejor registro visual de la información que se usaría más adelante.

La Figura 14 muestra un acelerograma apto de una estación de estudio señalando el picado del arribo de la onda S para ejemplificar la labor realizada en esta parte del preprocesado.

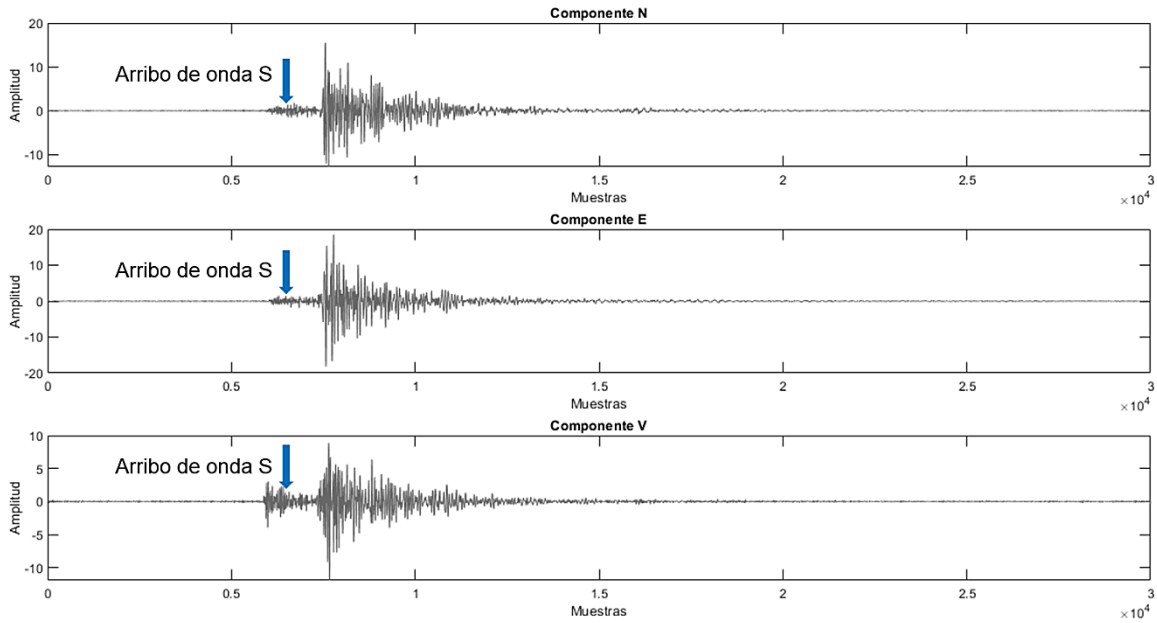


Figura 14. Acelerograma con arribo de onda S de la estación AP68.

Después de analizar todos los registros disponibles para cada estación, se hacía un reacomodo de la información en el archivo Excel de manera que solo aparecieran los nombres de los archivos de aceleración aptos y los números de muestra donde se marcó el arribo de onda S. Esta reorganización de la información se hizo con el objetivo de agilizar el manejo de los datos mencionados, ya que posteriormente serían utilizados en el programa del cálculo de cocientes espectrales que se abordará en el siguiente apartado.

Al finalizar el análisis de registros sísmicos, se determinó que los registros disponibles pertenecientes a las estaciones de la RII-UNAM fueron mayormente descartados, lo cual puede deberse a la gran cantidad de registros antiguos y a las condiciones de los instrumentos de esa época. La Tabla 4 contiene el reporte de los registros disponibles, aptos y descartados para las estaciones de estudio, donde además de lo recién mencionado, se puede notar que de las 40 estaciones de estudio iniciales, 38 estaciones contenían registros aptos para aplicar el método de Nagashima et al. (2014), mientras que de los acelerogramas disponibles para las estaciones DFCM y SXCU no había ni un registro apto.

Clave de la estación	Registros disponibles	Registros aptos	Registros descartados
AE02	74	59	15
AP68	61	42	19
AR14	53	41	12
AU11	86	60	26
BO39	98	74	24
CDAO	78	25	53
CE18	42	29	13
CE23	70	46	24
CE32	64	44	20

CH84	91	61	30
CI05	141	103	38
CO47	75	55	20
CU01	21	5	16
CU80	54	46	8
CUP1	20	10	10
CUP4	61	51	10
CUP5	59	54	5
DFCM	9	0	9
DFRO	48	13	35
DFVG	9	3	6
DM12	96	66	30
GC38	86	61	25
JA43	79	59	20
JC54	117	82	35
LI33	90	70	20
LV17	121	80	41
MI15	80	59	21
MY19	102	67	35
NZ31	103	62	41
PENR	20	14	6
RM48	70	43	27
SCT2	61	51	10
SI53	109	64	45
SP51	112	73	39
SXCU	6	0	6
SXVI	11	2	9
TACY	91	33	58
TH35	67	58	9
TL55	113	74	39
TLHD	12	2	10

Tabla 4. Reporte del análisis de registros sísmicos de las estaciones de estudio.

4.2. CÁLCULO DE COCIENTES ESPECTRALES

La siguiente actividad del preprocesado fue el cálculo de cocientes espectrales para las ventanas de onda S definidas a partir de su arribo, el cual se determinó mediante el análisis de los archivos de aceleración. Cabe mencionar que todo el preprocesamiento fue realizado por estación.

Para esta actividad, se usó nuevamente un programa de Matlab que calculó y graficó los cocientes espectrales a partir de la información reorganizada en el archivo Excel, es decir, el nombre de los archivos de aceleración aptos y los números de muestras donde se definieron las ventanas para onda S. Con esto en mente, el código tenía el propósito de brindar la respuesta espectral y evaluar la relación entre las componentes horizontales y verticales.

Al igual que el programa utilizado para el análisis de registros, el código empleado en esta actividad importaba archivos ASA2.0 desde la sección correspondiente a los datos numéricos de aceleración, con la diferencia de que se debían incluir todos los nombres de los archivos aptos y sus números de muestra para el ventaneo.

Dentro del código, se hacía un acomodo en bloques que agrupaba la información para las ventanas de onda S, donde igualmente había que incluir el valor total de ventanas. Este acomodo se realizó para mantener orden y no mezclar o repetir información al momento de calcular y graficar los cocientes espectrales.

En este programa también era necesario especificar a qué canal estaba asignada cada una de las tres componentes para que los cálculos fueran adecuados. Sin embargo, la disposición de las tres direcciones no era uniforme en todos los registros a pesar de que pertenecieran a una misma estación. Por ello, se debían agrupar y señalar a los registros con base en las diferentes asignaciones de las direcciones.

Teniendo en cuenta todas estas consideraciones del programa y ejecutándolo, su flujo de actividades consistía en cargar los nombres de los registros de aceleración aptos y el número de muestra que indicaba la posición de inicio de una ventana de análisis. Después, se extraían las tres componentes de cada archivo, se hacía una corrección de línea base, un suavizado de bordes y se aplicaban las ventanas para el cálculo de las transformadas de Fourier y de los cocientes espectrales. Finalmente se añadía la desviación estándar a los cocientes espectrales calculados y se promediaban para obtener un solo cociente espectral de onda S.

Una vez que se realizaban los cálculos, el programa generaba varias figuras para visualizar espectros de amplitud de Fourier, cocientes espectrales sin promediar con su desviación estándar y cocientes espectrales promediados. La información de los cocientes espectrales de onda S eran guardados en un archivo CSV que posteriormente sería usado para el proceso de inversión. No obstante, antes de pasar a dicho proceso, se podían examinar ciertos criterios para evaluar la congruencia de los cálculos realizados.

En primer lugar, los cocientes espectrales de onda S sin promediar y con su desviación estándar permitían identificar la estabilidad de la estimación y la variabilidad en la respuesta del sitio. La Figura 15 contiene ejemplos de gráficas de cocientes espectrales de onda S. La gráfica de la izquierda es de la estación CU01 y presenta gran desviación estándar, lo que reduce su fiabilidad debido a las diferencias entre los registros y al poco número de ellos. Al contrario, la gráfica de la derecha es de la estación CDAO y tiene una desviación estándar de media a pequeña que proporciona una mayor confiabilidad.

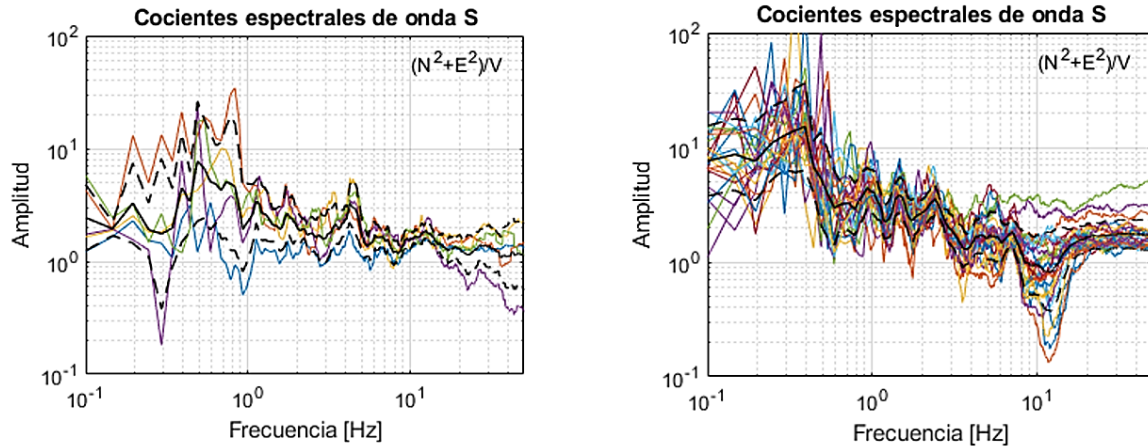


Figura 15. Cocientes espectrales con desviación estándar de las estaciones CU01 y CDAO.

Adicionalmente, los cocientes espectrales de onda S ya promediados permitían evaluar la respuesta sísmica del sitio mediante el periodo dominante. Con ello, se podía verificar si el periodo calculado a partir de los cocientes espectrales era congruente con el periodo de la zona sísmica correspondiente a cada estación.

En este sentido, se realizó la Tabla 5 en la que se reportan los periodos dominantes calculados y un intervalo más preciso de los periodos entre los que se encuentran las estaciones, determinados con base en el mapa de iso-periodos de la Figura 10. Las marcas verdes significan que el periodo resultante es coincidente con el intervalo de iso-periodos. Por su parte, las marcas amarillas indican que el periodo esta fuera del intervalo esperado pero con un valor muy cercano (diferencia menor a 0.5 s). Por último, las marcas rojas señalan que el periodo difiere en gran medida (diferencia mayor a 0.5 s).

Esta revisión permitió hacer una evaluación precisa de los periodos calculados en la que se optó por considerar a los periodos con marcas verdes y amarillas como adecuados debido a su ligera diferencia respecto al intervalo de iso-periodos y a su coherencia con la zona geotécnica en donde se encuentran sus estaciones asociadas. De igual forma, se profundizará más acerca de la evaluación de los periodos obtenidos en el capítulo 6, especialmente de los periodos incongruentes en rojo, como los de las estaciones de CU.

Clave de la estación	Intervalo de iso-periodos [s]	Periodo dominante [s]
AE02	4 – 4.5	4.17
AP68	2 – 2.5	2.56
AR14	2.5 – 3	2.94
AU11	3.5 – 4	4.17
BO39	2 – 2.5	2.56
CDAO	2.5 – 3	2.56
CE18	0.1 – 0.5	0.64
CE23	4 – 4.5	4.16
CE32	3.5 – 4	3.45

CH84	1 – 1.5	1.28
CI05	1.5 – 2	1.69
CO47	0.5 – 1	0.73
CU01	0.1 – 0.5	2.04
CU80	2.5 – 3	2.27
CUP1	0.1 – 0.5	2.56
CUP4	0.1 – 0.5	1.69
CUP5	0.1 – 0.5	2.56
DFRO	1 – 1.5	1.07
DFVG	2 – 2.5	1.85
DM12	3 – 3.5	2.94
GC38	1 – 1.5	1.47
JA43	2.5 – 3	2.56
JC54	1 – 1.5	1.08
LI33	2.5 – 3	2.94
LV17	1 – 1.5	1.85
MI15	1 – 1.5	1.28
MY19	2 – 2.5	2.27
NZ31	4 – 4.5	4.16
PENR	0.5 – 1	1.28
RM48	2 – 2.5	2.04
SCT2	1.5 – 2	1.69
SI53	1 – 1.5	1.37
SP51	1.5 – 2	1.69
SXVI	0.1 – 0.5	0.5
TACY	0.1 – 0.5	1.28
TH35	3 – 3.5	4.16
TL55	1.5 – 2	1.85
TLHD	2 – 2.5	1.2

Tabla 5. Revisión de zona sísmica y periodo dominante calculado de las estaciones de estudio.

Cuando se finalizó con esta parte del preprocesado, se obtuvieron los archivos CSV necesarios para realizar la inversión de los cocientes espectrales de onda S de todas las estaciones. Asimismo, se observó que la mayoría de los cálculos realizados en esta parte del estudio eran confiables con base en los criterios antes mencionados. Sin embargo, en el caso de las estaciones con diferencias considerables, aún se tenía que hacer el proceso de inversión para evaluar con certeza las discrepancias entre los periodos, por lo que esto será discutido hasta el capítulo 6.

CAPÍTULO 5: INVERSIÓN

El preprocesado permitió calcular los cocientes espectrales promedio de onda S (EHVR) y guardarlos en archivos CSV, los cuales eran muy importantes porque contenían la información que se pondría a invertir. Siguiendo el método de Nagashima et al. (2014), el objetivo de la inversión de los cocientes espectrales era caracterizar las velocidades de onda S a partir de un modelo inicial con parámetros generales de la zona de estudio y así poder construir estructuras de velocidad para cada estación.

Al llevar a cabo el proceso de inversión se usó la aplicación MobaXterm debido a que se requería la conexión al servidor Ollin para ejecutar el programa principal. Dicho servidor es un sistema de cómputo de alto rendimiento con sistema operativo Linux que se utiliza en el Instituto de Ingeniería para el procesamiento avanzado de datos y que resulta óptimo para resolver problemas complejos como una inversión geofísica.

Dentro del servidor Ollin, se optó por crear y organizar carpetas correspondientes a las 38 estaciones de las que se tenía cociente EHVR para invertir. Estas carpetas se hicieron con el fin de separar la gran cantidad de archivos que se generaban para cada estación.

Antes de comenzar el proceso de inversión, se añadieron ciertos archivos de entrada en cada carpeta junto con el programa de inversión principal, ya que tenían el propósito de brindar las características e información indispensables para la correcta realización de la inversión. A continuación se enlistan los archivos de entrada necesarios:

- **Archivo del modelo inicial:** archivo tipo *soil* con el que se definía al modelo inicial a partir de los parámetros de espesor (H), densidad (ρ) y velocidades de onda P y S (V_p y V_s) de cada estrato.
- **Archivo de restricciones:** archivo tipo *txt* con restricciones particulares para el proceso de inversión. En él se podía admitir la inversión de velocidades y seleccionar la forma en la que se calculaban los diferentes parámetros.
- **Archivo de control:** archivo tipo *txt* con la estructura y control de las características de la inversión como el rango de frecuencias, temperatura inicial de cristalización simulada, parámetros de población y número de generaciones de los algoritmos genéticos.
- **Archivo de cociente observado:** archivo tipo *csv* con el cociente espectral observado, es decir, el cociente promedio calculado en el preprocesamiento.

Un punto importante es que se utilizó un archivo macro dentro del servidor Ollin para modificar los nombres que tendrían los archivos de salida y garantizar que no se sobrescribieran con las 35 inversiones.

Para la mayoría de las estaciones, se usó un mismo modelo inicial el que se definieron los parámetros con base en las condiciones típicas de la cuenca de México, es decir, con un aumento progresivo de las velocidades y densidades a profundidad que va acorde a la transición de depósitos blandos a formaciones más rígidas.

Para las estaciones de estudio ubicadas en la Ciudad Universitaria (CU) de la UNAM, se definió un modelo inicial particular basado en el perfil estratigráfico del pozo de Copilco elaborado por Unda (2016) en el que se reportó presencia de capas rígidas más someras. Igualmente, se permitió la inversión de velocidades con el fin de que el modelo tomara en cuenta la posible presencia de una capa blanda en profundidad que explicara los cocientes espectrales obtenidos para esas estaciones y que aparece en el perfil del pozo.

Teniendo estas consideraciones presentes, se usó como referencia el procedimiento de Nagashima et al. (2014) para implementar el programa de inversión principal con el método de inversión HHS. Dicho método consistía en combinar un algoritmo genético y una cristalización simulada para buscar el mejor ajuste entre los cocientes EHVR observados en el preprocesamiento y los cocientes EHVR teóricos calculados con la ecuación (9) a partir de los parámetros dados en el modelo inicial.

De esta manera, al ejecutar el programa de inversión en el servidor Ollin se realizaban 35 inversiones independientes por estación que seguían un proceso computacional basado en la serie de pasos fundamentales de un algoritmo genético pero incluyendo una cristalización simulada en la operación de cruce para refinar la búsqueda. El propósito del código era evolucionar los parámetros del modelo inicial hasta encontrar el modelo que mejor explicara los datos observados y así poder tomar los valores de Vs para construir los perfiles de velocidad.

Al terminar de ejecutar el programa de inversión, se obtenía un grupo de archivos con diferente información que se guardaba en las carpetas. La lista incluida a continuación describe los diferentes archivos de salida obtenidos para cada una de las 35 inversiones.

- **Archivo de cociente teórico:** archivo tipo csv con el cociente espectral teórico que mejor se ajustó al cociente espectral observado.
- **Archivo del mejor modelo:** archivo tipo csv con los parámetros correspondientes al modelo de mejor ajuste.
- **Archivo de residuales:** archivo tipo csv con el resumen de los residuales de cada generación.
- **Archivo de estatus:** archivo tipo txt con información de la inversión realizada como las generaciones y el tiempo requerido.

Cuando la ejecución del código finalizaba, se utilizaban comandos en el servidor Ollin para visualizar el último valor de los archivos de residuales y así poder identificar cuál de las 35

inversiones tuvo el menor residual. Esto era importante para caracterizar la inversión con el mejor ajuste y destacarla al momento de graficar los resultados.

Finalmente, había que descargar del servidor todos los archivos generados y seguir almacenándolos en carpetas por estación donde también estarían los programas que se usarían para graficar los resultados. Se utilizaron en total tres códigos de Matlab con los que se leían y graficaban los datos de los archivos tipo csv.

El primer programa tenía el objetivo de importar y graficar los 35 archivos de residuales resaltando la inversión con el menor error. Con las gráficas se buscaba visualizar el comportamiento del residual conforme avanzaban las generaciones, el cual debía ser similar a una función exponencial negativa característica de los algoritmos genéticos.

La Figura 16 ejemplifica el comportamiento de los residuales correspondientes a las inversiones de una de las estaciones de estudio. En ella se puede apreciar una disminución rápida del residual en las primeras generaciones, seguida de un decremento más lento hacia el final que tiene que ver con la estabilización de la inversión al acercarse al mejor ajuste.

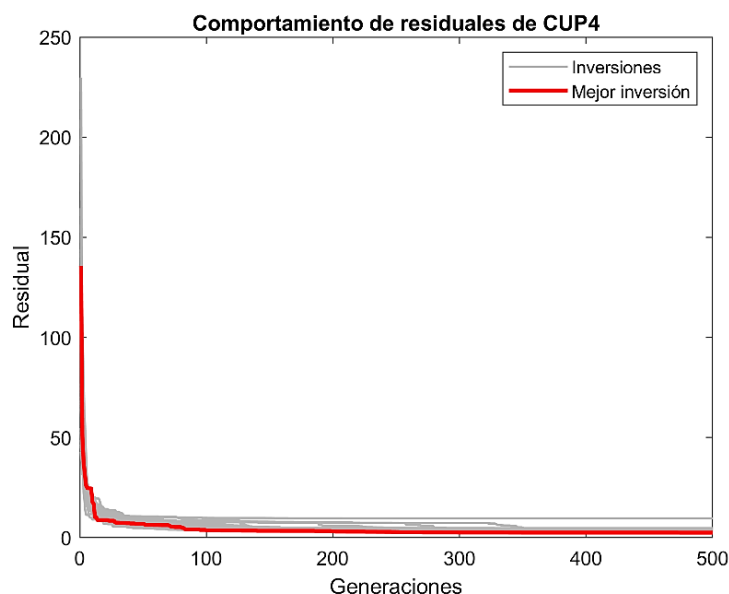


Figura 16. Comportamiento de los residuales de la estación CUP4.

En el segundo programa se leían y graficaban los 35 archivos de los cocientes espectrales teóricos junto con el cociente espectral observado, resaltando igualmente al cociente teórico que mejor ajustó. Los gráficos realizados se hacían con el fin de evaluar visualmente que tan bueno había sido el ajuste entre los cocientes teóricos con respecto al cociente observado. Dichas representaciones se hacían con escala logarítmica para visualizar e interpretar los resultados adecuadamente en un buen rango de frecuencias, lo cual no se lograba completamente con una escala lineal.

En la Figura 17 se muestra un ejemplo del ajuste de los cocientes espectrales EHVR para una de las estaciones de estudio. Se pueden ver de buena forma las variaciones en un amplio rango de frecuencias, lo que resulta favorable para notar en que frecuencias hubo un mejor ajuste.

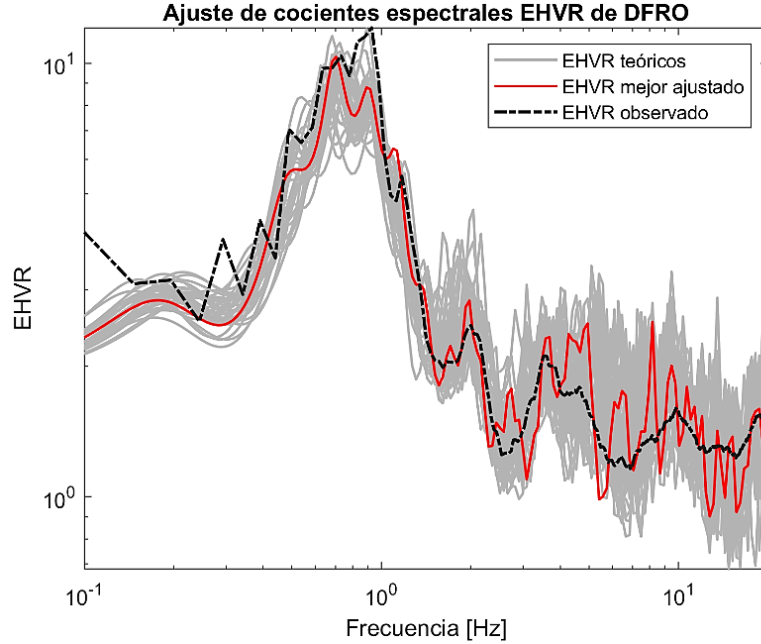


Figura 17. Ajuste de los cocientes espectrales de la estación DFRO.

El tercer programa importaba los archivos del mejor modelo de cada una de las 35 inversiones con el propósito de tomar las Vs de las capas caracterizadas y generar las estructuras de velocidad. Los 35 perfiles de cada estación se ponían juntos en una misma gráfica donde destacaba el perfil correspondiente a la inversión con el mejor ajuste. De igual forma, el programa añadía una tabla con los parámetros correspondientes al perfil mejor ajustado como apoyo para la interpretación de la gráfica. Cabe mencionar que los parámetros de ρ y V_p también fueron calculados en el proceso de inversión.

Al igual que las gráficas del ajuste de los cocientes espectrales, estas gráficas se hicieron con escala logarítmica para tener una visualización más amplia de las capas caracterizadas y que no se perdieran las capas de bajo espesor.

Adicionalmente, se agregaron unos ejes auxiliares que muestran la variación de distintas frecuencias teóricas en función de la profundidad y la velocidad de onda S. Dichas frecuencias (f) se calcularon a partir de la relación entre la Vs y la longitud de onda asociada (λ), para la cual se consideró una correspondencia aproximada con la profundidad investigada (z):

$$f = \frac{V_S}{\lambda} = \frac{V_S}{z} \quad (10)$$

Dichos ejes permitían tener un mayor contexto geofísico para relacionar las profundidades y velocidades donde se aprecia mayor convergencia en los perfiles con las frecuencias en las que hubo mejor ajuste en los cocientes espectrales. Además, esta relación permite estimar a qué profundidades son sensibles las frecuencias relevantes que se observan en los cocientes.

La gráfica presentada en la Figura 18 expone los perfiles de Vs obtenidos para una de las estaciones de estudio. En ésta y otras representaciones de los perfiles, se puede apreciar una congruencia y tendencia entre todos los perfiles, lo cual respalda la idea de que el proceso de inversión utilizado brinda resultados robustos.

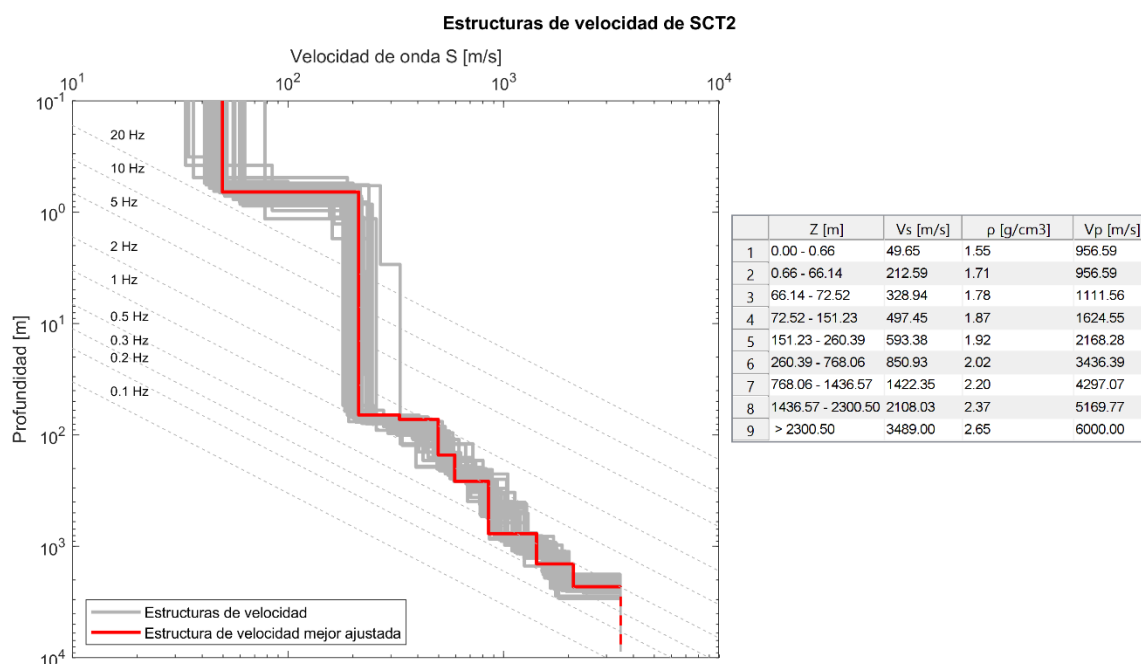


Figura 18. Perfiles de velocidad de onda S de la estación SCT2.

Al terminar el proceso de inversión, se obtuvieron los perfiles de velocidad para las 38 estaciones que contaban con cocientes espectrales EHVR para invertir. La mayoría de los perfiles resultantes mostraron una coherencia con respecto a la estructura de capas esperada de acuerdo con la ubicación de cada estación. No obstante, en el siguiente capítulo se discutirán y compararán los resultados obtenidos usando como referencia modelos o perfiles encontrados por otros autores.

Asimismo, es relevante mencionar que se conjuntaron las gráficas del ajuste de los cocientes espectrales con las gráficas de los perfiles de Vs para todas las estaciones, esto con el fin de minimizar el espacio requerido para la presentación de figuras. Por esta razón, ambas gráficas aparecen en una misma figura, tanto en la discusión del capítulo 6 como en la presentación de resultados incluida en el anexo.

CAPÍTULO 6: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1. ANÁLISIS DE EFECTIVIDAD DEL MÉTODO

Los resultados obtenidos al realizar el proceso de inversión fueron principalmente los ajustes de los cocientes espectrales y las estructuras de velocidad de onda S. Al analizar algunas características de dichos resultados se pueden discutir los factores que influyen en la efectividad del método.

En general, cuando el número de registros aptos utilizados para calcular los cocientes espectrales EHVR era bajo, había un mal ajuste de los cocientes teóricos con respecto al cociente observado. Esto puede atribuirse a que el uso de pocos eventos implica una inestabilidad en el cálculo del cociente observado y, a su vez, que no se defina adecuadamente en el sentido de que no luzca suavizado y tenga muchos cambios abruptos.

Siguiendo esta línea, el uso de una cantidad limitada de eventos dificulta obtener una respuesta sísmica promedio del sitio completa, ya que no se toma en cuenta la excitación de un rango amplio de frecuencias en el medio. Asimismo, considerar pocos eventos puede resaltar distorsiones en el cociente observado debido a efectos provocados por eventos atípicos.

Como se mencionó en el apartado referente al cálculo de cocientes espectrales del capítulo 4, la desviación estándar es un elemento que ayudó a evaluar si un cociente espectral observado podía dar indicios de no ser confiable. Cuando se usaban pocos eventos la desviación de los cocientes era alta, lo que significa que había una mayor variabilidad al definir el cociente promedio. Por consiguiente, si el cociente espectral observado no estaba bien definido los cocientes teóricos presentaban una mayor dificultad para ajustarse, afectando directamente la estabilidad del proceso de inversión y causando una mala convergencia entre las soluciones.

En la Figura 19, se conjuntan los perfiles de Vs con el ajuste de los cocientes EHVR obtenidos para una de las estaciones de estudio. Estos resultados ejemplifican el caso en el que se consideró un bajo número de eventos, ya que solamente se determinó que había 2 registros aptos. En la gráfica del ajuste puede apreciarse que la forma del cociente observado es muy abrupta y que los cocientes teóricos tratan de reproducir dicha forma pero resultan muy suavizados, lo cual hace pensar que el cociente observado no se definió de buena manera en un inicio. En consecuencia, los perfiles de velocidad presentan una mala convergencia entre ellos que hace dudar en la congruencia de los resultados.

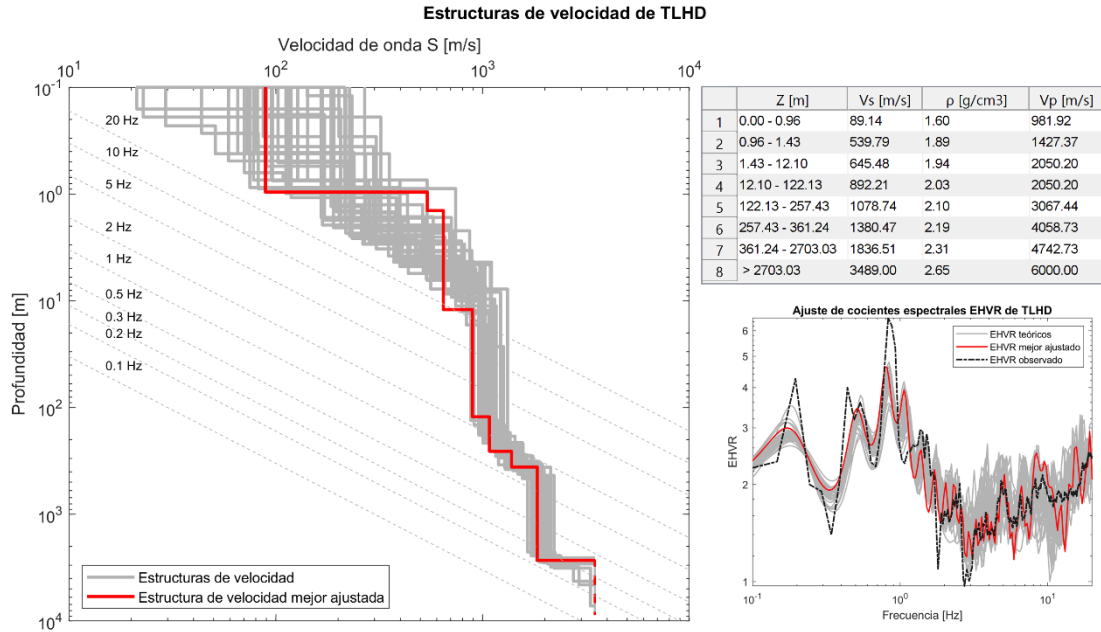


Figura 19. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación TLHD.

En cambio, la Figura 20 contiene el ajuste de los cocientes espectrales y los perfiles de Vs de una estación de estudio con 82 registros aptos, por lo que representa al resto de estaciones en las que había un gran número de eventos. El ajuste de los cocientes teóricos es muy bueno a pesar de que no reproducen la forma del cociente observado por completo. Esto se refleja en los perfiles de velocidad, los cuales convergen entre sí y brindan una mayor certeza en los resultados obtenidos.

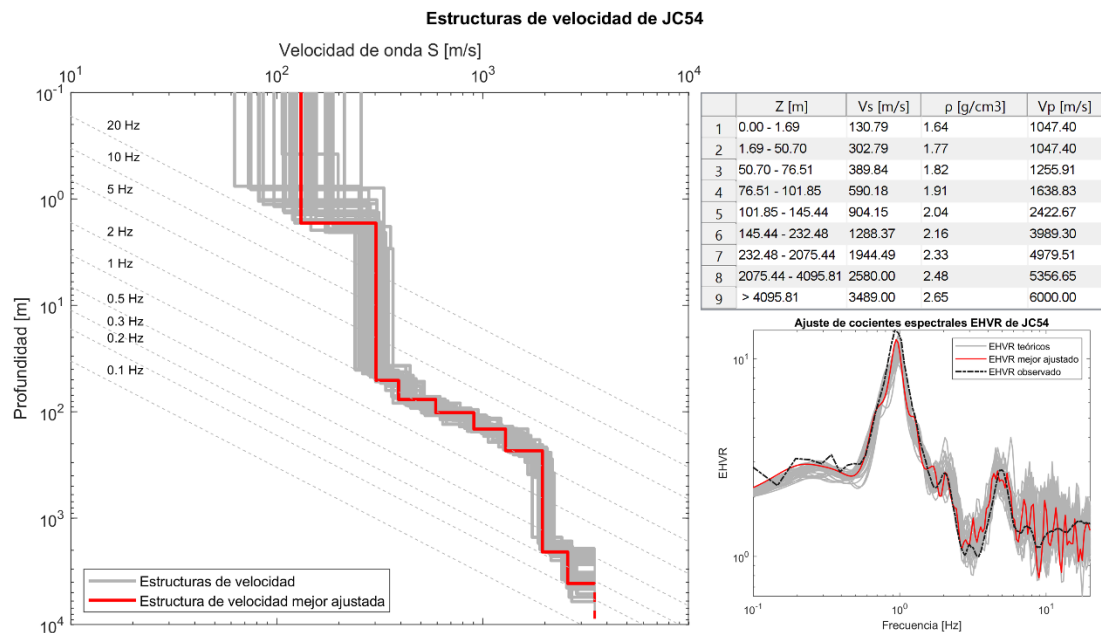


Figura 20. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación JC54.

Los dos casos planteados anteriormente son representativos para la mayoría de las estaciones. No obstante, hubo casos excepcionales en los que, a pesar de tener un gran número de eventos, solo se nota un buen ajuste en cierto rango de frecuencias, lo que ocasionaba convergencia de los perfiles en profundidades particulares. Tal es el caso de la estación CO47, cuyos resultados se muestran en la Figura 21. En los cocientes se observa que se tuvo un buen ajuste solo entre 0.5 y 5 Hz, lo cual coincide con las profundidades donde hubo buena convergencia. La escala logarítmica puede dar la impresión de que en grandes profundidades existe una buena convergencia, pero la realidad es que también hay una dispersión considerable de los perfiles en esa zona.

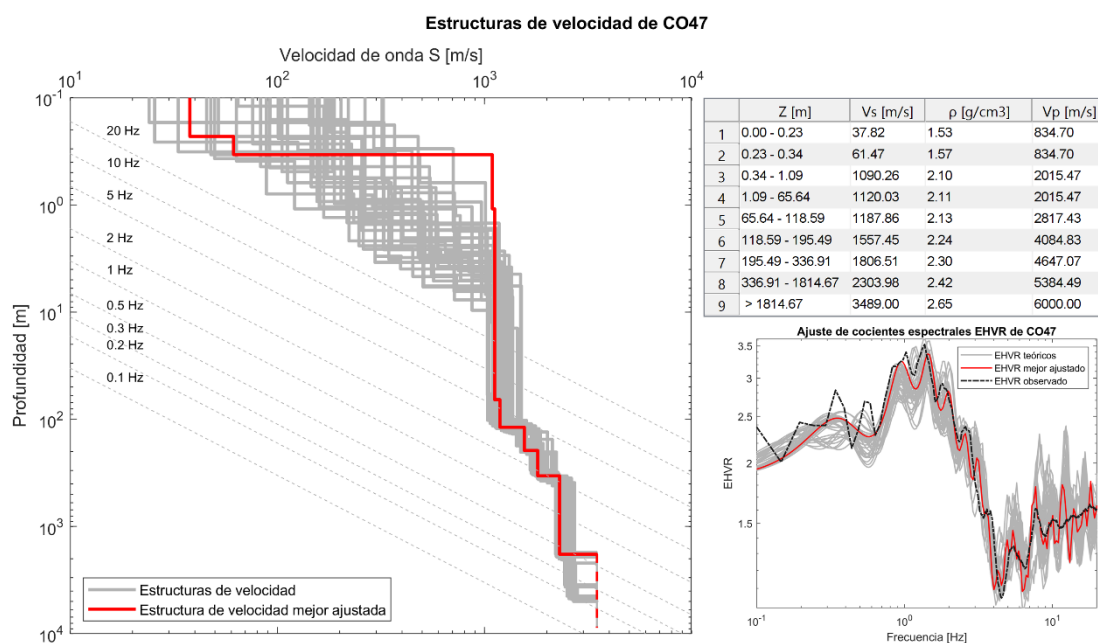


Figura 21. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación CO47.

En este sentido, una característica destacable que comparten los resultados de todas las estaciones, es que las profundidades en las que existe la mayor convergencia entre perfiles corresponden con frecuencias intermedias en las que siempre se presenta el mejor ajuste de los cocientes espectrales. Esto está estrechamente ligado al uso de ondas S en el cálculo e inversión de los cocientes espectrales EHVR, ya que la energía de ese tipo de onda se encuentra principalmente entre 0.5-5 Hz, lo cual mejora la sensibilidad del método justo en ese rango de frecuencias.

Con base en este análisis, se puede declarar que el método implementado en este trabajo de tesis muestra que el contenido de ondas S captadas en frecuencias intermedias siempre está bien representado en los cocientes EHVR, por lo que la inversión identifica más precisamente las capas ubicadas en profundidades correspondientes con dichas frecuencias. Además, la efectividad del método puede aumentar si el número de eventos considerados es alto, concretamente usar más de 50 eventos puede brindar resultados óptimos y confiables.

6.2. EVALUACIÓN DEL PERIODO DOMINANTE

Retomando los periodos dominantes obtenidos con los cocientes espectrales y reportados en la Tabla 5, cabe mencionar que 21 estaciones tuvieron un periodo coincidente con el intervalo de iso-periodos y 10 tuvieron un periodo muy cercano a dicho intervalo, dando un total de 31 estaciones consideradas coherentes. Para las 7 estaciones restantes el periodo dominante tuvo una diferencia considerable con respecto al intervalo de iso-periodos.

De esas siete estaciones con periodo incongruente, las estaciones TACY, TH35 Y TLHD tienen un periodo con una inconsistencia de 0.75 s en promedio, por lo que se puede considerar que sus resultados no son tan preocupantes. El cambio puede atribuirse a las condiciones locales y a la heterogeneidad del subsuelo que podrían no ser representadas con la zonificación sísmica general.

Por el contrario, para las estaciones CU01, CUP1, CUP4 y CUP5 ubicadas en CU se obtuvieron resultados que podrían parecer muy alarmantes debido a la gran discrepancia de los periodos. Al encontrarse en la zona de lomas, se esperaría que el periodo dominante estuviera por debajo de 0.5 s o muy cercano, y los cocientes obtenidos indican un periodo de 2 s en promedio.

Una explicación de la incoherencia de los resultados podría ser el bajo número de eventos utilizados para la definición de los cocientes espectrales observados. Sin embargo, esta idea se descarta rápidamente, ya que solo en el caso de las estaciones CU01 y CUP1 hubo un bajo número de registros aptos y aun así se obtuvieron periodos similares a los de las otras dos estaciones. Esto demuestra que el cálculo de los cocientes pudo no haber sido igual de robusto para las cuatro estaciones pero los periodos caracterizados si son correctos.

A pesar de que se trabajó con registros de sismos y no con microtemores, se puede tomar como base la guía de implementación de la técnica de cocientes espectrales H/V (SESAME, 2004) para evaluar la confiabilidad en los periodos obtenidos. En la guía se reporta que si la amplitud máxima es mayor de 4 se puede asegurar que el pico asociado a la frecuencia fundamental es bastante fiable. En el caso de las estaciones de CU, las amplitudes máximas con las que se definieron las frecuencias fundamentales fueron de 4 o más, por lo que se puede inferir que los periodos dominantes calculados son confiables.

Además, de acuerdo con los cocientes espectrales de microtemores encontrados por Lermo y Chávez-García (1994), hay una resonancia alrededor de 0.5 Hz que parece coincidir con el periodo de 2 s encontrado en los cocientes espectrales de las estaciones de CU. Por otra parte, aunque no sean directamente comparables, los espectros de respuesta obtenidos por Bolton et al. (1987) en CU muestran un pico en 2 s que sugiere que el sitio presenta una fuerte influencia en la amplificación sísmica, probablemente asociado a la presencia de capas más blandas que generan un importante contraste de impedancia ($\rho \cdot V_s$).

Se realizó una primera inversión de las cuatro estaciones antes mencionadas usando el modelo inicial con las condiciones típicas de la cuenca de México y las estructuras de Vs obtenidas mostraron una serie de capas blandas que iban hasta 150 m de profundidad, lo cual es incongruente con la estratigrafía local. Por ello, se modificó el modelo inicial para un segundo proceso de inversión, permitiendo la inversión de velocidades y considerando la posible presencia de capas blandas en profundidad que pudieran ser responsables del periodo de 2 s. El nuevo modelo inicial se basó en el perfil estratigráfico del pozo Copilco (Unda, 2016) en el que se reportaron capas duras someras de gran espesor y algunas capas de arcilla a profundidad.

Con este cambio se consiguieron estructuras de Vs para las estaciones de CU que no dieron exactamente lo que se esperaba, ya que no contienen alguna zona de baja velocidad sísmica que valide la existencia de una capa blanda a profundidad. No obstante, esta no es la única situación en la que puede presentarse resonancia. Una propuesta interesante es que, debido a que el periodo dominante está gobernado por el contraste de impedancia entre capas, se podría generar un pico en el cociente al tener una capa menos rígida de gran espesor sobre un medio aún más rígido. Esta idea se aprecia en los resultados de las cuatro estaciones, tal como los de la Figura 22.

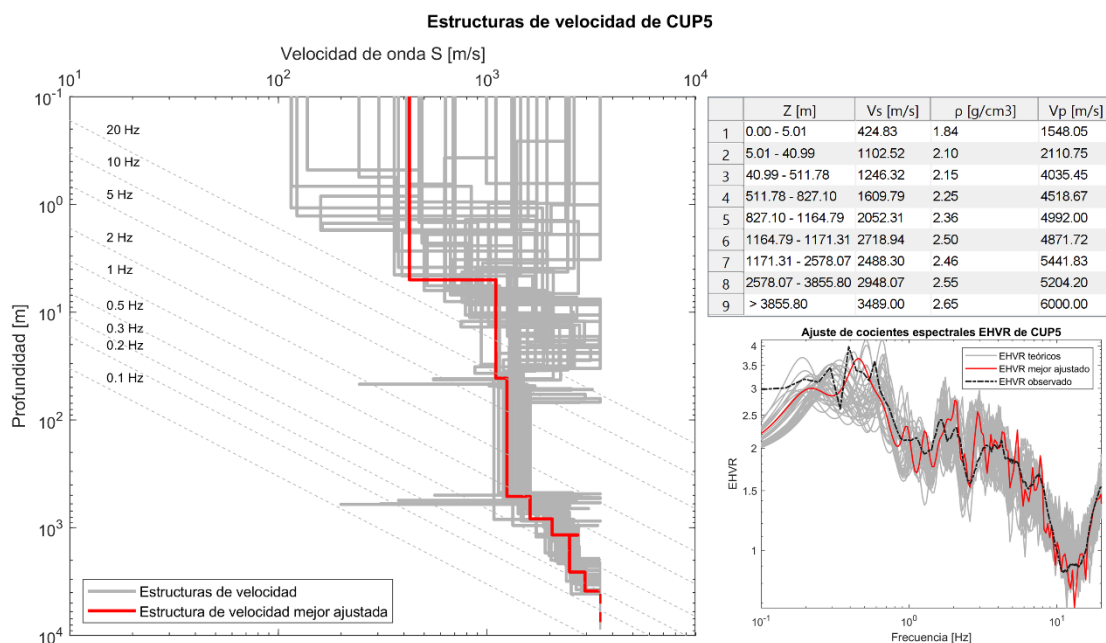


Figura 22. Perfiles de Vs y ajuste de los cocientes EHVR de la estación CUP5.

En la Figura 22 no hay una capa blanda a profundidad pero si se observa un contraste importante entre las capas 3 y 4 que puede ser suficiente para generar un pico de resonancia en el cociente EHVR. Además, es correcto considerar que los perfiles son coherentes respecto a la zona debido a la abundante presencia de materiales rígidos asociados a valores altos de Vs. Este argumento es respaldado por los resultados de las cuatro estaciones, ya

que se aprecia una primera capa delgada de material blando, seguido de una transición a velocidades progresivamente más altas que son consistentes con la existencia de materiales volcánicos rígidos desde zonas someras hasta grandes profundidades.

6.3. IDENTIFICACIÓN DEL BASAMENTO INGENIERIL

En el ámbito de la geotécnica y la ingeniería sísmológica, el basamento ingenieril es un concepto muy importante para cimentar construcciones en zonas sísmicas, ya que se define como la profundidad en la que la velocidad de onda S supera un valor específico que corresponde con materiales lo suficientemente rígidos y estables para reducir los efectos de sitio.

Se encontró que dicho valor de V_s es distinto dependiendo de las normativas y de diferentes autores, pero generalmente se encuentra entre 700-760 m/s. De acuerdo con González-Herrera et al. (2013), es adecuado considerar que el valor asociado al basamento ingenieril es de 720 m/s, ya que se cree que al pasar ese valor de V_s se supera el límite entre suelos blandos y rocas duras.

Conforme a la descripción realizada en el apartado de zonificación geotécnica del capítulo 2, las tres zonas de la Ciudad de México y áreas aledañas tienen una estratigrafía distinta que influye directamente en la profundidad donde se ubica el basamento ingenieril. Considerando lo anterior y la litología predominante del subsuelo de cada zona geotécnica, se esperaría superar los 720 m/s en profundidades someras para zona I, profundidades intermedias para zona II y profundidades grandes para zona III.

Con base en las estructuras de velocidad de onda S de las 38 estaciones invertidas, se caracterizaron las profundidades en la que se superan los 720 m/s. De esta forma, se elaboró la Tabla 6 en la que se agruparon las estaciones por zona para facilitar la comparación de las profundidades.

Zona geotécnica	Clave de la estación	Profundidad del basamento ingenieril [m]
I	CE18	38.02
	CU01	2.87
	CUP1	0
	CUP4	1.02
	CUP5	5.01
	TACY	2.2
II	CH84	95.17
	CO47	0.34
	JC54	101.85
	PENR	3.89
	SXVI	119.44
	AE02	362.44
	AP68	319.26

III	AR14	241.94
	AU11	536.47
	BO39	237.34
	CDAO	743.51
	CE23	400.71
	CE32	324.8
	CI05	275.47
	CU80	174.22
	DFRO	117.79
	DFVG	340.03
	DM12	229.87
	GC38	193.39
	JA43	461.84
	LI33	6.2
	LV17	164.72
	MI15	351.16
	MY19	8.6
	NZ31	213.52
	RM48	180.09
	SCT2	260.39
	SI53	3.11
	SP51	144.09
	TH35	243.67
	TL55	152.41
	TLHD	12.1

Tabla 6. Reporte de profundidad del basamento ingenieril de las estaciones de estudio.

Haciendo un promediado por zona de las profundidades antes reportadas, se obtiene que las profundidades típicas donde se encuentra el basamento ingenieril son 8.2 m para zona I, 64.1 m para zona II y 248.1 m para zona III. No obstante, hay que contemplar que algunas profundidades identificadas tienen una variación considerable con respecto al resto, específicamente en la zona II, lo cual influye gravemente en la media obtenida.

Teniendo en cuenta que la mayoría de las estaciones se ubican en la zona de lago (III) por ser la zona más crítica en cuanto al peligro sísmico que presenta, es importante mencionar que la caracterización de la profundidad promedio del basamento ingenieril en esa zona (248.1 m) es coincidente con el rango reportado por Rodríguez y Sánchez-Sesma (2001), ya que indican que en la zona III se superan los 720 m/s entre 200 y 300 m de profundidad.

A partir de la identificación de las profundidades promedio encontradas para el basamento ingenieril, se puede notar que hay una congruencia con las profundidades esperadas para las tres zonas geotécnicas. Sin embargo, se debe considerar que pueden existir variaciones importantes en el valor de la profundidad aun cuando se analicen estaciones dentro de la misma zona. Los valores atípicos de profundidad obtenidos se pueden atribuir a la estratigrafía local de la estación o a una falta de validez de las estructuras de Vs.

6.4. COMPARACIÓN CON MODELOS PREVIOS

Si bien los resultados de las 38 estaciones de estudio tienen diferencias en cuanto a su confiabilidad relacionada con el ajuste de los cocientes EHVR y la convergencia entre los perfiles de Vs, se pudieron recuperar estructuras de velocidad con una clara estructura en capas para todas las estaciones. En general, los perfiles de Vs de las estaciones estudiadas tienen una coherencia con la zona en la que se encuentran pero resulta relevante comparar algunos con perfiles realizados por otros autores.

6.4.1. Estación CDAO

La estación CDAO se ubica al este de la Ciudad de México en la zona geotécnica III con un periodo de 2.56 s. El ajuste de los cocientes EHVR para esta estación fue bueno y respalda las estructuras de Vs invertidas, las cuales se muestran en la Figura 23 junto con un perfil de Vs interpretado por Seed et al. (1988) a partir de mediciones directas de pozo.

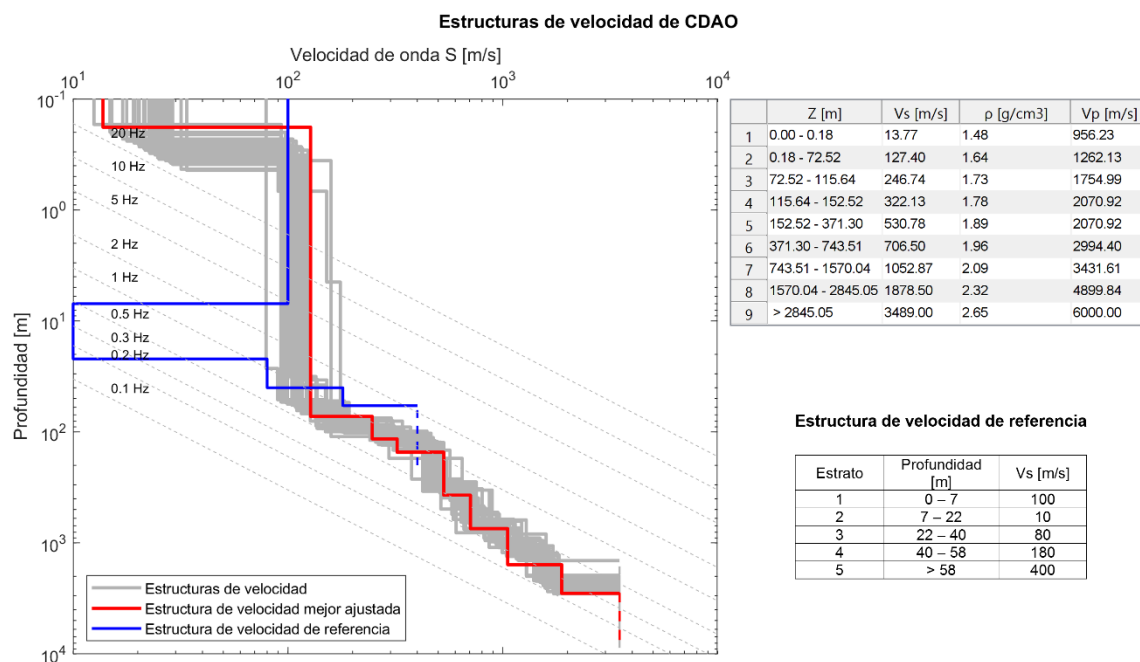


Figura 23. Perfiles de Vs invertidos y perfil de Vs interpretado de la estación CDAO (Seed et al., 1988).

Lo primero que se puede analizar de ambos perfiles es que el obtenido mediante el proceso de inversión permitió caracterizar capas más profundas que el perfil de referencia, por lo que solo se puede hacer una comparación directa en los primeros metros. No obstante, resulta interesante ver como la transición hacia valores más altos de Vs después de los 58 m es menos abrupta en el perfil invertido que en el perfil de referencia.

Asimismo, el perfil de referencia tiene una mejor resolución en capas someras a diferencia del invertido, ya que este último presenta una única capa (capa 2) que engloba las primeras 4 capas del perfil de referencia. Aun con ello, se puede afirmar que los valores de Vs dentro de los primeros 58 m se aproximan entre los dos perfiles y son congruentes con la estratigrafía esperada. Algo que podría llamar la atención es la capa de 10 m/s del perfil de referencia que podría corresponder con la capa de 13.77 m/s pero intercambiada en posición. Esto podría deberse a que el modelo inicial utilizado para las inversiones no permitió la inversión de velocidades más que en las estaciones de CU.

6.4.2. Estación DFRO

La estación DFRO está ubicada al centro de la Ciudad de México en la zona geotécnica III con un periodo de 1.07 s. Los perfiles de Vs invertidos presentan una excelente convergencia en las frecuencias de 0.5-5 Hz que se debe al buen ajuste de los cocientes EHVR. La figura 24 contiene los perfiles de Vs invertidos y un perfil de Vs del pozo 12 correspondiente a estudios con sonda suspendida realizados por Yamashita Architects y Engineers Inc. Oyo Corporation (1996).

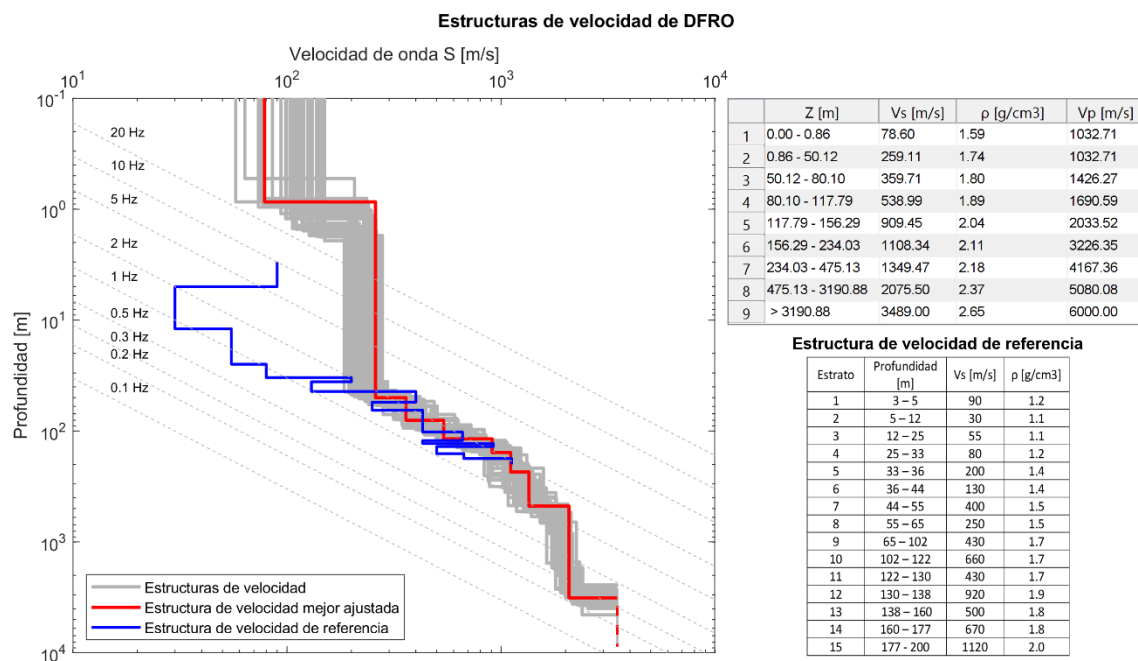


Figura 24. Perfiles de Vs invertidos de la estación DFRO y perfil de Vs de pozo 12 (Yamashita Architects & Engineers Inc. Oyo Corporation, 1996).

Las primeras diferencias entre los perfiles son que el perfil invertido profundizó a un valor mucho más alto que el perfil de referencia y que dentro de los 200 m del de referencia se caracterizaron muchas capas a comparación del perfil invertido, lo que debe ocurrir por la mayor precisión que tienen los estudios de sonda suspendida al ser mediciones directas.

En el perfil de referencia se reportan 4 capas en los primeros 33 m con valores de Vs muy bajos que generan un contraste con el perfil invertido debido a que éste presenta una única capa a 0.86 m con Vs menor a 100 m/s. Después de la capa 7 del de referencia y de la capa 3 del invertido, se nota una mejor aproximación en los valores de profundidad y de Vs. Tal es el caso de las capas 12 y 15 del de referencia que se encuentran dentro de los intervalos de las capas 5 y 6 del invertido con una Vs casi idéntica. Pese a eso, llama la atención la disminución de Vs que solo se aprecia en las últimas capas del perfil de referencia.

6.4.3. Estación DM12

La estación DM12 se encuentra al noreste de la Ciudad de México en la zona geotécnica III con un periodo de 2.94 s. Las estructuras de Vs no tienen una convergencia tan buena a profundidades someras debido a un ajuste reprochable en los cocientes EHVR para altas frecuencias, sin embargo, a profundidades grandes si brindan una mayor confiabilidad. Las estructuras de Vs son presentadas en la Figura 25 junto con un perfil de Vs del pozo 11 (cercano a estación DM12) correspondiente a estudios con sonda suspendida realizados por Yamashita Architects y Engineers Inc. Oyo Corporation (1996).

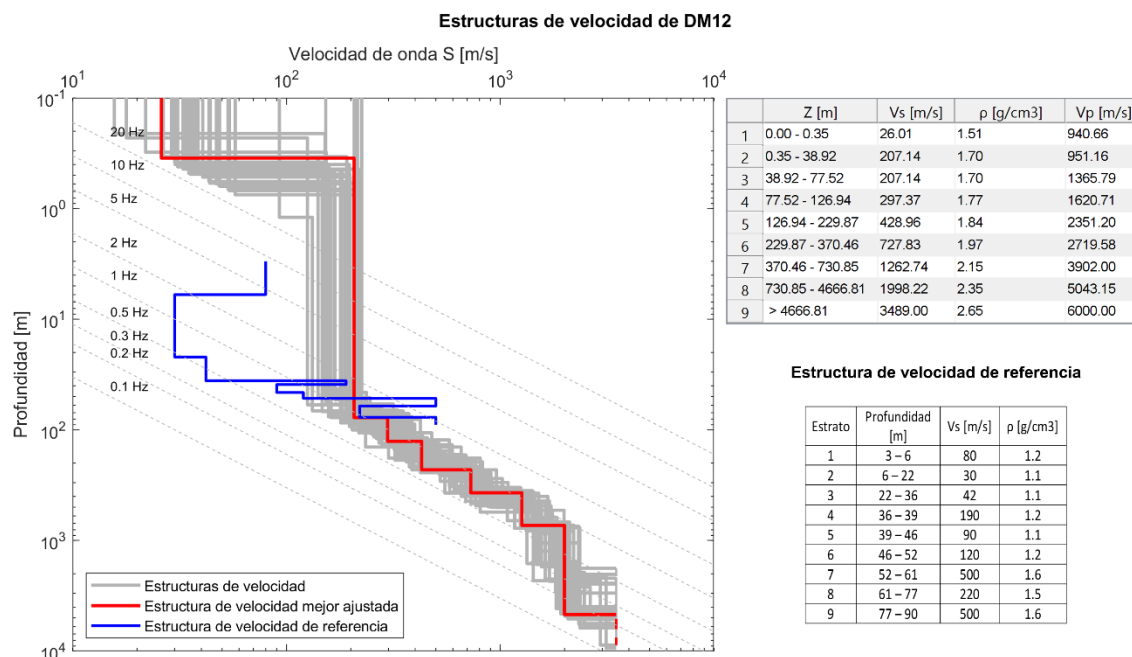


Figura 25. Perfiles de Vs invertidos de la estación DM12 y perfil de Vs de pozo 11 (Yamashita Architects & Engineers Inc. Oyo Corporation, 1996).

Únicamente se puede hacer una comparación directa entre las primeras 4 capas del perfil invertido y el perfil de referencia debido a las diferencias de resolución entre los perfiles. En este sentido, se puede afirmar que a los 90 m de profundidad hay existencia de materiales con Vs baja que va acorde a la zona en la que se encuentra la estación.

Las capas hasta 39 m del perfil de referencia no corresponden con las dos capas superficiales del perfil invertido ni en valores de profundidad ni tampoco en velocidades de onda. Por el contrario, el valor de Vs de la tercera capa del perfil invertido se puede asociar a las capas que van desde 39 hasta 77 m del perfil de referencia, ya que al obtener los estratos equivalentes para esas profundidades las Vs son muy cercanas (216.66 m/s y 174.31 m/s respectivamente). Finalmente, es relevante mencionar que la repetición de los valores de Vs y ρ en las capas 2 y 3, si bien podrían indicar la presencia de una misma roca pero con variaciones en otros parámetros físicos, también se puede atribuir a las limitaciones numéricas del proceso de inversión.

6.4.4. Estación SCT2

La estación SCT2 se ubica al centro de la Ciudad de México en la zona geotécnica III con un periodo de 1.69 s. El buen ajuste de los cocientes EHVR permitió que esta estación presentara una de las mejores convergencias entre las estructuras de Vs invertidas. La Figura 26 contiene dichas estructuras y un perfil de Vs interpretado por Seed et al. (1988) a partir de mediciones directas de pozo.

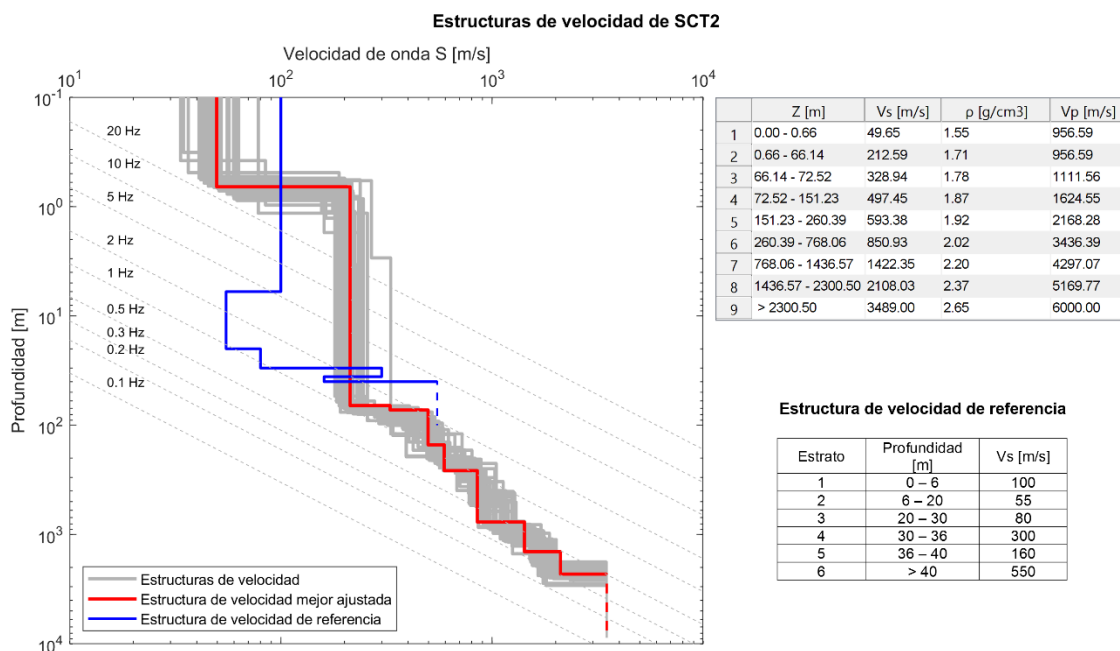


Figura 26. Perfiles de Vs invertidos y perfil de Vs interpretado de la estación SCT2 (Seed et al., 1988).

Este caso es muy similar al de la estación CDAO porque el perfil de referencia tiene gran resolución pero solo en capas someras, lo cual no sucede con el perfil invertido que presenta capas de mayor espesor y que profundiza hasta poco más de 2,000 m. Nuevamente hay una inversión de velocidades en el perfil de referencia que no aparece en el invertido por las características del proceso de inversión.

En el perfil de referencia se reportan capas con Vs bajas hasta los 30 m, lo que no coincide con el perfil invertido porque solo hay una capa por debajo de los 100 m/s y se encuentra en los primeros 0.66 m. Además, la profundidad en la que hay una transición hacia 500 m/s es más somera en el perfil de referencia. A pesar de estas diferencias, ambos perfiles muestran ser congruentes con la estratigrafía representativa de la zona geotécnica III.

6.4.5. Estación TACY

La estación TACY está localizada al oeste de la Ciudad de México en la zona geotécnica I con un periodo de 1.28 s que resultó no ser acorde a la zona en la que se encuentra. No hubo buen ajuste de los cocientes EHVR en altas frecuencias y eso significó una mala convergencia de los perfiles de Vs en bajas profundidades. En la Figura 27 se exponen dichos perfiles con un perfil de Vs del pozo 14 (cercano a estación TACY) correspondiente a estudios con sonda suspendida realizados por Yamashita Architects y Engineers Inc. Oyo Corporation (1996).

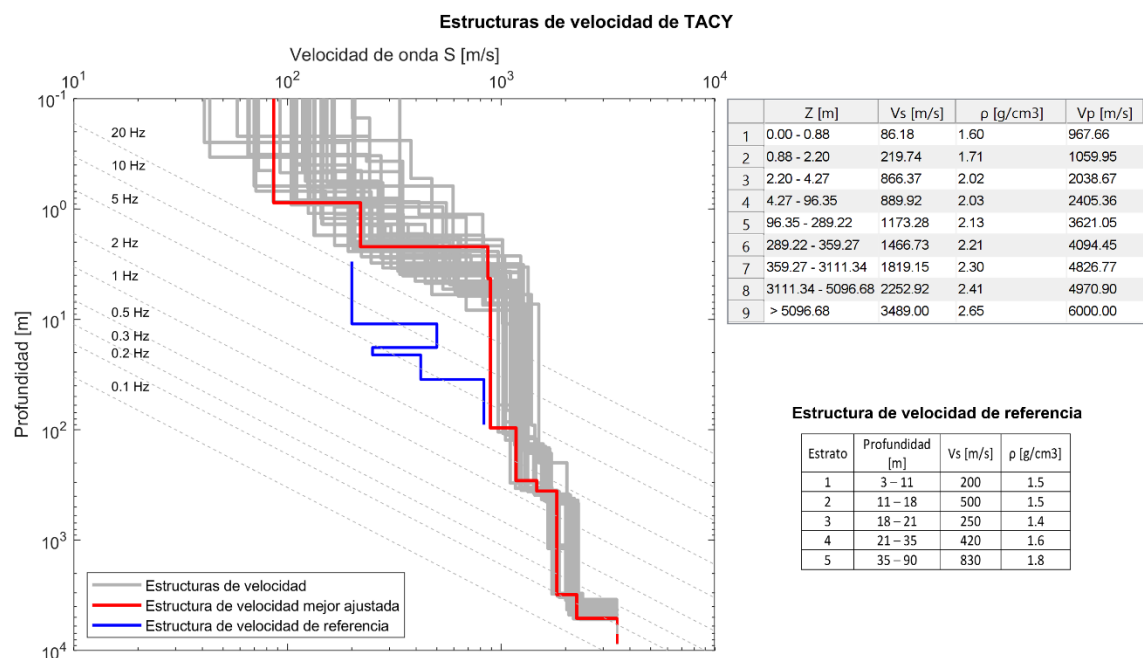


Figura 27. Perfiles de Vs invertidos de la estación TACY y perfil de Vs de pozo 14 (Yamashita Architects & Engineers Inc. Oyo Corporation, 1996).

A pesar de la incoherencia en el periodo dominante observado, los perfiles de Vs invertidos presentan un comportamiento de Vs correcto con respecto a la zona geotécnica, ya que se representa la existencia de capas rígidas desde profundidades someras. Al igual que en las demás estaciones, hay diferencias claras en cuanto a la resolución de investigación y a las Vs y profundidades de las capas superficiales. Puede notarse que la transición a Vs más altas es ligeramente más abrupta en el perfil invertido que en el de referencia. Además, puede definirse para esa estación que se llega a los 800 m/s dentro de los primeros 90 m.

6.5. PRESENTACIÓN DE SECCIONES DE VS

Se construyeron 2 secciones de velocidad de onda S a partir de los perfiles de Vs con menor residual de diferentes estaciones de estudio. El objetivo de presentar los resultados de esta forma es poder apreciar el comportamiento lateral de la velocidad de onda S y hacer una comparación con secciones realizadas en direcciones similares por Yamashita Architects y Engineers Inc. Oyo Corporation (1996) a partir de los perfiles de Vs generados con mediciones de sonda suspendida en diferentes pozos.

En la Figura 28 se muestra la distribución de las dos secciones construidas y de las dos secciones de referencia. Como se puede notar, las estaciones no estaban alineadas exactamente sobre las líneas propuestas, por lo que se proyectaron a dichas líneas. Este procedimiento se realizó, para cada sección construida, mediante una interpolación lineal de las coordenadas de las estaciones que permitió definir una línea de tendencia para cada caso. A partir de las ecuaciones de esa línea y de su perpendicular, se determinaron las coordenadas proyectadas de las estaciones y se construyó el eje horizontal de cada sección con la distancia entre esas nuevas coordenadas.

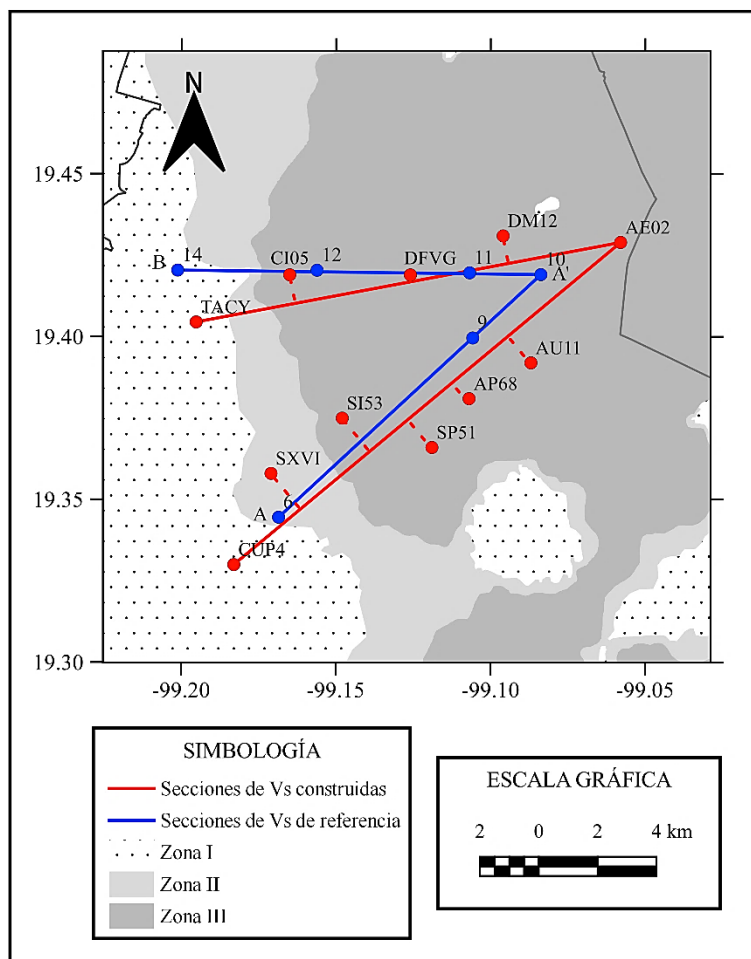


Figura 28. Localización de secciones de velocidad de onda S.

Para la construcción de las secciones, se hicieron archivos tipo csv que contenían la información a graficar del total de estaciones que conformaban cada sección. Estos archivos csv se leían con un programa de Matlab que implementaba el método de interpolación de vecinos naturales para generar las secciones. El motivo de utilizar este método fue asegurar transiciones suaves y realistas entre los puntos que a su vez mostraran la geomorfología general sin efectos irregulares.

La información contenida en los archivos correspondía a los 3 ejes de las secciones: distancia entre estaciones (x), profundidad del centro de cada capa (y) y velocidades de onda S (z). Se tomó la decisión de usar el centro de las capas como eje vertical porque así se representaba mejor el volumen promedio en el que se distribuye la Vs y se aseguraba una coherencia espacial para la interpolación.

En el caso de la última capa, que corresponde con el semiespacio, se estableció una profundidad máxima común para todos los perfiles a pesar de que tiene un espesor teóricamente infinito. Para ello, se identificó de entre todos los perfiles la mayor profundidad registrada como inicio del semiespacio y se estableció un valor ligeramente superior a ésta como un límite final imaginario del semiespacio. Esto se hizo con el fin de poder caracterizar el centro de dicha capa y garantizar una correcta interpolación entre la información de las estaciones para que las secciones tuvieran una buena visualización.

6.5.1. Sección TACY – AE02

La sección TACY – AE02 presentada en la Figura 29, tiene una longitud de aproximadamente 14.7 Km y fue construida con los perfiles de Vs de las estaciones TACY, CI05, DFVG, DM12 y AE02. La sección profundiza hasta los 5,000 m pero tiene áreas no interpoladas debido a la falta de información asociada al espesor del semiespacio, lo cual no es crítico porque la definición de su centro no es una representación de la realidad física.

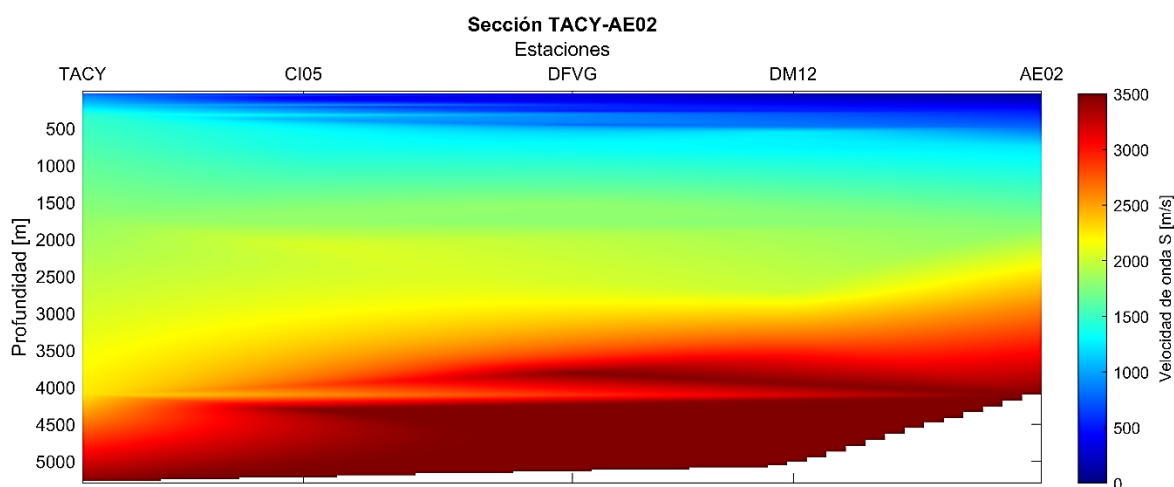


Figura 29. Sección de velocidad de onda S TACY – AE02.

En esta primera sección, se pueden notar dos tipos de comportamientos laterales de la velocidad de onda S. El primero se presenta dentro de los 2,000 m, donde los valores de Vs van disminuyendo de izquierda a derecha en la sección, sugiriendo una transición en el tipo de terreno. Posterior a los 2,000 m se nota el segundo comportamiento, el cual es contrario al anterior con un aumento en los valores de Vs de izquierda a derecha. Esto último llama la atención porque el cambio a valores más altos (áreas amarillas a rojas) debería mantenerse como el primer tipo de comportamiento si se toma en cuenta la zona geotécnica en la que está cada estación.

Por otra parte, tomando como referencia el trabajo realizado por Aguilar-Velázquez et al. (2024), se puede hacer una comparación de un segmento de la parte más superficial de la sección TOVM – TXVM que obtuvieron usando el método de función de receptor, con la parte profunda de la sección TACY – AE02. Con ello, se puede afirmar que para ambas secciones se superan los 3,000 m/s después de los 2,500 m de profundidad.

Debido a las diferencias de profundidad de investigación entre las secciones TACY – AE02 y B – A' elaborada por Yamashita Architects y Engineers Inc. Oyo Corporation (1996), se generó una nueva sección TACY – AE02 considerando su parte más superficial con el fin de conseguir una comparación más directa. La Figura 30 expone ambas secciones manteniendo la misma escala de color para apreciar mejor similitudes y diferencias.

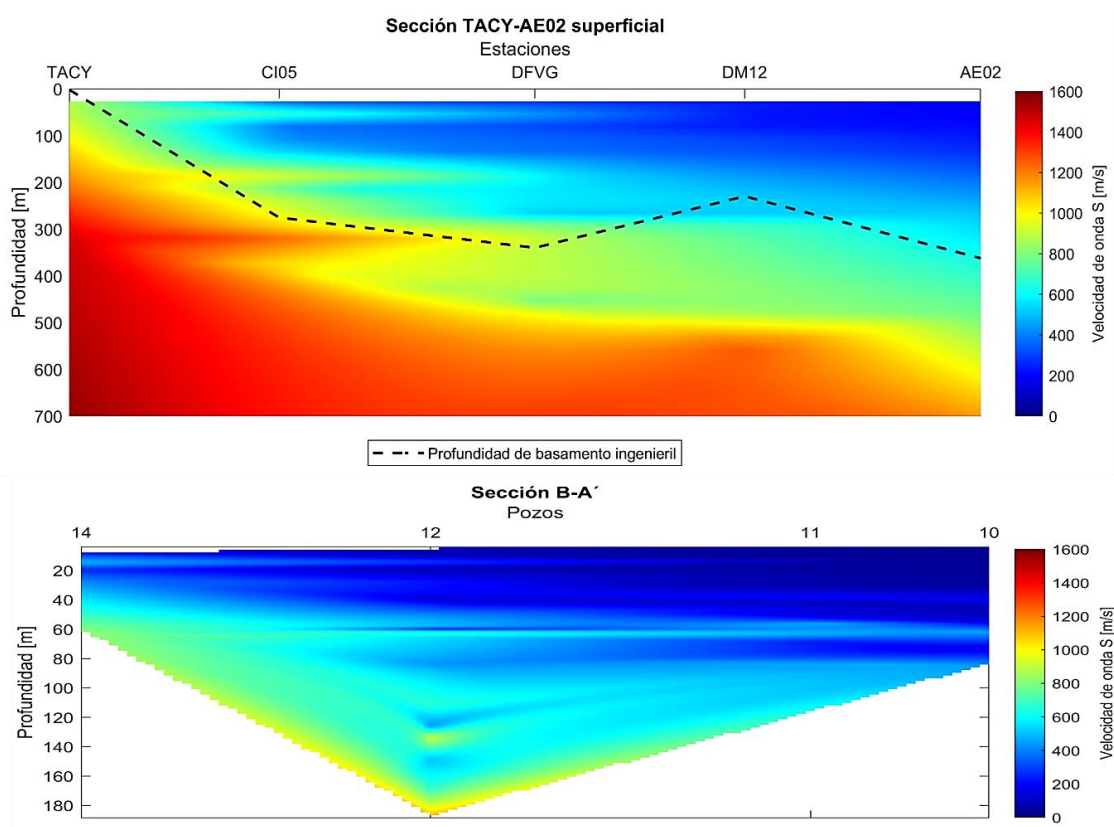


Figura 30. Comparación de sección de Vs TACY – AE02 superficial con sección de Vs B – A' (sección elaborada con base en Yamashita Architects & Engineers Inc. Oyo Corporation, 1996).

Analizando la sección TACY – AE02 superficial se puede apreciar de mejor manera el primer comportamiento de Vs que se describió anteriormente, con una disminución de la velocidad de onda S hacia la derecha. En este sentido, aunque las secciones no son paralelas, se puede asociar la sección B – A' con las áreas azules de la sección TACY – AE02 superficial debido a que muestran una tendencia similar que indica un cambio en las características del subsuelo. A su vez, esto es respaldado por la línea de la profundidad del basamento ingenieril, ya que resalta la separación entre materiales rígidos y blandos, mostrando que hacia la derecha la profundidad para superar los 720 m/s es mayor.

Considerando lo anterior, hacia el este (AE02 y 10), donde las estaciones se ubican dentro de la zona de lago, predomina la presencia de depósitos blandos asociados a valores bajos de Vs. Mientras que hacia el oeste (TACY y 14), conforme se transita a la zona de lomas, disminuye su espesor y se nota una transición más somera hacia valores altos de Vs correspondientes con la existencia de materiales rígidos. Este comportamiento de las Vs es congruente desde el punto de vista geotécnico y reafirma el peligro sísmico que representa la zona III debido a la gran presencia de materiales blandos que tiende a amplificar más las ondas sísmicas.

6.5.2. Sección CUP4 – AE02

La sección CUP4 – AE02 contenida en la Figura 31, tiene una longitud de aproximadamente 17.1 Km y fue construida con los perfiles de Vs de las estaciones CUP4, SXVI, SI53, SP51, AP68, AU11 y AE02. La sección profundiza hasta poco más de 5,000 m y, al igual que la sección anterior, tiene regiones con vacío de información por la profundidad del centro del semiespacio.

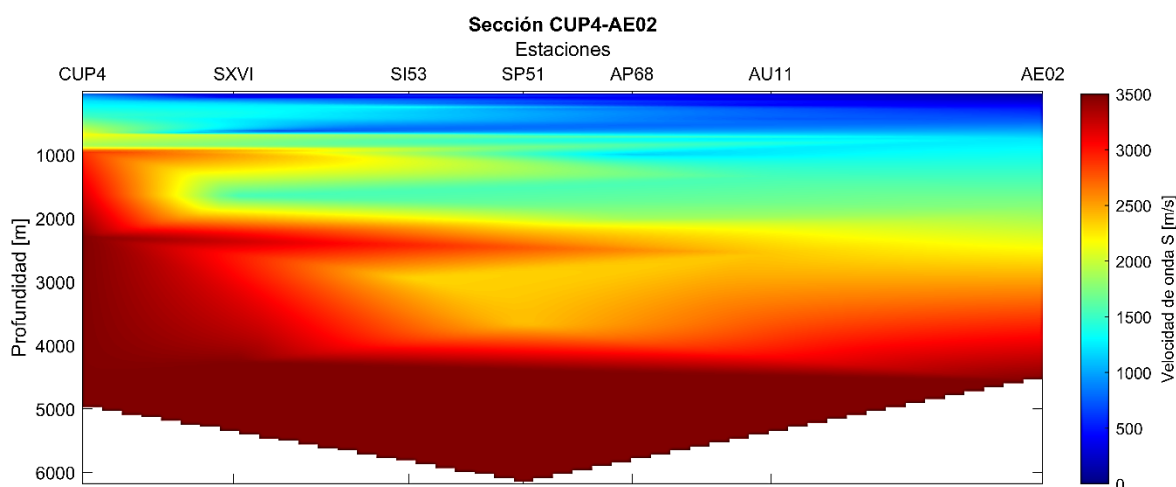


Figura 31. Sección de velocidad de onda S CUP4 – AE02.

En general, esta sección muestra un comportamiento de Vs muy parecido al de las secciones anteriores, donde hay una disminución progresiva de Vs de izquierda a derecha que tiene que ver con la transición del tipo de terreno entre estaciones. No obstante, lo que diferencia a esta sección son los “picos laterales” que presenta a distintas profundidades.

Al respecto, es importante señalar que los “picos laterales” que se observan dentro de las zonas azules ($< 1,000$ m) y amarillas a naranjas (entre 1,000 y 2,500 m) difícilmente podrían ser interpretadas como anomalías asociadas a estructuras geológicas. Más bien, estas zonas pueden atribuirse a la variabilidad de los perfiles de Vs con las que se construyó la sección que afecta a la interpolación implementada. De igual forma, no necesariamente indican la presencia de una inversión de velocidades en la estructura de capas de cada estación.

Al igual que con la sección anterior, se optó por realizar una sección CUP4 – AE02 tomando en cuenta las regiones más someras. Esto se hizo con el objetivo de contrarrestar las grandes diferencias de profundización y así hacer una mejor comparación con la sección A – A’ realizada por Yamashita Architects y Engineers Inc. Oyo Corporation (1996). La Figura 32 incluye las dos secciones con una escala de color idéntica para examinarlas de manera conjunta.

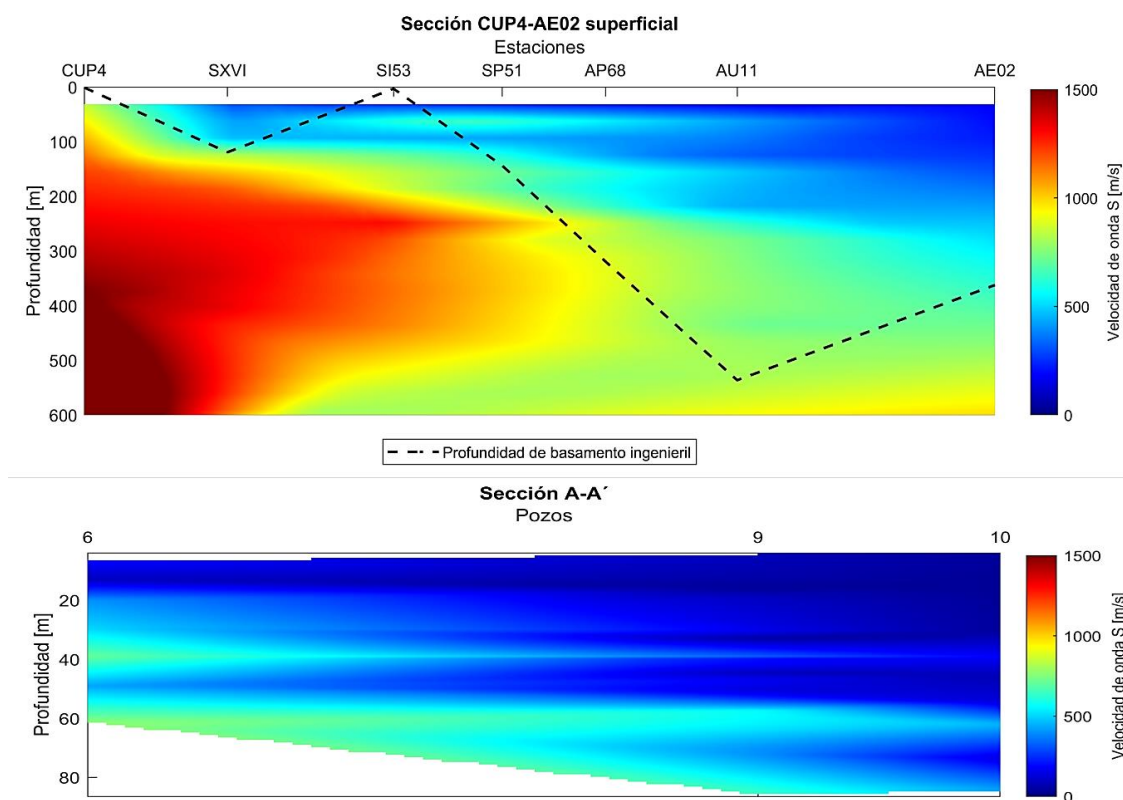


Figura 32. Comparación de sección de Vs CUP4 – AE02 superficial con sección de Vs A – A’ (sección elaborada con base en Yamashita Architects & Engineers Inc. Oyo Corporation, 1996).

A pesar de que estas dos secciones tienen una dirección diferente a las del apartado anterior, presentan un comportamiento de la velocidad de onda S muy parecido porque también hay un cambio similar de zona geotécnica. La sección A – A' se puede asociar claramente a los primeros 100 m de la sección CUP4 – AE02 superficial, más aún si se toma en cuenta que son casi paralelas y que la sección A – A' inicia entre las estaciones CUP4 y SXVI, y finaliza entre las estaciones AU11 y AE02.

La línea de la profundidad del basamento ingenieril tiene un comportamiento llamativo hacia la estación SI53 llegando a los 720 m/s en una región muy somera. Sin embargo, la tendencia general de dicha línea muestra que hacia la derecha la profundidad asociada al basamento es mucho mayor. Con ello, vuelve a aparecer el argumento de que el comportamiento lateral y vertical de Vs indica una transición en el tipo de materiales del subsuelo.

En este contexto, al noreste (AE02 y 10), en las estaciones de la zona de lago, vuelve a aparecer un espesor considerable de materiales blandos con valores bajos de Vs, que va disminuyendo conforme se avanza al suroeste a las estaciones SXVI y CUP4, que están en la zona de transición y de lomas respectivamente, debido a la presencia más superficial de materiales rígidos con valores altos de Vs.

Este análisis permite ver que las dos secciones construidas muestran la distribución de capas de diferentes tipos de materiales e incluso un espesor aproximado para dichas capas. De igual forma, el comportamiento lateral de Vs presente en las secciones es coincidente con las secciones de referencia realizadas a partir de mediciones directas, por lo que las estructuras de velocidad de onda S obtenidas en este trabajo pudieron ser validadas y transmiten confiabilidad.

CONCLUSIONES

En este trabajo de tesis se implementó el método propuesto por Nagashima et al. (2014) en 38 estaciones situadas en la cuenca de México, con el cual se confirmó la hipótesis de que es posible recuperar estructuras de velocidad de onda S, directamente debajo de las estaciones, a partir del cálculo e inversión de cocientes espectrales obtenidos con eventos sísmicos (EHVR).

El análisis de registros sísmicos representa una etapa fundamental para la aplicación del método, ya que se debe asegurar que cumplan con ciertos criterios de calidad para un correcto cálculo e inversión de los cocientes EHVR. De las 40 estaciones acelerográficas consideradas inicialmente, solo fue posible obtener las estructuras de Vs en 38 estaciones por la falta de registros aptos en dos de ellas.

Las estructuras de Vs resultantes pueden considerarse robustas debido a que la ejecución de 35 inversiones independientes por estación garantizó la caracterización del perfil con mejor ajuste. A su vez, estos resultados permitieron abordar diversas discusiones, para las cuales se presentan las siguientes conclusiones.

Los resultados muestran que usar un bajo número de eventos afecta la definición del cociente observado, lo que dificulta un buen ajuste de los cocientes teóricos y una buena convergencia entre los perfiles de velocidades obtenidos con la inversión. El uso de las ondas S dentro del método siempre proporciona buenos resultados en el rango de 0.5-5 Hz, pero se recomienda utilizar la mayor cantidad posible de registros de eventos sísmicos con el fin de asegurar una buena definición del cociente espectral que se pondrá a invertir.

El hecho de que en 31 de 38 estaciones los periodos dominantes fueran congruentes con la zonificación sísmica brindó una mayor fiabilidad en el cálculo de los cocientes espectrales. Sin embargo, los periodos incongruentes obtenidos para las estaciones de CU demuestran que pueden existir otros factores que expliquen los resultados obtenidos. En este sentido, es recomendable realizar un correcto cálculo de los cocientes EHVR observados y considerar ajustar los parámetros del modelo inicial con condiciones geológicas locales para que las estructuras de velocidad calculadas tengan coherencia y una mayor exactitud.

Con base en la identificación de las profundidades promedio en las que se superan los 720 m/s, se puede concluir que para estaciones ubicadas en zona de lomas el basamento ingenieril se encuentra en promedio a 8.2 m, en zona de transición a 64.1 m y en zona de lago a 248.1. Las tres profundidades promedio son adecuadas de acuerdo con lo esperado, especialmente en la zona III. No obstante, al comparar individualmente las profundidades de cada estación se pudieron notar valores atípicos en algunas de las estaciones a pesar de encontrarse en la misma zona geotécnica, lo que puede deberse a una incoherencia de las estructuras de velocidad invertidas o a las condiciones locales de la estación.

La comparación de perfiles de Vs de las estaciones CDAO, DFRO, DM12, SCT2 y TACY con perfiles de referencia permitieron concluir que las estructuras de Vs invertidas son congruentes con respecto a la estratigrafía de la zona geotécnica donde se encuentra cada estación. En general, se encontró que los perfiles invertidos tuvieron una mayor profundización pero una menor resolución en capas someras que trajo consigo diferencias importantes entre perfiles. A pesar de ello, se debe considerar que el método tiene una mayor confiabilidad para capas ubicadas en profundidades mayores correspondientes con frecuencias de entre 0.5-5 Hz.

Las dos secciones de Vs construidas permitieron apreciar el comportamiento de la velocidad de onda S hasta profundidades de aproximadamente 5,500 m. Además, pudieron ser validadas al comparar con secciones de referencia y al tomar en cuenta la tendencia de la profundidad del basamento ingenieril. Las secciones mostraron que la variación de los valores de Vs está asociada a la transición entre zonas geotécnicas y, a su vez, al tipo de materiales del subsuelo. Con ello, se puede asegurar que las secciones representan coherentemente la geomorfología general de la cuenca de México, con predominantes depósitos blandos hacia el centro (zona de lago) y abundantes capas rígidas hacia los extremos (zona de lomas). Sin embargo, se debe considerar que algunas formas presentes en las secciones construidas no representan la estructura real del medio, sino que son resultado del método de interpolación implementado. Por ello, sería recomendable usar una técnica de interpolación más robusta que considere restricciones en los perfiles de Vs utilizados para mejorar las secciones obtenidas.

Finalmente, se puede concluir que la técnica implementada en este trabajo es óptima y eficaz para la caracterización de estructuras de velocidad de onda S, en especial para regiones sísmicamente activas que cuentan con un buen compendio de registros de eventos sísmicos. Este trabajo contribuye al entendimiento de las condiciones de sitio que repercuten en la respuesta sísmica de la región de estudio y refuerza las bases para futuras investigaciones orientadas al análisis del comportamiento de la velocidad de onda S.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguilar-Velázquez, M., Pérez-Campos, X., Tago, J., & Villafuerte, C. (2024). Azimuthal crustal variations and their implications on the seismic impulse response in the Valley of Mexico. *Acta Geophysica*, 73, 53–70.
- Auvinet, G., Méndez, E., & Juárez, M. (2017). *The subsoil of Mexico City* (Vol. 3). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Bard, P.-Y. (1999). Microtremor measurements: A tool for site effect estimation? *The effects of surface geology on seismic motion*, 3, 1251–1279.
- Bertsimas, D., & Tsitsiklis, J. (1993). Simulated annealing. *Statistical Science*, 8(1), 10–15.
- BMDSF. (2000). *Compendio de registros de aceleración* (Versión II) [Disco; CD].
- Bolton, H., Romo, M., Sun, J., Jaime, A., & Lysmer, J. (1987). *Relationships between soil conditions and earthquake ground motions in Mexico City in the earthquake of sept. 19, 1985* (Reporte No. UCB/EERC-87/15). Earthquake Engineering Research Center.
- Campillo, M., & Paul, A. (2003). Long-Range Correlations in the Diffuse Seismic Coda. *SCIENCE*, 299, 547–549.
- CIRES. (2024). *Red Acelerografica de la Ciudad de Mexico RACM*. http://www.cires.org.mx/racm_mapainteractivop/
- Díaz-Rodríguez, J. (2006). Los suelos lacustres de la Ciudad de México. *Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil*, 6(2), 111–130.
- Estévez, P. (1997). Optimización Mediante Algoritmos Genéticos. *Anales del Instituto de Ingenieros de Chile*, 83–92.
- Field, E., & Jacob, K. (1995). A comparison and test of various site-response estimation techniques, including three that are not reference-site dependent. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 85(4), 1127–1143.
- Gestal, M., Rivero, D., Rabuñal, J., Dorado, J., & Pazos, A. (Eds.). (2010). *Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética*. Universidade da Coruña, Servicio de Publicacións.
- GobCDMXM. (2004). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal* [Reglamento]. Gaceta Oficial de la Ciudad de México.

- González-Herrera, R., Mora-Chaparro, J. C., Aguirre-González, J., & Novelo-Casanova, D. alberto. (2013). La estructura de velocidades y su relación con el peligro sísmico en Tuxtla Gutiérrez, Chiapas. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 30(1), 121–134.
- Gutiérrez, C., & Singh, S. (1992). A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: Comparison of results from strong-motion and microtremor data. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 82(2), 642–659.
- Hadamard, J. (1902). Sur les Problèmes aux Dérivées Partielles et Leur Signification Physique. *Princeton University Bulletin*, 13, 49–52.
- Havskov, J., & Ottemöller, L. (2010). *Routine Data Processing in Earthquake Seismology*. Springer.
- II-UNAM. (2025). *Estructura del Archivo Estándar de Aceleración*. Base de datos de registros acelerográficos de la RAII-UNAM. <https://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/DscArcStd.aspx>
- Juárez-Camarena, M., Auvinet-Guichard, G., & Méndez-Sánchez, E. (2016). Zonificación geotécnica del subsuelo del Valle de México. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 17(3), 297–308.
- Kawase, H., Sánchez-Sesma, F. J., & Matsushima, S. (2011). The Optimal Use of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Motions for Velocity Inversions Based on Diffuse-Field Theory for Plane Waves. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 101(5), 2001–2014.
- Kulháněk, O. (1990). *Anatomy of Seismograms* (1a ed.). Elsevier.
- Lay, T., & Wallace, T. (1995). *Modern Global Seismology*. Academic Press.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1993). SITE EFFECT EVALUATION USING SPECTRAL RATIOS WITH ONLY ONE STATION. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 83(5), 1574–1594.
- Lermo, J., & Chávez-García, F. J. (1994). Are Microtremors Useful in Site Response Evaluation? *Bulletin of the Seismological Society of America*, 84(5), 1350–1364.
- Lermo, J., Sánchez-Sesma, F. J., Ramos, E., Álvarez, I., Jiménez, N., Torres, R., Machado, O., Téllez, N., Luna, I., Crespo, N., López, D., Huerta, O., Castañeda, K., Lorenzo, H., Pérez, J., Luna-Cruz, J., & Luna-Méndez, J. (2020). *ACTUALIZACIÓN DE LA ZONIFICACIÓN SÍSMICA DE LA CIUDAD DE MÉXICO Y ÁREAS ALEDAÑAS-PARTE NORTE* [Técnico]. Instituto de Ingeniería.

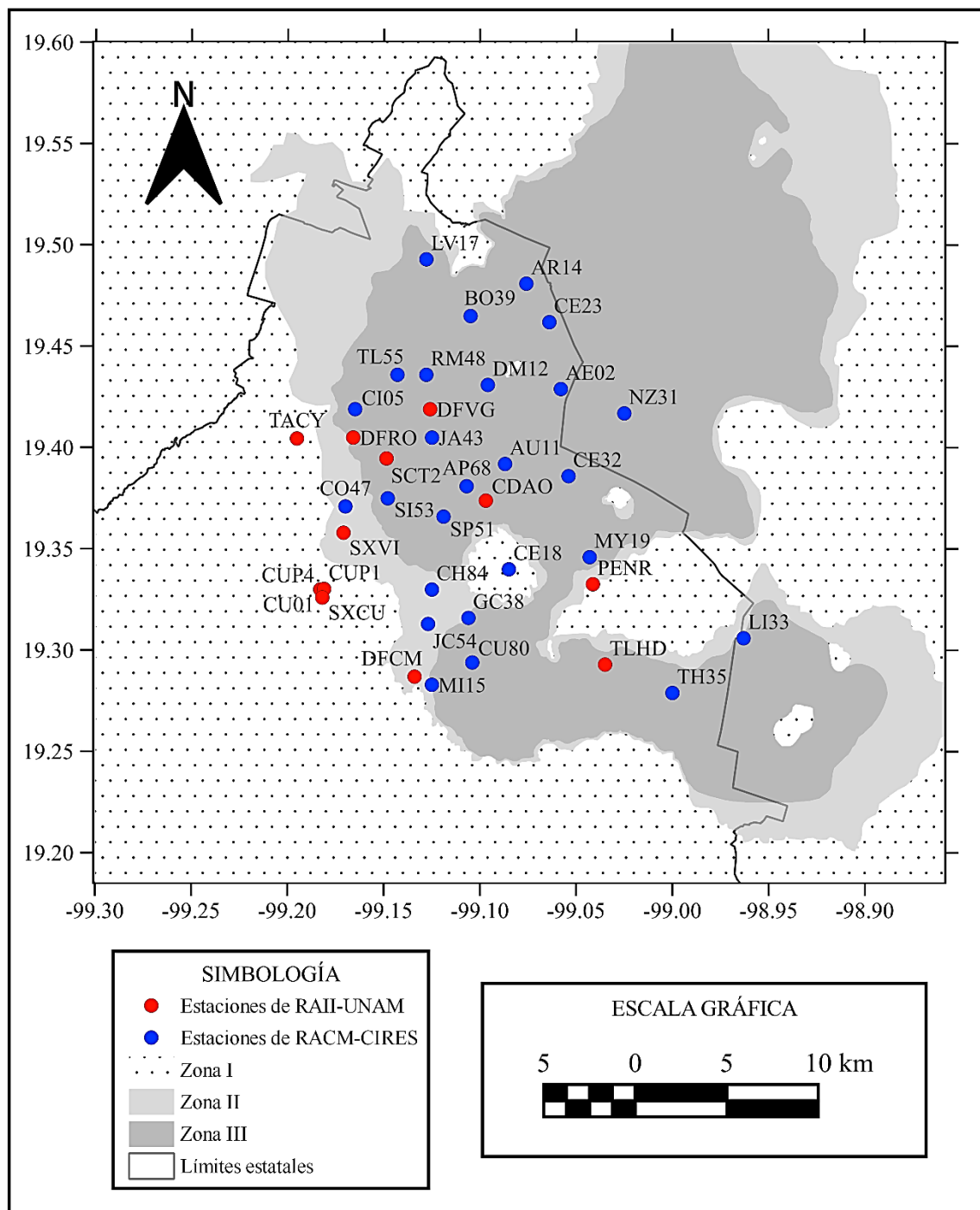
<https://transparencia.cdmx.gob.mx/storage/app/uploads/public/603/44b/1c6/60344b1c69beb045505965.pdf>

- Marsal, R., & Mazari, M. (1959). *The Subsoil of Mexico City* (Vol. 1). Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Ingeniería.
- Mooser, F., Montiel, A., & Zuñiga, A. (1996). Nuevo mapa geológico de las cuencas de México, Toluca y Puebla, 1:100,000. *Comisión Federal de Electricidad*, 27.
- Nagashima, F., Matsushima, S., Kawase, H., Sánchez-Sesma, F. J., Hayakawa, T., Satoh, T., & Oshima, M. (2014). Application of Horizontal-to-Vertical Spectral Ratios of Earthquake Ground Motions to Identify Subsurface Structures at and around the K-NET Site in Tohoku, Japan. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(5), 2288–2302.
- Nakamura, Y. (2000). Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's Technique and its Applications. *12WCEE 2000: 12th World Conference on Earthquake Engineering.*, 1–8.
- Rodríguez, M., & Sánchez-Sesma, F. (2001). Modelo tridimensional del Valle de México para estudios sísmicos. *Revista de Ingeniería Sísmica*, 65.
- Salinas, V., Luzón, F., García-Jerez, A., Sánchez-Sesma, F. J., Kawase, H., Matsushima, S., Suarez, M., Cuellar, A., & Campillo, M. (2014). Using Diffuse Field Theory to Interpret the H/V Spectral Ratio from Earthquake Records in Cibeles Seismic Station, Mexico City. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 104(2), 995–1001.
- Santoyo-Villa, E., Ovando, E., Mooser, F., & León, E. (2005). *Síntesis geotécnica de la Cuenca del Valle de México*. TGC.
- Seed, H. B., Romo, H. M., Sun, J. I., Jaime, A., & Lysmer, J. (1988). The Mexico earthquake of September 19, 1985-Relationship between soil conditions and earthquake ground motions. *Earthquake Spectra*, 4(4), 687–729.
- SESAME. (2004). *Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations* (Guía Nos. EVG1-CT-2000–00026; p. 62). European Commission.
- Shapiro, N., Campillo, M., Margerin, L., Singh, S., Kostoglodov, V., & Pacheco, J. (2000). The Energy Partitioning and the Diffusive Character of the Seismic Coda. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(3), 655–665.
- Shearer, P. (2009). *Introduction to Seismology* (2a ed.). Cambridge University Press.

- Tikhonov, A. N. (1943). On the stability of inverse problems. *Proceedings of the USSR Academy of Sciences*, 39, 195–198.
- UISII-UNAM. (2024). *Base de datos de registros acelerográficos de la RAII-UNAM*. <http://aplicaciones.iingen.unam.mx/AcelerogramasRSM/>
- Unda, J. (2016). *Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México* [Licenciatura]. Universidad Nacional Autónoma de México.
- Vázquez-Sánchez, E., & Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la Cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133–190.
- Yamashita Architects, & Engineers Inc. Oyo Corporation. (1996). *ESTUDIOS DEL SUBSUELO EN EL VALLE DE MEXICO* (Cuadernos de investigación No. 34). CENAPRED.
- Yepes, V. (2017, noviembre 7). ¿Qué es la optimización por cristalización simulada? *El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2017/11/07/optimizacion-cristalizacion-simulada/>
- Yepes, V. (2023, septiembre 14). Cristalización simulada. *El blog de Víctor Yepes*. <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/cristalizacion-simulada/>
- Zhdanov, M. S. (2015). *Inverse Theory and Applications in Geophysics* (2a ed.). Elsevier.

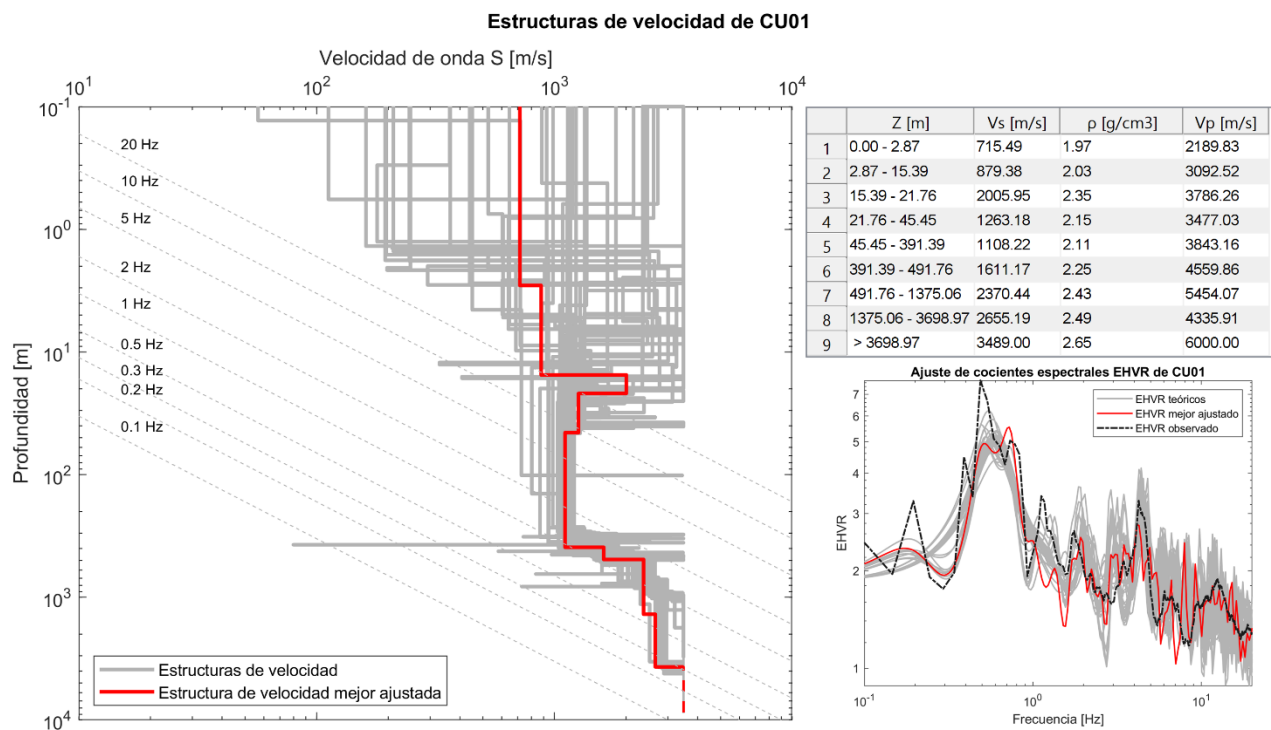
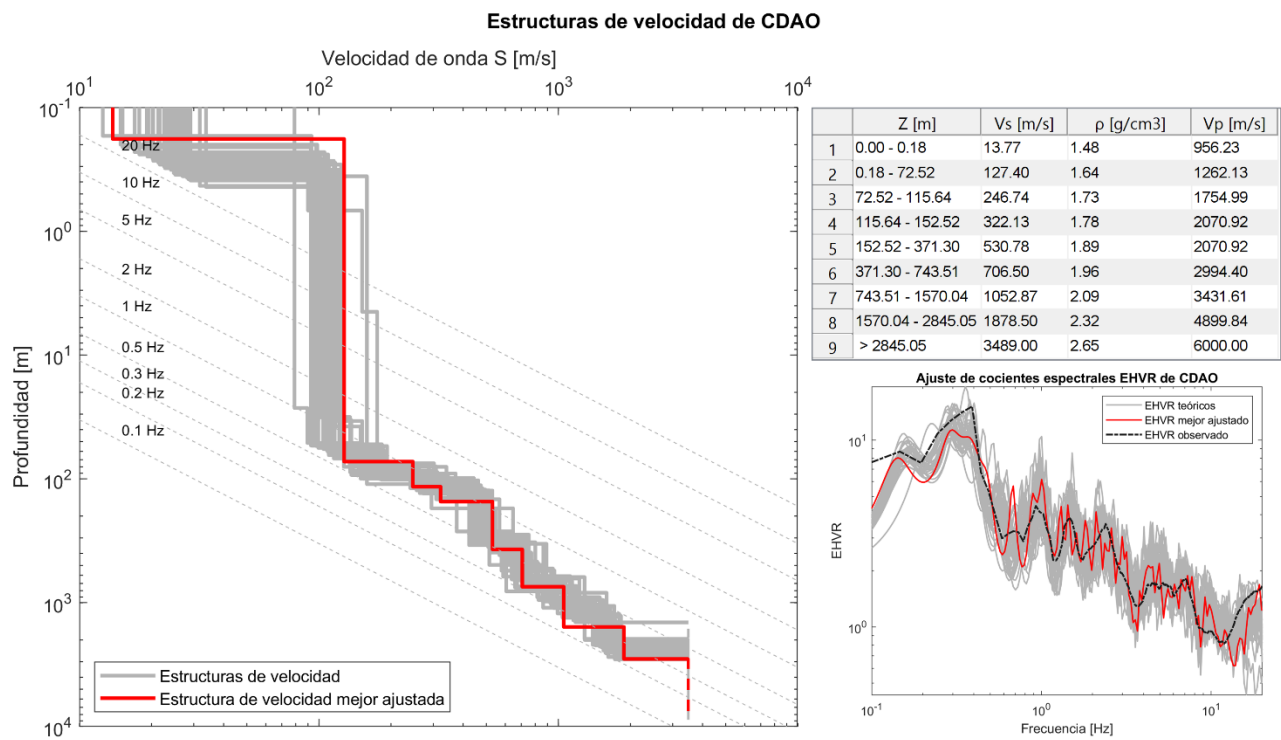
ANEXO

MAPA DE LOCALIZACIÓN DE ESTACIONES DE ESTUDIO

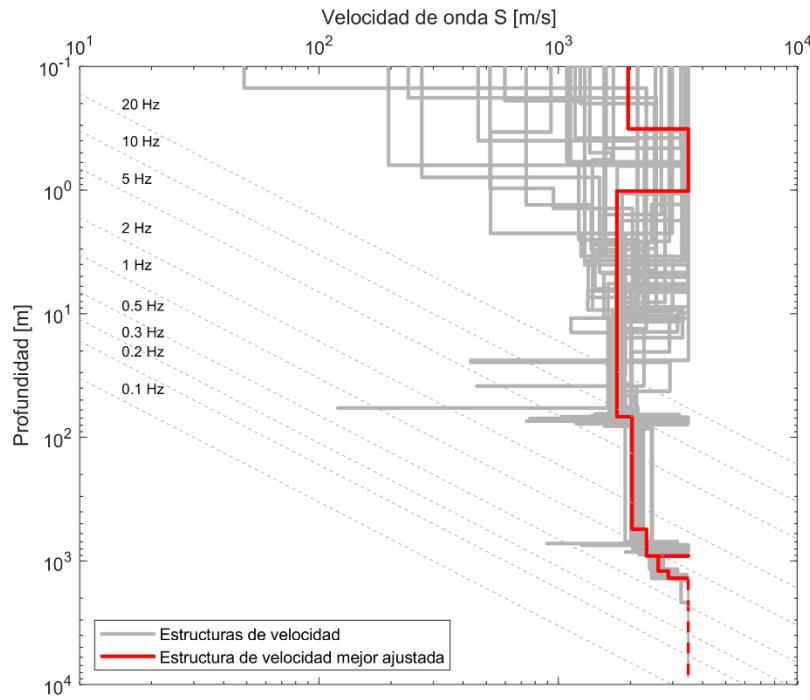


ESTRUCTURAS DE VELOCIDAD DE ONDA S Y AJUSTE DE COCIENTES ESPECTRALES

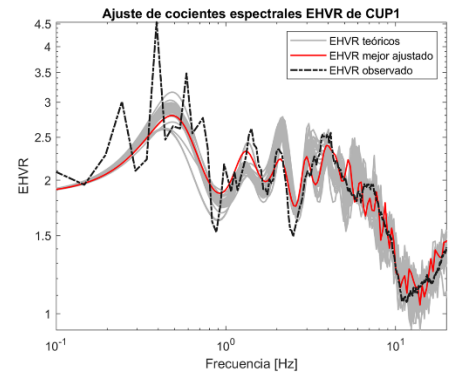
Estaciones de la RAII-UNAM



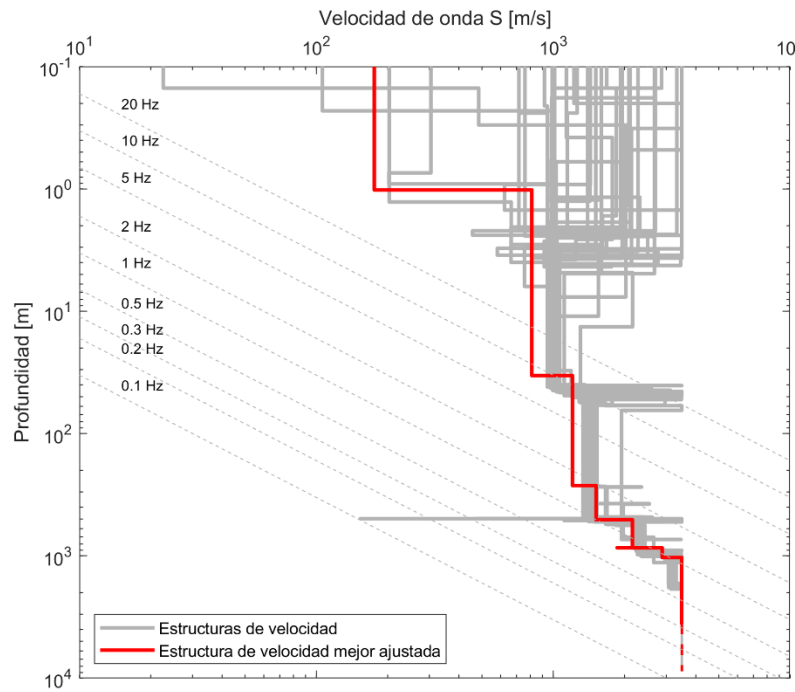
Estructuras de velocidad de CUP1



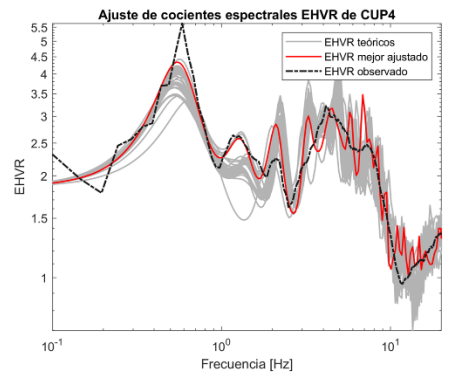
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.32	1954.55	2.34	3770.61
2	0.32 - 1.02	3489.00	2.65	6000.00
3	1.02 - 68.17	1755.10	2.29	3432.98
4	68.17 - 553.06	2030.91	2.35	4899.60
5	553.06 - 910.83	2332.97	2.42	5415.03
6	910.83 - 912.17	3489.00	2.65	6000.00
7	912.17 - 1206.97	2611.51	2.48	5051.81
8	1206.97 - 1376.61	2880.35	2.54	5002.52
9	> 1376.61	3489.00	2.65	6000.00



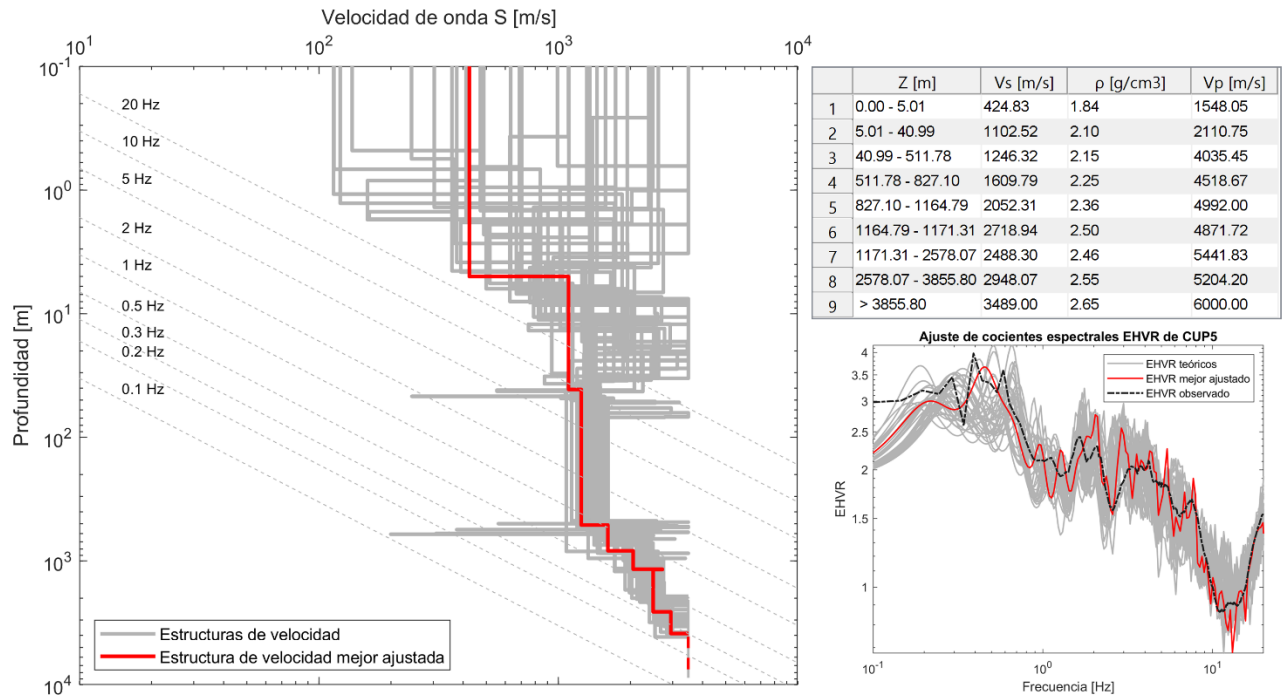
Estructuras de velocidad de CUP4



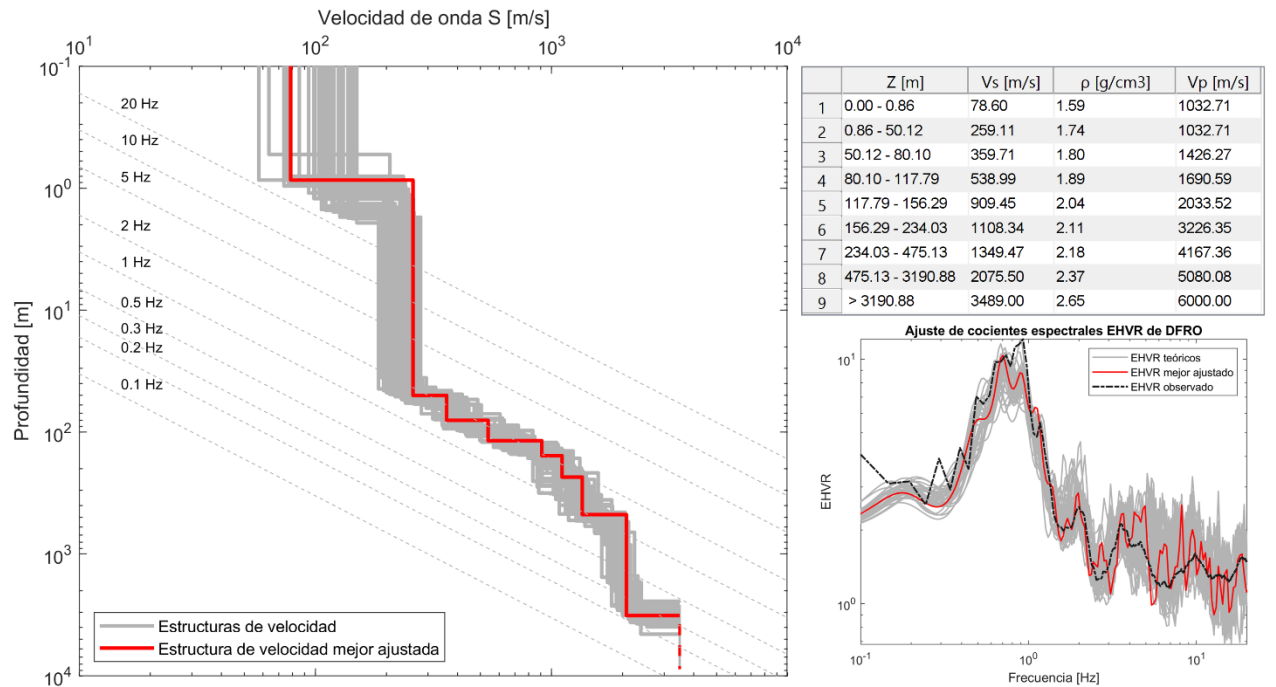
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 1.02	175.60	1.68	2233.93
2	1.02 - 33.62	811.51	2.00	2548.61
3	33.62 - 266.07	1205.05	2.14	3773.83
4	266.07 - 506.35	1515.38	2.22	4431.21
5	506.35 - 859.27	2158.35	2.38	5173.39
6	859.27 - 859.81	1859.50	2.31	3682.51
7	859.81 - 1031.92	2882.49	2.54	4794.88
8	1031.92 - 3581.08	3484.96	2.65	5995.73
9	> 3581.08	3489.00	2.65	6000.00



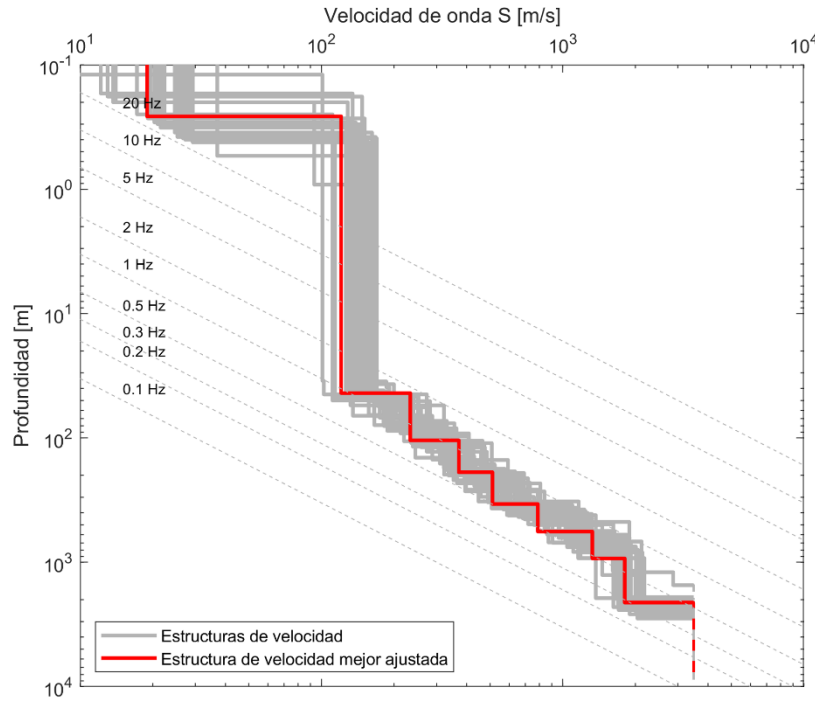
Estructuras de velocidad de CUP5



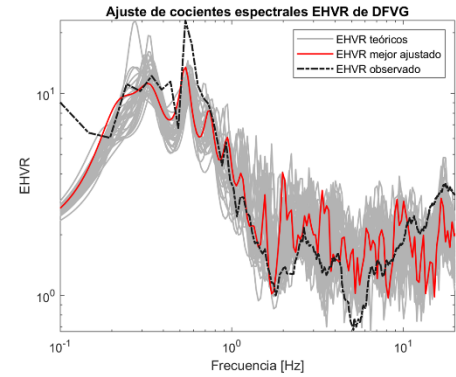
Estructuras de velocidad de DFRO



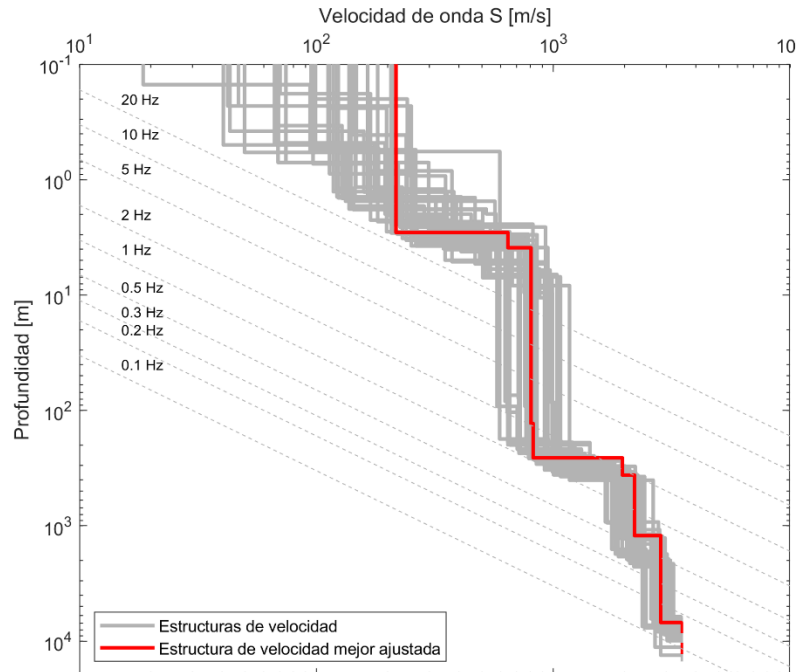
Estructuras de velocidad de DFIG



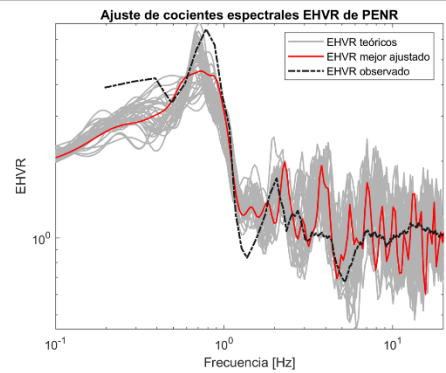
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.26	18.94	1.49	865.83
2	0.26 - 43.65	120.71	1.63	865.83
3	43.65 - 104.62	233.40	1.72	1314.78
4	104.62 - 188.86	370.83	1.81	1596.93
5	188.86 - 340.03	511.54	1.88	2852.18
6	340.03 - 566.15	788.34	1.99	3333.23
7	566.15 - 930.89	1326.24	2.17	4166.41
8	930.89 - 2111.49	1807.12	2.30	4811.79
9	> 2111.49	3489.00	2.65	6000.00



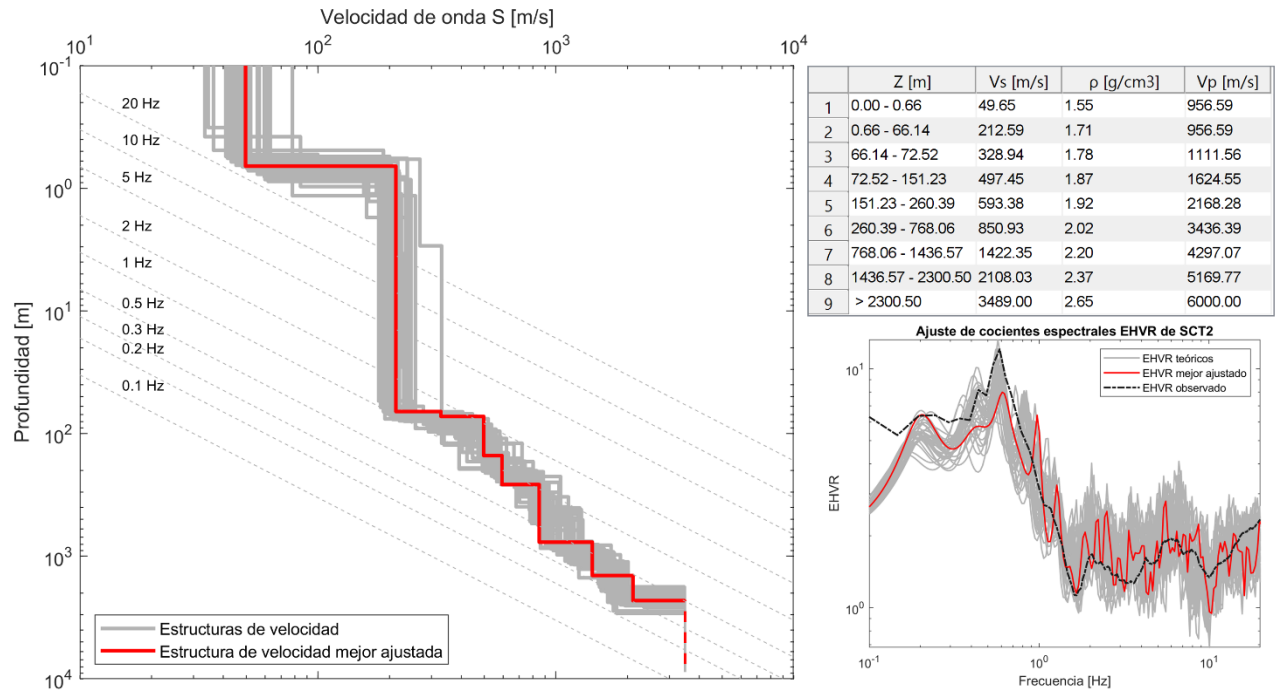
Estructuras de velocidad de PENR



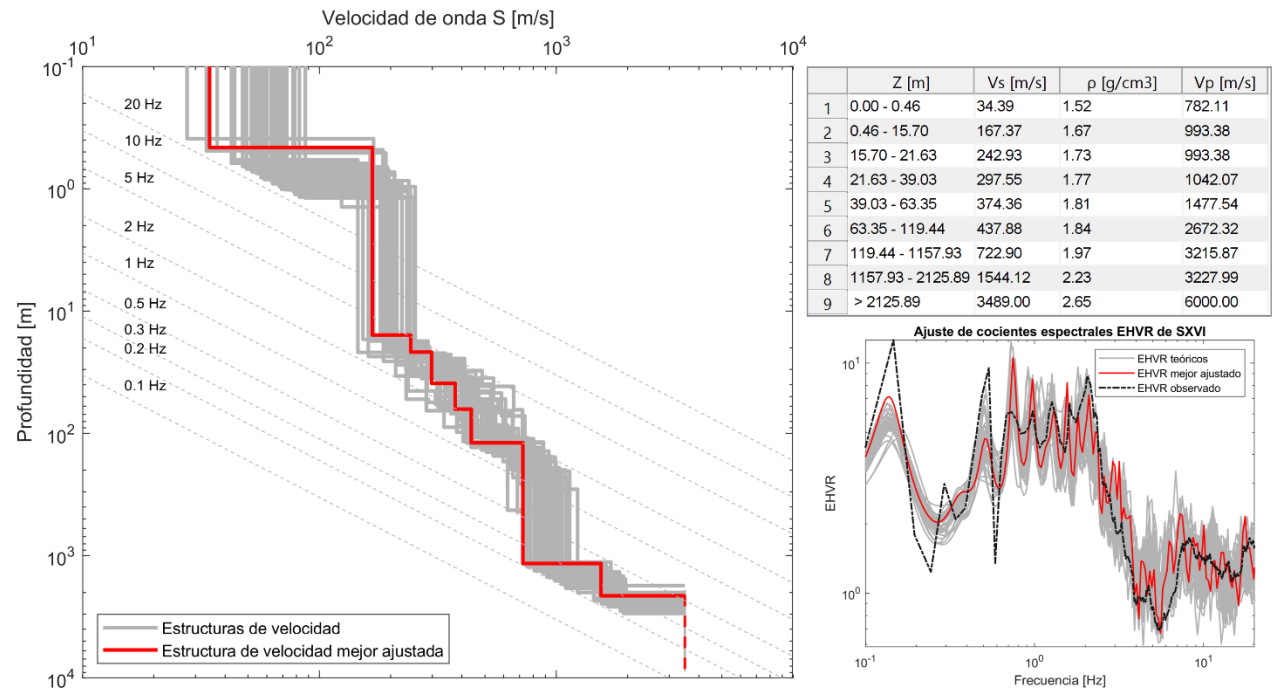
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 2.87	216.86	1.71	1168.16
2	2.87 - 3.89	643.41	1.94	1585.97
3	3.89 - 76.74	805.46	2.00	1585.97
4	76.74 - 129.84	805.46	2.00	2263.85
5	129.84 - 258.21	822.63	2.01	2975.91
6	258.21 - 363.86	1959.58	2.34	3301.06
7	363.86 - 1216.07	2202.52	2.39	5062.00
8	1216.07 - 6884.50	2843.61	2.53	5903.27
9	> 6884.50	3489.00	2.65	6000.00



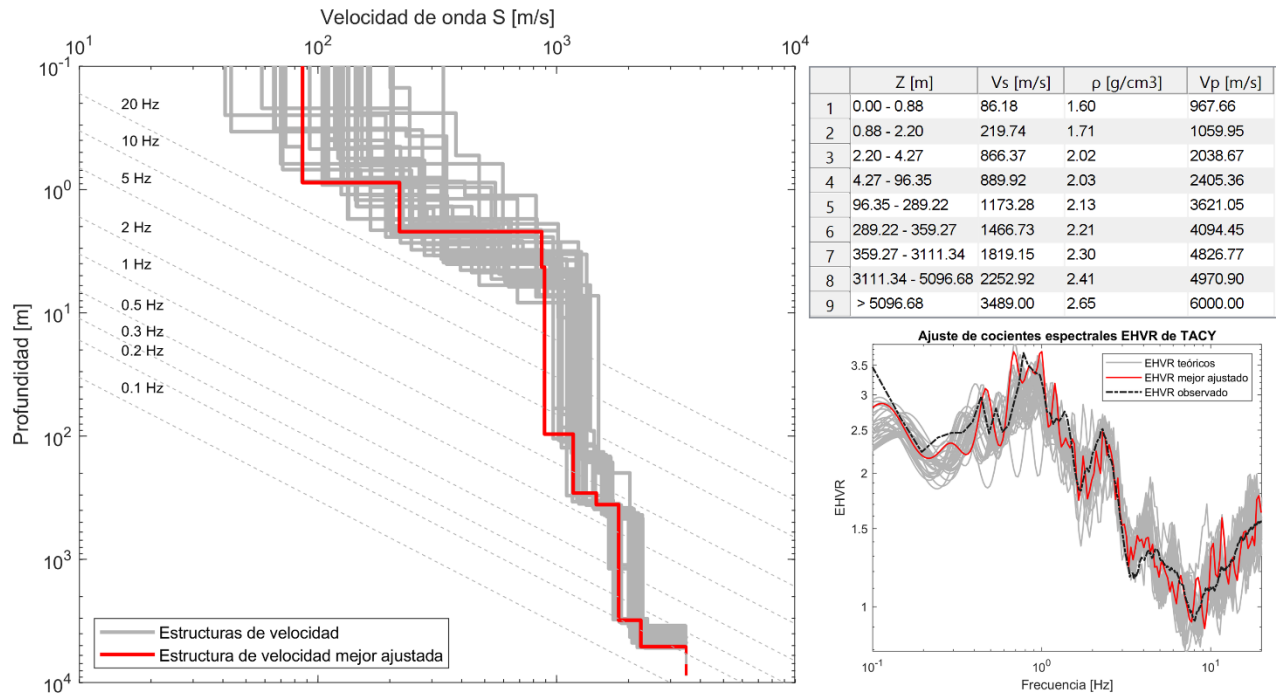
Estructuras de velocidad de SCT2



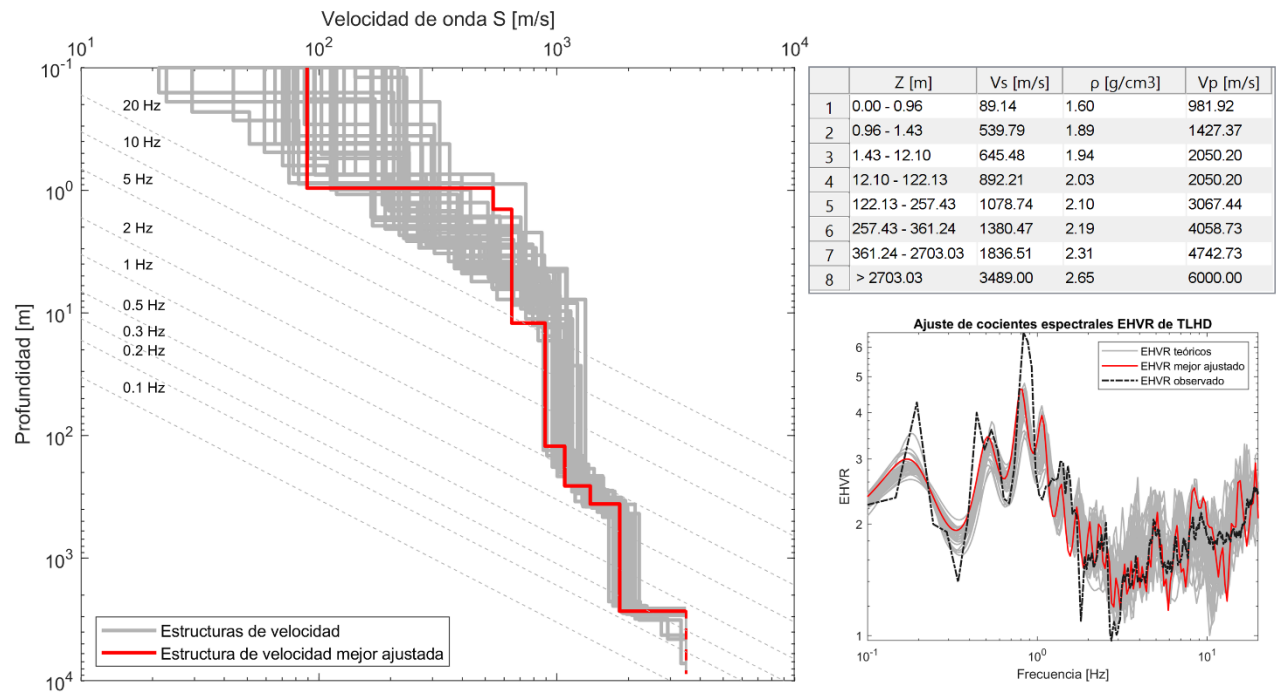
Estructuras de velocidad de SXVI



Estructuras de velocidad de TACY

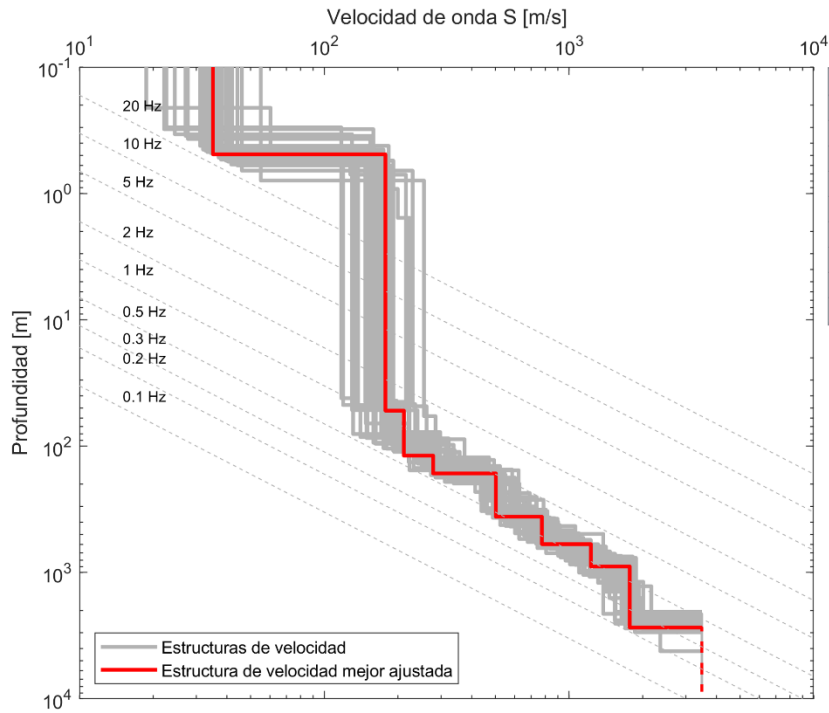


Estructuras de velocidad de TLHD



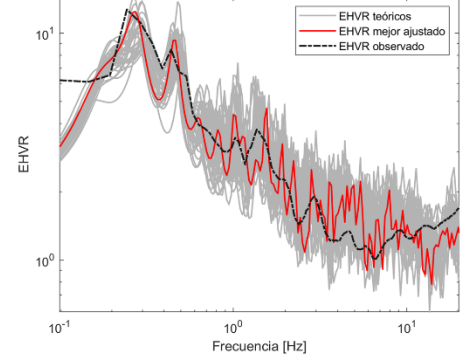
Estaciones de la RACM-CIRES

Estructuras de velocidad de AE02

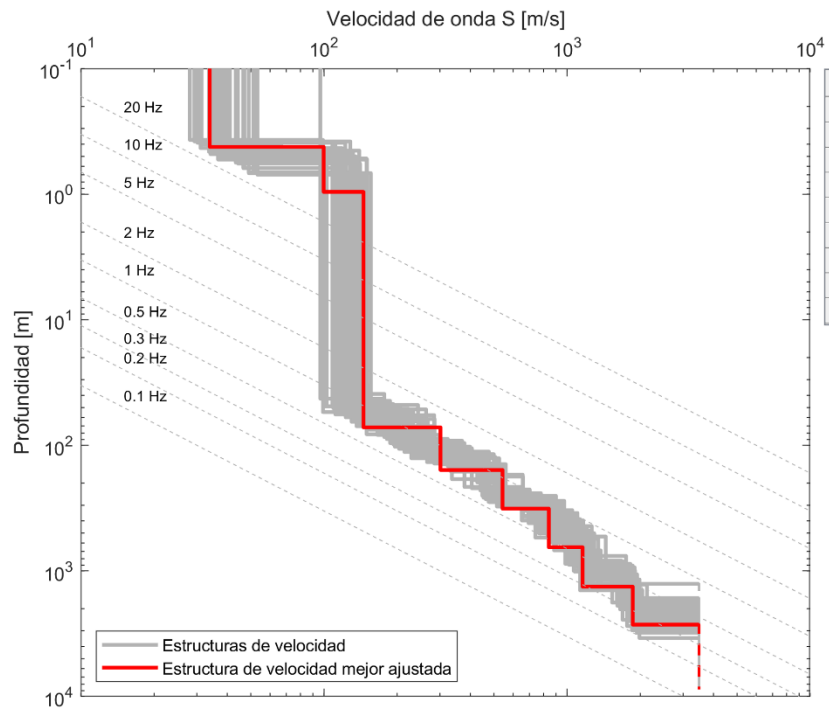


	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.49	35.11	1.53	933.22
2	0.49 - 52.42	177.76	1.68	1001.46
3	52.42 - 118.98	211.42	1.71	1408.84
4	118.98 - 164.49	278.44	1.75	1895.03
5	164.49 - 362.44	502.40	1.87	2420.61
6	362.44 - 596.60	774.76	1.99	2420.61
7	596.60 - 896.94	1227.89	2.14	3937.28
8	896.94 - 2728.77	1769.57	2.29	4687.44
9	> 2728.77	3489.00	2.65	6000.00

Ajuste de cocientes espectrales EHVR de AE02

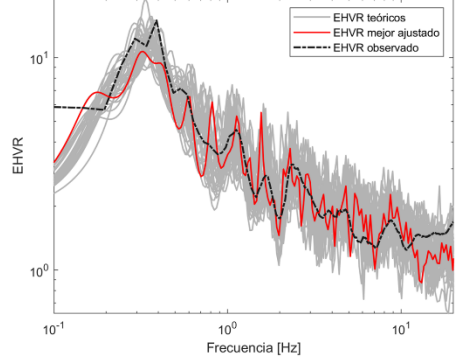


Estructuras de velocidad de AP68

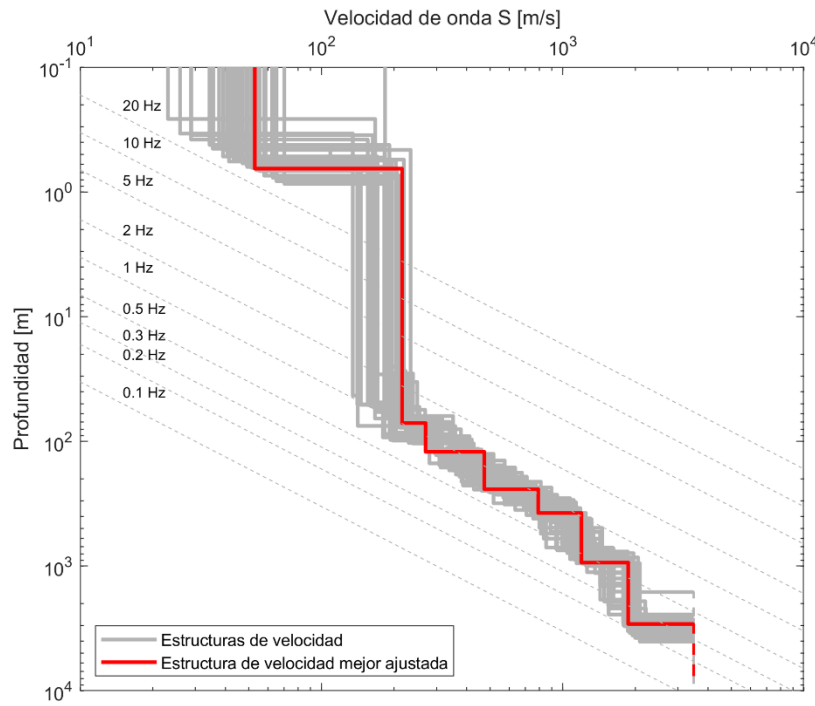


	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.42	33.89	1.52	1057.22
2	0.42 - 0.96	99.68	1.61	1123.00
3	0.96 - 71.98	145.35	1.66	1342.15
4	71.98 - 157.28	301.56	1.77	1805.65
5	157.28 - 319.26	542.44	1.89	2280.55
6	319.26 - 648.21	840.76	2.01	2844.48
7	648.21 - 1334.85	1157.91	2.12	3265.66
8	1334.85 - 2682.14	1861.92	2.31	4879.57
9	> 2682.14	3489.00	2.65	6000.00

Ajuste de cocientes espectrales EHVR de AP68

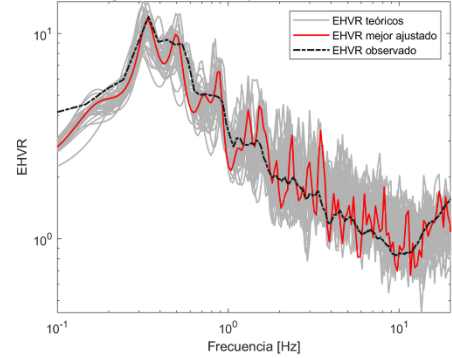


Estructuras de velocidad de AR14

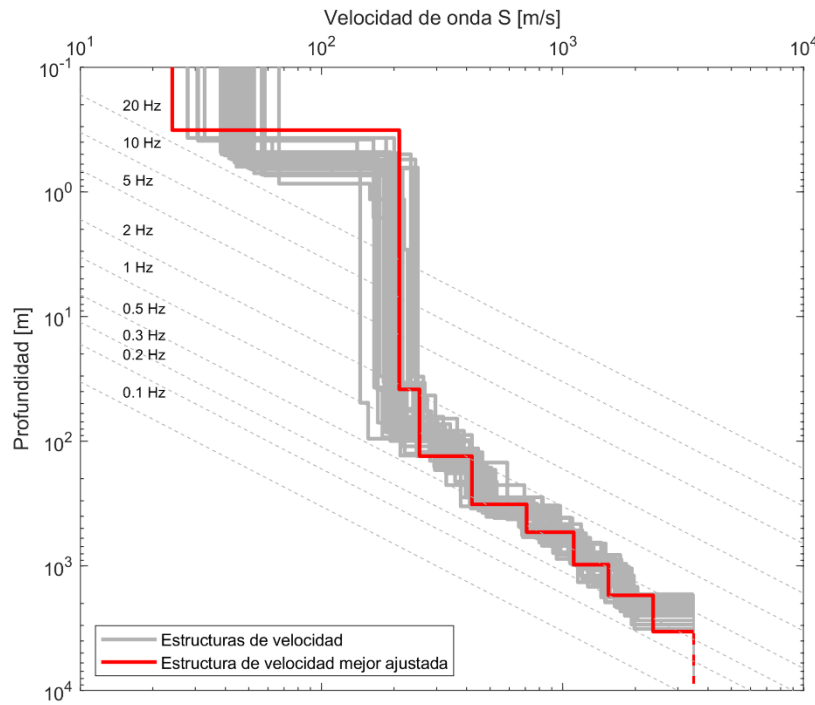


	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.65	52.93	1.55	959.69
2	0.65 - 28.72	215.69	1.71	959.69
3	28.72 - 71.32	215.69	1.71	1445.41
4	71.32 - 121.32	270.17	1.75	2131.27
5	121.32 - 241.94	473.21	1.86	2453.78
6	241.94 - 375.43	791.49	2.00	3004.14
7	375.43 - 938.11	1194.73	2.13	3973.76
8	938.11 - 2917.63	1868.06	2.32	4887.09
9	> 2917.63	3489.00	2.65	6000.00

Ajuste de cocientes espectrales EHVR de AR14

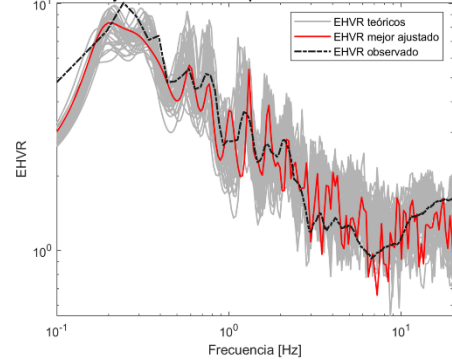


Estructuras de velocidad de AU11

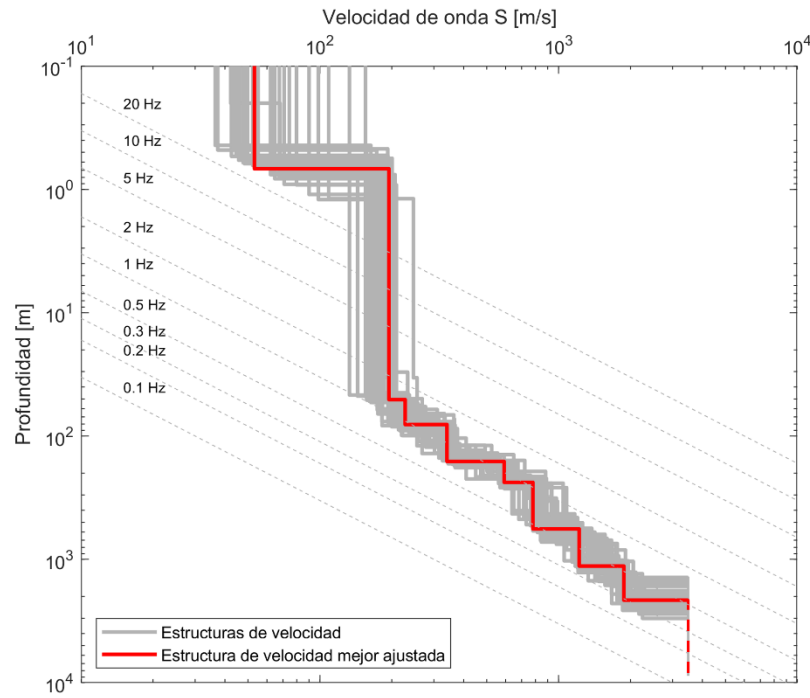


	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.32	24.08	1.50	957.33
2	0.32 - 38.41	210.05	1.71	968.33
3	38.41 - 131.70	254.81	1.74	1679.86
4	131.70 - 320.91	420.34	1.83	2325.00
5	320.91 - 536.47	708.88	1.96	2781.90
6	536.47 - 976.72	1110.31	2.11	3607.79
7	976.72 - 1719.66	1547.62	2.23	3910.33
8	1719.66 - 3368.02	2369.20	2.43	4991.15
9	> 3368.02	3489.00	2.65	6000.00

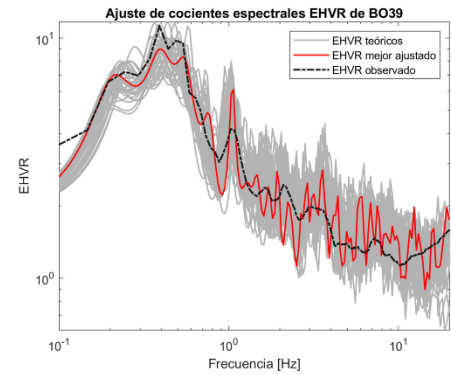
Ajuste de cocientes espectrales EHVR de AU11



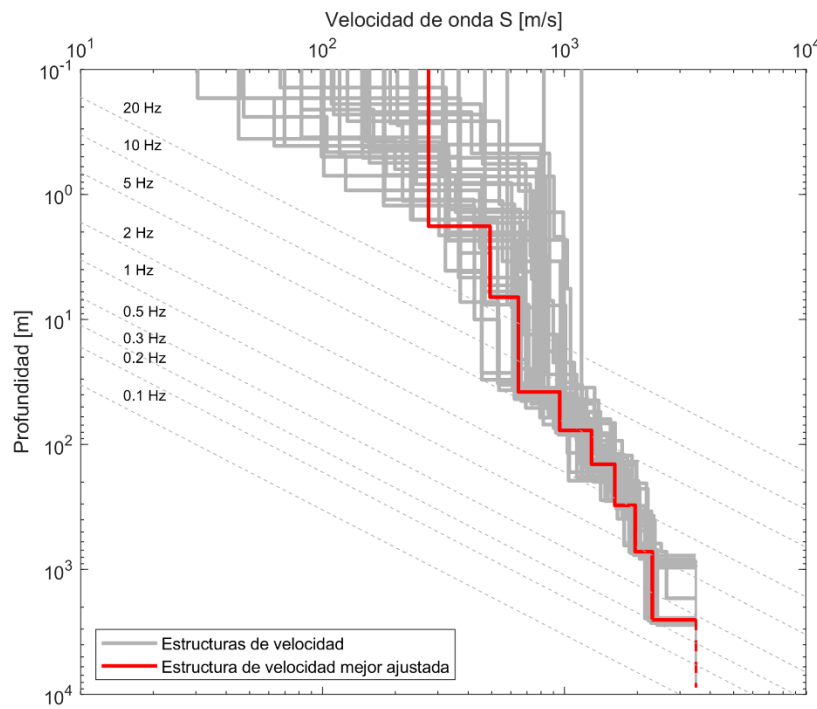
Estructuras de velocidad de BO39



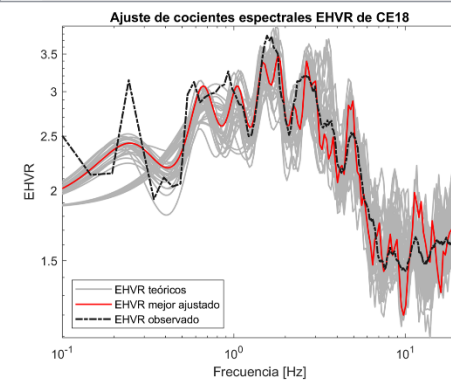
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.68	53.15	1.55	867.07
2	0.68 - 50.70	194.60	1.70	998.77
3	50.70 - 80.70	227.57	1.72	1271.71
4	80.70 - 160.85	340.68	1.79	1606.71
5	160.85 - 237.34	591.26	1.92	2274.33
6	237.34 - 566.27	779.90	1.99	3319.19
7	566.27 - 1133.26	1219.61	2.14	4010.75
8	1133.26 - 2141.52	1875.23	2.32	4895.85
9	> 2141.52	3489.00	2.65	6000.00



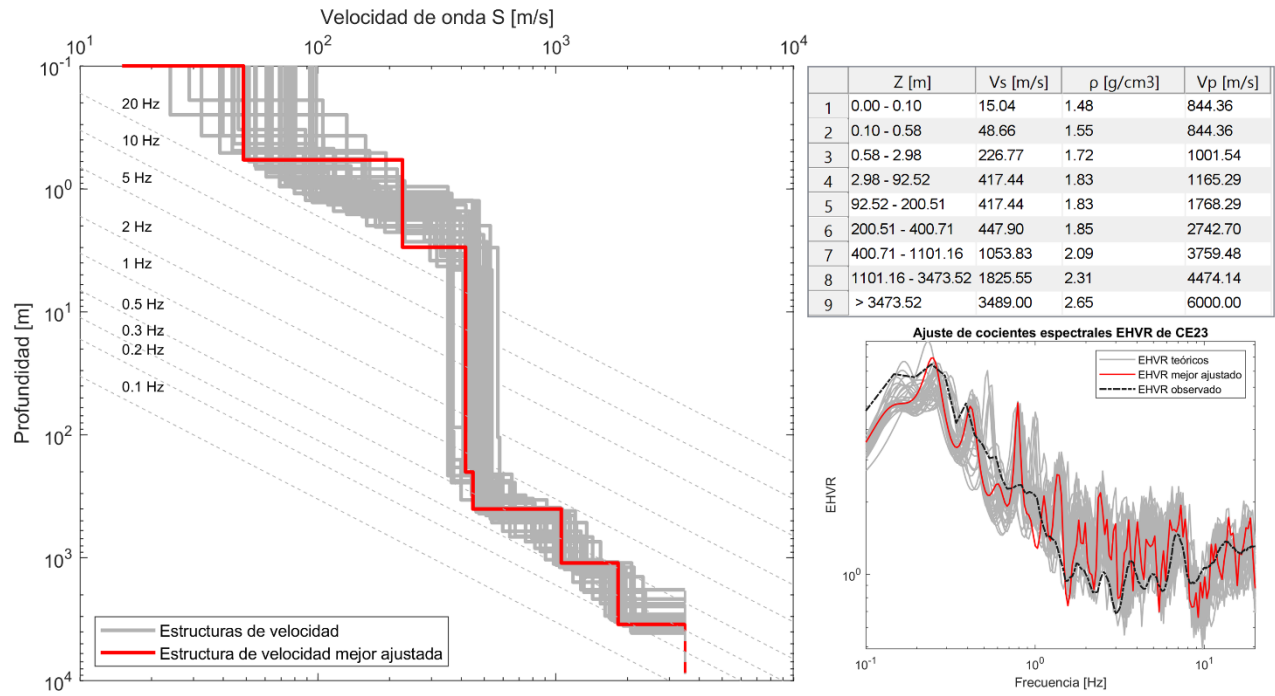
Estructuras de velocidad de CE18



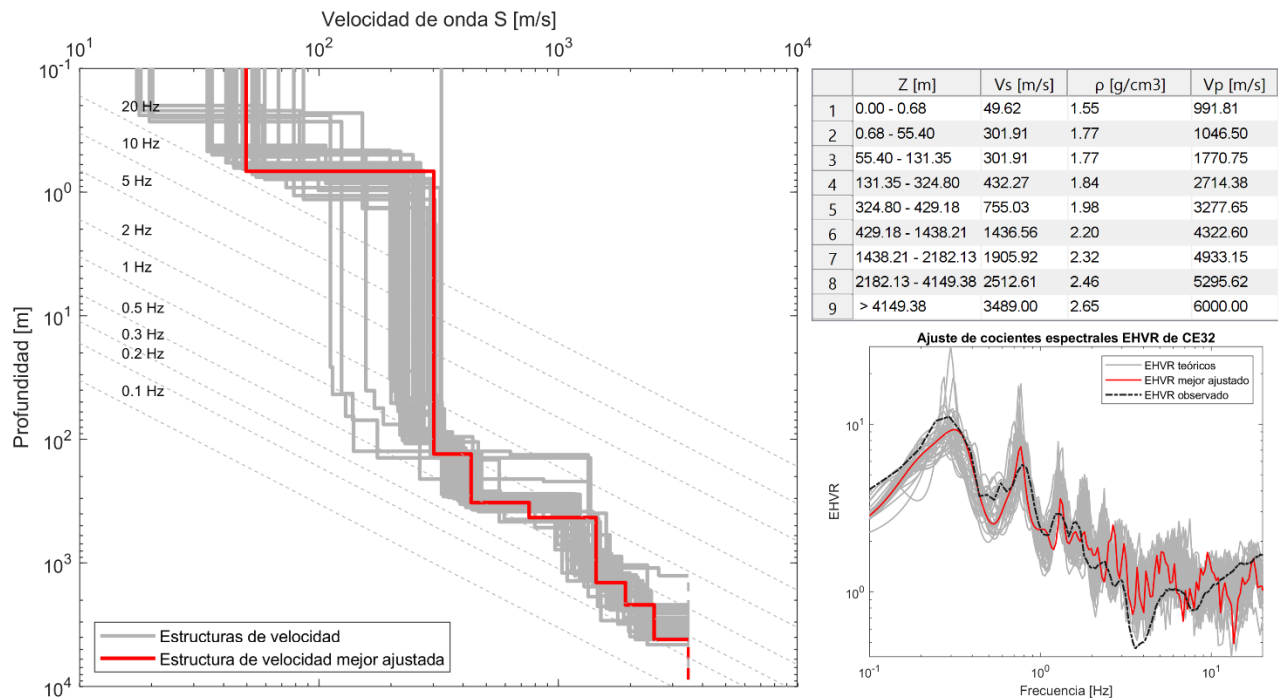
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 1.80	274.39	1.75	1212.99
2	1.80 - 6.65	492.57	1.87	1721.93
3	6.65 - 38.02	645.04	1.94	1993.52
4	38.02 - 77.26	956.25	2.06	2493.39
5	77.26 - 143.91	1293.72	2.16	3020.22
6	143.91 - 306.60	1613.32	2.25	3733.04
7	306.60 - 721.66	1958.90	2.34	4930.91
8	721.66 - 2529.19	2307.51	2.42	4930.91
9	> 2529.19	3489.00	2.65	6000.00



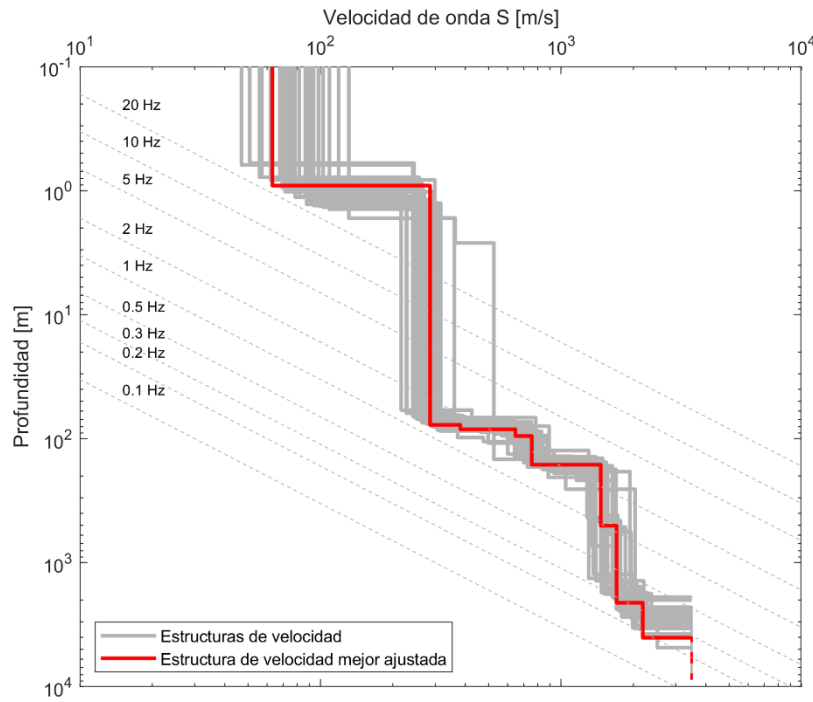
Estructuras de velocidad de CE23



Estructuras de velocidad de CE32

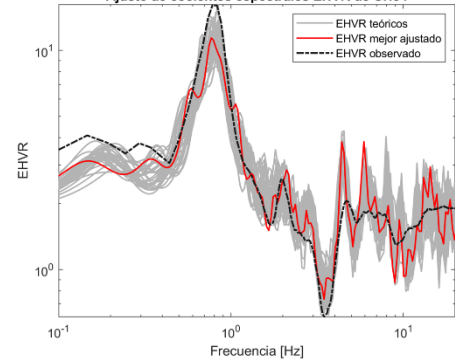


Estructuras de velocidad de CH84

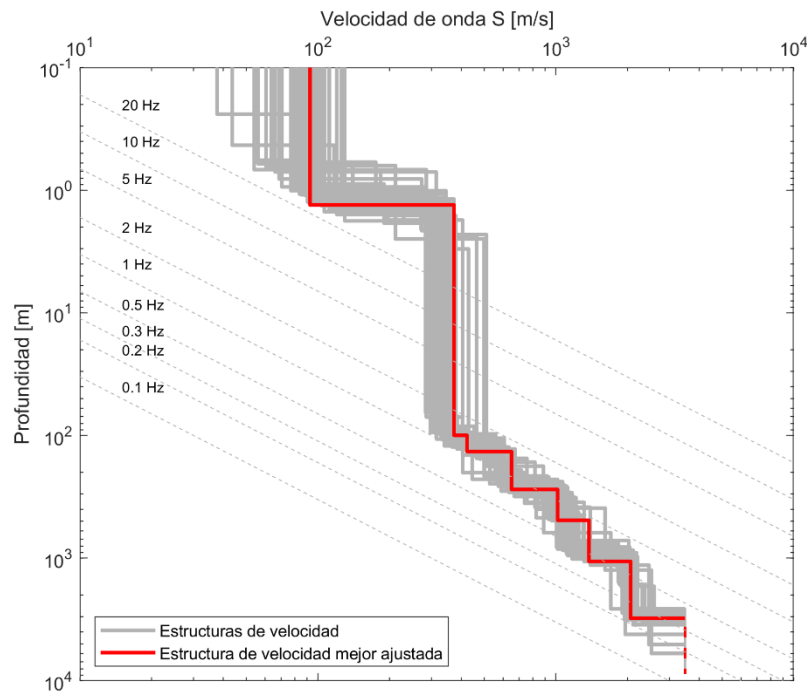


	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.91	63.08	1.57	1041.78
2	0.91 - 77.39	285.59	1.76	1130.55
3	77.39 - 83.99	381.53	1.81	1473.07
4	83.99 - 95.17	646.17	1.94	1646.88
5	95.17 - 162.13	756.16	1.98	2747.22
6	162.13 - 503.73	1462.46	2.21	4358.57
7	503.73 - 2103.90	1702.24	2.27	4678.82
8	2103.90 - 4027.72	2187.58	2.39	5228.33
9	> 4027.72	3489.00	2.65	6000.00

Ajuste de cocientes espectrales EHVR de CH84

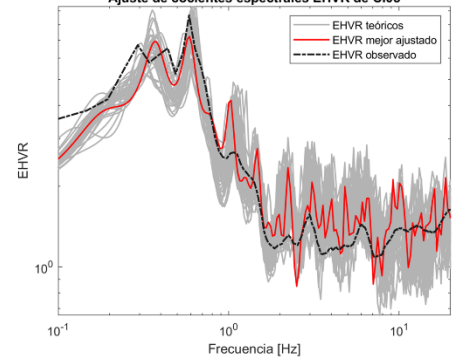


Estructuras de velocidad de CI05

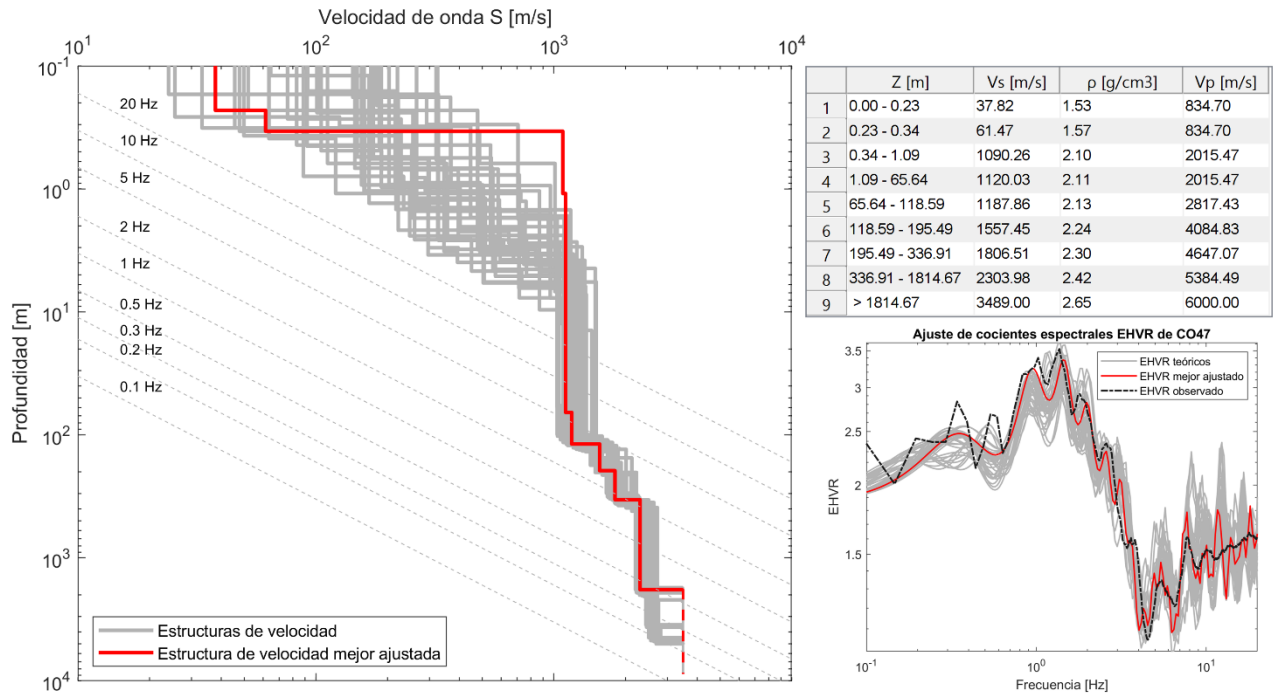


	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 1.32	92.67	1.60	943.57
2	1.32 - 53.66	373.50	1.81	1119.78
3	53.66 - 99.74	373.50	1.81	1436.13
4	99.74 - 135.34	423.29	1.84	1720.14
5	135.34 - 275.47	650.62	1.94	2559.88
6	275.47 - 491.60	1016.92	2.08	3701.99
7	491.60 - 1063.42	1377.48	2.19	4239.56
8	1063.42 - 3095.92	2061.21	2.36	5116.34
9	> 3095.92	3489.00	2.65	6000.00

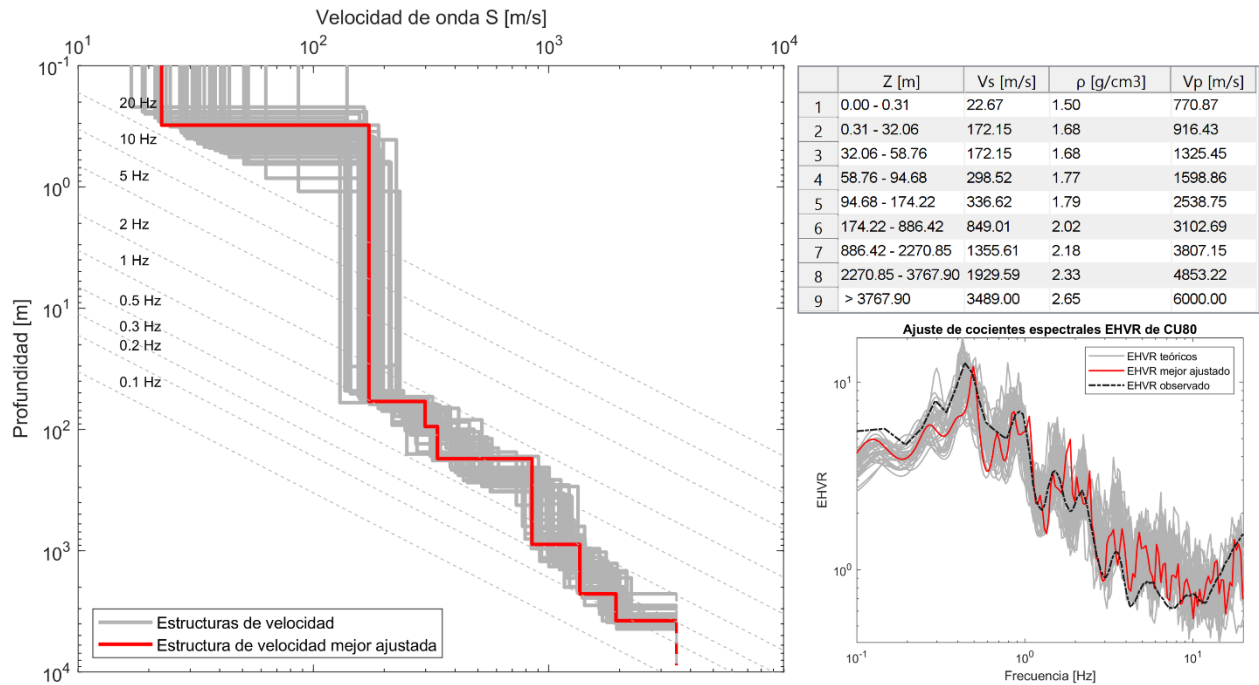
Ajuste de cocientes espectrales EHVR de CI05



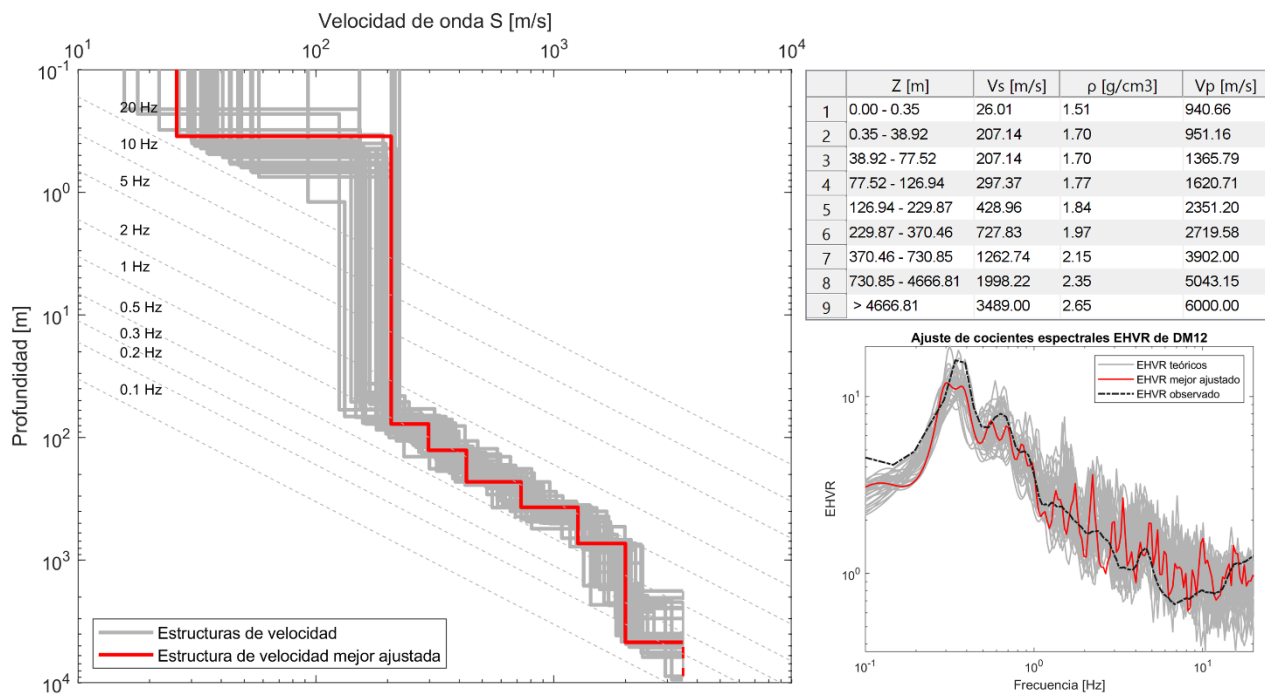
Estructuras de velocidad de CO47



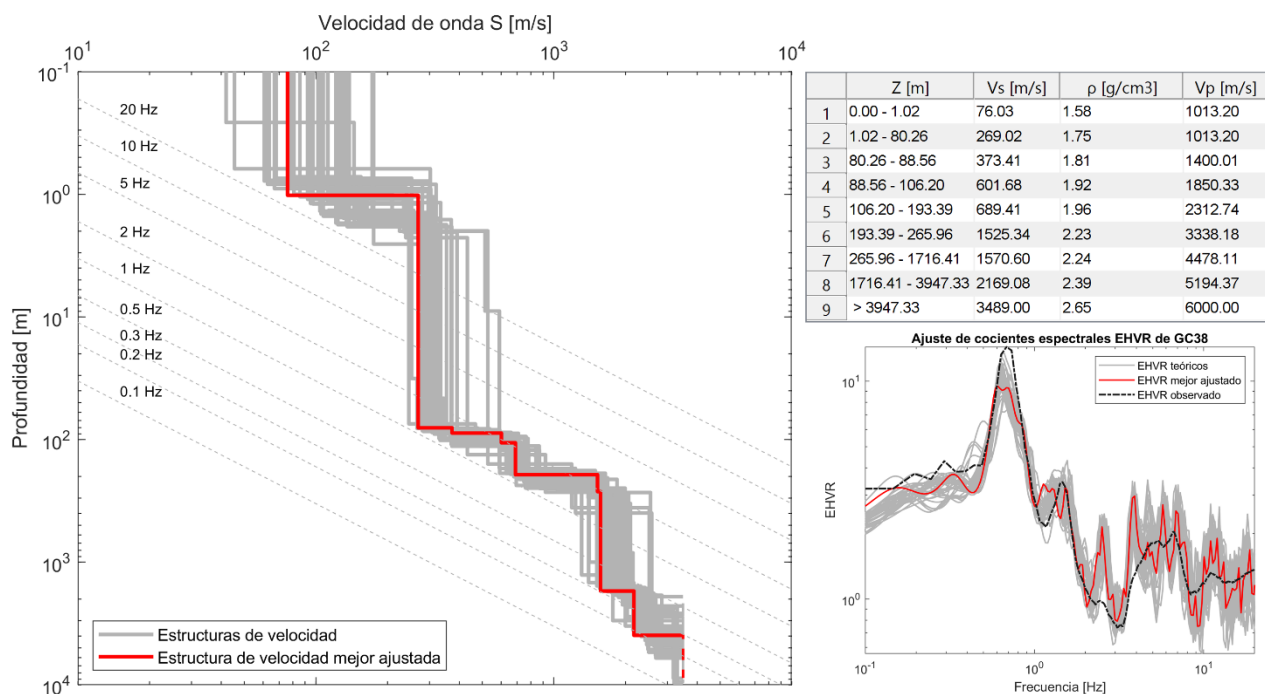
Estructuras de velocidad de CU80



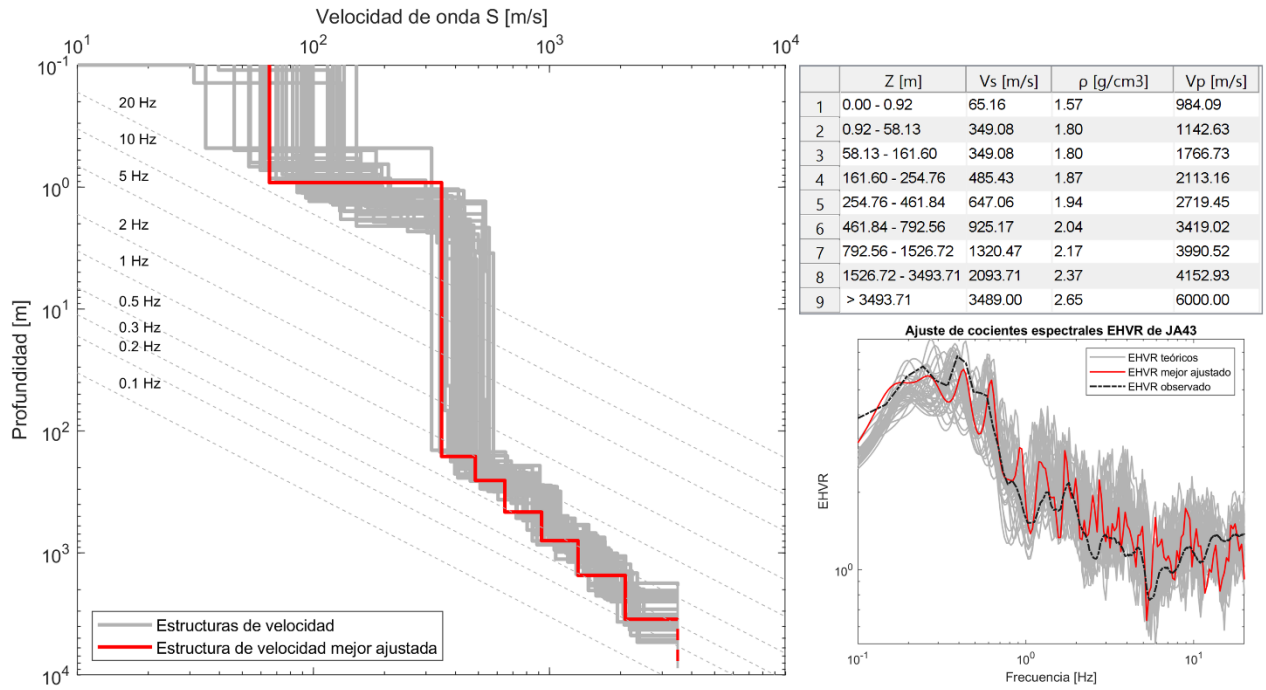
Estructuras de velocidad de DM12



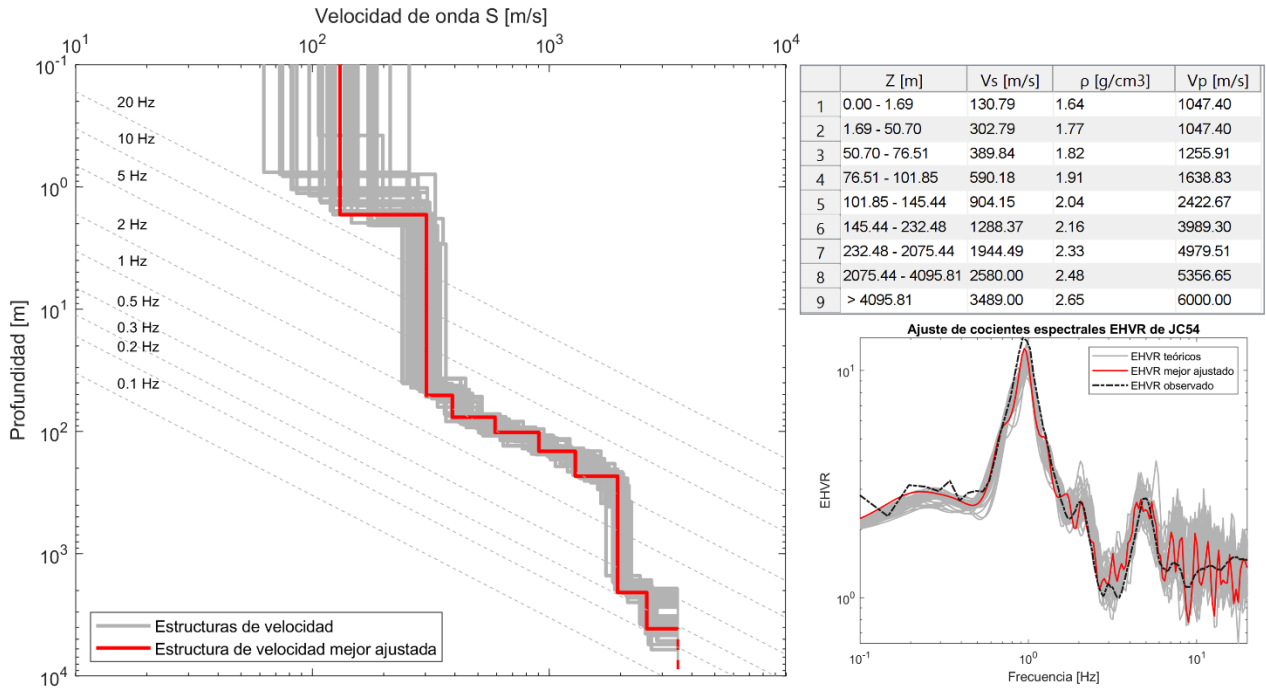
Estructuras de velocidad de GC38



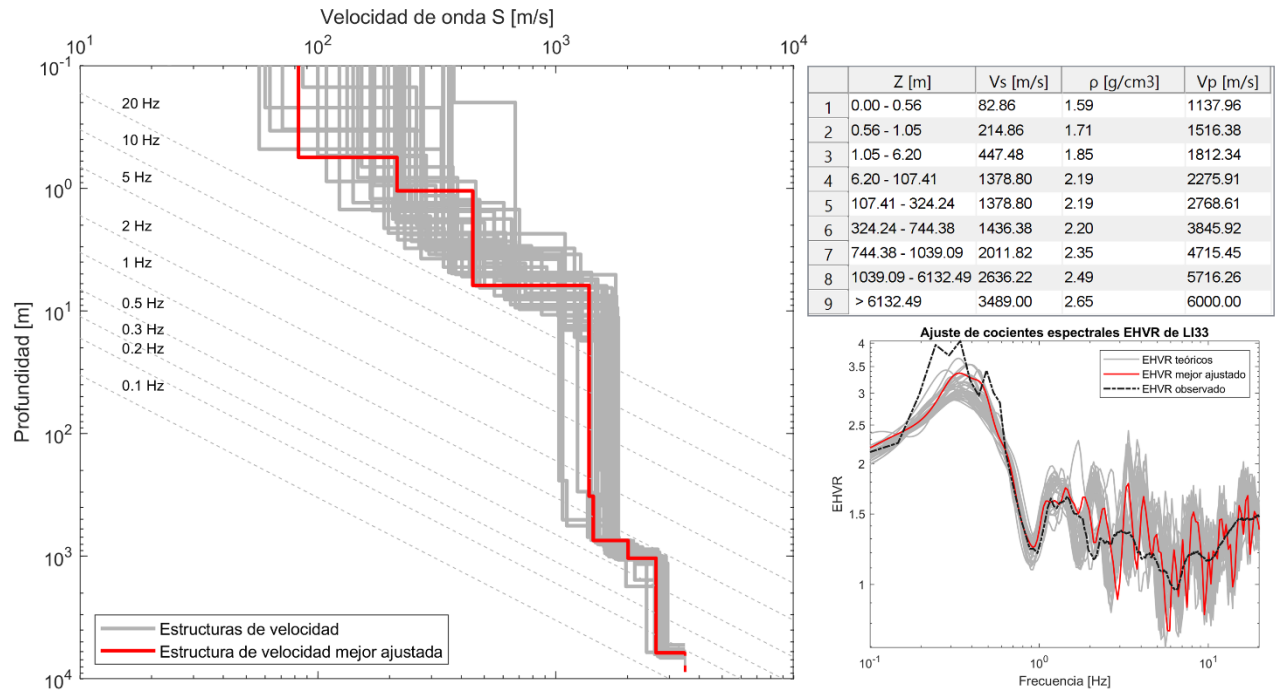
Estructuras de velocidad de JA43



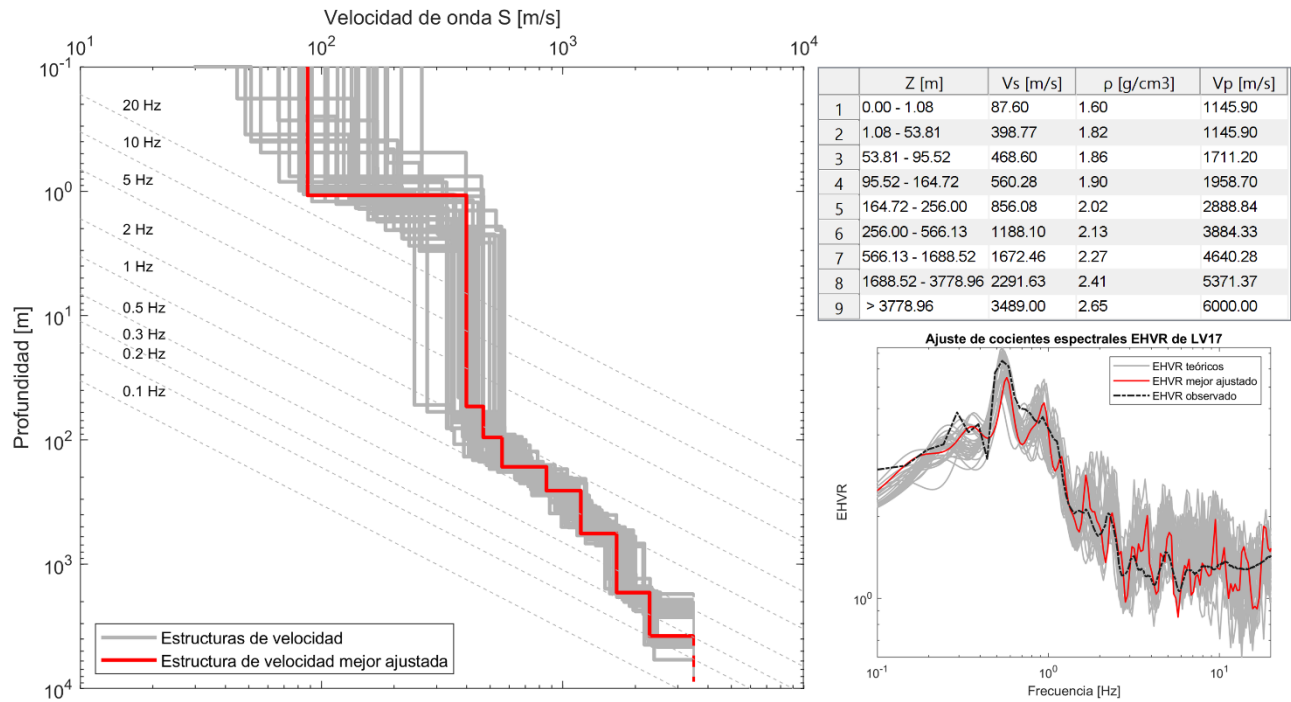
Estructuras de velocidad de JC54



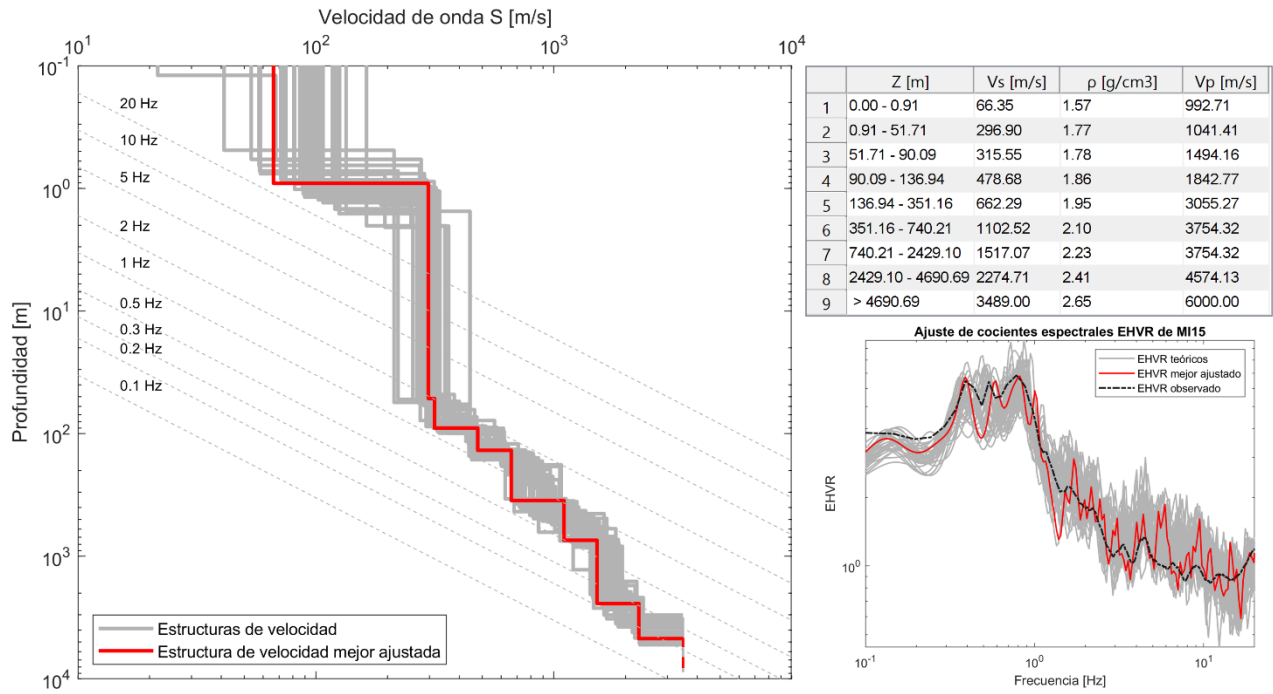
Estructuras de velocidad de LI33



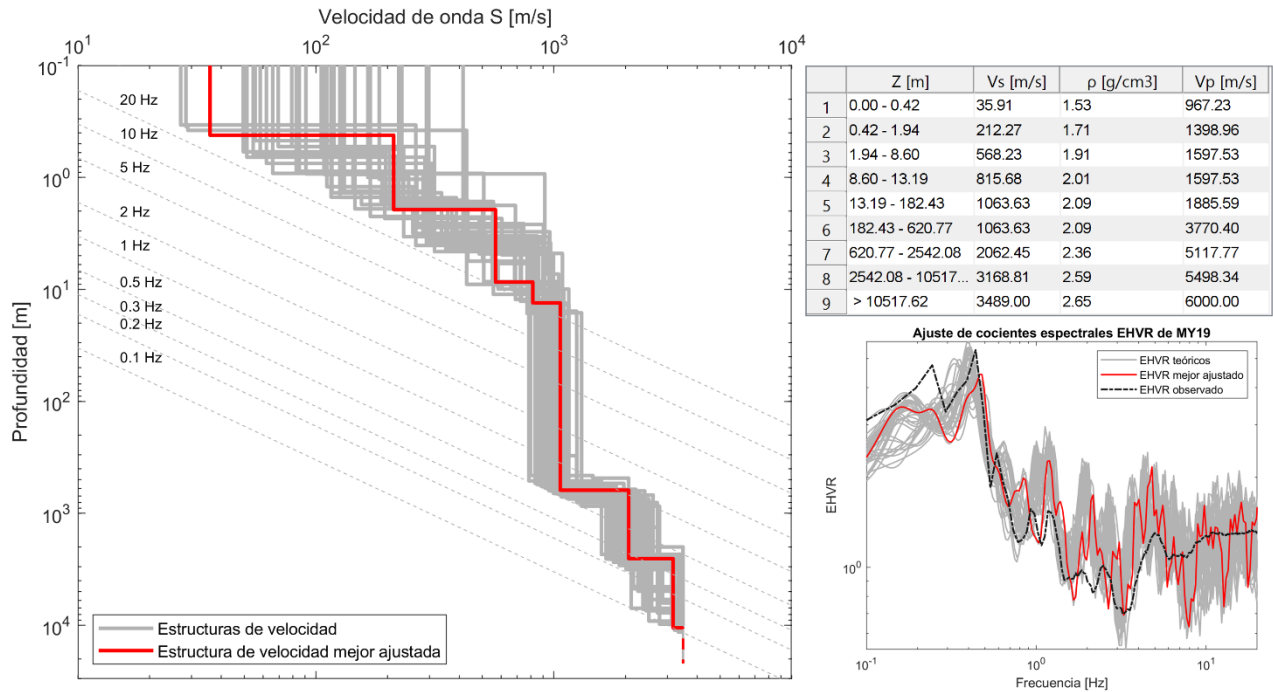
Estructuras de velocidad de LV17



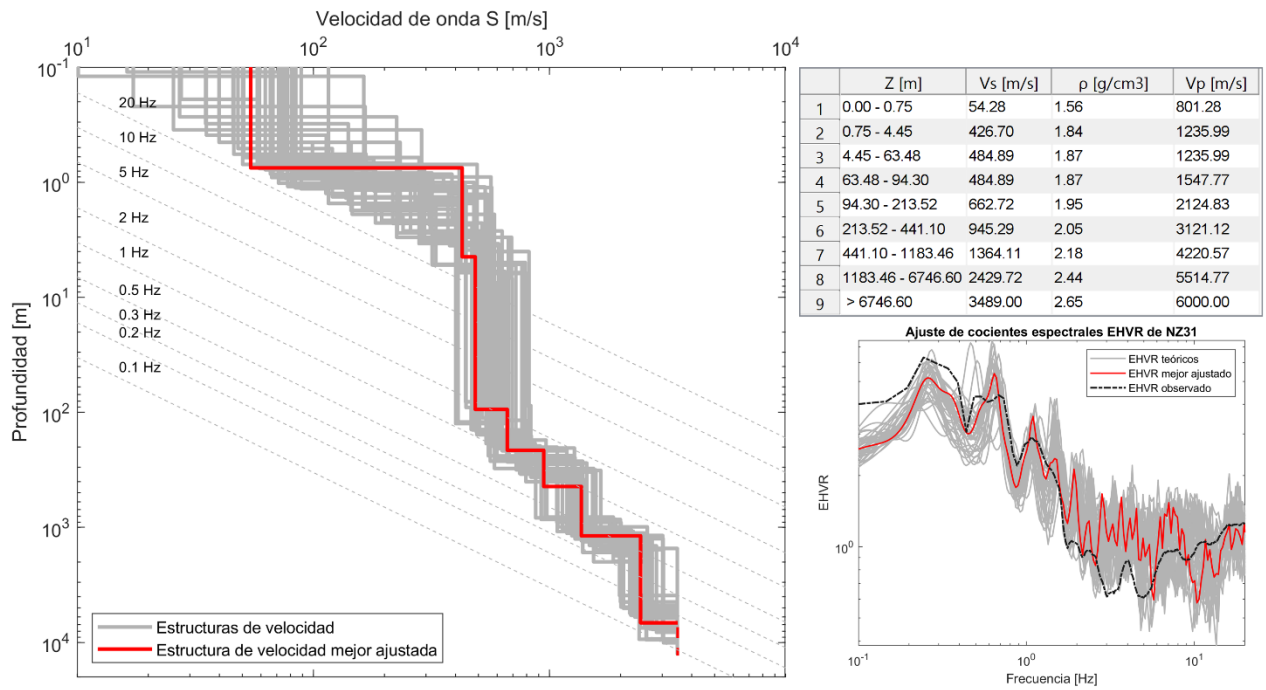
Estructuras de velocidad de MI15



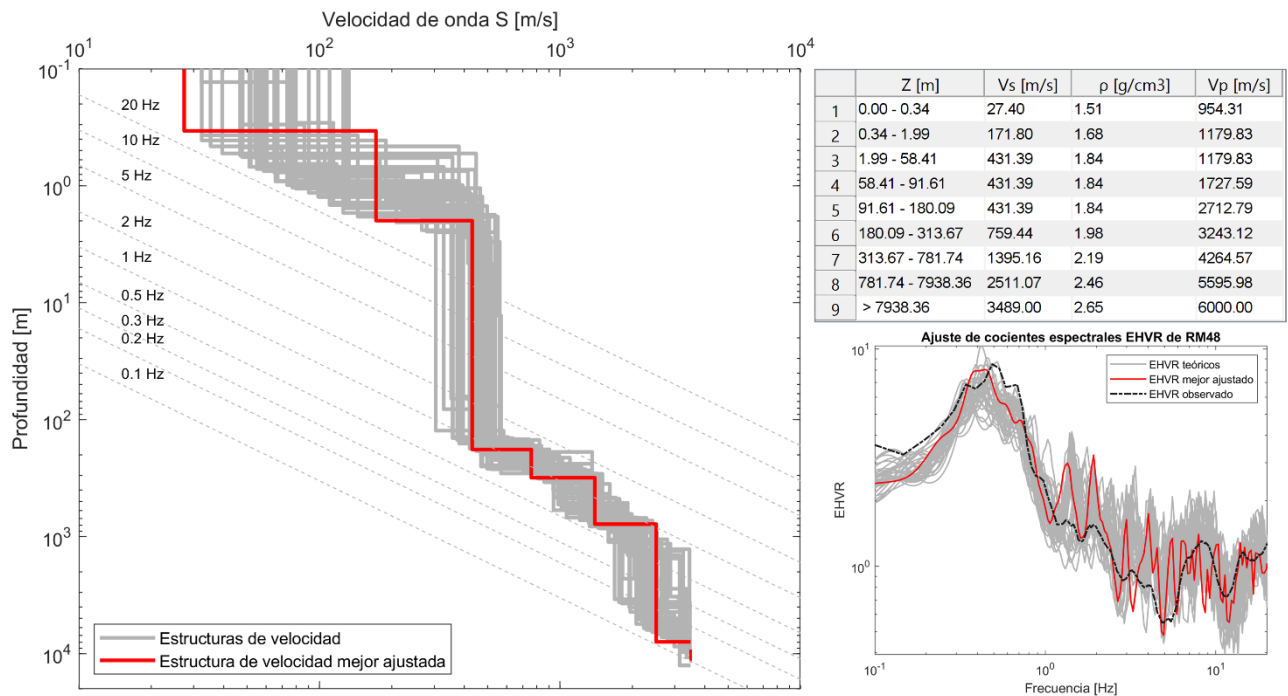
Estructuras de velocidad de MY19



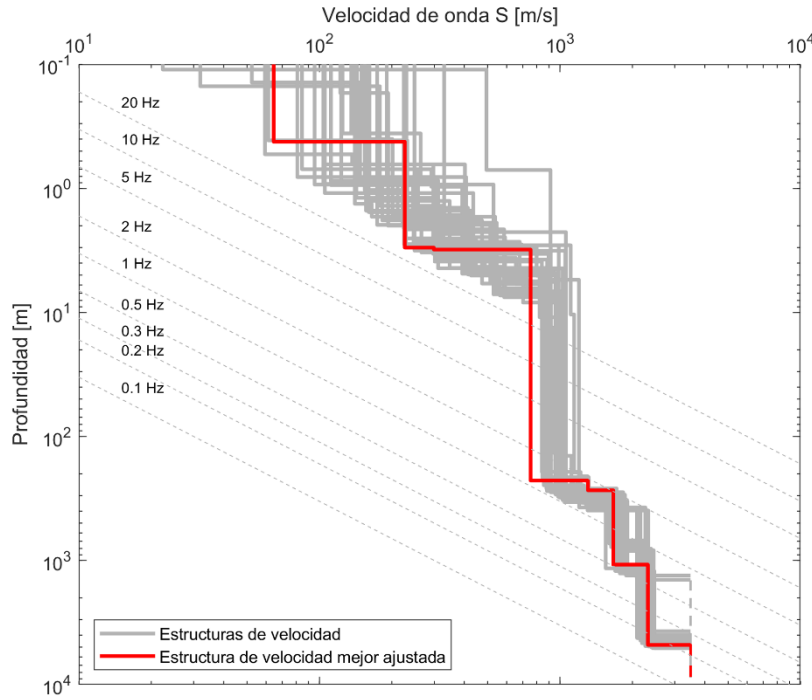
Estructuras de velocidad de NZ31



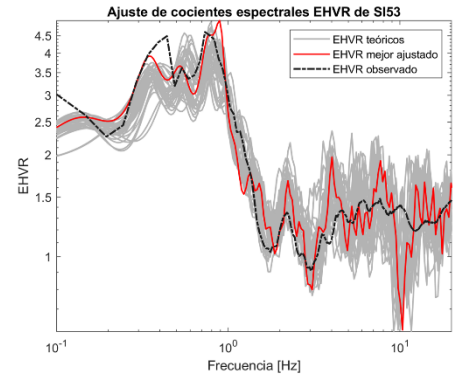
Estructuras de velocidad de RM48



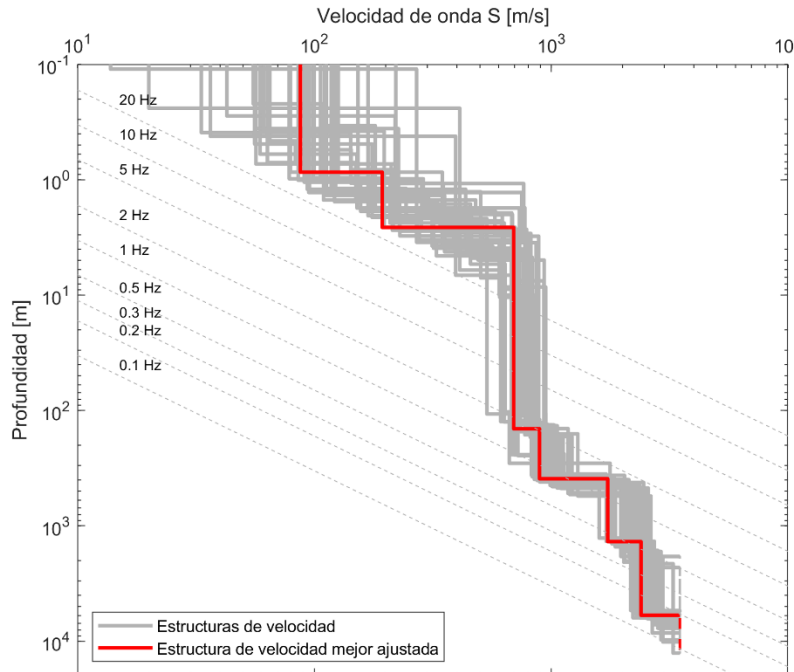
Estructuras de velocidad de SI53



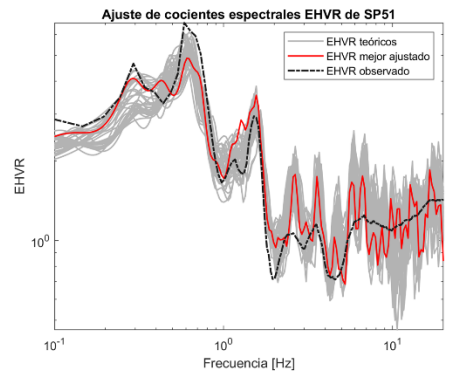
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.42	64.50	1.57	842.25
2	0.42 - 3.00	226.34	1.72	1401.31
3	3.00 - 3.11	298.83	1.77	1419.19
4	3.11 - 110.57	754.76	1.98	1529.04
5	110.57 - 226.50	754.76	1.98	2735.81
6	226.50 - 271.81	1307.48	2.17	3412.31
7	271.81 - 1080.95	1664.97	2.26	4630.54
8	1080.95 - 4798.16	2319.88	2.42	5365.29
9	> 4798.16	3489.00	2.65	6000.00



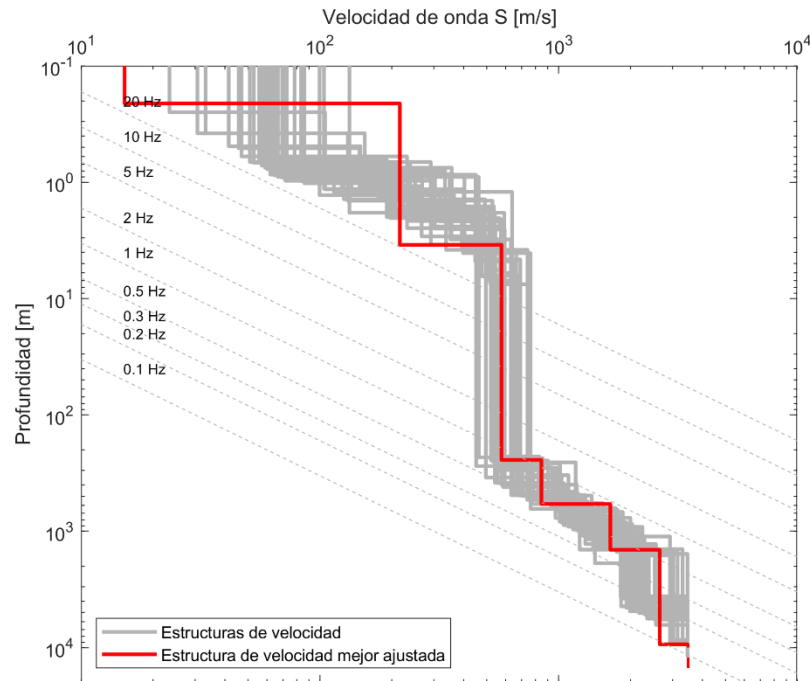
Estructuras de velocidad de SP51



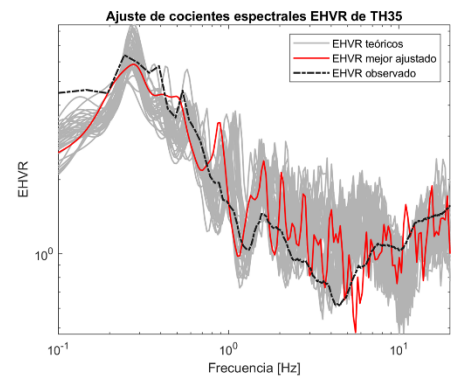
	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.86	87.28	1.60	983.84
2	0.86 - 2.59	193.38	1.69	1282.28
3	2.59 - 74.50	693.77	1.96	1461.35
4	74.50 - 144.09	693.77	1.96	2325.76
5	144.09 - 390.60	892.22	2.03	3503.53
6	390.60 - 1370.45	1731.62	2.28	4714.58
7	1370.45 - 5961.14	2392.17	2.44	5311.79
8	> 5961.14	3489.00	2.65	6000.00



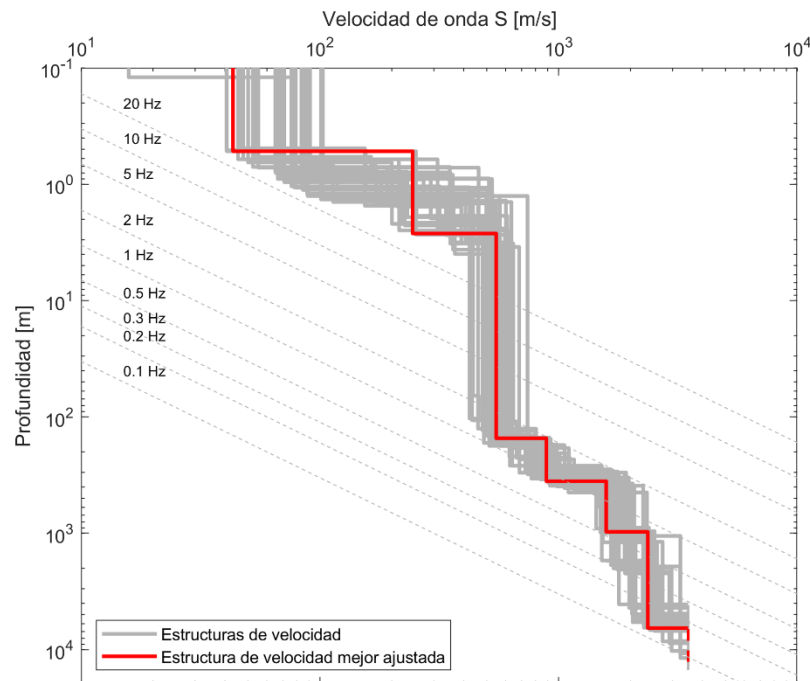
Estructuras de velocidad de TH35



	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.21	15.20	1.48	763.71
2	0.21 - 3.45	216.16	1.71	1068.26
3	3.45 - 69.59	576.25	1.91	1333.34
4	69.59 - 243.67	576.25	1.91	2272.74
5	243.67 - 583.05	847.01	2.02	3429.98
6	583.05 - 1443.43	1646.47	2.26	4606.36
7	1443.43 - 9369.72	2649.23	2.49	5728.44
8	> 9369.72	3489.00	2.65	6000.00



Estructuras de velocidad de TL55



	Z [m]	Vs [m/s]	ρ [g/cm ³]	Vp [m/s]
1	0.00 - 0.52	43.26	1.54	1077.19
2	0.52 - 1.56	244.75	1.73	1200.70
3	1.56 - 2.65	244.75	1.73	1297.78
4	2.65 - 61.54	547.54	1.90	1302.54
5	61.54 - 152.41	547.54	1.90	2212.33
6	152.41 - 356.87	888.67	2.03	3497.80
7	356.87 - 972.14	1581.83	2.24	4520.85
8	972.14 - 6529.00	2363.68	2.43	5447.07
9	> 6529.00	3489.00	2.65	6000.00

