



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**El uso del ruido sísmico  
ambiental para el estudio de  
vibraciones en el sistema  
subsuelo-edificio**

**TESIS**

Que para obtener el título de

**INGENIERA GEOFÍSICA**

**P R E S E N T A**

**KARLA LILIANA GODÍNEZ JUÁREZ**

**DIRECTOR DE TESIS**

**DR. MARTÍN CÁRDENAS SOTO**



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2022**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

# Índice

Resumen .....	3
Abstract.....	4
1. Introducción.....	4
2. Antecedentes .....	9
2.1 Cimentaciones .....	9
2.1.1 Superficiales .....	10
2.1.2 Compensadas.....	12
2.1.3 Profundas.....	12
2.1.4 Patologías de las cimentaciones .....	13
2.2. Estructuras .....	15
2.2.1. Dinámica estructural.....	16
2.2.2 Vulnerabilidad estructural .....	16
2.2.3 Amortiguamiento.....	17
2.3 Interacción Suelo-Estructura .....	19
2.4. Regionalización sísmica.....	21
2.5 Zonificación .....	24
2.6 Geología .....	31
3. Técnicas de estudio.....	32
3.1 Sísmica de Refracción .....	32
3.2 Cocientes espectrales H/V .....	33
3.3 Espectro de Fourier .....	34
4. Datos .....	36
4.1 Zona de estudio.....	36
5. Análisis y resultados.....	38
5.1 Refracción sísmica.....	38
5.2 Análisis Espectral de Ondas Superficiales (1D) .....	44
5.3 Cocientes espectrales H/V .....	49
5.4 Espectro de Fourier .....	57
5.5 Análisis de la cimentación.....	62
6. Discusión de resultados .....	63
7. Conclusiones y recomendaciones.....	67
Referencias.....	68
Anexos 1.....	69
Anexos 2.....	75

## Índice de figuras

Figura 1.1: Fotografías de daños en puentes durante el sismo de Kanto, Japón (1923).....	5
Figura 1.2: Daños por capacidad de carga en el sismo de Niigata, Japón (1964).....	5
Figura 1.3: Ejemplificación de ruptura por capacidad de carga. ....	6
Figura 2.2: Ilustración de zapata.....	11
Figura 2.3: Ilustración de las principales patologías de cimentaciones.....	14
Figura 2.4: Ejemplificación de la interacción suelo-estructura en una estructura cimentada .....	20
Figura 2.5: Mapa de regionalización sísmica de México.....	22
Figura 2.6: Espectros para diseño sísmico de la Ciudad de México.....	23
Figura 2.7: Mapa de ubicación de la Ciudad de México. ....	24
Figura 2.9: Mapa de zonificación sísmica de la Ciudad de México.....	30
Figura 4.1: Representación espacial de la zona de estudio subrayada en color azul. ....	36
Figura 4.2: Representación espacial de la unidad CIRSA. ....	37
Figura 5.1: Ubicación espacial de las 6 líneas de sísmica de refracción realizadas. ....	38
Figura 5.2: Ejemplo de un sismograma.....	39
Figura 5.3: Ejemplo de una domocrona.....	40
Figura 5.4: Línea 1 de refracción sísmica. ....	40
Figura 5.5: Línea 2 de refracción sísmica. . ....	41
Figura 5.6: Línea 3 de refracción sísmica.....	41
Figura 5.7: Línea 4 de refracción sísmica. ....	42
Figura 5.8: Línea 5 de refracción sísmica.. ....	42
Figura 5.9: Línea 6 de refracción sísmica. ....	43
Figura 5.10: Ejemplificación de curvas de dispersión obtenidas para la línea 3. ....	44
Figura 5.11: Línea 1 de MASW. ....	45
Figura 5.12: Línea 2 de MASW.....	45
Figura 5.13: Línea 3 de MASW. ....	46
Figura 5.14: Línea 4 de MASW. ....	46
Figura 5.15: Línea 5 de MASW. ....	47
Figura 5.16: Línea 6 de MASW.....	47
Figura 5.17: Ejemplificación del gráfico de las tres señales utilizadas.....	49
Figura 5.18: Ventanas seleccionadas para el registro.....	50
Figura 5.19: Localización de las estaciones para registro de vibración ambiental. ....	51
Figura 5.20: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A01.....	52

Figura 5.21: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A02.....	52
Figura 5.22: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A03.....	52
Figura 5.23: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A04.....	52
Figura 5.24: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A05.....	53
Figura 5.25: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A06.....	53
Figura 5.26: Localización de las estaciones de la segunda campaña .....	53
Figura 5.28: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B02.....	54
Figura 5.27: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B01.....	54
Figura 5.30: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B04.....	54
Figura 5.29: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B03.....	54
Figura 31: Mapa de frecuencias dominantes.....	55
Figura 5.32: Mapa de periodos fundamentales obtenidos.....	56
Figura 5.33: Localización de la toma de datos de ruido ambiental. ....	58
Figura 5.35: Espectro resultante en la componente E-W del edificio B1. ....	60
Figura 5.34: Espectro resultante en la componente N-S del edificio B1. ....	60
Figura 5.37: Espectro resultante en la componente E-W del edificio B2 .....	60
Figura 5.36: Espectro resultante en la componente N-S del edificio B2. ....	60
Figura 5.39: Espectro resultante en la componente E-W del edificio B6. ....	61
Figura 5.38: Espectro resultante en la componente N-S del edificio B6. ....	61
Figura 5.40: Fotografías del cajón de cimentación del edificio de estudio B1. ....	62
Figura 6.1: Correlación de columnas litológicas .....	63
Figura 6.2: Columna litológica del pozo Copilco-I.....	64
Figura 6.3: Perfil general litológico propuesto del suelo.. .....	66
Figura A1: Domocronas resultantes de Vp para la línea 1.....	72
Figura A2: Domocronas resultantes de Vp para la línea 2.....	72
Figura A3: Domocronas resultantes de Vp para la línea 3.....	73
Figura A4: Domocronas resultantes de Vp para la línea 4.....	73
Figura A5: Domocronas resultantes de Vp para la línea 5.....	74
Figura A6: Domocronas resultantes de Vp para la línea 6.....	74
Figura A7: Curva de dispersión correspondiente al disparo 1 de la línea 2.....	75
Figura A8: Curva de dispersión correspondiente al disparo 2 de la línea 2.....	75
Figura A9: Curva de dispersión correspondiente al disparo 3 de la línea 2.....	75
Figura A10: Curva de dispersión correspondiente al disparo 4 de la línea 1.....	75
Figura A11: Curva de dispersión correspondiente al disparo 5 de la línea 1.....	76
Figura A12: Curva de dispersión correspondiente al disparo 6 de la línea 1.....	76
Figura A13: Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 1.....	76



Figura A50: Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 6.....	87
Figura A51: Curva de dispersión correspondiente al disparo 8 de la línea 6.....	87
Figura A52: Curva de dispersión correspondiente al disparo 9 de la línea 6.....	88
Figura A53: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 1 de la línea 1.....	89
Figura A54: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 2 de la línea 1.....	89
Figura A55: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 3 de la línea 1.....	89
Figura A56: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 4 de la línea 1.....	89
Figura A57: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 5 de la línea 1.....	89
Figura A58: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 6 de la línea 1.....	89
Figura A59: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 7 de la línea 1.....	90
Figura A60: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 8 de la línea 1.....	90
Figura A61: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 9 de la línea 1.....	90
Figura A62: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 1 de la línea 2.....	91
Figura A63: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 2 de la línea 2.....	91
Figura A64: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 3 de la línea 2.....	91
Figura A65: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 4 de la línea 2.....	91
Figura A66: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 5 de la línea 2.....	91
Figura A67: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 6 de la línea 2.....	91
Figura A68: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 7 de la línea 2.....	91
Figura A69: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 1 de la línea 3.....	92
Figura A70: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 2 de la línea 3.....	92
Figura A71: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 3 de la línea 3.....	92
Figura A72: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 4 de la línea 3.....	92
Figura A73: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 5 de la línea 3.....	92
Figura A74: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 6 de la línea 3.....	92
Figura A75: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 7 de la línea 3.....	93
Figura A76: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 1 de la línea 4.....	93
Figura A77: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 2 de la línea 4.....	93
Figura A78: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 3 de la línea 4.....	93
Figura A79: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 4 de la línea 4.....	93
Figura A81: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 5 de la línea 4.....	94
Figura A80: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 6 de la línea 4.....	94
Figura A82: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 7 de la línea 4.....	94
Figura A83: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 1 de la línea 5.....	94
Figura A84: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 2 de la línea 5.....	94
Figura A85: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 3 de la línea 5.....	94

Figura A86: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 4 de la línea 5.....	94
Figura A87: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 5 de la línea 5.....	95
Figura A88: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 6 de la línea 5.....	95
Figura A89: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 7 de la línea 5.....	95
Figura A90: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 1 de la línea 6.....	95
Figura A91: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 2 de la línea 6.....	95
Figura A92: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 3 de la línea 6.....	96
Figura A93: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 4 de la línea 6.....	96
Figura A94: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 5 de la línea 6.....	96
Figura A95: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 6 de la línea 6.....	96
Figura A96: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 7 de la línea 6.....	96
Figura A97: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 8 de la línea 6.....	96
Figura A98: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, disparo 9 de la línea 6.....	97

## Índice de tablas

Tabla 2.1: Criterio para juzgar los desplomos o inclinaciones de los edificios .....	13
Tabla 2.2: Materiales con mayor presencia en los alrededores de la zona de estudio.....	31
Tabla 2.3: Materiales con mayor presencia en los alrededores de la zona de estudio .....	
Tabla 5.1: Velocidad de onda P por línea [m/s] .....	43
Tabla 5.2: Espesor de estrato por línea [m].....	43
Tabla 5.3: Velocidad de onda S por línea [m/s] .....	48
Tabla 5.4: Grosor de estrato por línea [m] .....	48
Tabla 5.5: Criterios ingresados en la selección de ventanas .....	50
Tabla 5.6: Frecuencias resultantes (primera campaña).....	55
Tabla 5.7: Frecuencias resultantes (segunda campaña).....	55
Tabla 5.8: Amplitudes resultantes (primera campaña) .....	55
Tabla 5.9: Amplitudes resultantes (segunda campaña).....	55
Tabla 5.10: Periodo fundamental de suelo (primera campaña) .....	56
Tabla 5.11: Periodo fundamental de suelo (segunda campaña) .....	56

## Dedicatoria

## Agradecimientos

A Dios por permitirme concluir esta etapa de mi vida y por darme temple, esperanza y luz, aun cuando todo se vislumbraba oscuro.

A mi tutor de tesis el Dr. Martín Cárdenas Soto, por el compromiso, confianza, dedicación y paciencia que brindó no sólo en este trabajo de tesis, si no con cada uno de sus alumnos. Gracias por creer en mi.

A mis amigos, fue un placer haber coincidido y trabajado con ustedes. María, Maricela, Montse, Isabel y Palma, gracias por tantos momentos llenos de amor y felicidad. Los tengo siempre en mi corazón.

A mis profesores, por todo el aprendizaje que me brindaron a lo largo de mi paso por la Facultad de Ingeniería.

A la Ing. Valeria Peña Gaspar, por su gran colaboración en la toma de datos utilizados en esta tesis.

A la administración de CRISA, ya que, sin su apoyo en la toma de datos y accesibilidad al edificio, este trabajo no se hubiera podido realizar.

A la Universidad Nacional Autónoma de México por darme la oportunidad de superarme en el ámbito académico, espiritual y humano. Me has dado todo en la vida.  
“Por mi raza hablará el espíritu”.

## Resumen

En este trabajo exploramos el incremento en la vibración natural de un edificio en la Ciudad de México después de ocurrido el sismo del 19 de septiembre de 2017 (Mw 7.1). Para ello, en una primera etapa caracterizamos la estructura de velocidad del subsuelo mediante el método de refracción sísmica y el análisis espectral de ondas superficiales. Posteriormente, realizamos mediciones de vibración ambiental en la azotea del edificio en estudio, en un edificio similar, y a nivel del campo libre.

Los resultados muestran que el edificio está cimentado en materiales de relleno, tobas y basaltos fracturados que mejoran su calidad con la profundidad. La distribución de materiales blandos o poco compactos fue verificada por cocientes espectrales H/V. Observamos que las frecuencias (longitudinal y transversal) del edificio se mantienen normales comparadas con edificios de la unidad con el mismo diseño, sin embargo, hay un aumento en amplitud, lo cual indica que la estructura experimentó una variación dinámica en su sección transversal debido al cambio en la amplitud espectral. Como resultado a las altas aceleraciones a que fue sometido ocurrió una posible pérdida de amortiguamiento en la parte sur del edificio, lo cual se correlaciona con el cambio de la resistencia estructural de la cimentación aunado a la heterogeneidad de los materiales en que ésta está inmersa.

## Abstract

### 1. Introducción

La Ciudad de México es conocida en la rama de la ingeniería sísmológica por su respuesta ante amenaza sísmica, ya que esta posee varias singularidades de acuerdo con la zona en la que se encuentre. La resiliencia y vulnerabilidad que las estructuras civiles presentan ante movimientos sísmicos depende del tipo de suelo sobre el cual se realice la cimentación, el diseño estructural base, la naturaleza del sismo y el mantenimiento que se le dé a la estructura a lo largo de su vida útil.

En la última década, las estructuras de la Ciudad de México han sido afectadas por varios sismos, entre ellos el sismo del 19 de septiembre de 2017, el cual generó diversos daños a pesar de que aparentemente la ingeniería mexicana estaba preparada para un sismo de esa magnitud.

La Ciudad de México se encuentra construida sobre los vestigios de un lago, por lo tanto, el suelo superficial es sumamente problemático y complejo en ámbitos constructivos. Esto se debe a los sedimentos finos que caracterizan a las zonas lacustres, el contenido de agua y el cambio de grosor entre los estratos más superficiales. La zonificación geotécnica de la Ciudad de México divide el suelo en tres grupos: Zona I (suelo firme), Zona II (suelo de transición), Zona III (suelo lacustre). Uno de los factores de gran importancia que afecta la intensidad provocada por un sismo es el tipo de suelo, ya que en terrenos muy blandos pueden amplificar las ondas sísmicas hasta 50 veces más con respecto a suelos consolidados (Cruz *et al*, 2017).

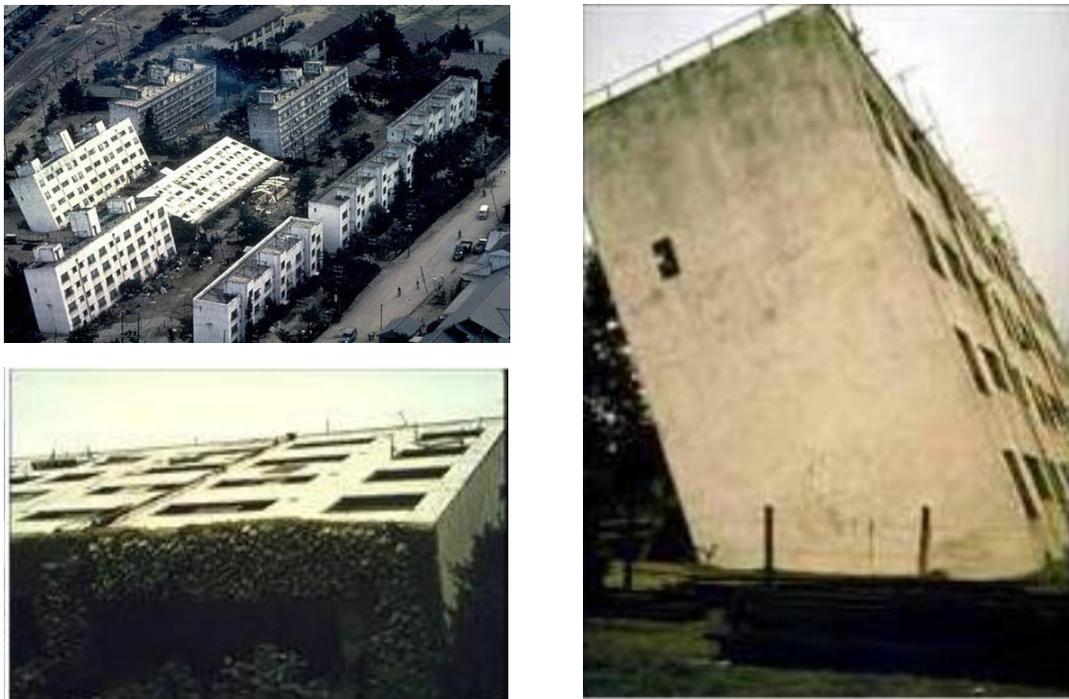
Diversas investigaciones se han dedicado al estudio del comportamiento sísmico de las cimentaciones, obteniendo como resultado que en su mayoría los daños son resultado de la pérdida en la capacidad de carga en las cimentaciones. El término capacidad de carga se entiende como la resistencia límite de las cimentaciones, es decir que estas no presenten fallas por cortante. En el sismo de septiembre de 1985 parte de las edificaciones de la Ciudad de México sufrieron patologías (termino médico incorporado a la ingeniería civil en los últimos años) de cimentaciones como asentamientos diferenciales de importancia y desplomes, los cuales pueden explicarse en términos de pérdida de capacidad de carga (Merlos E. J., 2002).

Los sismos que dieron la pauta para el desarrollo de estudios del comportamiento de las estructuras bajo cargas sísmicas generaron las primeras normas de diseño sísmo resistentes (estructural y geotécnico), fueron el sismo de San Francisco, E.U. (1906) y el de Kanto, Japón (1923), en los cuales se registraron grandes desplazamientos verticales y diversas rotaciones estructurales, principalmente en puentes (Figura 1.1), generando fallas en toda la estructura (Chatzigogos C., 2007).



**Figura 1.1: Fotografías de daños en puentes durante el sismo de Kanto, Japón (1923), en las cuales se presentaron grandes asentamientos a nivel de cimentación (Tomada de: Chatzigogos C., 2007).**

Ejemplos drásticos de daños en cimentaciones por sismo se presentaron en Niigata (Japón) en 1964, donde las estructuras sufrieron fallas a una gran escala por la pérdida de capacidad de carga de los suelos sobre los cuales fueron cimentados. También se destacaron asentamientos diferenciales y rotaciones de tipo permanente con menos de  $80^\circ$ , pero conservando una integridad estructural alta como se muestra en la figura 1.2 (Chatzigogos C., 2007).



**Figura 1.2: Daños por capacidad de carga en el sismo de Niigata, Japón (1964) donde se resalta la estructura intacta de los edificios (Tomada de: Chatzigogos C., 2007).**

En el sismo de Guerrero-Michoacán, México (1985) se encontraron diversos casos de fallas en cimentaciones generadas por causas diferentes a la licuefacción del suelo, estableciéndose que el 13% de daños graves en estructuras de 9 a 12 pisos se debieron a un comportamiento ineficiente de la cimentación (Pecker et al., 1996, Romo & Auvinet, 1991). Dicho lo anterior, se reveló que parte de las estructuras que tuvieron daños en cimentación presentaron un mecanismo de falla rotacional a la vez de un desprendimiento en el sistema suelo-cimentación (Figura 1.3), por lo tanto se reconoció que la mayoría de las fallas de cimentación por sismo se debieron a estructuras con mucha carga (aumento del peso del edificio), ocasionando altas presiones verticales en condiciones estáticas (antes del sismo), diseños de cimentación inapropiados y sótanos inundados. Un segundo ejemplo de este fenómeno se presentó después del terremoto de Koçaeli, Turquía (1999) en la ciudad de Adapazari mostrado en la figura 1.3 (Chatzigogos C., 2007).



**Figura 1.3: Ejemplificación de ruptura por capacidad de carga. A) Edificio dañado en la ciudad de México (1985). B) Edificio dañado de Adapazari por el sismo de Kocaeli, Turquía (1999). (Tomada de: Chatzigogos C., 2007).**

La pregunta central en cualquier estudio sobre fallas de cimentaciones por sismo es: ¿Qué tipos de suelo son vulnerables a la aparición de fallas? La mayor parte de fallos registrados han sido originados en suelos débiles o blandos, ya sea arcillosos, limosos, arenas de baja densidad, sólo por poner unos cuantos ejemplos. Esto llega a ser de principal importancia ya que es reconocido que en suelos blandos se amplifica la respuesta sísmica del suelo, y esto conduciría a daños más grandes para cimientos y superestructuras, añadiendo las condiciones de sitio local y el horizonte freático, ejemplo de ello se tiene como referencia a el terremoto de Spitak de 1988 en Armenia (Chatzigogos C., 2007).

La falla de un cimiento no siempre depende del tipo de suelo, pues un mal diseño en la cimentación podría ser un potencial detonante de fallos. De esta forma, se pueden esperar fallas de cimentaciones debido a estas causas: estratos de suelo blando de un espesor considerable, suelos que portan una baja capacidad de carga, suelos con disposición a licuarse y cuyo horizonte freático sea alto (Chatzigogos C., 2007).

En el estudio del subsuelo se vuelve indispensable en el área de la construcción el contar con estudios de tipo geológicos y geofísicos, ya que su interpretación en conjunto determinará las características y parámetros a los que se debe apegar el diseño de la estructura, sumando que se podrá inferir de la respuesta que tendrá el suelo a corto y largo plazo, para así evitar ciertas complicaciones. Por ejemplo, la Asociación Americana de Oficiales de Carreteras Estatales y Transportes (AASHTO, por sus siglas en inglés) recomienda una adecuada observación de la resistencia y degradación geotécnica del suelo, mientras que el código de construcción internacional sugiere un aumento en la capacidad de carga en un 33%, esto para contrarrestar la carga sísmica (Day, 2006).

El diseño de cimentaciones someras y profundas ante cargas sísmicas resulta complejo, ya que es necesario considerar todos los factores sísmicos de gran influencia, como asentamientos diferenciales, efectos cíclicos sobre el suelo, licuefacción, fuerzas horizontales de los suelos, deslizamientos de tierra, y movimientos de fallas superficiales (Lrfd, A., 2012). Así que, después de la ocurrencia de varios eventos sísmicos es recomendable en muchos edificios (sobre todo en las que las patologías de construcción son muy evidentes) realizar estudios en los que se dé a conocer las condiciones actuales del suelo y estructura, con el fin de que esta siga subsistiendo.

Por lo anterior, en este estudio se aborda el posible efecto de pérdida de capacidad de carga en un edificio del Conjunto Residencial Insurgentes San Ángel (CIRSA), ubicada en Avenida Copilco, Colonia Copilco el Bajo, en la alcaldía Coyoacán, en la Ciudad de México. Los residentes de esta unidad recurrieron a la División de Ingeniería en Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ingeniería de la UNAM, para solicitar la realización de estudios geofísicos debido al incremento de los niveles de vibración a partir del sismo de septiembre de 2017 (Mw 7.1).

El objetivo general de este trabajo es analizar el posible incremento en la vibración natural del edificio, en términos del análisis de estudios geofísicos y de medidas de vibración tanto del suelo como de la estructura.

Se hipotetiza la presencia de una posible interacción suelo-estructura (cinemática o inercial) o un posible daño/desgaste en la parte de la subestructura debido a factores sísmicos y geotécnicos. Una inspección visual muestra que por el momento se pueden descartar daños por patologías estructurales de importancia (irregularidad en planta, irregularidad en elevación, columnas cortas, asimetría de esquina, cambio de rigidez, planta baja débil, golpeteo).

En este trabajo se utilizaron diferentes técnicas geofísicas para hacer un análisis el cual se evalúe el estado actual del subsuelo y la estructura, para descartar algún tipo de daño por sismo. Se utilizó la técnica de prospección sísmica de refracción y análisis espectral de ondas superficiales alrededor del edificio, así como también datos de vibración ambiental recolectados en el campo libre y azotea en la unidad habitacional, procesados con la técnica de los cocientes espectrales H/V y espectro de Fourier.

En el capítulo 3 se presentan antecedentes sobre propagación de ondas y demás conceptos sísmicos, información sobre los principales tipos de cimentación usados en edificaciones de la Ciudad de México (superficiales y semiprofundas), una introducción a las patologías en cimentaciones, principales conceptos abordados de ingeniería estructural, el fenómeno suelo-estructura y la segmentación de la ciudad en zonas geotécnicas y zona de estudio (geología).

En el capítulo 4 se abordan los principales métodos de estudio utilizados para el análisis de nuestra edificación, prospección sísmica, análisis espectral de ondas superficiales, cocientes espectrales H/V y espectro de Fourier.

En el capítulo 5 se comentan aspectos relacionados con la toma de datos y equipo utilizado.

En el capítulo 6 se presentan los resultados de la inversión y procesamiento de los métodos utilizados en forma de secciones sísmicas, gráficas y tablas.

En el capítulo 7 se presentan las conclusiones de este trabajo, recomendaciones y una lista de referencias. Al final se anexan imágenes descriptivas sobre del procesamiento de los datos de este trabajo.

## 2. Antecedentes

Al realizar una construcción es importante garantizar su estabilidad y seguridad, así entre los elementos que determinarán el éxito de esta en su vida útil se encuentra la cimentación, la cual debe ser adecuada en función de una serie de variables (tipo de suelo, estructura a soportar, altura, peso). Es importante que la cimentación trabaje de forma correcta, es decir, que la forma estructural permanezca sana y que no afecte construcciones aledañas, esto independientemente del tipo de suelo sobre la cuál esté desplazada o que ocurran eventos sísmicos de cierta magnitud que pudieran alterarla.

El papel que juega el diseño en la ingeniería geotécnica y civil es la creación de cimentaciones innovadoras y resistentes, capaces de satisfacer cualquier tipo de limitación estructural y arquitectónica. Como se mencionó anteriormente en la introducción, parte de los daños en edificios provocados por sismos son causados por fallas en el sistema suelo-cimentación, lo que provoca hundimientos diferenciales y rotaciones.

### 2.1 Cimentaciones

En el ámbito geológico, la palabra cimienta establece que es un macizo rocoso (basamento) o terreno "*in situ*", en el cual se transmiten fuerzas que son causadas por el propio peso de los estratos o rocas que se tengan sobre esta, pero de menor dureza. En ingeniería civil, el cimienta es el conjunto de partes estructurales pertenecientes a la superestructura por las cuales se transmitirá su peso propio y fuerzas al terreno o roca donde serán soportadas.

Una estructura se dividirá en dos partes (Infraestructura y Superestructura), el nivel de suelo será el límite para cada una. La infraestructura es parte de la estructura que se encuentra debajo del nivel de suelo, en esta se apoya la superestructura y su principal función es darle firmeza. Puede estar compuesta de anclajes, estribos, muros de cimentación, pilastras, pavimento, terraplenes y zapatas, dependiendo de la superestructura a soportar. Por otro lado la Superestructura está destinada para uso humano, y es la parte que se encuentra por encima del nivel de suelo, la cual está conformada y sostenida generalmente por columnas u otro tipo de apoyo (Dunham, 1962).

La experiencia que se ha obtenido con el paso del tiempo a través de los sismos ha permitido a la comunidad ingenieril obtener y crear normas de construcción básicas mencionadas a continuación, estas deben de ser tomadas en cuenta en todo el proceso constructivo, ya que en algún momento serán sometidas a ciertos requerimientos sísmicos. Algunas de las recomendaciones en el proceso constructivo de cimentaciones, para el caso de la Ciudad de México son dadas por Auvinet (1990):

- Será siempre necesario buscar simetría, regularidad y una distribución uniforme de cargas en el diseño de la cimentación.

- Se recomienda evitar la planeación y uso de sistemas de cimentación mixtos (combinaciones de varios tipos de cimentación).
- La parte de unión cimentación-estructura deberá soportar las fuerzas transmitidas por la misma estructura, es decir, fuerza cortante horizontal y movimientos de tracción vertical. Así estos elementos deberían poder soportar esfuerzos de tracción vertical iguales al 10% de la mayor carga vertical de compresión.

El tipo de cimentación que se deberá utilizar en cualquier proyecto dependerá de varios factores como lo son las cargas a soportar, condiciones del suelo, su función, y el costo en comparación de la superestructura.

Una cimentación se considerará resistente en caso de que no presente falla por cortante en el suelo sobre el cual se apoya, a esta resistencia límite en cimentaciones se conocerá como capacidad de carga.

En algunos casos, se debe de considerar importante la zona en la cual se encuentre localizada la cimentación ya que en un futuro, será esta la que influencie a la cimentación a tener cierto comportamiento.

### 2.1.1 Superficiales

Los tipos de cimentaciones se pueden clasificar en dos grupos: cimentaciones superficiales y profundas.

Las superficiales se caracterizan por la transmisión directa de cargas al subsuelo, esto gracias a grandes superficies de apoyo, un ejemplo de estas:

- Vigas Flotantes  
Es un tipo de cimentación de forma alargada (longitudinal) y rectangular (Figura 2.1), en su mayoría se utiliza para cimentar soportes verticales cuando estos se encuentren próximos entre sí, sin embargo, esta no es recomendada para zonas en las que se tenga un alto peligro sísmico (Peck, 2007).

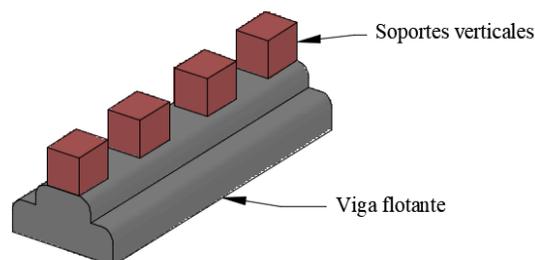


Figura 2.1: Ejemplo de vigas flotantes de cimentación.

- Zapatas

Este método se considera como una ampliación o continuación de la base de una columna o muro, mediante el cual se transmitirán las cargas generadas al suelo, con una presión que se adecúe a las propiedades del suelo (figura 2.2). Hay de diferentes tipos de ellas. Zapata aislada o individual, la cual soporta una sola columna. Zapata corrida o continua, que se construye debajo de un muro. En el caso de tener que soportar varias columnas se le llamará zapata combinada (Peck, 2007).



**Figura 2.2: Ilustración de zapata.**

- Losas

El objetivo de una losa de cimentación (también conocida como zapata combinada) es cubrir prácticamente toda el área en la cual se planea construir una estructura, esta soportará todos los muros y columnas. Esta cimentación será utilizada si la suma de las áreas de contacto de las zapatas requeridas para sostener la estructura da como resultado aproximadamente la mitad de la superficie cubierta por tal estructura, y así se tendría una placa única de cimentación (Jiménez, 1980). De acuerdo a Jiménez (1980), en ocasiones tienen un menor precio de obra comparada con las zapatas, esto dependiendo del área, la carga su distribución de esfuerzos). En este tipo de cimentación no se considera su peso en el proyecto estructural, debido a que se supone que al ser una cimentación de tipo superficial el suelo la soportará directamente; sin embargo, se acostumbra a reforzar por varias razones (Jiménez, 1980):

- 1) Cargas de las columnas no uniformemente distribuidas.
- 2) Suelo muy expuesto a grandes asentamientos diferenciales.

Se usa un coeficiente de seguridad al hundimiento en cual no debe ser menor que 3. Si se tiene un material suelto fino (arenas, limos, arcillas) este debe de ser primero compactado por seguridad con métodos externos (Jiménez, 1980).

## 2.1.2 Compensadas

Este tipo de cimentación se usa para edificios en los que se transmitan cargas de magnitud media sobre suelos con una compresibilidad media-alta y en la que la capacidad de carga es baja. En principio se realiza una excavación en donde se extrae el peso de suelo equivalente al que tendrá la estructura, de ahí es donde recibe su nombre, aunque en ocasiones el peso extraído puede ser menor o mayor, definiéndose como cimentación parcialmente compensada o sobre compensada, respectivamente (Tezaghi, K y Peck R., 1976). En caso de que esta cimentación sea expuesta a momentos de volteo de magnitud importante (sismos), podría ser causante de fallas locales, causando así desplome de la estructura y en casos graves, un fallo estructural por inestabilidad.

- Cajones de cimentación: Se trata de una caja de tipo estructural o cámara hundida, construida in situ por medio de una excavación, permitiendo así descender a la profundidad denominada en el diseño del proyecto. En esta se utiliza el principio de flotación, el cual reduce la carga neta del suelo, se reduce el asentamiento total y el diferencial (Tomlinson, 1996).

Generalmente se les da un segundo uso a los cajones de cimentación, como por ejemplo uso de bodegas de almacenaje o estacionamientos subterráneos.

## 2.1.3 Profundas

En ocasiones las características del suelo no son las adecuadas para usar un tipo de cimentación superficial, así los encargados del diseño de cimentación deben localizar los estratos más resistentes, los cuales tienden a encontrarse a una mayor profundidad. Las cargas o esfuerzos para los que estarán diseñados a soportar pueden ser transmitidas directamente al estrato más resistente por medio de pilas o pilotes de punta, o mediante fricción lateral creada entre el suelo y la cimentación (pilotes de fricción) (Domínguez, 2013).

- Pilotes: Estructuras prefabricadas, en general, con una dimensión de sección transversal pequeña, si se compara con su longitud. Posteriormente son hincados.
- Pilas: Elementos subterráneos, colocados in situ por su gran magnitud. Son similares y cumplen con la misma función que una Zapata (transmiten cargas a un estrato fuerte capaz de soportarlas).

## 2.1.4 Patologías de las cimentaciones

La cimentación o cualquiera de los elementos que la componen pueden fallar a razón de que el suelo o la roca sobre la cual descansan sea incapaz de soportar la carga.

En ciudades con alto grado de población es común ver que al construir una cimentación se produzcan una serie de deformaciones en el área, cuya principal afectación son los pavimentos y edificios que se encuentran alrededor (Jiménez, 1980). Cuando hay fallos en las cimentaciones se producen daños estructurales, y en ocasiones su arreglo es tan complejo y costoso que el uso del edificio debe ser interrumpido o en un caso extremo desalojarlo para su demolición (Basset, 2015).

El término patología proviene del griego “*pathos*” (enfermedad) y “*logos*” (estudio). En la Ingeniería Civil se utiliza para referirse al conjunto de enfermedades de origen físico, químico, mecánico o electroquímico, y las soluciones que estas puedan tener (Florentín, 2009). Es común que el 75% de las patologías en construcción aparezcan debido a fallas humanas, como mal diseño y materiales de obra de calidad escasa (Moncada, 2016).

El diagnóstico de este tipo de patologías no es inmediato, ya que deben observarse con especial atención los síntomas, como lo son grietas, vibraciones extraordinarias, asentamientos diferenciales, emersiones y desplomes, para poder determinar, con base en conocimientos geotécnicos, el origen verdadero de la patología presente (causa) (Basset, 2015).

A continuación, se explican brevemente las sintomatologías más comunes que producen fallos en la cimentación debido a factores externos, como el suelo, movimiento sísmico y fuentes hídricas.

- **Desplomes**

Por lo general están directamente relacionados a fallos en la cimentación, en los que puede pasar a afectar desde elementos estructurales simples, hasta la estructura total (figura 2.3). Aunque no son los primeros síntomas en hacerse presente, sí es el síntoma más evidente y cuando aparece, advirtiendo de la gravedad del fallo en la cimentación (Basset, 2016).

Para la Ciudad de México la forma de evaluar si el desplome cumple o no cumple con las NTC para diseño y construcción de cimentaciones es por medio de la tabla 2.1.

**Tabla 2.1: Criterio para juzgar los desplomos o inclinaciones de los edificios**

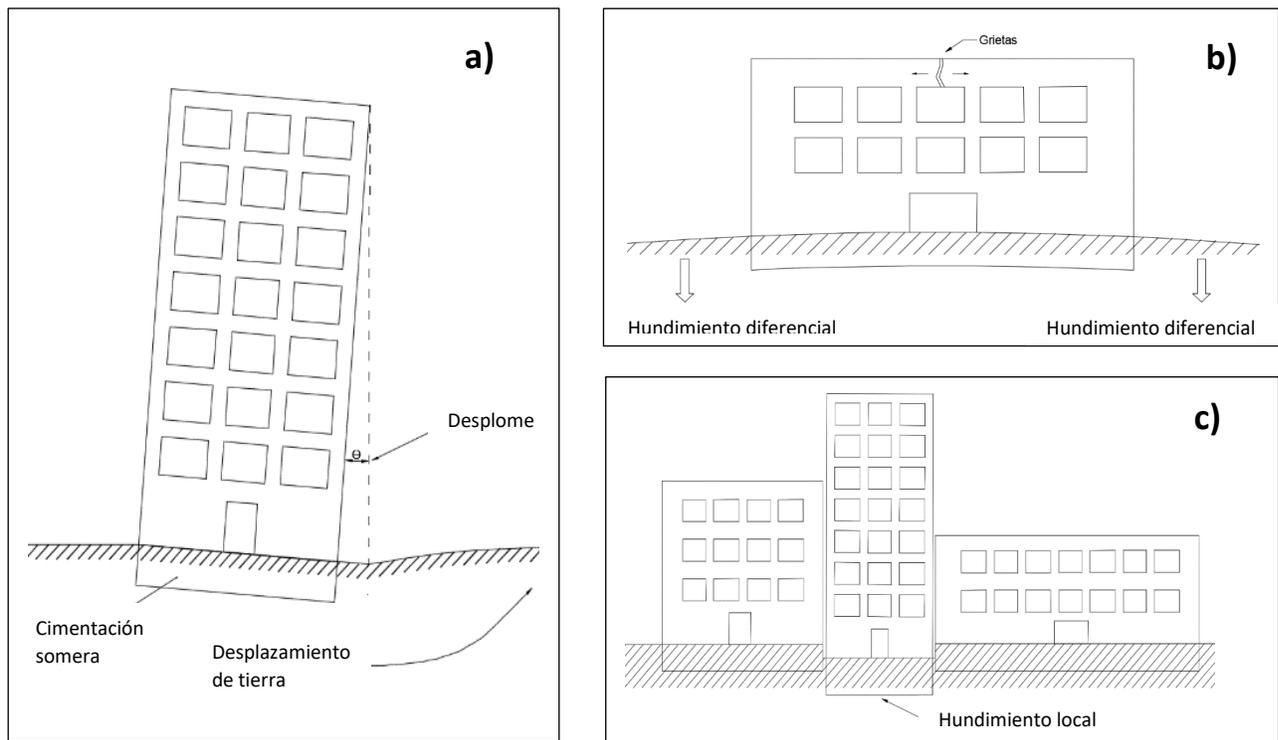
Inclinación (%)	Comentario estructural y reacción de las personas habitantes
>1.5	Grave riesgo para las personas y la estructura
1.5	Inadmisibles, profundamente incómodo para las personas
1.0	Límite admisible y molesto para las personas
0.75	Admisible, pero empieza a ser incómodo para las personas
0.50	Tolerable, lo advierten las personas
<0.5	Sin importancia, desapercibido para muchas personas

- **Asentamientos**

Son movimientos de tipo vertical que implican el descenso del apoyo de nuestra cimentación, debido a la re-consolidación del suelo (figura 2.3). Los asentamientos pueden ser totales (uniformes) cuando su intensidad es la misma para cada punto de la cimentación del edificio, no suelen provocar daños estructurales o en elementos constructivos ya que todo el edificio se desplaza en conjunto, pero si se presenta de manera excesiva podría representar un problema grave. Otro tipo de asentamientos son los diferenciales, en estos la magnitud del movimiento de los cimientos puede variar para cada punto de esta. Los asentamientos diferenciales suelen ser índice de graves lesiones en elementos estructurales o constructivos, ya que si parte de la cimentación se queda sin el apoyo necesario, el edificio buscará la forma de acoplarse al cambio, como resultado, las estructuras no tolerarán esta forma de deformación, produciendo fisuras, agrietamientos, desplomes y giros (Basset, 2016).

- **Grietas – fisuras**

Estas suelen ser parte de los primeros síntomas de asientos diferenciales excesivos. Estas suelen tener una sintomatología común, ya que responden a patrones de fácil reconocimiento, dependiendo del tipo de material, elemento, ubicación estructural, forma y dirección (figura 2.3). La observación, estudio y evolución de las grietas y fisuras ayudará a entender el movimiento que la estructura tuvo y a diagnosticar a qué se debió el origen de la falla (Basset, 2016).



**Figura 2.3: Ilustración de las principales patologías de cimentaciones. a) Desplome. b) Grietas y fisuras. c) Asentamientos**

A continuación, se identifican las patologías debidas a la propia cimentación, es decir, aquellas que se originan por un fallo en el diseño de la cimentación de la estructura (Moncada, 2016).

- Cimentaciones insuficientes: Se produce cuando el tamaño del cimiento origina esfuerzos excesivos en el suelo.
- Grupos de cimentaciones diferentes: Son referentes a el uso de sistemas de cimentación variables en un mismo terreno.
- Degradación estructural: La cimentación es afectada por agentes exteriores, como humedad del suelo.

## 2.2. Estructuras

Uno de los objetivos más importantes dentro de la ingeniería estructural es el crear modelos teóricos que se acerquen en la mayor medida posible al comportamiento real de una estructura, la cual experimenta diferentes tipos de excitaciones, esto con el fin de entender de una mejor manera su comportamiento (Albuérne, 2000).

En términos generales es común ver que las estructuras se diseñen por sismo, es decir, son diseñadas para resistir ciertas magnitudes de fuerzas que muy posiblemente se presentarán en un momento de su vida útil, siempre teniendo en cuenta que las fuerzas resistentes sean mayores a las fuerzas actuantes, y así al terminar el proceso de su diseño, se verificarán los desplazamientos que la estructura tendrá. En años recientes este proceso se ha ido modificando, debido a que se ha demostrado que las deformaciones son un parámetro más confiable en cuanto a diseño que el cálculo de fuerzas, ya que se genera un mejor control de la magnitud de daños que se espera y de esta forma se correlaciona directamente con rasgos de gran importancia para los ocupantes dentro de la estructura, como lo son el costo de reparación, tiempo de evacuación y posibles pérdidas humanas (Martínez González, 2009).

Comúnmente el daño contenido dentro de una estructura involucra grandes pérdidas económicas muy variables, las cuales podrían llegar a un 75% del costo total de nuestra estructura (Reinoso y Miranda, 2004).

### 2.2.1. Dinámica estructural

La dinámica estructural es la encargada de determinar e identificar tanto las propiedades estructurales como el comportamiento de estas. Las estructuras tienen propiedades dinámicas, las cuales pueden expresarse mediante una serie de parámetros modales, cada uno con una debida frecuencia natural (resonancia) y un valor dado para amortiguación, los cuales son generados a partir de modelos matemáticos que deben de describir una relación de entrada y de salida, es decir, la relación de entrada corresponderá a una excitación y la de salida a una respuesta. Se pueden obtener dichos parámetros realizando un análisis modal clásico o en su defecto un análisis modal operacional (OMA).

Si se conoce la respuesta sísmica de una cierta región o grupo estructural, se podría identificar cuáles zonas serían las más vulnerables, además de detectar estructuras con patologías de construcción con una alta probabilidad de daño en caso de siniestro.

Dentro de las formas de estimar la respuesta sísmica se encuentra el espectro de respuesta, el cual proporciona una medida de la demanda total de desplazamientos, sin embargo, por lo general los desplazamientos en situación de movimiento sísmico no se efectúan de una forma distribuida (de la forma en que se evalúan) y añadiendo que el espectro no toma en cuenta los modos de vibración superiores (Miranda y Akkar, 2006), el espectro de respuesta no da un resultado de alta confiabilidad sobre la máxima distorsión.

Con el tiempo se han ido generando otros métodos para evaluar la respuesta sísmica, (ya que en algunas estructuras no se rige por su primer modo) los cuales toman en cuenta los modos de vibración superiores, encargados de dar la pauta de desplazamientos sobre la altura del edificio. De esta manera se va encontrando la demanda de desplazamientos por nivel, evitando un piso de estructura blando (Martínez González, 2009).

### 2.2.2 Vulnerabilidad estructural

Una de las razones para mantener evaluada la respuesta de estructuras es la mitigación del riesgo sísmico, ya que de esta forma se evaluará el comportamiento que se tendrá, y en caso de requerirlo, modificar sus propiedades, ya sea limitando los desplazamientos (rigidizando) o incrementando capacidad de deformación de sus elementos estructurales (Martínez González, 2009).

Por lo general es común ver propuestos modelos continuos para evaluar la respuesta estructural por medio de una excitación dinámica (Miranda, 1999). Hay modelos que proponen a las estructuras como vigas de corte

En la mayoría de los casos la vulnerabilidad estructural es un factor índice del daño que puede haber en los edificios por sismo probable, siendo que entre más vulnerable sea una estructura, mayor será el daño estando la vulnerabilidad en función de la magnitud del

movimiento sísmico y la intensidad de daños que sufren las estructuras (Martínez González, 2009).

Para una adecuada evaluación del daño será de gran ayuda conocer la mayor cantidad de características estructurales, como lo son: el sistema estructural, año de construcción, conservación, mantenimiento del inmueble, y demás patologías estructurales.

Los conceptos de diseño basado en desplazamiento y desempeño son actualmente el camino para el diseño de cimentaciones eficientes ante la acción de movimientos sísmicos. Después del sismo de Guerrero-Michoacán el 19 de septiembre de 1985 en México, varios edificios en la Ciudad de México se vieron gravemente dañados a nivel de cimentación, debido las diversas causas por las que estos daños se hacen presentes, el estudio de capacidad de carga sísmica en cimentaciones superficiales se ha vuelto indispensable, concretamente en el desarrollo del concepto de macro elemento (Chatzigogos C., 2007).

Las acciones que se han identificado como las dos causas principales de las fallas sísmicas en cimentaciones son la licuefacción del suelo y sobrepasar del límite de la capacidad de carga.

Con relación a cargas estáticas, las fuerzas activas a nivel de cimentación se originarán en la superestructura. En la práctica de las cimentaciones superficiales estas fuerzas se describen como fuerzas verticales y horizontales (N, V) y por el momento resultante (M) en la interfaz suelo estructura. La estabilidad de la cimentación estará asegurada por medio de la ecuación 2.1, en donde las fuerzas N, V, M contribuyen a la parte de las "*Acciones*". La parte de la "*Resistencia*" será totalmente dependiente de las características del suelo, independientemente de las acciones (Chatzigogos C., 2007).

$$Acciones \leq Resistencia \quad (2.1)$$

En el ejemplo de caso de sismo la desigualdad se romperá, aumentando el número de las acciones que se tienen en el caso dinámico, a comparación del estado estático.

Esto es posible debido a que la excitación del suelo contribuye a la parte de "*Acciones*", al mismo tiempo que las fuerzas inerciales del suelo y la respuesta inercial de la superestructura, lo cual modifica los valores resultantes de diseño N, V, M que actúan en la cimentación. Añadiendo que de alguna forma todo esfuerzo sísmico también afecta la parte de *Resistencia*, en la mayoría de los casos disminuyéndola (Chatzigogos C., 2007).

### 2.2.3 Amortiguamiento

El incremento en el uso de materiales de alta resistencia adjuntos a eficientes sistemas estructurales tiene como resultado sistemas de piso con mayor flexibilidad y un menor grado de amortiguamiento. Por consecuencia, las vibraciones o ruido ambiental causado por el paso de personas, tránsito de autos o actividades similares puedan ser molestas o inaceptables, así que en el diseño deben ser tomadas en cuenta las medidas necesarias para

reducir estas vibraciones a un estatus tolerable (GDF, 2004). Las vibraciones son dependientes principalmente de las actividades que las producen, además de las características dinámicas presentes en el sistema de piso, como ejemplo de estas:

- a) Frecuencia natural (Hz)
- b) Amortiguamiento (porcentaje del crítico)
- c) Masa y rigidez

Las tradicionales revisiones de deformaciones bajo la aplicación de cargas vivas no son lo suficientemente aptas para asegurar que no se tendrán vibraciones molestas de los sistemas de piso o incluso del edificio. Por lo tanto el control y manejo de rigideces es un aspecto bastante importante para cumplir el estado límite de servicio, pero no dejando de lado la distribución de masas y el amortiguamiento. En caso de presentar un movimiento estructural excesivo, este se mitigará limitando las aceleraciones del edificio o piso, a valores que no presenten molestia a los inquilinos/dueños (GDF ,2004).

La forma en que las personas perciban las vibraciones de piso dentro de la estructura dependerá del comportamiento que se espere del edificio y las actividades que se estén presentando alrededor y dentro de éste. De manera general se presentan dos tipos de vibraciones, continuas y transitorias, la primera dura varios minutos y tienden a ser más molestas para la mayoría de las personas que se mueven poco o realizan trabajos de bajo impacto, es decir, cuando las aceleraciones se encuentran en un rango de 0.005g a 0.01g, ya que las personas que realizan alguna actividad física soporta valores de entre 0.02g y 0.05g (transitorias) (GDF, 2017). Las vibraciones transitorias son excitaciones temporales, suelen ser bastante dañinas debido a que poseen una naturaleza no periódica y producen altos niveles de aceleraciones y grandes deformaciones, lo cual hace que su control se vuelva complicado (Ramírez, 2015).

En gran cantidad de actividades de origen humano es común la aplicación de fuerzas dinámicas con una frecuencia comprendida entre 2 y 6 Hz. En caso de que el sistema de pisos posea una frecuencia fundamental comprendida entre esos límites y la actividad es rítmica pudieran llegar a tener amplificaciones por resonancia, y para evitar este fenómeno el sistema debe de tener una frecuencia natural de dos veces la de la excitación (a menos que se instalen aisladores). Así que como una sencilla solución a las molestas vibraciones que producen las actividades comunes es necesario controlar la rigidez del sistema de piso (GDF ,2017).

Dentro de las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México del 2017, el amortiguamiento debe de ser modelado mediante una matriz de amortiguamiento de Rayleigh o algún otro método racional. En caso de que el amortiguamiento se determine y modele como un proporcional a la masa del sistema estructural y la rigidez lateral, se deberá de tener presente que el porcentaje de amortiguamiento crítico para cada uno de los modos de vibrar este no debe exceder 2.5. Para el cumplimiento de lo anterior debe tener presente el probable alargamiento de los periodos fundamentales de vibración a causa de la respuesta no lineal de nuestro sistema estructural.

El movimiento excesivo de la estructura es controlado limitando aceleraciones del edificio a ciertos valores que no sean molestos a los ocupantes.

### 2.3 Interacción Suelo-Estructura

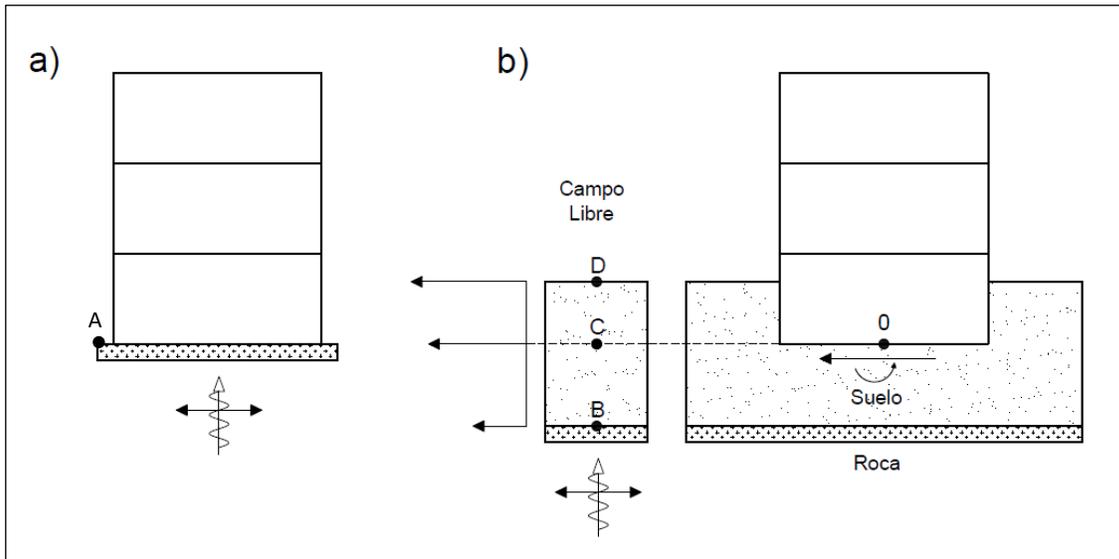
El comportamiento dinámico de una estructura podrá variar por distintas razones, una de ellas es el fenómeno llamado “Interacción Suelo-Estructura, reconocido por sus siglas ISE. La interacción suelo-estructura está definida como la diferencia entre dos respuestas, la primera haciendo referencia a un punto en el que está emplazada la estructura, y la segunda es la respuesta que se debería tener en ese punto si la estructura no estuviera (Takewaki, 1998).

Así mismo, la interacción que las cimentaciones tienen sobre el suelo juega un papel muy importante ante la presencia de ondas sísmicas o fuerzas externas. Por ejemplo, en un grupo de cimentaciones, la onda incidente será difractada por cada una de las cimentaciones presentes en la acción o paso de ondas sísmicas, lo cual generará una onda secundaria que incidirá en otras cimentaciones, es decir la presencia de cimentaciones adyacentes afecta a otras en un ámbito dinámico (Tham et al, 1998).

Como ya se explicó, sobre la interfase suelo-estructura se tendrán ciertos movimientos, de los que se emitirán ondas las cuales se propagarán en todas las direcciones del suelo. En la superficie libre del suelo se tendrán reflexiones, y refracciones en las interfaces de los estratos. A esto se le conoce como “patrón de ondas” el cual irradia energía hacia el infinito fuera de nuestro sistema dinámico total (Espinoza, 1999).

Ahora bien, en el sistema suelo-estructura incluye la mezcla de diferentes tipos de dinámica, esto dependiendo de cuál sea el sistema que se establezca como referencia, de esta manera se tendrá a la dinámica de suelos y la estructural. La dinámica de suelos será la encargada de determinar las propiedades y comportamiento del suelo, al ser sometidos a esfuerzos dinámicos, determinando su respuesta. Por otro lado, la dinámica estructural se ocupa de caracterizar las propiedades de las estructuras y su comportamiento. La diferencia entre dinámica de suelos y dinámica estructural radica en que la primera se enfoca en la necesidad de modelar el suelo utilizando condiciones de frontera y el segundo no. (Espinoza, 1999).

En la figura 2.4 se ilustra la interacción suelo-estructura. En primer lugar, se establecen dos casos, en el primero se tiene una estructura cimentada en roca (A) y en el segundo (B) la misma estructura pero empotrada en un suelo flexible descansando en roca (Wolf, 1994).



**Figura 2.4: Ejemplificación de la interacción suelo-estructura en una estructura cimentada en a) roca y b) un suelo flexible con basamento rocoso (Adaptada de: Wolf, 1994).**

El llamado movimiento de control, o las ondas sísmicas incidentes cuyo movimiento es horizontal, se propagan a través de la roca de manera vertical. Estos movimientos se representan con flechas de un tamaño proporcional a la excitación sísmica planteada (Wolf, 1994).

Para la estructura cimentada en roca: El movimiento de control se situará directamente en la base (punto A mostrado en la figura 2.4). Durante un sismo se cuenta con dos tipos de acciones que actúan desde la base de la estructura: el momento de volteo y fuerza cortante transversal. Cuando se dice que la estructura yace sobre roca firme, se establece que los dos tipos de acciones antes mencionados no crearán deformaciones adicionales en la base, ya que nuestro movimiento de control sísmico será igual al desplazamiento horizontal (en base) y no se tendrá movimiento de cabeceo (Wolf, 1994).

Para la estructura cimentada en suelo flexible: El movimiento asociado a la base en el punto O no será igual al del movimiento de control. Para explicar de la mejor manera cómo se afecta la respuesta dinámica de la estructura a través del suelo se tendrán explicar los siguientes tres efectos (Espinoza, 1999).

- *Primero:* La respuesta del suelo sin tomar en cuenta la estructura será diferente del movimiento de control. Es decir, en caso de que no se tuviera la presencia de una capa de suelo sobre la roca (punto B), el movimiento en nuestro estrato rocoso sería igual al movimiento de control.
- *Segundo:* Al excavar y colocar una base rígida en el sitio el movimiento se modificará. La base experimentará dos movimientos, un desplazamiento horizontal promedio y un movimiento efectivo de entrada en la cimentación (interacción cinemática), esto tendrá como resultado aceleraciones que variarán conforme a la altura de la estructura.

- *Tercero:* Las fuerzas inerciales que se aplican en la estructura tendrán como consecuencia una fuerza cortante transversal y un momento de volteo (actuarán en el punto O) lo que causará deformaciones en el suelo (denominado interacción inercial).

Gazetas (1997) propone dos tipos de interacción entre el suelo y la estructura.

1. Interacción inercial: variación del movimiento a causa de la acción de la estructura sobre el suelo.
2. Interacción cinemática: variación del movimiento a causa de la presencia de la cimentación. En la cual la masa de la estructura se consideraría nula.

La presencia de tipos de suelo blandos en cualquier modelo dinámico hará al sistema suelo-estructura más flexible, lo que provocará una disminución en la frecuencia fundamental y la forma de vibración también se verá afectada, siendo de los dos el modo fundamental el más afectado (Safak, 1995).

El cabeceo que se produzca en la base de la estructura (cimentación) modificará la respuesta, incrementando los desplazamientos laterales, sobre todo en la parte superior de una edificación alta, de forma que los valores de las fuerzas laterales, el cortante basal y los momentos de volteo que fueron calculados previamente para la estructura se verán afectados según el Manual de Diseño de Obras Civiles de Diseño Sísmico por la CFE. La radiación (emisión) de ondas que se propagan lejos de la estructura originará un incremento en el amortiguamiento de tipo efectivo a nuestro sistema dinámico final. Dentro de una aproximación a un modelo elástico homogéneo este incremento será de importancia, llevando al sistema a una respuesta reducida (Espinoza, 1999).

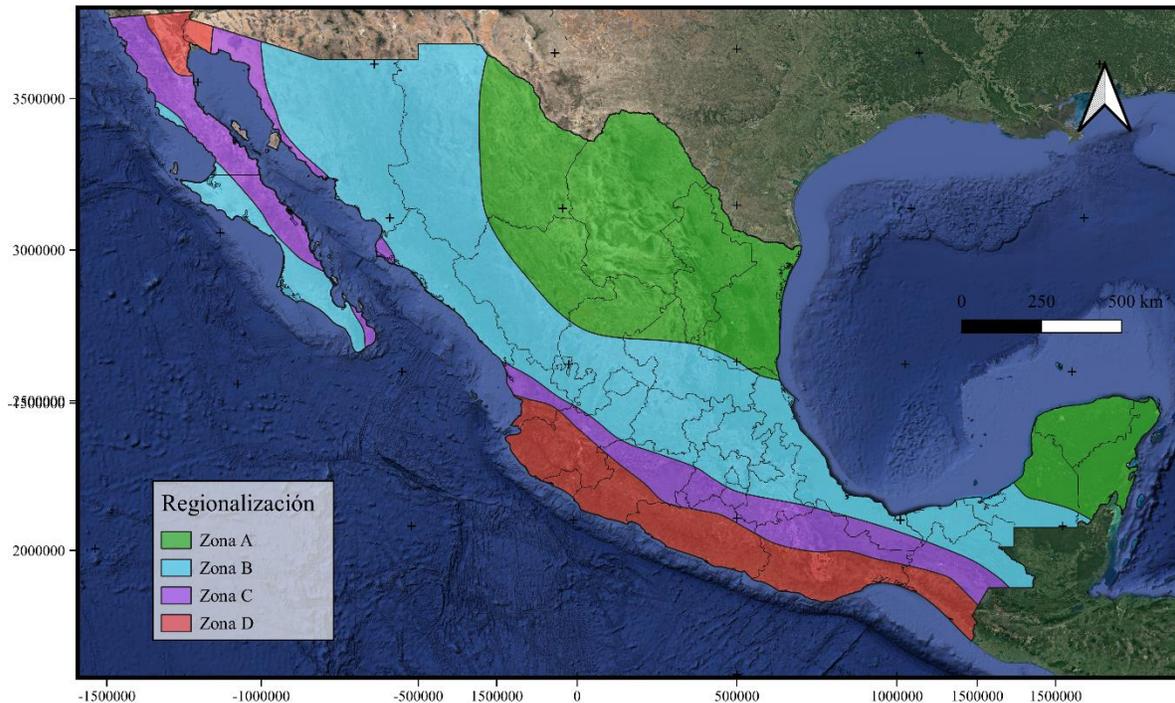
A diferencia del caso de un suelo de espesor delgado que está sobrepuesto a roca rígida, habrá la posibilidad de que las ondas no tengan gran propagación lejos de la estructura y si se diera esta situación el amortiguamiento del suelo será el actuante únicamente, de tal manera que no habrá algún efecto benéfico sobre la respuesta sísmica de la estructura (Espinoza, 1999).

## 2.4. Regionalización sísmica

En México se ha seccionado territorio de acuerdo al peligro sísmico que se pueda presentar, esto tiene como resultado cuatro zonas que van en función de la sismicidad de cada región: A, B, C Y D (figura 2.5). El objetivo principal de esta regionalización sísmica es, junto con los manuales de obras civiles, otorgar a las construcciones información para el cálculo de valores en el diseño de obras, esto para obtener un costo de construcción adecuado y otorgar seguridad a la construcción (Gutiérrez et al, 2008).

- **La zona A:** En esta no se tienen registros de sismos históricos, o no se han presentado dentro de un rango de 80 años. Tampoco se esperan aceleraciones por sismo que sean mayores a un 10% de la aceleración de la gravedad.

- **Las zonas B y C (zonas intermedias):** Los sismos se detectan con cierta frecuencia. La región es principalmente afectada por aceleraciones altas que no sobrepasan el 70% de la aceleración de la gravedad.
- **La zona D:** En esta región se han reportado grandes sismos de tipo históricos. En general la presencia de sismos es muy frecuente, las aceleraciones del suelo llegan a sobrepasar el 70% del valor de la aceleración de la gravedad.



**Figura 2.5: Mapa de regionalización sísmica de México.  
Metadatos tomados del CENAPRED.**

Actualmente, para efectos positivos en la resiliencia sísmica de edificaciones, no es suficiente conocer únicamente la aceleración máxima que puede llegar a tener el suelo en la vida útil de una estructura, si no que deben de ser de nuestro conocimiento otras características, como la amplificación de sus aceleraciones, esto dependiendo de su comportamiento dinámico. Los estudios de ingeniería sísmica son los que definen los valores de las aceleraciones con los que se deben diseñar los edificios, a estas aceleraciones se les conoce como espectros de diseño.

Los espectros de diseño son generados a partir de familias de espectros de respuesta en un sitio, estos son representativos de la respuesta de estructuras expuestas a fenómenos sísmicos que afectan a una región, teniendo presente a la amplificación local. En la figura 2.6 se presentan los espectros de diseño sísmico generados a partir de los datos de la tabla 2.2 para las distintas zonas en las que se divide la Ciudad de México. El eje vertical de la figura 2.6 representa las aceleraciones máximas probables en los edificios, normalizadas respecto a la aceleración de la gravedad.

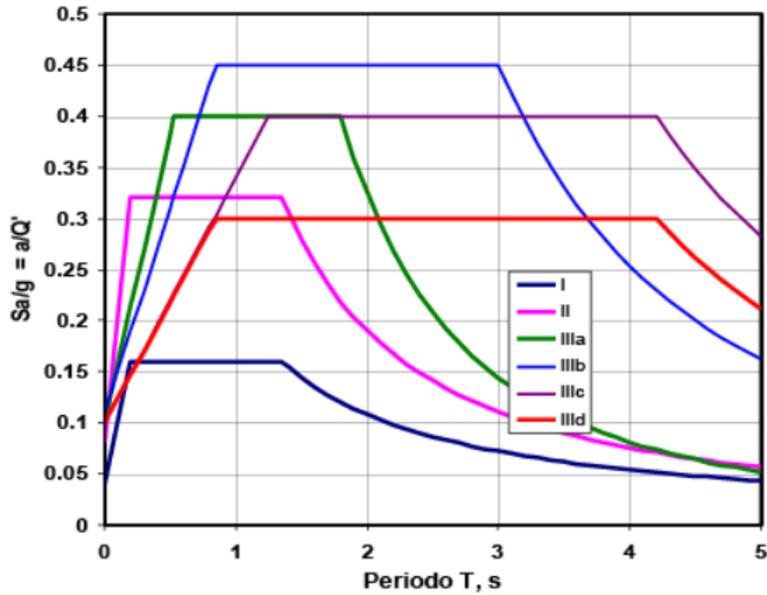


Figura 2.6: Espectros para diseño sísmico de la Ciudad de México (GDF, 2004)

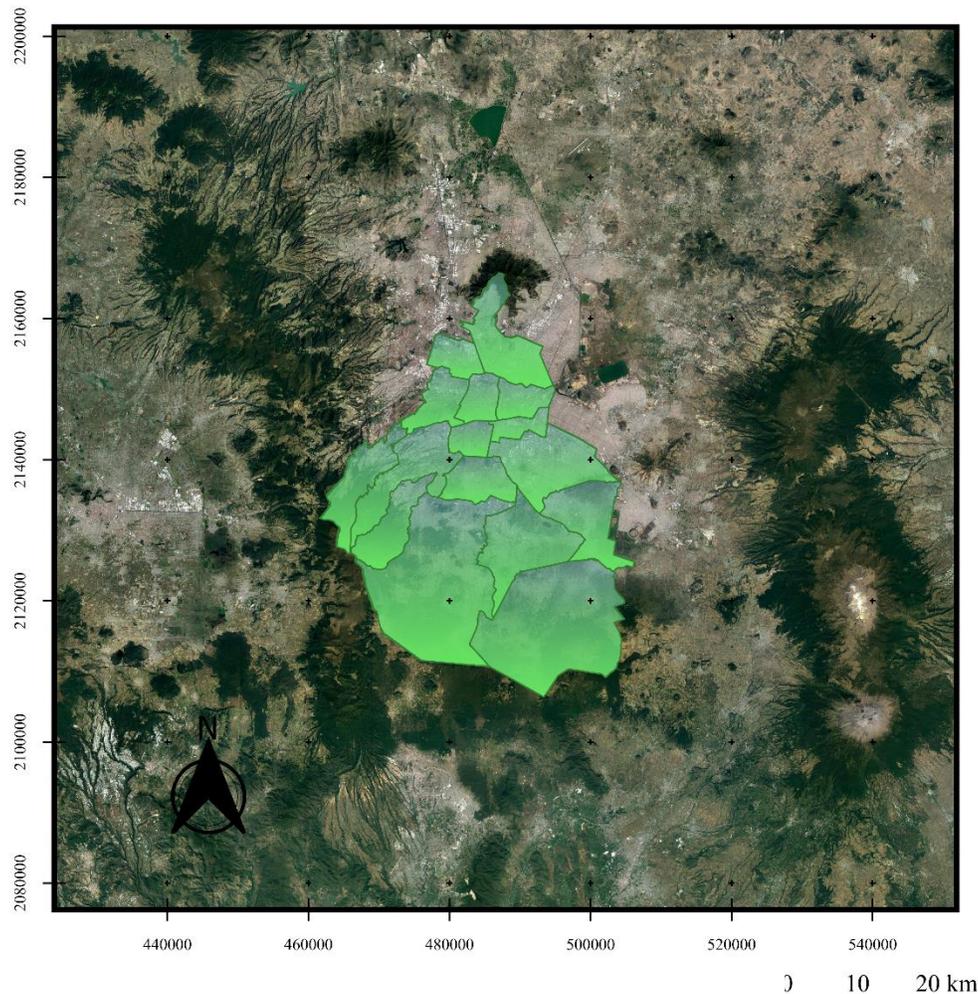
Tabla 2.2: Valores de los parámetros para calcular los espectros de aceleraciones.

Zona	c	$a_o$ [ $cm/s^2$ ]	$T_a$ [s]	$T_b$ [s]	r
I	0.16	0.04	0.2	1.35	1
II	0.32	0.08	0.2	1.35	1.33
IIIa	0.40	0.10	0.53	1.8	2
IIIb	0.45	0.11	0.85	3.0	2
IIIc	0.40	0.10	1.25	4.2	2
IIId	0.30	0.10	0.85	4.2	2

c: coeficiente sísmico,  $a_o$ : valor de a que corresponde a  $T=0$ ,  $T_a$  y  $T_b$ : periodos característicos de los espectros de diseño, r: exponente en las expresiones para el cálculo de las ordenadas de los espectros

## 2.5 Zonificación

La Ciudad de México (figura 2.7) está situada dentro del Valle de México, en el centro-oriente de la Faja Volcánica Transmexicana. Se sitúa en una gran planicie, anteriormente lacustre, que la cual está rodeada por cuatro sierras de origen es volcánico: al norte la Sierra de Pachuca y Tezontlalpan, al poniente la Sierra de las Cruces, al oriente la Sierra Nevada, y al sur la Sierra Chichinautzin (González-Torres et al., 2015).



**Figura 2.7: Mapa de ubicación de la Ciudad de México.**

La estratigrafía del suelo de la Ciudad de México ha sido investigada y correlacionada mediante pozos profundos (Lozano y Sosa, 2015). El basamento está conformado por la Formación Morelos del Cretácico inferior conformada por depósitos de conglomerados calcáreos y anhidritas, en cuanto a la composición del relleno se tienen depósitos lacustres en la cima, y productos volcánicos, incluyendo distintos derrames de lava de composición variable (desde basalto a dacita) con dominancia de andesitas y depósitos piroclásticos de tobas e ignimbritas (González, 2015).

El relleno de la cuenca de la Ciudad de México está conformado por cuatro unidades, que a continuación se ordenan de la base a la cima (Pérez-Cruz, 1988):

- a) Calizas (del Cretácico) - basamento
- b) Unidad Volcánica Inferior (UVI), constituida por materiales de tipo volcánico efusivos y piroclásticos
- c) Unidad Volcánica Superior (UVS), conformada por rocas piroclásticas con menor proporción de rocas efusivas
- d) Unidad de depósitos lacustres y fluviales compuestos por arcillas, limos y arenas

Así, al tener estudios geológicos y estratigráficos de la Ciudad de México permitirán generar mapas de zonificación geotécnica, esto con la finalidad de crear reglamentación para la construcción, es decir, Normas Técnicas Complementarias para Diseño y Construcción de Cimentaciones (2004).

En las Normas Técnicas Complementarias de Construcción de la Ciudad de México se incluye un mapa de la Zonación Geotécnica del Valle de México (figura 2.8), el cual se usa para el diseño de edificaciones. En la actualidad se presentan grandes retos y problemas hablando específicamente del diseño y construcción de una obra en Ciudad de México, los cuales son ocasionados por las propiedades dinámicas del suelo, como lo son: la gran compresibilidad de los suelos, el hundimiento (subsistencia) y por consolidación regional a causa de la explotación de los mantos acuíferos subterráneos. Actualmente es necesario realizar una permanente actualización de los mapas de Zonificación Geotécnica de la Ciudad de México (figura #), debido a los cambios en las propiedades de los suelos antes mencionadas (Juárez, 2014).

Como características importantes del suelo en la Ciudad de México se tienen las siguientes (Rodríguez, 2016):

- El contenido de agua es mayor a 400%
- El índice de plasticidad excede 300%
- El índice de compresión  $C_c$  puede llegar a un valor de 10, cuando en la mayoría de los suelos es menor a 1.

Debido a lo antes mencionado, se considera altamente compresible el suelo lacustre de la Ciudad de México, lo cual es considerado un problema y riesgo en la construcción de edificaciones muy altas o con mucho peso (Rodríguez, 2016).

Por lo tanto, se le atribuyen características sísmicas variables a la zona donde está ubicada la Ciudad de México, como se ha constatado en los sismos históricos de 1957, 1979, 1985, 2017; los cuales han provocado daños considerables en toda la ciudad, como asentamientos diferenciales, desplomes, hundimientos, etc.

Se tiene que existe una correlación directa entre la distribución de los daños por sismos y la ubicación de los sedimentos lacustres de la ciudad, así que se debe de dar importancia a las características y propiedades del subsuelo, ya que estas pueden tener un papel principal en daños por sismo (Rodríguez, 2016).

## Zonificación del Valle de México.

Los primeros en definir tres zonas de importancia en la Ciudad de México fueron Marsal y Mazari (1959), esto en base de sondeos realizados a diferentes profundidades, las tres zonas definidas son: zona del Lago (limos y arcillas), la zona de Transición (predominantemente arenoso), y la zona de lomas o zona firme (tobas volcánicas y rocas intemperizadas), las cuales se muestran en la figura 2.8.

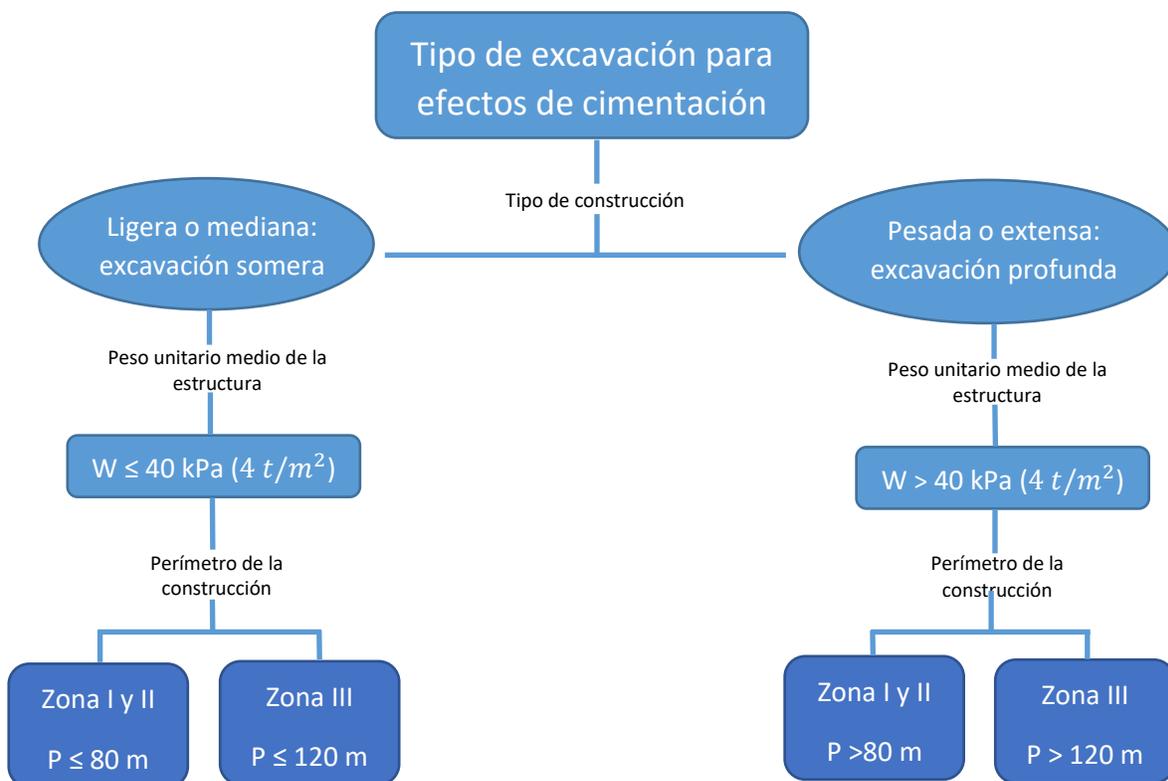
- **Zona I** (Firme o de lomas): localizada en las partes más altas de la cuenca del valle, está formada por suelos de alta resistencia y poco compresibles. Se caracteriza por sus condiciones favorables para cimentar estructuras, su capacidad de carga es elevada, y debido a que no hay capas de arcillas no se presentan asentamientos diferenciales.
- **Zona II** (De transición): El suelo se compone de características intermedias entre las Zonas I y III, así que la estratigrafía varía de gran forma. Los depósitos profundos se encuentran a 20m o menos. En ocasiones se presenta una franja de transición, en donde hay transporte de arenosos con arcillas de origen lacustre. Los problemas de asentamientos diferenciales podrían llegar a ser muy críticos en esa zona
- **Zona III** (de Lago): Se localiza en las regiones donde anteriormente se tenían lagos (Lago de Texcoco y Lago de Xochimilco). El suelo se conforma de depósitos lacustres muy blandos y compresibles, con altos contenidos de agua, lo que favorece la amplificación de las ondas sísmicas. Su espesor puede llegar a sobrepasar los 50 m. Los problemas más serios que se tienen son provocados a la alta compresibilidad de los sedimentos y baja resistencia al corte de las arcillas. Si se realizaran sondeos en esta zona se distinguirían los siguientes estratos principales: 1) Depósitos arenos-arcillosos o limosos con hasta 10 m de profundidad; 2) Arcillas volcánicas compresibles, intercaladas con capas o lentes de arena de 15 a 32 m; 3) Un estrato duro con aproximadamente 3 m de espesor compuesto por suelos arcillo o limo-arenosos, compactados a 33 m de la superficie; 4) Arcillas volcánicas con un espesor de 4 a 14 m; 5) Depósitos de arena con grava, separados por estratos de limo o arcilla arenosa.

Cabe señalar que, en caso de querer utilizar el mapa con fines constructivos, se deberá consultar el *Reglamento de las Construcciones para la Ciudad de México* (pág. 14), en el cual se postula lo siguiente:

- a) Es muy importante aclarar que la figura 2.6 sólo podrá usarse para consultar la zona a la que pertenece el predio en cuestión. Lo cual sólo aplica para construcciones ligeras o medianas sin extensiones muy grandes con excavaciones someras.
- b) Cualquier estructura tendrá una ubicación desfavorable si esta se encuentra cerca de los límites que se establecen como cambio de zona geotécnica.
- c) La zona geotécnica se determinará por estudios directos del subsuelo. El estudio consiste en una exploración de campo y pruebas de laboratorio, teniendo como objetivo principal caracterizar localmente la zona para el correcto diseño de cimentación.

- d) Si la zona está localizada en la Zona I se tendrá que investigar la posible existencia de materiales sueltos en superficie, grietas, oquedades naturales o galerías de minas.
- e) Para las Zonas II y III se investigará las cargas a las que ha sido sometido el suelo de la zona y el análisis, de posibles cimentaciones antiguas, restos arqueológicos, rellenos superficiales, cambios bruscos de estratigrafía, inestabilidad de terreno u otros fenómenos que pudieran causar asentamientos diferenciales importantes, para así poder considerar esto para el diseño.

Para caso de ejemplo, ya que el tipo de cimentación dependerá de gran medida de las condiciones del suelo, en el siguiente diagrama se resume lo que establece el Reglamento de construcciones. El tipo de excavación para efectos de cimentación, se debe de determinar en función del peso de la estructura.



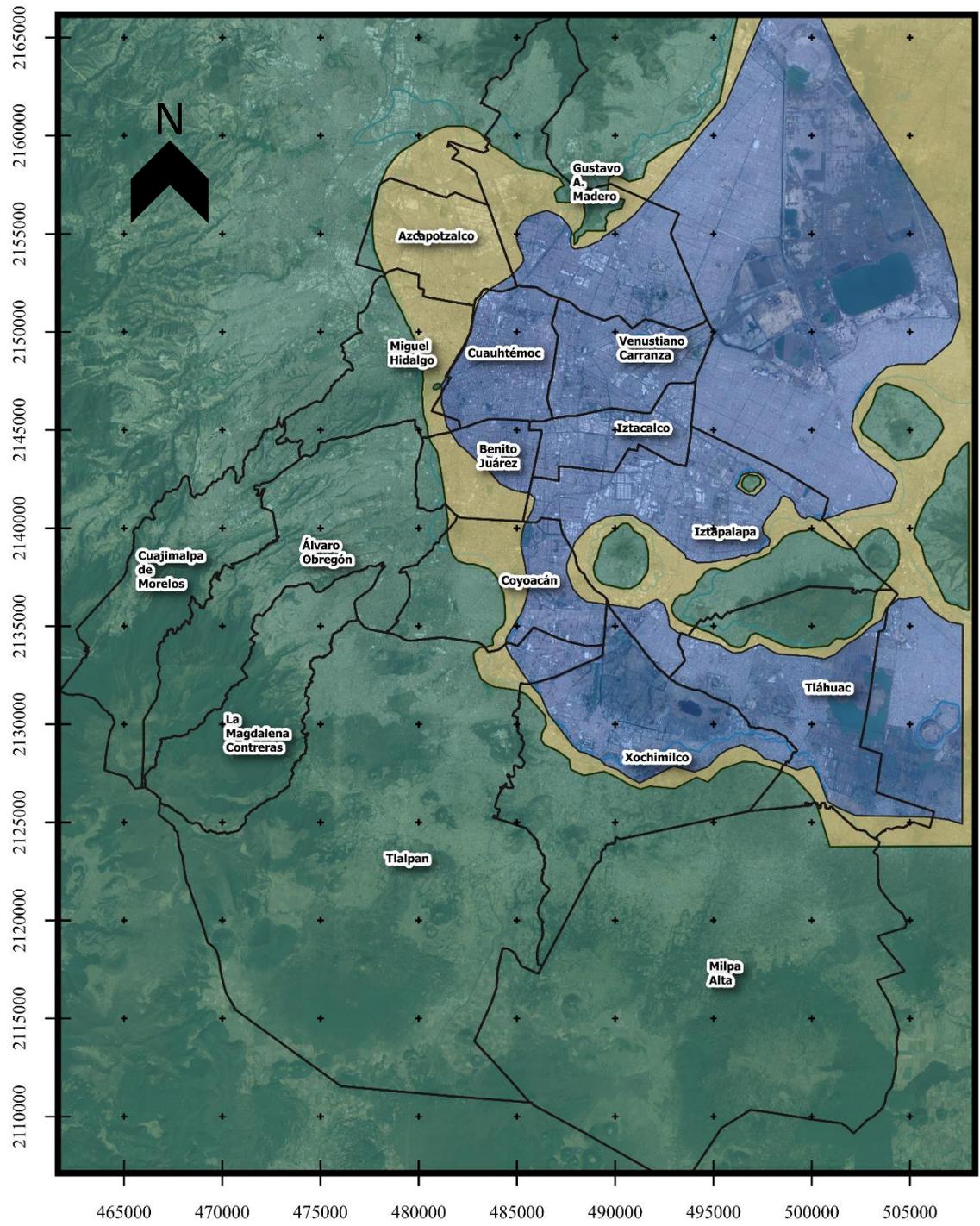


Figura 2.8: Zonificación geotécnica de la Ciudad de México por delegación, Zona I, Zona II y III. 0 2.5 5 km

Zona I: de Lomas
  Zona II: de Transición
  Zona III: de Lago

En las Normas Técnicas Complementarias para diseño por sismo de la Ciudad de México, se establece dentro del artículo 170, que la Zona III se dividirá en cuatro subzonas (*III<sub>a</sub>*, *III<sub>b</sub>*, *III<sub>c</sub>* y *III<sub>d</sub>*) sísmicas, con fines de diseño (figura 2.9).

Así también, con fines de diseño las edificaciones se dividirán en 2 grupos, según el artículo 139 en el reglamento de construcciones para el entonces Distrito Federal.

Grupo A: Edificios que en caso de falla estructural podría tener un peligro significativo por manejo de sustancias tóxicas o explosivas, así como también se encuentran aquellas que su funcionamiento es necesario en caso de emergencia urbana, teniendo como ejemplo, en este grupo a: hospitales, escuelas, terminales de transporte, estaciones de bomberos, centrales eléctricas y de telecomunicaciones, estadios, depósitos de sustancias flamables o tóxicas, museos y edificios que alojen archivos y registros públicos de particular importancia, y otras edificaciones a juicio de la Secretaría de Obras y Servicios.

Grupo B: Edificios destinados a vivienda, de tipo común, oficinas, locales comerciales, hoteles y construcciones comerciales e industriales que no hayan sido incluidas en el Grupo A. Este grupo se subdivide en:

a) Subgrupo B1: Edificios con una altura mayor a los 30 m o más de 6,000  $m^2$  de área total construida, con una ubicación geotécnica en Zona I y II, y construcciones con una altura mayor a los 15 m o más de 3,000  $m^2$  de área total construida, esto en Zona III. En los dos casos mencionados las áreas se refieren a un solo cuerpo como edificio, que tenga medios propios en caso de desalojo (acceso y escaleras, incluyendo anexos, como son los cuerpos propios de escaleras. Los cuerpos que no cuenten con medios propios de desalojo se sumarán el área del cuerpo por el cual se desaloje.

b) Edificaciones que se ocupen como lugares de reunión que puedan alojar más de 200 personas (templos, salas de espectáculos, así como anuncios auto soportados, anuncios de azotea y estaciones repetidoras de comunicación celular y/o inalámbrica).

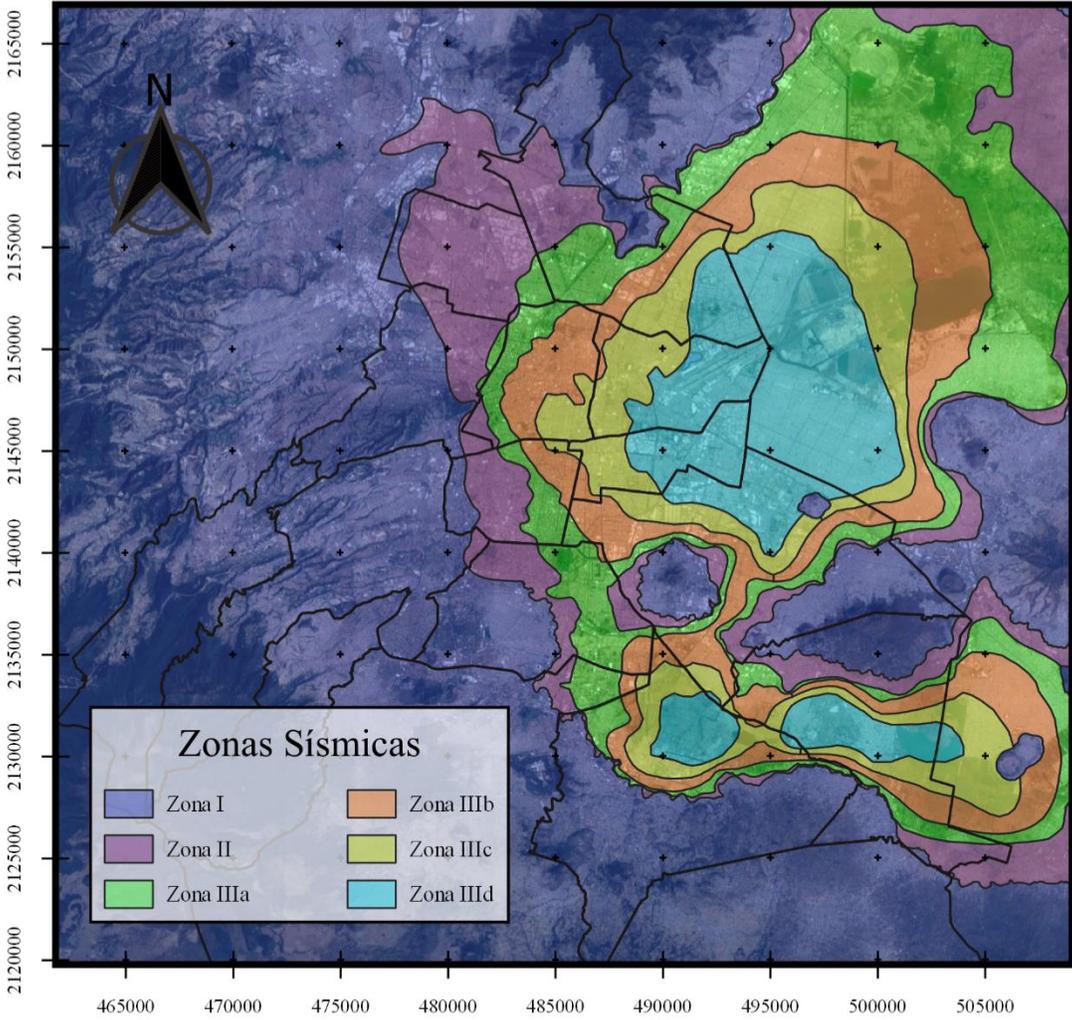
c) Subgrupo B2: Las demás de este grupo.

Con el propósito de que las edificaciones tengan una seguridad adecuada y estas no presenten fallas estructurales mayores o pérdidas humanas, los edificios se diseñarán bajo una suposición de sismo máximo probable, de esta manera sólo se tendrán daños con afectaciones mínimas. Entonces se tendrá que para el análisis del posible desplazamiento de una estructura se recurrirá al coeficiente sísmico,

Así, uno de los principales factores a considerar en el diseño de un edificio será coeficiente sísmico  $[c]$ , el cuál se define como el cociente de la fuerza cortante horizontal por efecto de sismo  $[V_0]$ , sobre el peso de la edificación  $[W_0]$ , los dos tomados desde la base del edificio. Cabe mencionar que se establecerá como base de la estructura el nivel sobre a partir del

cual sus desplazamientos comienzan a ser significativos en comparación con el terreno circundante. En cuanto al peso total, se contarán las cargas muertas y vivas correspondientes, todo esto según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo.

El coeficiente sísmico para edificaciones que se encuentren dentro del grupo B en el artículo 139 del reglamento se tomará igual a 0.16 en Zona I, en la Zona II igual a 0.32, y en las Zonas *III<sub>a</sub>* y *III<sub>c</sub>* como 0.40, así finalmente como 0.45 en la *III<sub>b</sub>* y 0.30 en la *III<sub>d</sub>*. Para edificaciones que se encuentren dentro del grupo A en coeficiente se verá incrementado en un 50%.



**Figura 2.9: Mapa de zonificación sísmica de la Ciudad de México.  
Metadatos tomados del Atlas de la CDMX.**

## 2.6 Geología

El edificio de estudio se ubica en la alcaldía Coyoacán, en una zona que es caracterizada por su origen geológico, ya que en el periodo del cuaternario se destacó por su actividad eruptiva debido a una distribución de estructuras volcánicas, así depositándose material basáltico que fue proporcionado en su mayoría por el volcán Xitle. Este material basáltico se extiende hasta la Colonia Pedregal de Santo Domingo, Ajusco y el Pueblo de Santa Úrsula Coapa. Los tipos de suelo asociados a esta área de la Ciudad son: basalto, aluvial, lacustre, toba básica y volcanoclástico. (Atlas de Riesgos de la Delegación Coyoacán).

**Tabla 2.3: Materiales con mayor presencia en los alrededores de la zona de estudio (Atlas de Riesgos de la Delegación Coyoacán).**

Material	Características
Basalto	En la región abarca un área de $22,474 \text{ km}^2$ . Roca ígnea extrusiva con una composición básica característica por un color negro oscuro. Contiene principalmente plagioclasas básicas, augita y olivino casi imperceptible. Por lo general es porosa y compacta, dependiendo del contenido de agua presente en su periodo de enfriamiento. Se presenta como una estructura de derrame, formando mesas de lava de gran tamaño.
Aluvión	Ocupa un área aproximada de $7,408 \text{ km}^2$ en la región y alrededores. Se considera un material de relleno moldeado por las elevaciones existentes. Se conforma por gravas, arenas, arcillas y cenizas. Su rango de grosor varía de los 30 a 300 m.
Lacustre	Este material ocupa la mayor parte dentro de la región de la delegación Coyoacán, con un área total de $23,341 \text{ km}^2$ . Su origen se debe al lago que ocupaba toda la Cuenca de México.
Toba básica	Está presente en porciones menores. Se presenta en forma de depósitos formados por partículas de materiales expulsados por los volcanes. Se compone principalmente de ceniza, arena y lapilli. Este material puede ser basáltico, andesítico o riolítico.
Toba volcanoclástica	Abarca la menor porción de todos los materiales mencionados anteriormente, con un área de $0.273 \text{ km}^2$ . Este material está asociado a elevaciones de origen volcánico

### 3. Técnicas de estudio

Los estudios de prospección geofísica están definidos con una metodología para la adecuada deducción de las propiedades del suelo, esto por medio de la observación y medición de fenómenos físicos, ya sea de fuente natural o artificial, los cuales serán correlacionados con la estructura geológica del suelo.

Con ayuda de estas técnicas los objetivos pueden ser determinar propiedades físicas *in situ*, condiciones geológicas y estratigráficas de los materiales, detección del nivel freático, heterogeneidades y fallas, incluyendo la deducción o inferencia del comportamiento mecánico del suelo.

#### 3.1 Sísmica de Refracción

Es un método de prospección que es usado ampliamente para fines de Ingeniería Civil al ser funcional en la medición de espesores, detección de profundidades de capa y de estratos rocosos adecuados para cimentación e identificación del nivel freático.

En la sísmica de refracción las leyes que determinan la propagación y trayectoria de las ondas sísmicas, al igual que en la óptica, son el Principio de Huygens, Principio de Fermat y la Ley de Snell.

En la aplicación de este método, la fuente y los detectores (geófonos) se ubican alineados en la superficie de estudio, posteriormente se obtienen registros que son aportados por las ondas sísmicas que son refractadas críticamente entre las interfaces de estratos con diferencia de velocidad de onda P. Las ondas que siguen una trayectoria de tiempo mínimo, es decir, las ondas refractadas son las primeras en arribar a los receptores (con excepción de las ondas directas) desde el momento en el que se realiza la liberación de energía de la fuente (Cavada, 2000).

Con el registro obtenido se realiza un gráfico (tiempo-distancia), en estelas distancias de la fuente hasta cada receptor son ubicadas en las abscisas y en las ordenadas se encontrarán los respectivos tiempos de llegada. A la curva presentada en el gráfico se le denomina domocrona, y así a partir de esta, sumado la identificación de cambios de pendiente, será posible calcular un perfil de espesores y velocidades de propagación de ondas P (Cavada, 2000).

Sin embargo, el método tiene limitantes, ya que el fenómeno que origina la onda de primera llegada es generada sólo si el estrato siguiente posee una velocidad de onda P mayor al del estrato que tiene encima, si no es así, no será posible detectar al estrato que se tiene por debajo con este método (Cavada, 2000).

### 3.2 Cocientes espectrales H/V

En zonas caracterizadas por suelos blandos y poco compactos los daños serán mayores tras un sismo de gran magnitud a comparación de zonas con suelo firme, esto debido a la amplificación que sufren las ondas sísmicas al transmitirse en este tipo de suelos. A este efecto o fenómeno se le conoce generalmente como “efecto de sitio” o “amplificación de suelos”. La amplificación sísmica y el grado de daño que se observa en las estructuras durante sismos fuertes son variables de un lugar a otro, aún si se evalúa en distancias cortas, debido a los cambios locales del tipo de suelo (Bard, 1999).

A partir de los trabajos de Sezawa (1930, 1935) comenzaron a identificar el problema del efecto de sitio, después surgieron otros trabajos (Kanai y Yoshizawa, 1957), en los cuales se obtuvieron fórmulas matemáticas en el dominio de la frecuencia para el movimiento de la superficie, relacionándolas a una onda incidente, asumiendo ondas de corte sísmicas planas estacionarias propagadas verticalmente. Los que introdujeron la idea de visualizar el cociente espectral H/V fueron Nogoshi e Igarashi (1971).

El “método de Nakamura” surgió en 1989, el cual aseguró que la razón  $A^{NHV}(f)$  es una estimación confiable de la función de transferencia del sitio para las ondas  $S H_T(f)$ , al que le nombro “Quasi-espectro de transferencia” o QTS (Bard, 1999). Es utilizado para evaluar la razón espectral H/V, es decir, la determinación del periodo fundamental de vibración del suelo o edificaciones, esto a partir de mediciones de vibración ambiental. Asocia la frecuencia de valor máximo de la razón espectral con la frecuencia predominante del suelo en dicho sitio (Bonneyoy-Claudet, et al, 2006; Lachet, et al, 1996).

El método del cociente espectral H/V ha sido ampliamente utilizado en los últimos años por la fiabilidad de sus resultados, y el pequeño costo que tiene al realizarse (Bard, 1999).

Este método utiliza registros de ruido sísmico ambiental generalmente de una duración de 10 a 30 minutos (en promedio). Para obtener la razón espectral H/V se obtienen mediciones de velocidad en tiempo continuo en tres direcciones, las dos componentes horizontales Norte-Sur (N-S), Este-Oeste (E-O) y la componente vertical (Z) (Lezana, 2014). Además, se puede utilizar la forma de la razón espectral para estimar el contraste de impedancia entre los sedimentos y la roca basal (Woolery, 2002; Ruiz, 2009).

Al realizar un estudio de cocientes espectrales H/V en estructuras se buscará evaluar su respuesta dinámica; sin embargo, se pueden tener objetivos más específicos, como los que se anuncian a continuación (Durán, 1987), en los cuales se plantea problema previo con la estructura.

- Control de calidad de obra: Se realizan mediciones en edificios recién construidos para hacer una comparación entre los datos tomados con los valores que fueron

utilizados en la etapa de diseño. De esta forma se puede verificar si hay cambios de importancia entre el diseño y la construcción. A futuro los resultados serán de ayuda que nos permitirá llevar un cierto control de seguridad ante sismos fuertes.

- Control de los daños por sismo: Realizar mediciones en edificios después de un sismo de gran magnitud con el propósito de determinar existen daños estructurales importantes en los que tenga que intervenir.
- Chequeo de reparaciones o modificaciones: Constatar que la reparación o refuerzo de la estructura ha sido exitosa después de haber tenido daño estructural. El objetivo será verificar si se han modificado las características estructurales originales.
- Bitácora estructural de vida útil: Mediciones de seguimiento para determinar si existe algún deterioro estructural importante debido a eventos sísmicos menores, envejecimiento de los materiales, asentamientos diferenciales, falla en la cimentación, reparaciones, adaptaciones incorrectas o modificaciones estructurales realizadas por los propietarios.
- Instrumentación de edificios: Si se quiere instrumentar un edificio para el registro de sus movimientos causados por sismos, se recomienda determinar sus características dinámicas mediante estudios de vibración ambiental, ya que estas servirán como referencia para monitorear dichas propiedades, y además servirán para localizar la mejor ubicación de los instrumentos (Muriá-Vila y González. 1995)

### 3.3 Espectro de Fourier

Consiste en un análisis de tipo frecuencial, en donde una función periódica será descompuesta en sus componentes armónicos, así por medio de este, es posible transformar una función o registro de datos en dominio del tiempo al de frecuencias (Newland, 1993).

La transformada de Fourier para una función en tiempo  $x(t)$  esta dada por la ecuación 4.1 (Bendat & Piersol, 2010)

$$S_x(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)e^{-i2\pi ft} dt \quad (3.1)$$

Esta es una función compleja, la cual puede ser expresada en términos polares, como en la ecuación 4.2

$$S_x(f) = |S_x(f)|e^{-i\theta(f)} \quad (3.2)$$

$$|S_x(f)| = \text{Espectro de amplitudes}$$
$$\theta(f) = \text{Espectro de fase}$$

El espectro de amplitud de Fourier es una expresión de densidad de tipo espectral, en la cual son graficadas las amplitudes resultantes de la transformada de Fourier con frecuencias para una señal obtenida.

Teniendo presentes las anteriores bases teóricas, un edificio se moverá de diferentes formas, y todos sus desplazamientos tendrán frecuencias predominantes las cuales pueden ser representadas en el espectro de amplitud de Fourier.

Una señal cuenta con diferentes componentes en frecuencia, al aplicar el Espectro de Fourier estas componentes quedan adecuadamente separadas, por lo cual de este principio podemos inferir mediante Fourier que para cada frecuencia existe una componente de movimiento. Es decir, la vibración de un edificio es causada por una fuente externa, si esta fuerza tiene diferentes componentes en el dominio de la frecuencia, entonces serán representadas en el espectro de Fourier las frecuencias en las cuales vibra el edificio o sus diferentes modos de vibrar.

En dinámica estructural se sabe que la parte alta del edificio (azotea) lo que más contribuye es el modo fundamental, el cuál es el que más desplazamientos tiene que los modos superiores, es decir, el desplazamiento máximo del edificio (Caicedo, 2014).

Los datos por utilizar para el correcto uso del espectro de amplitud de Fourier deben de ser adquiridos en algún punto dentro de los niveles de la superestructura, ya que dependiendo del nivel en donde sean adquiridos, estos tendrán la contribución del movimiento precisamente en ese nivel. Si se adquieren datos para el espectro de amplitud a nivel del suelo no se tendrán prácticamente contribuciones de edificios, ya que lo que ahí contribuye principalmente es el movimiento del ruido sísmico o las frecuencias que predominan en el suelo, lo cual no nos servirá para uso de vibración de estructuras.

La relación entre la dinámica de la estructura y el espectro de Fourier está en que el espectro de amplitud de Fourier representa la forma en la que vibra o se mueve el edificio para cada componente de frecuencia, de tal forma que, si se calcula el espectro de Fourier en la azotea, veremos claramente la frecuencia en la que vibra el edificio, la cual es dominante en la representación espectral debido a que el movimiento del edificio es mayor en ese nivel.

## 4. Datos

### 4.1 Zona de estudio

La Unidad Habitacional (CIRSA), edificación de estudio, está ubicada en Eje 10 Sur, colonia Copilco el Bajo, Alcaldía de Coyoacán, Ciudad de México, México, con las coordenadas 19°20'18.7548" N 99°11'18.8582" W (Figura 4.1). Se ubica al oeste de Plaza Copilco, al norte del club deportivo Terranova Country Club y al este del cruce de Avenida Insurgentes Sur con Avenida Copilco. La zona geotécnica, de acuerdo a las Normas Técnicas Complementarias de la Ciudad de México., corresponde a la Zona II (de Transición).

La Unidad Habitacional está conformada por 16 edificios, 6 en forma de "H" y 10 en forma de "X", cada uno de ellos con un total de 6 pisos y una azotea.

#### Unidad Habitacional



**Figura 4.1: Representación espacial de la zona de estudio subrayada en color azul. El edificio B1 se muestra encerrado en el círculo rojo. Tomada de Google Earth 2020.**

El edificio de interés (B1) tiene como forma característica la letra "H" y cuenta con 6 niveles de uso habitacional. El sistema estructural del edificio está compuesto de marcos de concreto armado constituidos por columnas, y como sistema de piso se cuenta con una losa plana. En todos los niveles se cuenta con muros divisorios de mampostería. La infraestructura consiste en un cajón de cimentación.

De las diferentes patologías de edificaciones (Irregularidad en planta, elevación, columnas cortas, asimetría de esquina, cambio de rigidez, planta baja débil, golpeteo) en el edificio de estudio B1 se encontró la siguiente:

- Irregularidad en planta:

La planta de la estructura está conformada de alas orientadas en direcciones diferentes (formas en H, U, L). Lo cual puede ser causante de deformaciones estructurales (deflexiones) en nuestros sistemas de piso, de forma semejante a lo que ocurre en edificios alargados, disminuyendo la eficiencia de resistencia a torsiones (Arnold *et al*, 1986).



**Figura 4.2:** Representación espacial de la unidad CIRSA. En el mapa se identifica los edificios B1 (de estudio), B2 y B6 edificios de comparación con mismo diseño estructural. Tomada de Google Earth 2020.

## 5. Análisis y resultados

En este capítulo se presentan los resultados de las técnicas geofísicas con las cuales los datos fueron procesados, invertidos e interpretados los datos. Se presenta en primer lugar la técnica de refracción sísmica y el método MASW, como un método de caracterización de la estructura de velocidad ( $V_p$  y  $V_s$ ) del subsuelo. En segundo lugar, se usó el método de cocientes espectrales  $H/V$ , el cual se emplearon datos de ruido ambiental. Finalmente se utilizó como análisis el Espectro de Fourier, para identificar la frecuencia del modo fundamental de vibración de la estructura.

### 5.1 Refracción sísmica

La estructura de estudio nombrada B1 presenta una forma de “H”, la cual consta de dos torres de departamentos unidas por una estructura de elevador-escaleras. El equipo que fue utilizado en el trabajo de campo para la toma de datos se resume a un sismógrafo (Seistronix), geófonos de 4.5 Hz, trigger, computadora de campo y un marro de 12 lb.

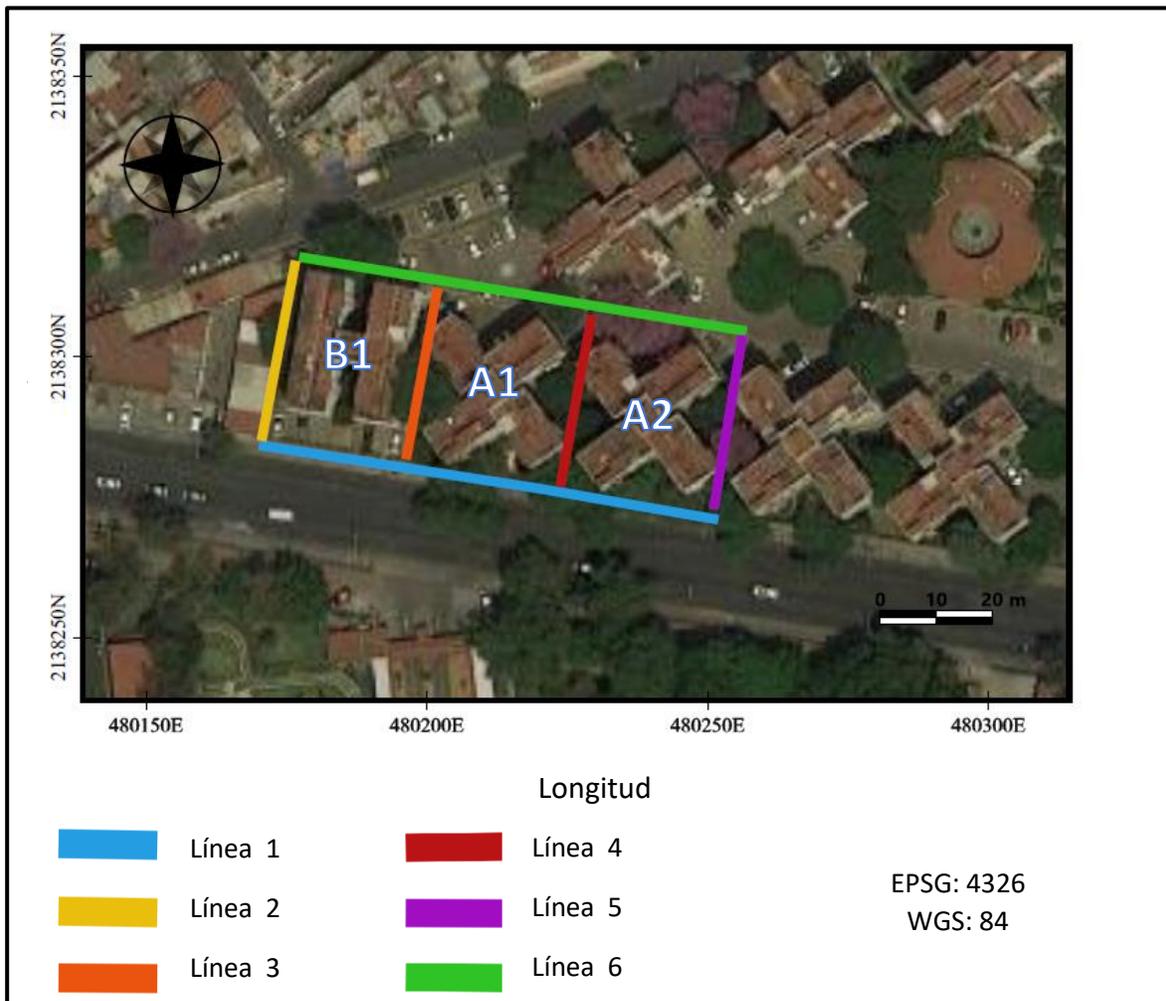
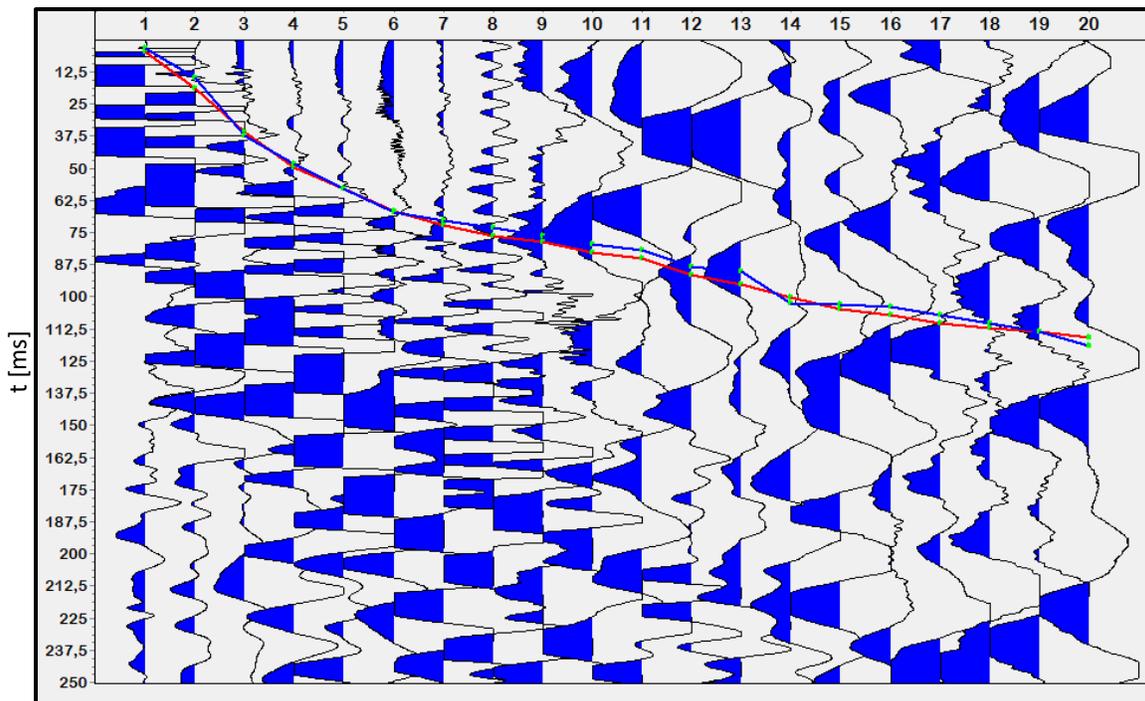


Figura 5.1: Ubicación espacial de las 6 líneas de sísmica de refracción realizadas.

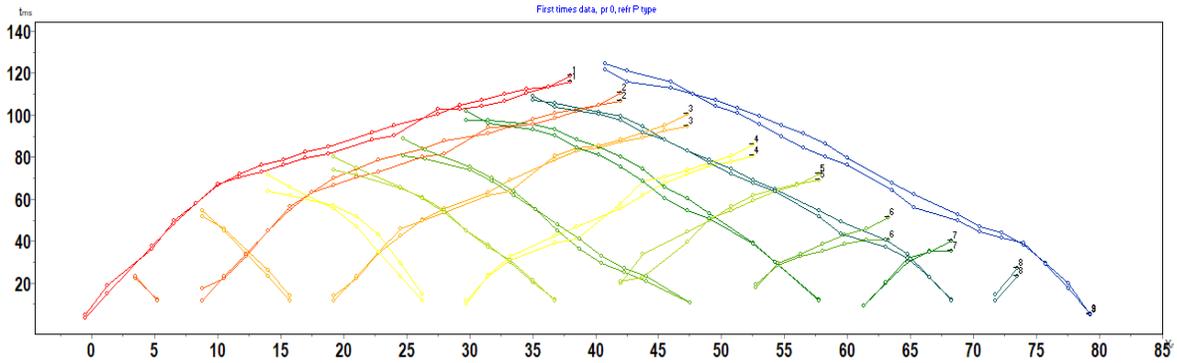
El estudio consistió en la toma de tendidos de refracción sísmica para 6 líneas (Figura 5.1), las cuales abarcaron los alrededores de los edificios de B1, A1 y A2. La distancia de las líneas 1 y 6 tiene un total de 80 m, con una orientación W-E. Para las líneas 2, 3, 4 y 5 se previó un largo de 34 m, con una orientación N-S. Mediante este método se logró prospectar una profundidad de hasta 20 m para las líneas 1 y 6, lo que cambia para las líneas 2, 3, 4 y 5, en las cuales se llegó a una profundidad de 14 m. Como resultado de este método se obtuvieron 6 secciones sísmicas, las cuales permiten interpretar litologías probables que se pueden correlacionar entre sí en términos de la velocidad compresional ( $V_p$ ) de los materiales.

En el procesamiento de los datos de sísmica de refracción se utilizó el programa ZondST2D. Fueron identificados los primeros arribos para cada una de las trazas de los sismogramas, tal como se ejemplifica en la figura 5.2.



**Figura 5.2:** Ejemplo de un sismograma (correspondiente a la línea 1) y la selección de los primeros arribos (puntos verdes) en milisegundos (eje y) para cada uno de los canales registrados (eje x). La línea roja corresponde al picado manual, y la azul al autopicado. Imagen generada en el programa ZondST2D.

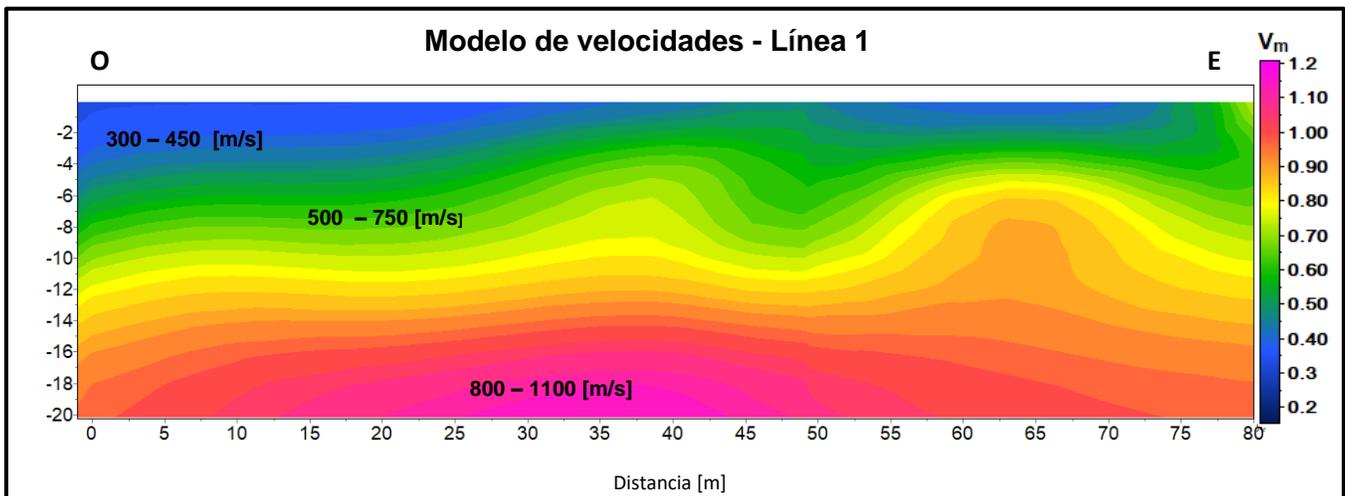
Los tiempos de arribo obtenidos de cada sismograma para las 6 líneas de refracción son ubicados en una misma gráfica (figura 5.3) contra la distancia correspondiente entre el punto disparo y los geófonos presentes, generando curvas de tiempo-distancia, con el fin de identificar cambios de pendiente (superficies refractoras). En la curva tiempo- distancia se les llaman domocronas al grupo de puntos pertenecientes.



**Figura 5.3: Ejemplo de una domocrona para los 9 disparos de la línea 1 a lo largo de los 80 m del tendido de sismica de refracción. Imagen generada en el programa ZondST2D.**

Al terminar el procesamiento de los datos se correlacionaron, con el propósito de poder evaluar y constituir un mejor modelo de velocidades para el suelo. El resultado del procesamiento de refracción sísmica arrojó los siguientes modelos de velocidades mostrados en las figuras 5.4– 5.9, de esa forma se realizó la correlación entre los modelos obtenidos, con el fin de verificar si hay correspondencia en las zonas de empalme.

Línea 1 (Figura 5.4): El tendido de la línea tiene un largo de 80 [m] y un espaciamiento entre geófonos de 3.5 [m]. Se puede observar que el modelo de velocidades arrojó lo que se puede identificar como tres estratos. El primer estrato con un intervalo de velocidad de 300 a 450 [m/s], el cual empieza con un espesor de 7 [m] y se va reduciendo hasta 2 [m]. El segundo se caracteriza con velocidades de 500 a 750 [m/s] y con un grosor que va de 6 a 12 [m], en el cual se infiere que el estrato es irregular. La última litología visible se identifica con velocidades de 750 a 1100 [m/s], es irregular y el espesor no se conoce.



**Figura 5.4: Línea 1 de refracción sísmica. Imagen generada en el programa ZondST2D.**

En comparación con la línea 1, en la línea 2 (junto con las 3, 4 y 5) se logró prospectar a menor profundidad, ya que el largo de esta es menor. Línea 2 (Figura 5.5): La distancia del tendedo fue de 34 [m], con un total de 18 geófonos equiespaciados a 2 [m], del cual se pudo obtener un modelo de velocidades con 13 [m] de profundidad aproximada. De la figura 5.5 se puede inferir un modelo de velocidades con dos estratos. El primer estrato cuenta con un intervalo de velocidades de 300 a 400 [m/s] cuyo /su grosor es variable, ya que va en promedio de 4 a 9 [m]. En el segundo estrato se obtuvieron velocidades de 500 a 750 [m/s], con un grosor visible de 5-9.

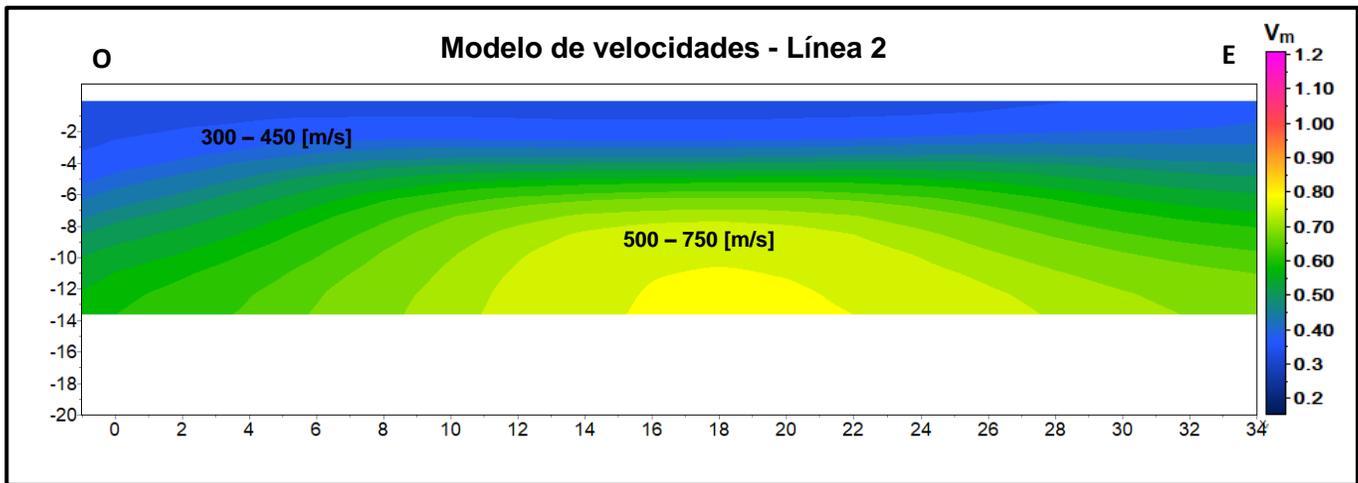


Figura 5.5: Línea 2 de refracción sísmica. . Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 3 (Figura 5.6): Las características del tendedo son las mismas que la línea 2 en cuanto a distancia, geófonos, espaciado y profundidad de alcance. Analizando la figura 5.6 se pueden identificar dos tipos de estratos. El primero posee velocidades de 300 a 350 [m/s], con un espesor promedio entre 2 y 7 [m]. Las velocidades del segundo van de los 450 a 650 [m/s], con un grosor de 5 y 10 [m]. Cabe señalar que el contacto entre los dos estratos tiene una forma irregular.

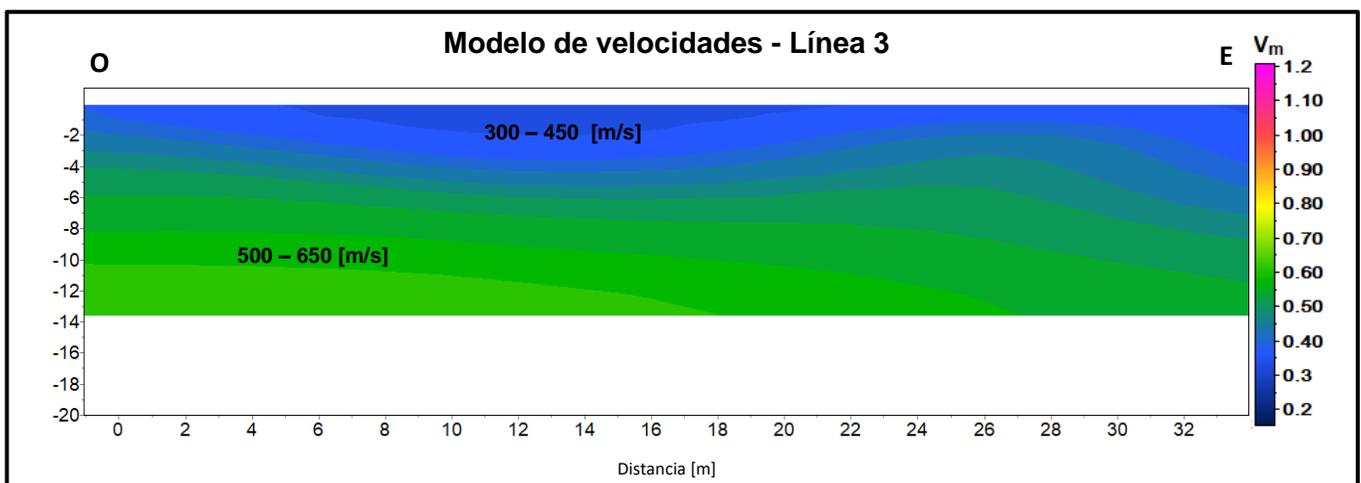


Figura 5.6: Línea 3 de refracción sísmica. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 4 (Figura 5.7): Las características del tendido son las mismas que la línea 2 en cuanto a distancia, geófonos, espaciado y profundidad de alcance. Se puede observar dos rangos de velocidades en la figura #, lo cual corresponde a dos diferentes litologías. El primero tiene velocidades entre los 300 y 400 [m/s], y una profundidad promedio de 4 [m]. En cuanto al rango de velocidad del segundo estrato tiene una velocidad de 470 a 750 [m/s], junto con una profundidad de 10 [m].

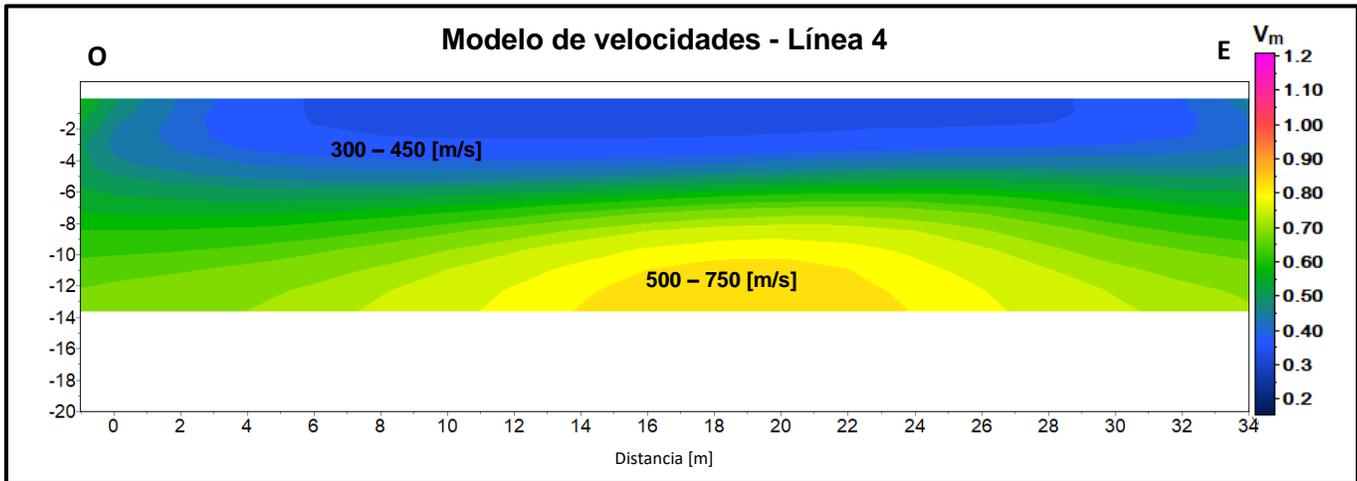


Figura 5.7: Línea 4 de refracción sísmica. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 5 (Figura 5.8): Las características del tendido son las mismas que la línea 2 en cuanto a distancia, geófonos, espaciado y profundidad de alcance. En su modelo de velocidades se identifican 2 diferentes estratos. El primero con velocidades de 300 a 400 [m/s] con una profundidad promedio de 5 [m]. Por otro lado, nuestro segundo estrato está caracterizado por una velocidad de 450 a 660 [m/s], con una profundidad de 6 a 13 [m]. El contacto entre los dos estratos es irregular.

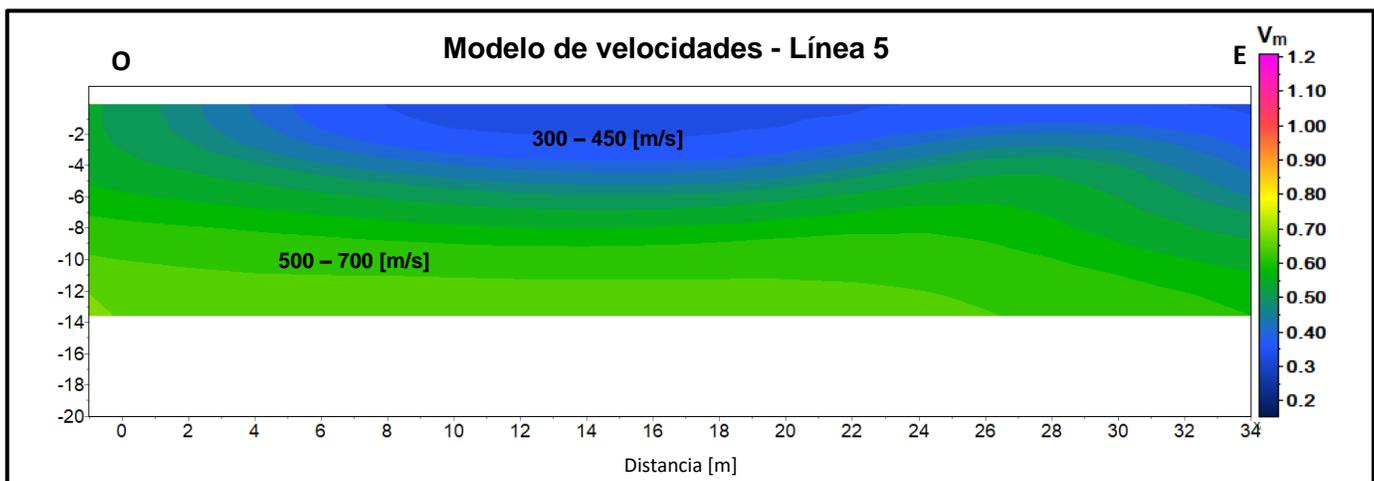


Figura 5.8: Línea 5 de refracción sísmica. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 6 (Figura 5.9): Las características del tendido son las mismas que la línea 2 en cuanto a distancia, geófonos, espaciado y profundidad de alcance. Se observan tres rangos de velocidades, lo cual infiere a 3 estratos de diferente litología. El primer estrato tiene velocidades de 300 a 400 [m/s] con un grosor entre 1 y 6 [m]. El rango de velocidades en el segundo estrato va de 450 a 750 [m/s], con un grosor irregular de 4 a 11 [m]. Para el último estrato presenta velocidades 750 a 1100 [m/s]. Se observa que el contacto entre los tres estratos descritos anteriormente es irregular.

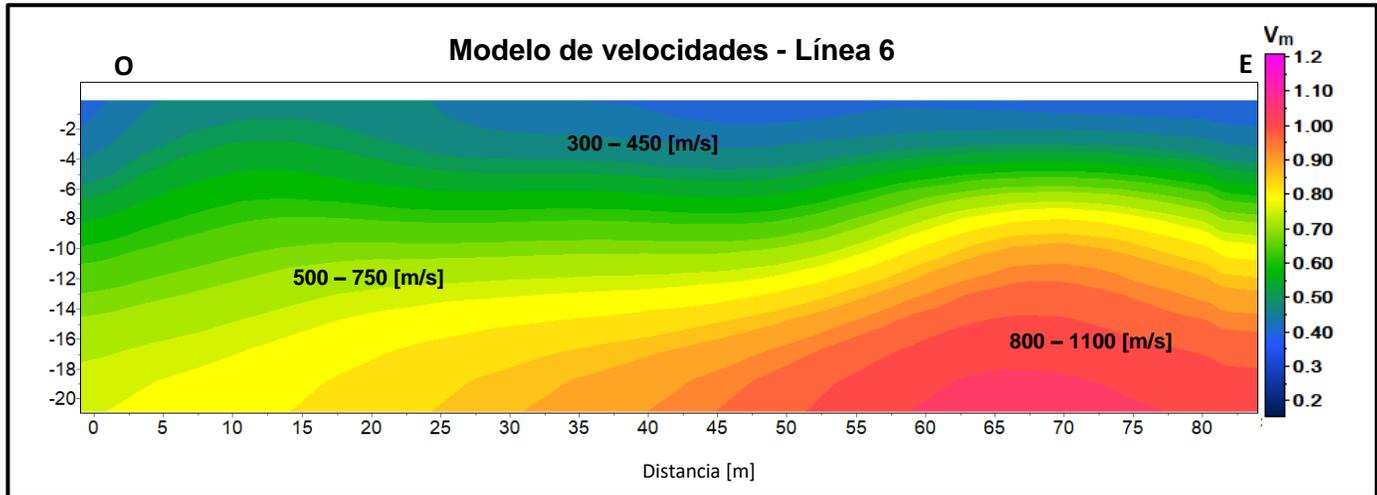


Figura 5.9: Línea 6 de refracción sísmica. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Se resume en la tabla 5.1 las velocidades de los estratos identificados en el estudio.

Tabla 5.1: Velocidad de onda P por línea [m/s]

Estrato	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
1	300-450	300-450	300-450	300-450	300-450	300-450
2	500-750	500-750	500-650	500-750	500-700	500-750
3	800-1100					800-1100

En la tabla 5.2 se resume el rango de espesores inferidos de las secciones sísmicas.

Tabla 5.2: Espesor de estrato por línea [m]

Estrato	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
1	7	4-9	2-7	4	5	1-6
2	6-12	5-11	5-10	10	6-13	4-11
3	7-16					2-13

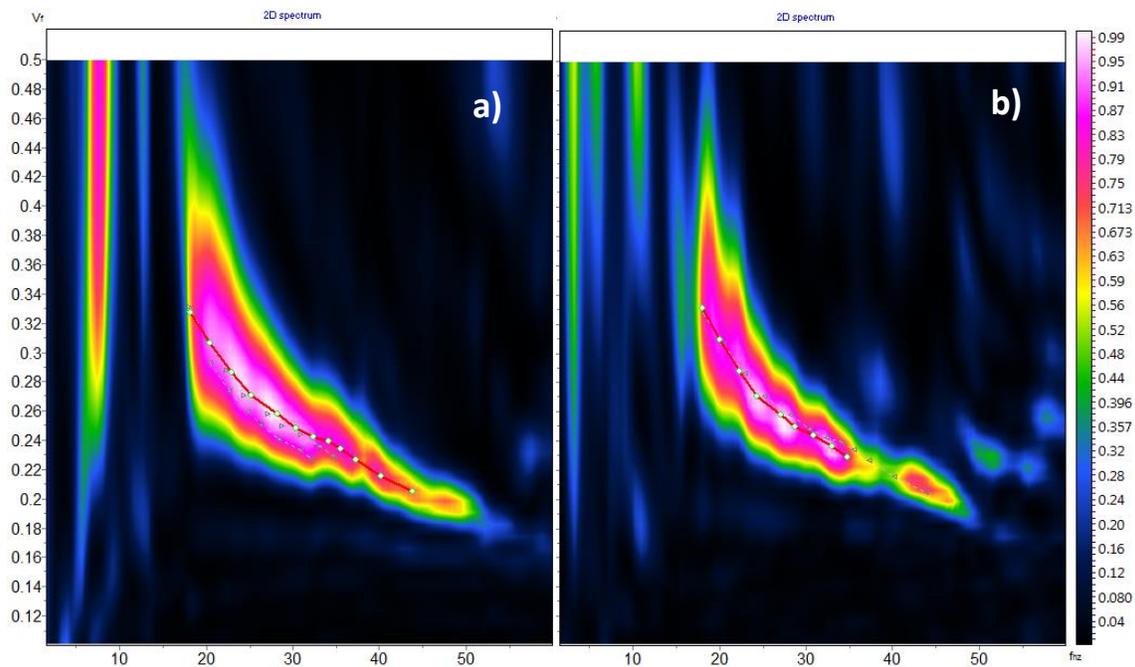
## 5.2 Análisis Espectral de Ondas Superficiales (1D)

El fundamento principal de esta técnica se basa en las propiedades dispersivas de las ondas Rayleigh, las cuales dependen de la frecuencia al viajar a través de un medio. La dispersión de ondas Rayleigh se debe a que diferentes longitudes de onda son propagadas a diferentes profundidades del suelo, de esta forma mientras más grande sea el valor de la longitud de onda, mayor será la profundidad de penetración de las ondas y con esto se obtendrán velocidades de onda a mayor profundidad.

En un suelo estratificado la velocidad de fase (rapidez de una onda plana) dependerá de la rapidez con la que cambia la frecuencia en cada estrato, por lo que la velocidad será determinada mediante un análisis de variaciones de frecuencias.

Se le llamará curva de dispersión al gráfico que se realice de la velocidad de fase de ondas Rayleigh en función de la longitud de onda o la frecuencia. Cuando se realiza la inversión de curva de dispersión (figura 5.10) de la velocidad de fase de ondas Rayleigh de los datos que fueron adquiridos, se podrá obtener perfiles de velocidades de onda de corte ( $V_s$ ) del sitio (Xia et al., 1999).

En el análisis espectral de ondas superficiales para valores de frecuencia bajos corresponderá a capas/estratos con más profundidad, por otro lado, si se tiene valores altos de frecuencia, la velocidad de fase corresponderá a capas más superficiales (Strobbia, 2003).



**Figura 5.10: Ejemplificación de curvas de dispersión obtenidas para la línea 3. a) Curva de dispersión del disparo 6. b) Curva de dispersión del disparo 7. Imagen generada en el programa ZondST2D.**

El estudio de Análisis Espectral de Ondas Superficiales 1D fue realizado para las 6 líneas de refracción, las cuales presentan perfiles unidimensionales presentados en las figuras 5.11 – 5.16. En las imágenes se pueden observar tres estratos principales, los cuales se describirán por sección. Debido a que este método es puntual los resultados son variables por sección, ya que no se cuenta con una inversión de nuestros datos hacia los laterales.

Línea 1 (Figura 5.11): En esta sección se presentan 3 estratos. El primer estrato presenta velocidades de 190 m/s a 280 m/s, con una profundidad aproximada de 4 m. La segunda capa presenta velocidades de 280 m/s a 540 m/s con un grosor aproximado de 2.5 m. En la última capa visible por el método se cuenta con velocidades entre los 550 m/s y 1100 m/s aproximadamente, con un grosor de 13.5 m.

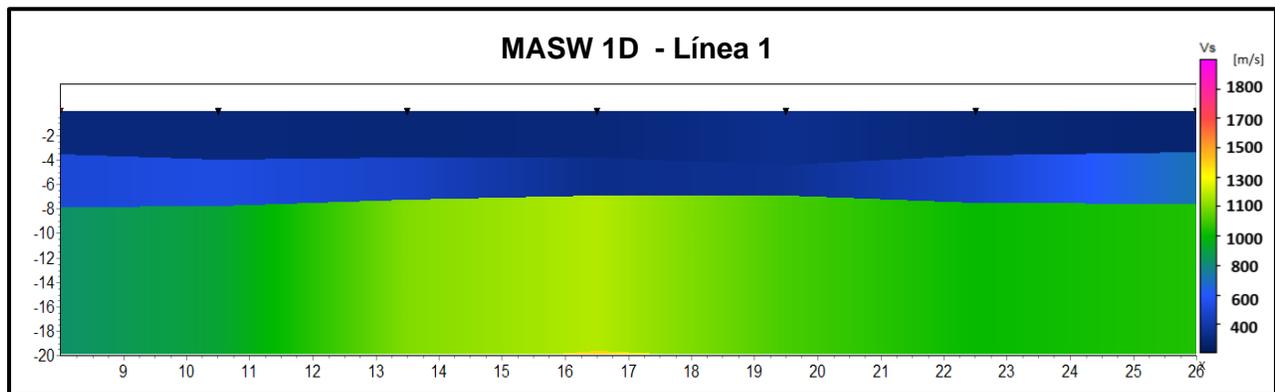


Figura 5.11: Línea 1 de MASW. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 2 (Figura 5.12): La primera capa posee velocidades entre 200 m/s y 350 m/s con un grosor de 5 m aproximadamente. No se perciben cambios bruscos de altura entre puntos de estudio, por lo tanto podría tratarse de un estrato plano. La segunda capa se caracteriza con velocidades de 400 m/s y 800 m/s con un grosor promedio de 2 m. Estableciendo las velocidades para nuestra tercera capa nos arroja un rango entre 820 m/s y 1200 m/s, con un grosor aparente de 12 m. La segunda y tercera capa tiene más cambios de pendiente hasta donde se puede percibir, por lo que se consideraría medianamente irregulares.

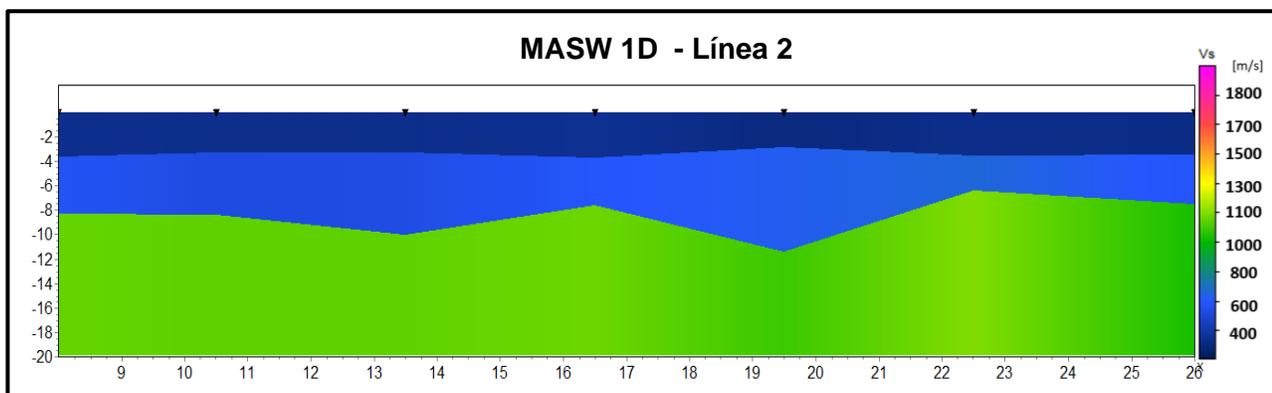


Figura 5.12: Línea 2 de MASW. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 3 (Figura 5.13): El primer estrato presenta velocidades de 200 m/s a 260 m/s, con una profundidad de entre 4.5 m a lo largo de este. El segundo estrato, como se puede observar en la imagen tiene un espesor menos uniforme a lo largo de nuestra línea de estudio con un valor como máximo de 1.5 m, su rango de velocidades está dentro de los 380 m/s y 750 m/s. El tercer y último estrato presenta velocidades de 790 m/s y 1100 m/s, con un espesor aparente de 14 m.

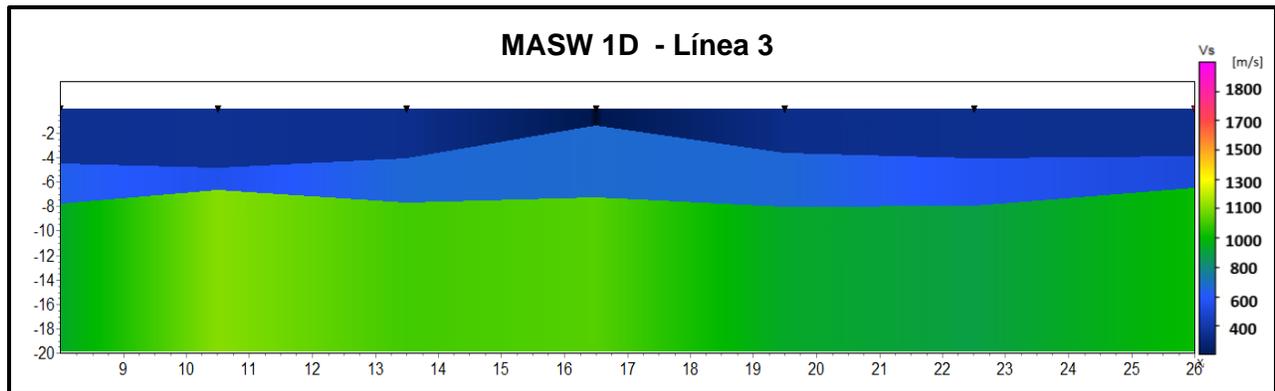


Figura 5.13: Línea 3 de MASW. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 4 (Figura 5.14): Aparentemente nuestros 3 posibles estratos son paralelos entre sí, ya que no cuentan con diferencias de gran percepción en cuanto a profundidad. La primera capa posee velocidades entre los 180 m/s y 350 m/s, con un espesor de 3 m. La segunda capa de manera similar en las anteriores figuras, su velocidad ronda en los 400 m/s y 750 m/s, el espesor se infiere de 4 m. En el tercer estrato tenemos velocidades características de 800 m/s y 1100 m/s, con un espesor parcial de 12 m.

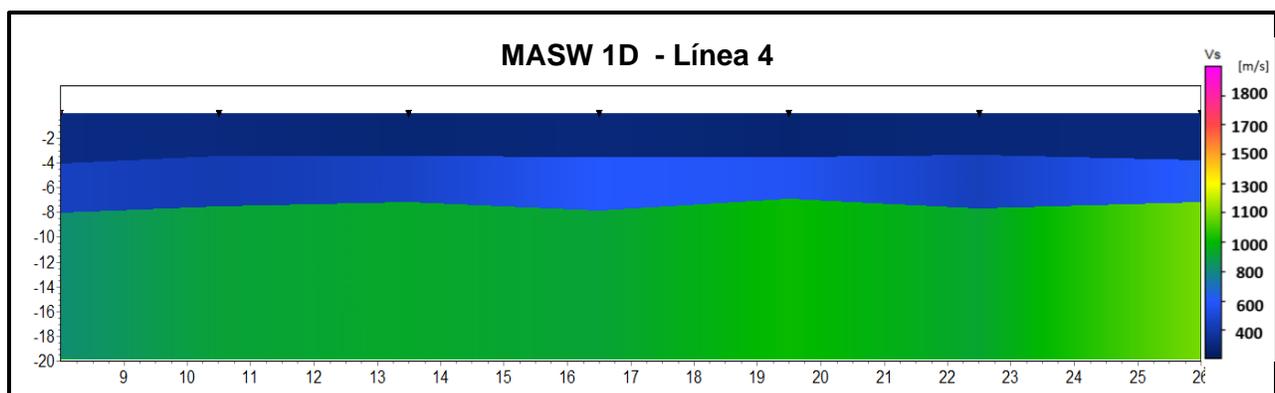


Figura 5.14: Línea 4 de MASW. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 5 (Figura 5.15): En esta línea se observan estratos paralelos, sin embargo, hay que recordar que este método MASW 1D presenta datos de manera puntual. El primer estrato cuenta con velocidades de 180 m/s a 300 m/s, la profundidad aproximada de este es de 3 m. En el segundo estrato se perciben velocidades de 340 m/s a 750 m/s, con un grosor inferido de 3 m. En cuanto al tercer estrato se identificaron velocidades de 780 m/s a los 1000 m/s, con un grosor aparente de 12 m.

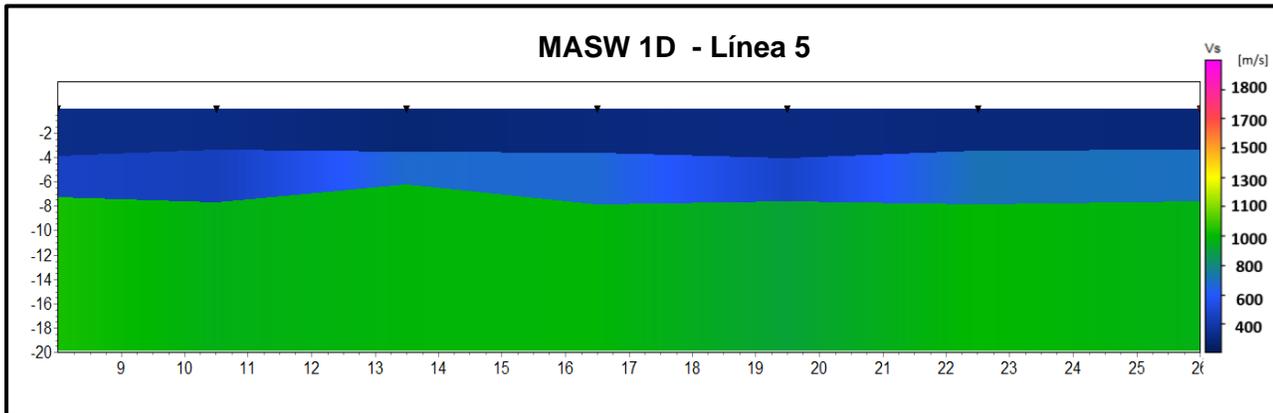


Figura 5.15: Línea 5 de MASW. Imagen generada en el programa ZondST2D.

Línea 6 (Figura 5.16): Para esta última línea el primer estrato posee un rango de velocidades entre los 180 m/s y 250 m/s, con un espesor inferido entre los 4 m. La segunda capa de nuestra imagen presenta velocidades entre los 300 m/s y 700 m/s, y un grosor de estrato de 2 m. Por último, nuestro estrato último se caracteriza con velocidades de 730 m/s y 1100 m/s como máximo, con un espesor visible de 13 m en promedio.

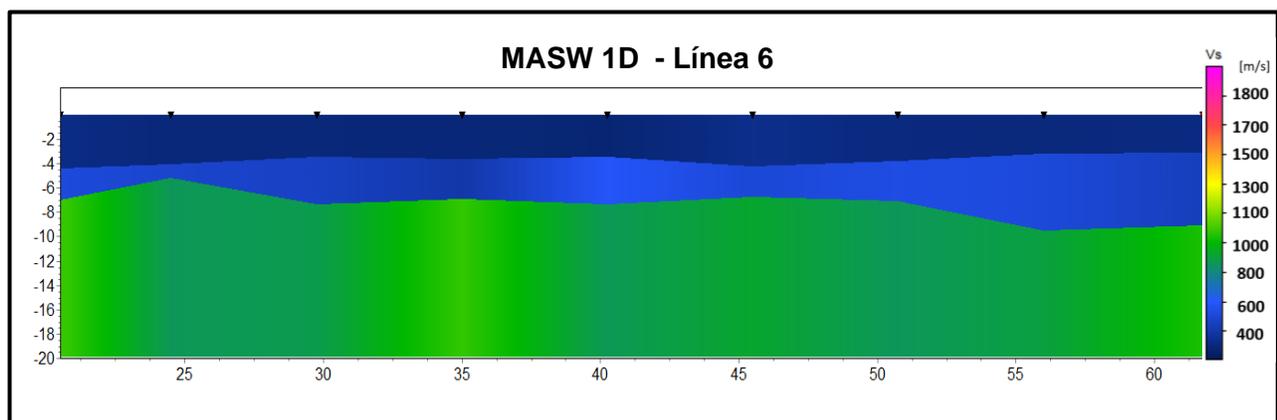


Figura 5.16: Línea 6 de MASW. Imagen generada en el programa ZondST2D.

A continuación se resume en la tabla 5.3 las velocidades de onda S identificadas en el estudio, para una mejor comparación entre cada una, así como en la 5.4 el grosor de estrato por línea.

*Tabla 5.3: Velocidad de onda S por línea [m/s]*

<i>Estrato</i>	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
1	190-280	200-300	200-260	180-350	180-300	180-250
2	280-540	400-800	380-750	400-750	340-750	300-700
3	550-1100	820-1200	790-1100	800-1100	780-1000	730-100

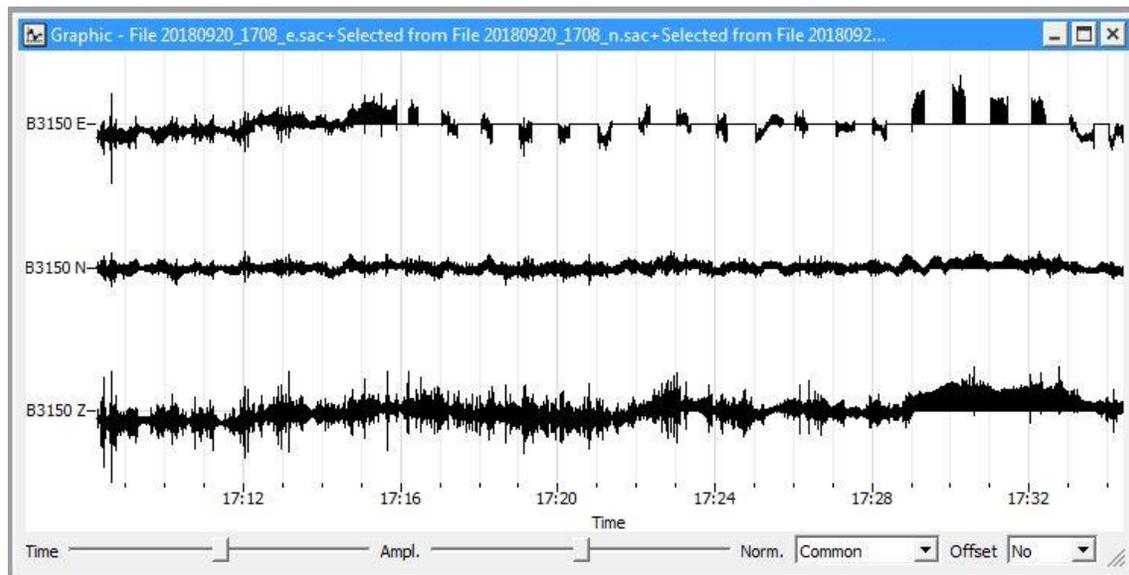
*Tabla 5.4: Grosor de estrato por línea [m]*

<i>Estrato</i>	Línea 1	Línea 2	Línea 3	Línea 4	Línea 5	Línea 6
1	4	5	4.5	3	3	4
2	2.5	2	1.5	4	3	2
3	13.5	12	14	12	12	13

### 5.3 Cocientes espectrales H/V

Para procesar las señales se utilizó el programa Geopsy (Wathelet, 2020), ya que es una herramienta muy versátil para el procesamiento y análisis de datos de ruido, además de presentar una interfaz accesible y sencilla para el manejo de los datos (Lezana, 2014).

En la figura 5.17 se observa el gráfico que se obtiene en Geopsy® de las tres componentes en un punto de registro de este proyecto, en el cual se identifica como B3150 E a la señal correspondiente a la componente Este-Oeste, B3150 N para la Norte-Sur y por último, B3150 Z para la componente vertical.



**Figura 5.17: Ejemplificación del gráfico de las tres señales utilizadas para obtener el coeficiente H/V.**

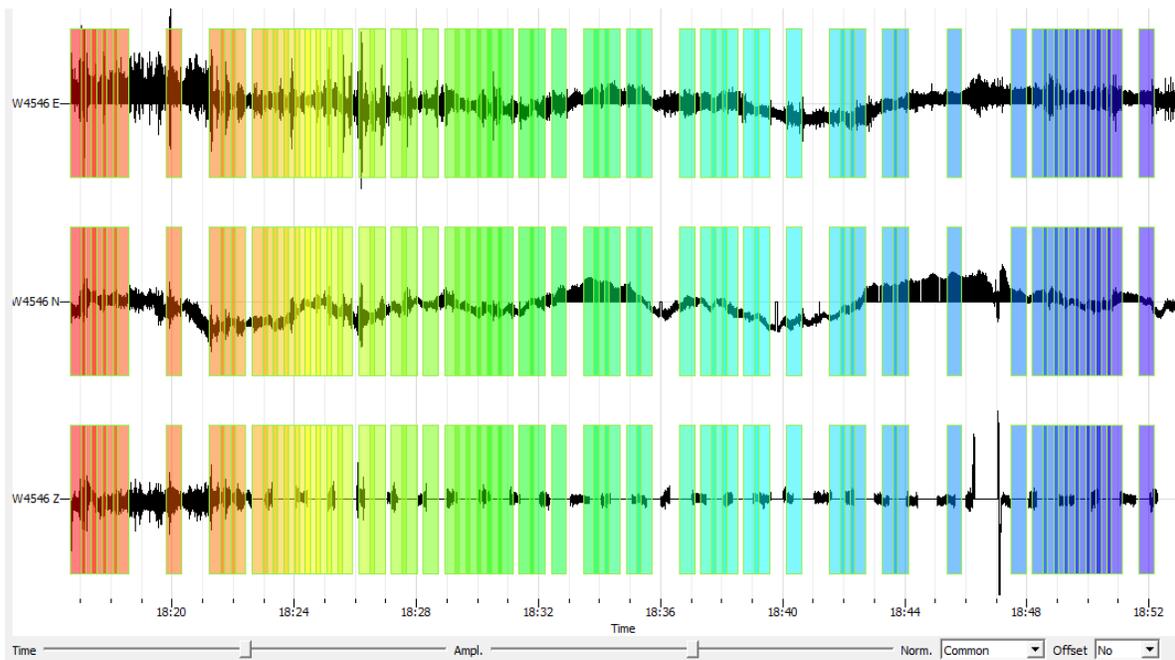
Al tener las señales correctamente cargadas e identificadas dentro del programa Geopsy®, se procedió a realizar la determinación de las ventanas a utilizar, ya que por medio de estas se calcularán espectros y posteriormente razones espectrales. El término ventana se define como el producto de cierta parte de la señal con una función (suave y nula en los extremos), de esta manera se evita que aparezcan frecuencias altas, debido al comienzo y corte de medición de la señal. El programa cuenta con varias herramientas de análisis, entre ellas: elección de longitud de ventanas de tiempo, elección de suavizado de la gráfica, intervalo de frecuencia de muestreo, tipo de ventana, entre otras.

La frecuencia de muestreo y el porcentaje de empalme de las ventanas para este caso fue de una longitud de 30 segundos con un 30% de traslape de duración total entre ellas. Al tener definidas las ventanas algunas fueron eliminadas de la muestra a procesar, ya que en ellas se presentaban eventos de tipo accidentales.

En la tabla 5.5 se presentan los parámetros ingresados para el desempeño de esta técnica, y el valor que toma cada uno de ellos. En la figura 6.18 se muestran las ventanas seleccionadas para los registros, los cuales tienen un intervalo de duración de 17 a 35 minutos, dependiendo del cual se elija.

*Tabla 5.5: Criterios ingresados en la selección de ventanas*

<i>Parámetro</i>	<i>Valor</i>
<i>Largo de ventana</i>	30 [s]
<i>Frecuencia de muestreo</i>	2 a 20 [Hz]
<i>Tipo de suavizado</i>	Konno & Ohmanchi
<i>Constante de suavizado</i>	40
<i>Tipo de ventana</i>	Tukey



**Figura 5.18: Ventanas seleccionadas para el registro desde las 17:16 hrs a las 18:52 hrs. Cada color representa una ventana de 30 s.**

En la técnica del cociente espectral H/V se tomaron un total de 10 registros de ruido sísmico en dos campañas (6 en la primera y 4 en la segunda), para estimar la respuesta del suelo de la unidad. En la figura 5.19 se observa la localización espacial de los registros de la primera campaña, los cuales se muestran en verde. Estos tienen una duración de 13 a 36 min, dependiendo del caso.

### Puntos de ruido sísmico



**Figura 5.19: Localización de las estaciones para registro de vibración ambiental. Color verde: tomadas a nivel de piso. Color azul: tomadas en la azotea del edificio B1.**

En las figuras 5.20 a la 5.25 se presentan los cocientes espectrales obtenidos para los seis puntos de medición, en las cuales se indica en el eje “x”, el valor de la frecuencia dominante del suelo (Hz – escala logarítmica), y en el eje “y” la relación adimensional H/V. Las líneas de colores en el gráfico son el equivalente de cada una de las ventanas producidas para la estimación del cociente H/V; el promedio de las ventanas que fueron procesadas se indica con la línea continua y las líneas punteadas indican el máximo y mínimo respectivamente de su desviación estándar. Las franjas verticales color gris indican la frecuencia donde ocurre el máximo del cociente H/V, así como el valor de este resaltado en amarillo.

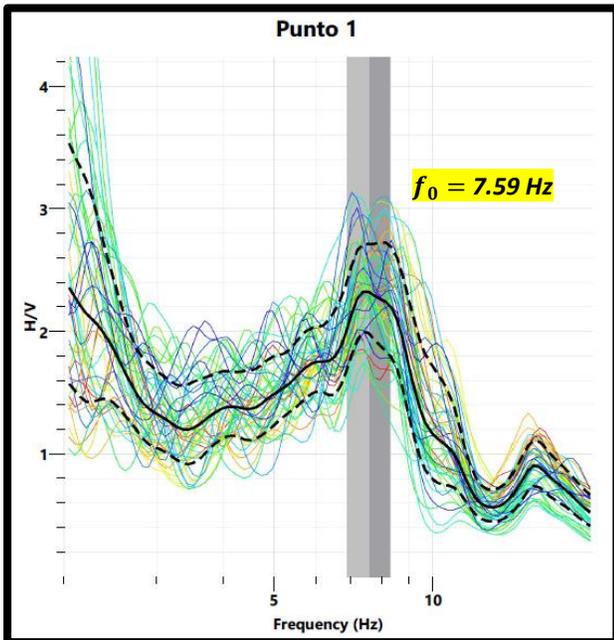


Figura 5.20: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A01 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.19.

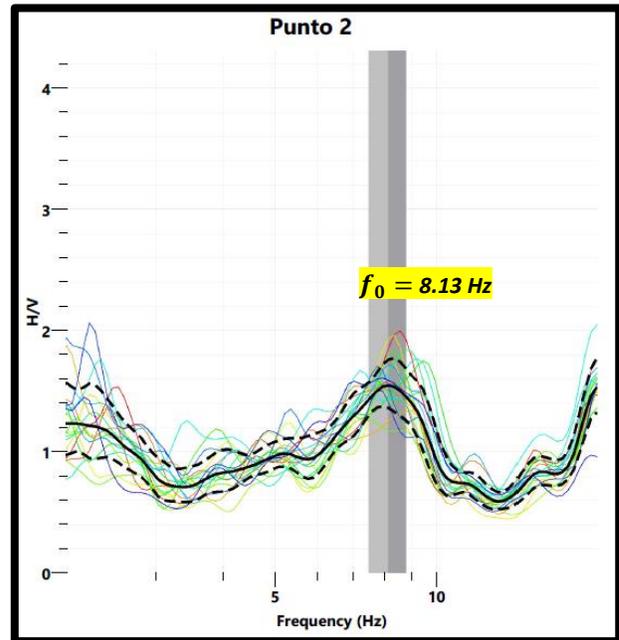


Figura 5.21: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A02 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.19.

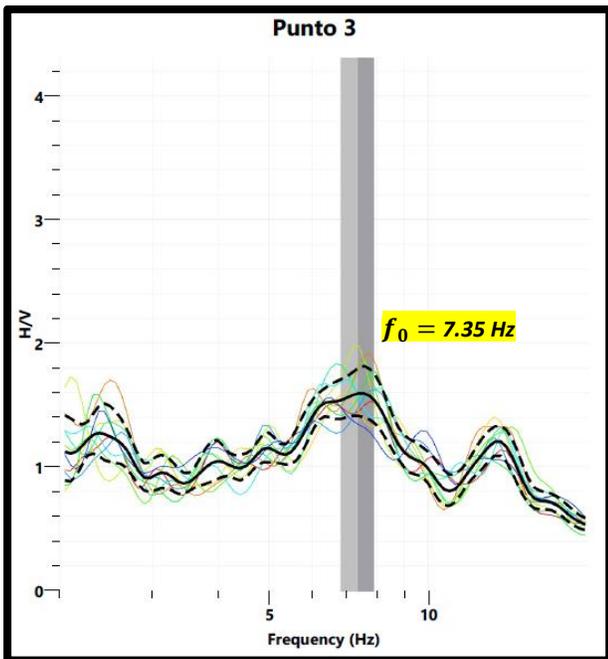


Figura 5.22: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A03 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.19.

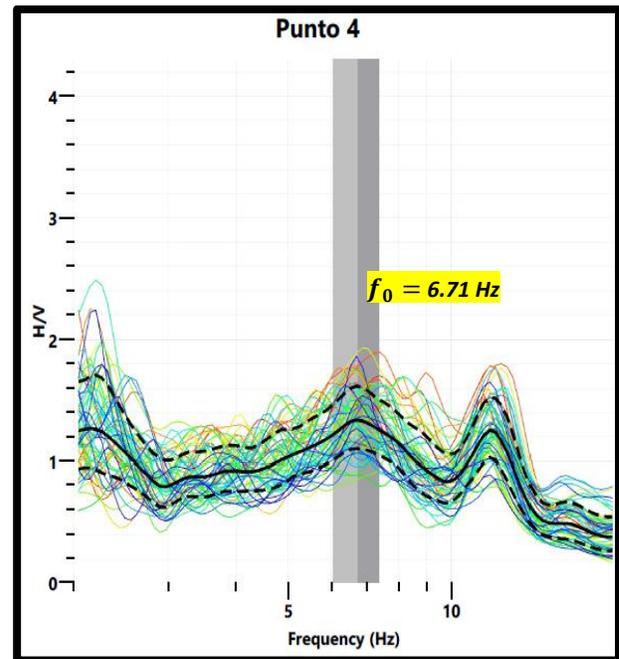


Figura 5.23: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A04 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.19.

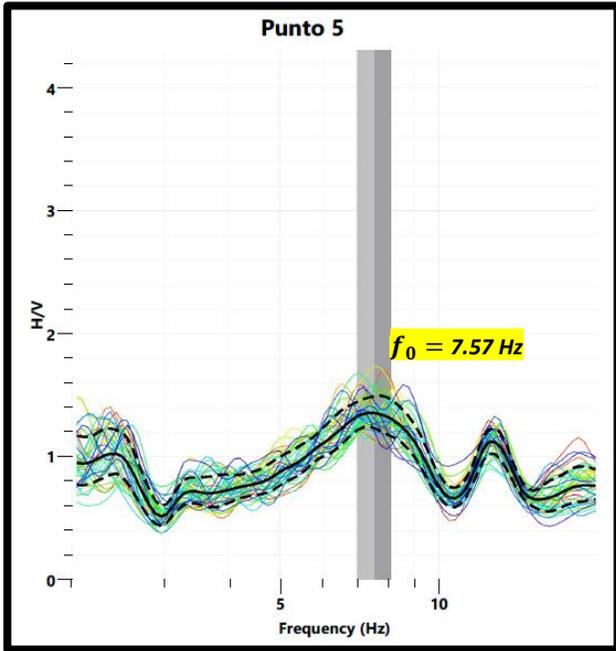


Figura 5.24: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A05 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.19.

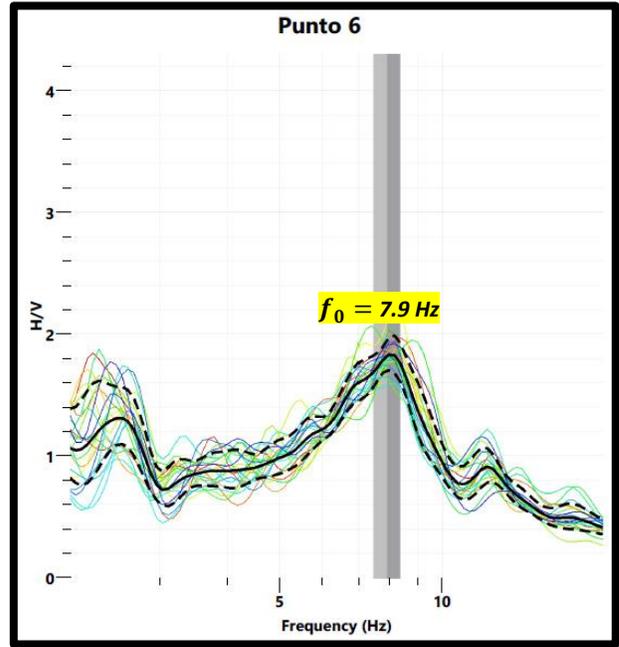


Figura 5.25: Gráfico resultante para el método H/V en el punto A06 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.19.

Posteriormente en una segunda campaña se realizaron cuatro mediciones más de vibración ambiental, en los sitios que se muestran en la figura 5.26.



Figura 5.26: Localización de las estaciones de la segunda campaña para registro de vibración ambiental (puntos color rosa).

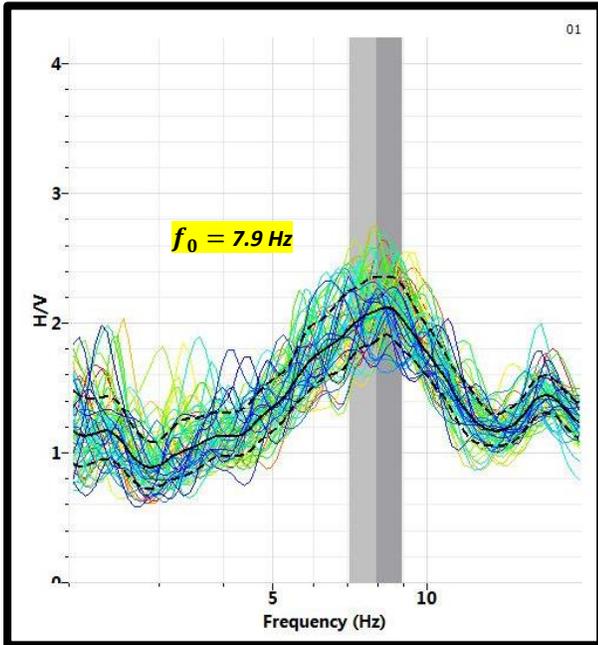


Figura 5.27: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B01 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.26.

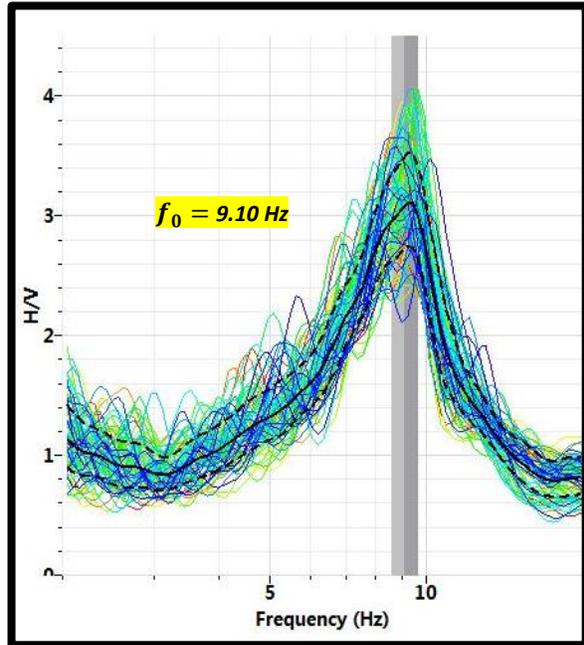


Figura 5.28: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B02 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.26.

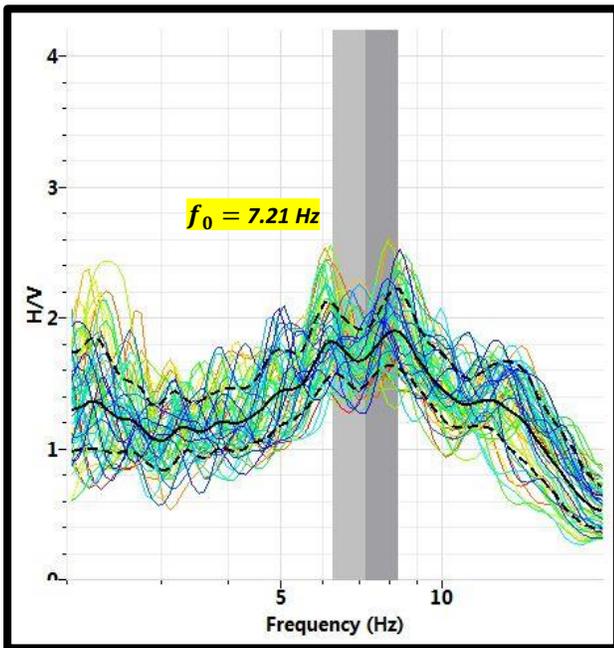


Figura 5.29: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B03 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.26.

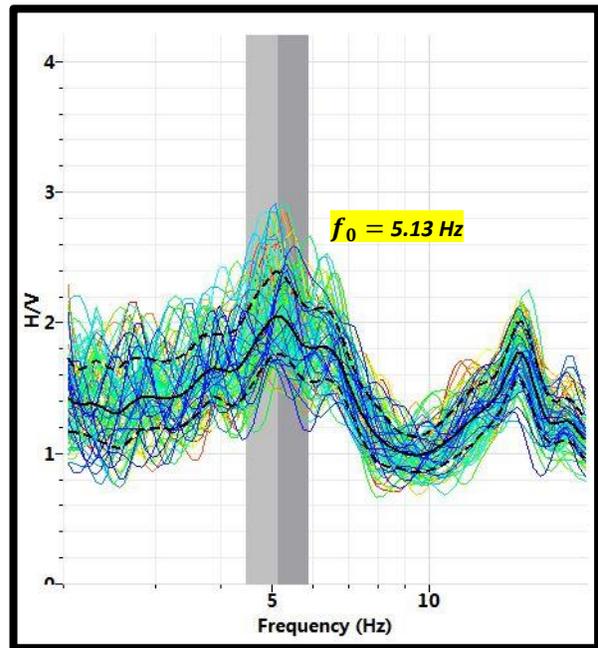


Figura 5.30: Gráfico resultante para el método H/V en el punto B04 de nuestro estudio ubicado en la figura 5.26.

En la tabla 5.6 se muestra las frecuencias dominantes obtenidas para los seis puntos de registro realizados en la primera campaña (identificada con la letra A), y en la tabla 5.7 los obtenidos para los cuatro puntos de registro en la segunda campaña (letra B).

*Tabla 5.6: Frecuencias resultantes (primera campaña)*

Punto	A01	A02	A03	A04	A05	A06
Frecuencia (Hz)	7.59	8.13	7.35	6.71	7.57	7.9

*Tabla 5.7: Frecuencias resultantes (segunda campaña)*

Punto	B01	B02	B03	B04
Amplitud	7.9	9.10	7.21	5.13



**Figura 31: Mapa de frecuencias dominantes obtenidas para todos los puntos de vibración ambiental**

En la tabla 5.8 se muestran las amplitudes obtenidas para los seis puntos de registro realizados en la primera campaña (identificada con la letra A), y en la tabla 5.9 los obtenidos para los cuatro puntos de registro en la segunda campaña (identificada con la letra B).

*Tabla 5.8: Amplitudes resultantes (primera campaña)*

Punto	A01	A02	A03	A04	A05	A06
Amplitud	2-3	1-2	1-2	1-2	1-2	1-2

*Tabla 5.9: Amplitudes resultantes (segunda campaña)*

Punto	B01	B02	B03	B04
Amplitud	2	2-3	2	2

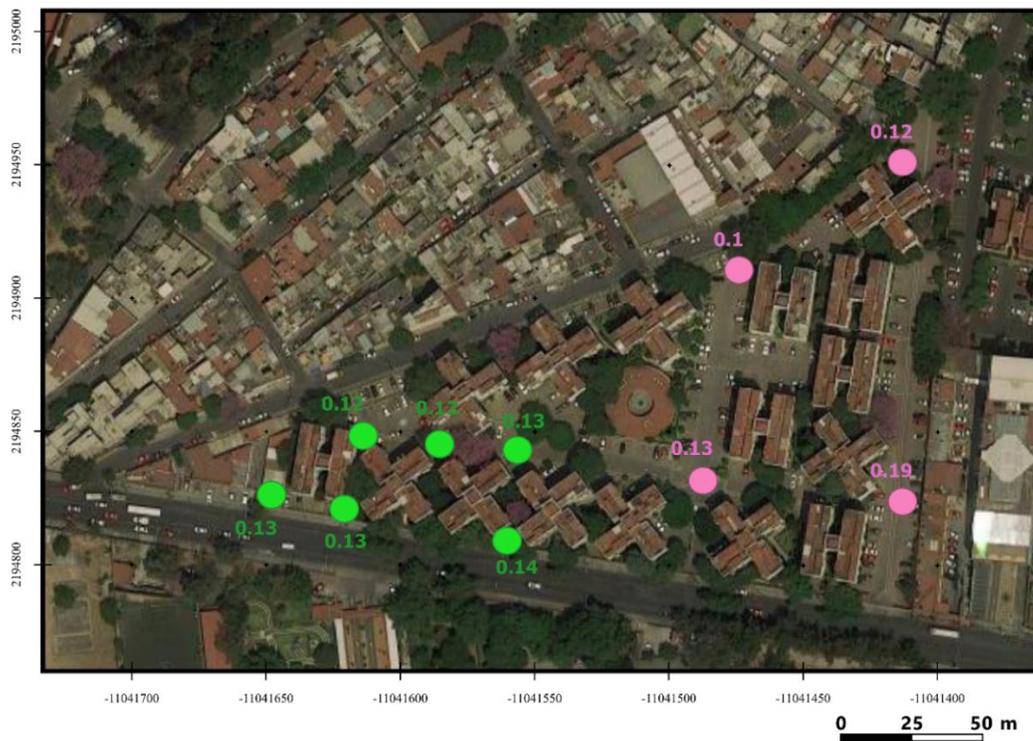
Como se puede observar en las imágenes, estas presentan picos marcados, por lo cual se inferiría la presencia de un suelo muy suave, esto a diferencia de que si se tuviera un gráfico plano, el cual corresponde a la existencia de basamentos o suelos rígidos en superficie (Bonney-Claudet et al, 2009). La frecuencia característica del sitio varía entre 6.71 y 8.13 lo cual nos permite confirmar la existencia de una capa delgada superficial de suelo suave, así como se mostró en las imágenes de refracción sísmica (Figuras 5.4 a la 5.9). En la tabla 5.10 y 5.11 se muestran los resultados de los periodos característicos para los 10 puntos estudiados (los cuales fueron obtenidos con la técnica H/V).

*Tabla 5.10: Periodo fundamental de suelo (primera campaña)*

Punto	A01	A02	A03	A04	A05	A06
$T_0$ [s]	0.13	0.12	0.13	0.14	0.13	0.12

*Tabla 5.11: Periodo fundamental de suelo (segunda campaña)*

Punto	B01	B02	B03	B04
$T_0$ [s]	0.12	0.1	0.13	0.19



**Figura 5.32: Mapa de periodos fundamentales obtenidos para todos los puntos de vibración ambiental**

El espesor (H) de la capa más superficial del suelo puede darse valor con este método, mediante el despeje de la fórmula 5.1, donde  $V_s$  es la velocidad de onda "S" o de corte, y  $T_0$  el periodo fundamental [s] (Kanai y Yoshizawa, 1956).

$$T_0 = \frac{4H}{V_s} \text{ -Fórmula 5.1} \quad H = \frac{T_0 V_s}{4} \text{ - Fórmula 5.2}$$

De esta forma, utilizando la fórmula (5.2) ya despejada, y tomando los valores obtenidos mediante la técnica MASW de onda de corte, se presentan (Tabla) los siguientes valores en el espesor de la capa más superficial del suelo, para cada punto de la técnica H/V.

Se presentan en la tabla # los espesores de la primera campaña de medición.

*Tabla 5.12: Espesores resultantes (primera campaña)*

<i>Punto</i>	A01	A02	A03	A04	A05	A06
<i>H [m]</i>	14.6	13.5	14.6	15.7	14.6	13.5

*Tabla 5.13: Espesores resultantes (segunda campaña)*

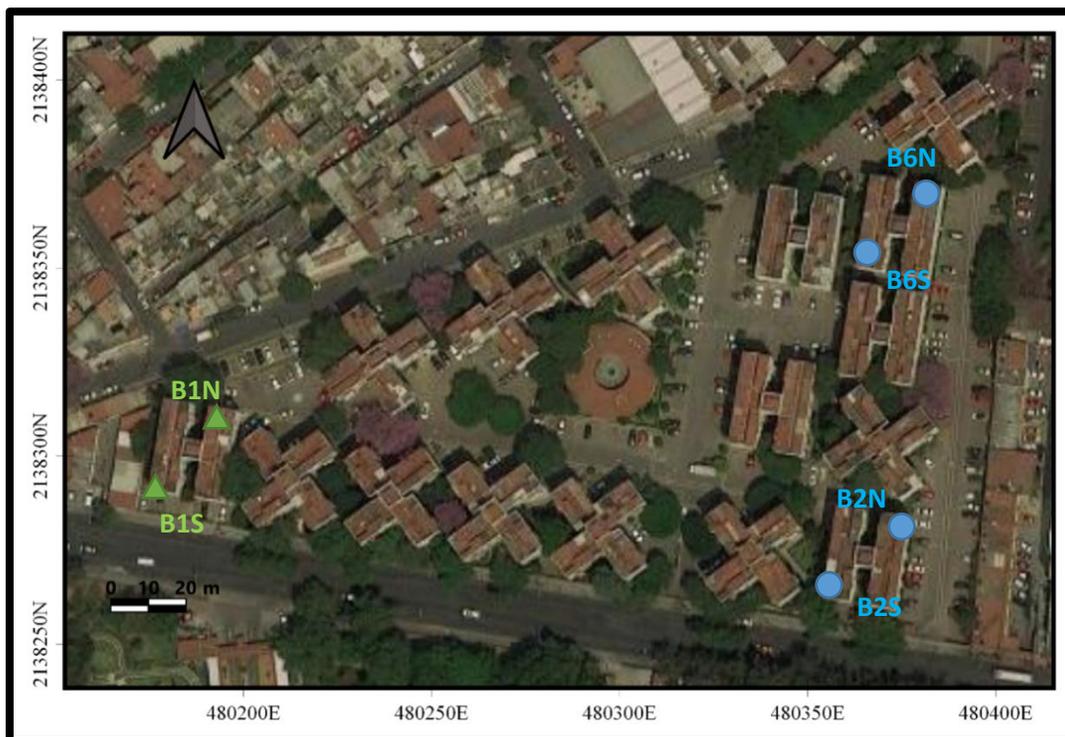
<i>Punto</i>	B01	B02	B03	B04
<i>H [m]</i>	13.5	11.2	14.6	21.37

Comparando los espesores obtenidos de los datos de vibración ambiental mediante la fórmula 5.2 con los espesores resultantes en la tabla 5.4 de la inversión por el método MASW, se puede determinar que se concuerda la profundidad del estrato superficial con mayor dureza.

## 5.4 Espectro de Fourier

Para el análisis de la respuesta dinámica de la estructura y sus entrepisos se aplicó la técnica conocida como “Espectro de amplitud de Fourier”, utilizando las componentes horizontales (Norte-Sur) y transversal (Este-Oeste). Para esto se adquirieron medidas de vibración ambiental en la azotea del edificio en cuestión (B1), y con el objetivo de realizar una comparativa de resultados, se registraron datos de vibración ambiental en la azotea de otros dos edificios con forma geométrica similar (forma de H), asumiendo que fueron construidos con el mismo diseño estructural, por lo tanto, los parámetros deberán ser similares. De esa forma observar si efectivamente hubo o no cambios en su respuesta dinámica debido al sismo del 2017.

La primera campaña tuvo como objetivo el edificio B1, posteriormente en una segunda campaña se realizó la toma de datos de los edificios de referencia B2 y B6, como se muestra en la figura 5.33.



**Figura 5.33: Localización de la toma de datos de ruido ambiental. Color verde: edificio de estudio B1, parte norte (B1N) y sur (B1S). Color azul: edificios de referencia B2 y B6 (color azul).**

Antes de la adquisición se verificó que las dos componentes del sensor del equipo estuvieran bien orientadas respectivamente, es decir: la componente Norte-Sur (N-S) orientada en la dirección longitudinal (L – lado más largo de la torre) del edificio B1, y la componente Este-Oeste (E-W) orientada en la dirección transversal (T- lado más corto de la torre).

En las figuras 5.34 a 5.39 se muestran los espectros de amplitud obtenidos para los tres edificios en forma de H. Las figuras 5.34 y 5.35 corresponden a la estructura de estudio “B1”, la cual, según los habitantes, la vibración natural a partir del sismo del 2017 se ha visto incrementada. La línea azul continua corresponde a datos adquiridos en la parte norte de la azotea del edificio, y la línea verde discontinua corresponde a la parte sur.

En la figura 5.34 se observa (en dirección L del edificio B1) una frecuencia de 2.5 Hz como modo fundamental de vibrar. En la dirección T de nuestra figura 5.35 se pueden identificar dos picos, lo que nos indica el primer y segundo modo de vibración, la primera con una frecuencia de 2.7 Hz y la segunda de 4.2 Hz.

En general se observan diferencias en el edificio B1 en cuanto a posición de frecuencias y amplitud comparando los espectros de Fourier con los edificios que fueron analizados sin antecedentes o reportes de daños post-sismo (B2 y B6).

En la dirección longitudinal se observa que la amplitud para los 3 edificios de medición es prácticamente igual y a la misma frecuencia, lo que nos permite saber que los 3 edificios (B1, B2 y B6) fueron diseñados idénticamente.

En un principio se pensó que el segundo pico de los resultados en T del edificio B1 se debía a vibraciones anormales (debilidad) en los entrepisos. Sin embargo, se descartó esta teoría al comparar los espectros con los edificios de la segunda etapa B2 y B6 debido a que el pico es propio de la forma (diseño) estructural.

En cuanto a amplitud, no hay variación en la dirección longitudinal del edificio de estudio (B1), sin embargo, en la dirección transversal se puede observar que ha cambiado en la parte sur comparando con la norte, aumentando su valor en amplitud, lo cual se considera para este caso anormal, debido a que al comparar este espectro en el edificio B1 con los otros B2 y B6, la amplitud para la sección transversal norte y sur debería empalmarse, es decir, tener el mismo valor, lo cual no sucede.

El cambio en amplitud está atribuido a cambios de amortiguación del edificio B1 en su parte sur, ya que valores altos de amplitud son correspondientes a valores bajos de amortiguamiento (Piro “*et al*”, 2020) determinando así un caso subamortiguado con esta técnica.

L

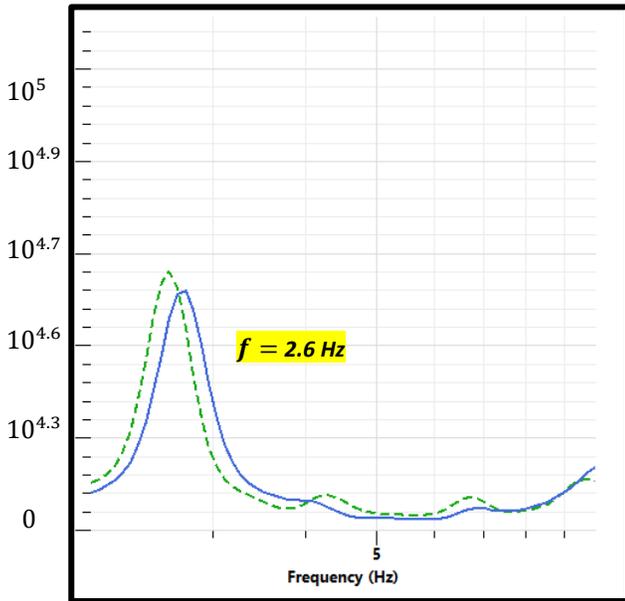


Figura 5.34: Espectro resultante en la componente N-S del edificio B1 ubicado en la figura 5.33. La línea azul punteada corresponde al instrumento situado en la parte norte, mientras que la verde discontinua corresponde a la parte sur.

T

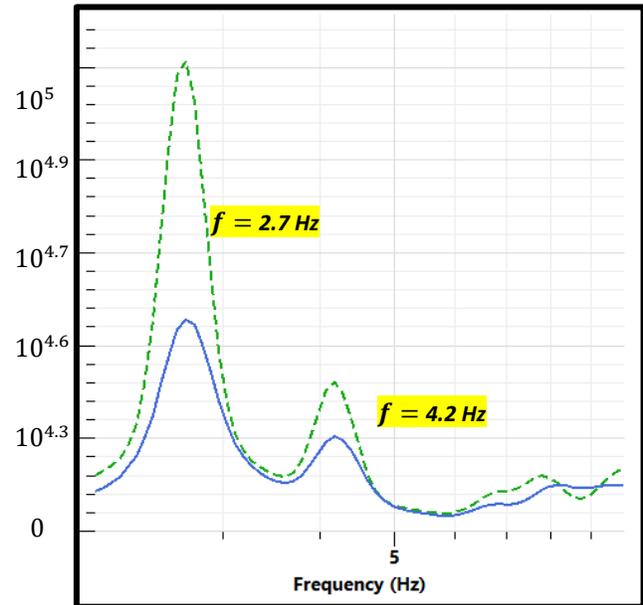


Figura 5.35: Espectro resultante en la componente E-W del edificio B1 ubicado en la figura 5.33. La línea azul punteada corresponde al instrumento situado en la parte norte, mientras que la verde discontinua corresponde a la parte sur.

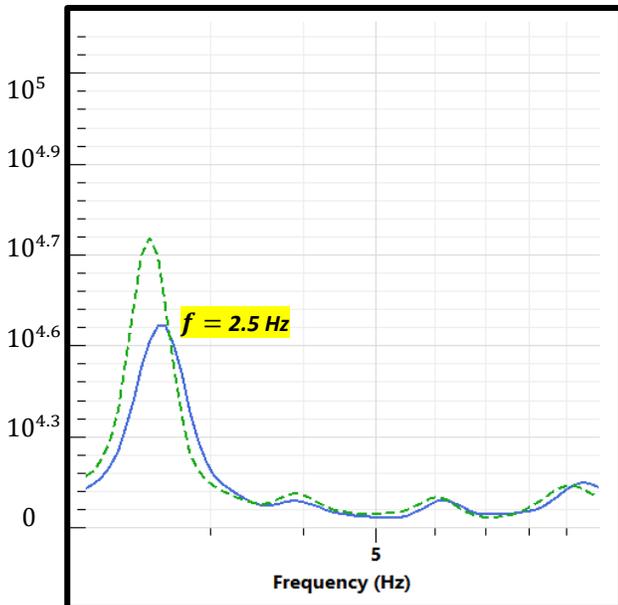


Figura 5.36: Espectro resultante en la componente N-S del edificio B2 ubicado en la figura 5.33. La línea azul punteada corresponde al instrumento situado en la parte norte, mientras que la verde discontinua corresponde a la parte sur.

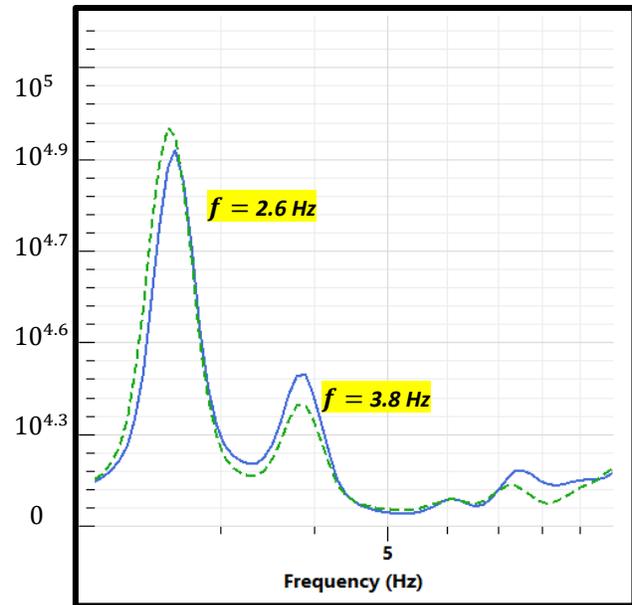


Figura 5.37: Espectro resultante en la componente E-W del edificio B2 ubicado en la figura 5.33. La línea azul punteada corresponde al instrumento situado en la parte norte, mientras que la verde discontinua corresponde a la parte sur.

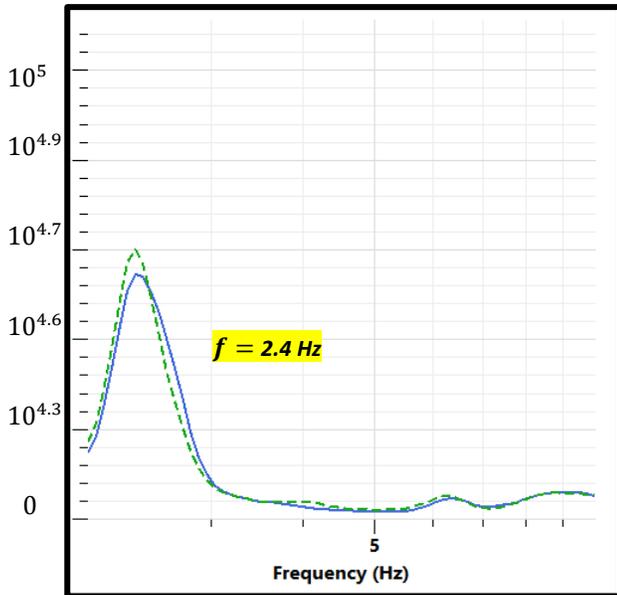


Figura 5.38: Espectro resultante en la componente N-S del edificio B6 ubicado en la figura 5.33. La línea azul punteada corresponde al instrumento situado en la parte norte, mientras que la verde discontinua corresponde a la parte sur.

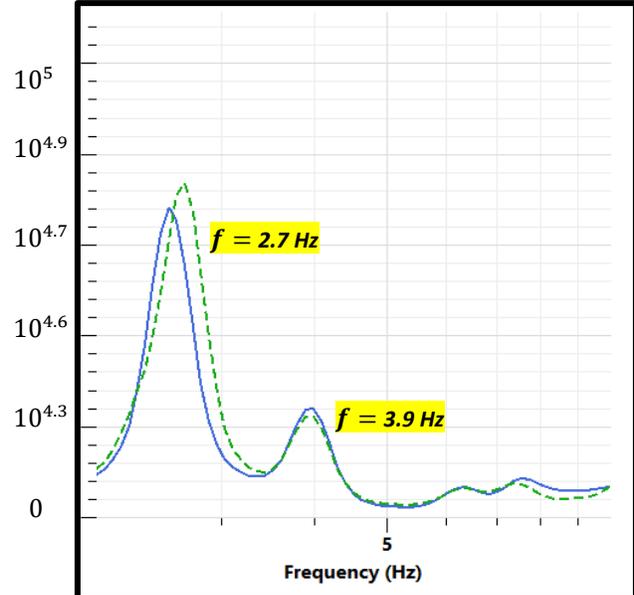


Figura 5.39: Espectro resultante en la componente E-W del edificio B6 ubicado en la figura 5.33. La línea azul punteada corresponde al instrumento situado en la parte norte, mientras que la verde discontinua corresponde a la parte sur.

## 5.5 Análisis de la cimentación

La cimentación del edificio de estudio B1 está compuesta de un cajón de cimentación (compensado), su función consiste en reducir el aumento en la carga neta aplicada al suelo por medio de la excavación planeada para el cajón.



Figura 5.40: Fotografías del cajón de cimentación del edificio de estudio B1).

Según la clasificación del terreno de cimentación de acuerdo con la estratigrafía de la CFE, se obtuvo el siguiente tipo de suelo:

Tipo I (Terreno firme): La estructura se sitúa sobre depósitos de suelo formados por estratos con una velocidad de propagación  $\beta_0 \geq 700 \text{ m/s}$

## 6. Discusión de resultados

Los resultados de prospección sísmica permiten hacer una interpretación estratigráfica de la zona de estudio. Por un lado, hablando del contexto geológico en la zona, el primer estrato para todas las líneas tiene velocidades entre 240 y 400 m/s, por lo que se infiere que esta primer capa corresponde a un material poco compacto, como un material de relleno o un suelo suave, con un grosor que oscila entre 1 y 9 m. La segunda capa tiene una forma irregular, la cual tiene una velocidad promedio general de 450 a 750 m/s, con un grosor entre 4 y 12 m. Los resultados de este estudio muestran que esa segunda capa está compuesta por basalto alterado de mala calidad, debido a la geología de la zona y pruebas geotécnicas realizadas en el pozo Copilco-1 (Ubicado entre las colonias San Ángel y Progreso Tizapan) mostrado en la figura 6.2 (López-Unda, 2016) y a través de los núcleos de roca obtenidos (RQD) en la zona del anexo de ingeniería (figura 6.1), en Ciudad Universitaria (Sánchez, 2019). Por último, en el tercer estrato sólo se pudo cuantificar con un grosor entre 2 y 16 metros, hasta donde llegó a profundizar el método. Obteniendo velocidades de 750 a 1100 m/s, lo cual puede establecerse como el mismo material que el estrato 3, basalto que mejora su calidad con la profundidad.

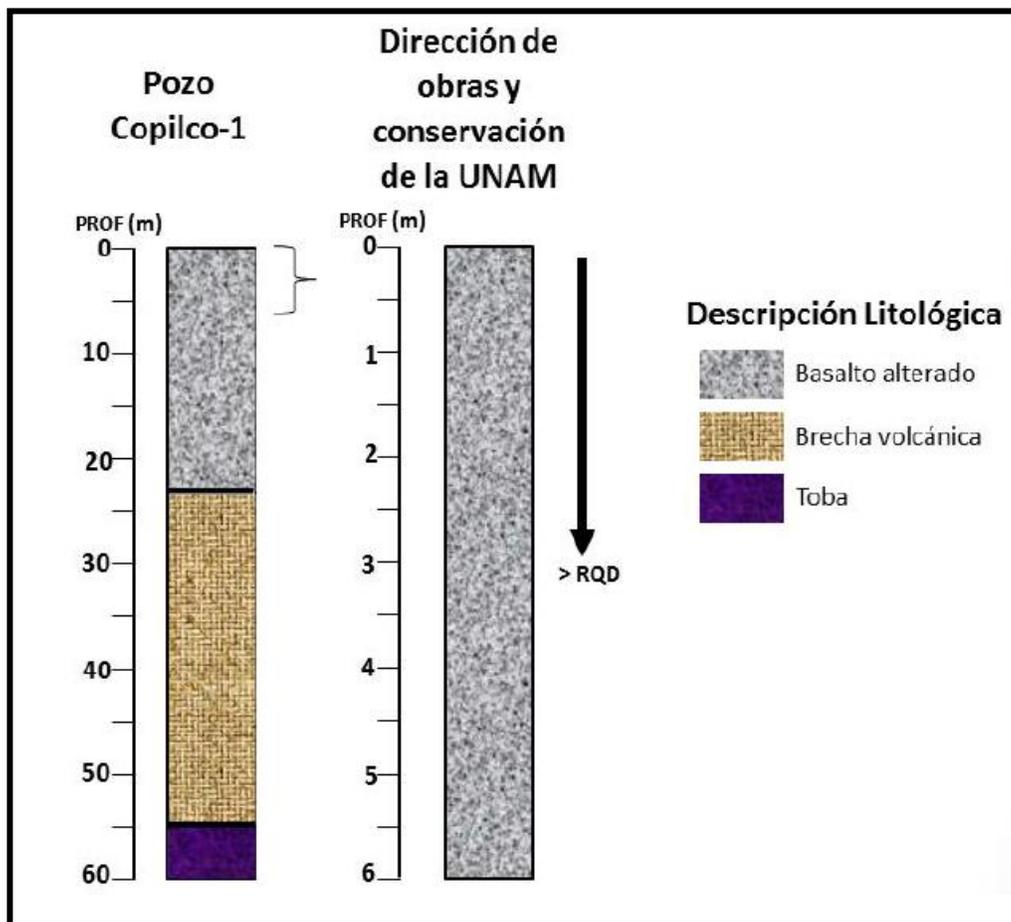


Figura 6.1: Correlación de columnas litológicas del Pozo Copilco-I y de la dirección de obras y conservación de la UNAM (esta última obtenida de la información proporcionada de los núcleos de roca (RQD) en la zona del anexo de ingeniería). Tomada de: Sánchez, 2019.

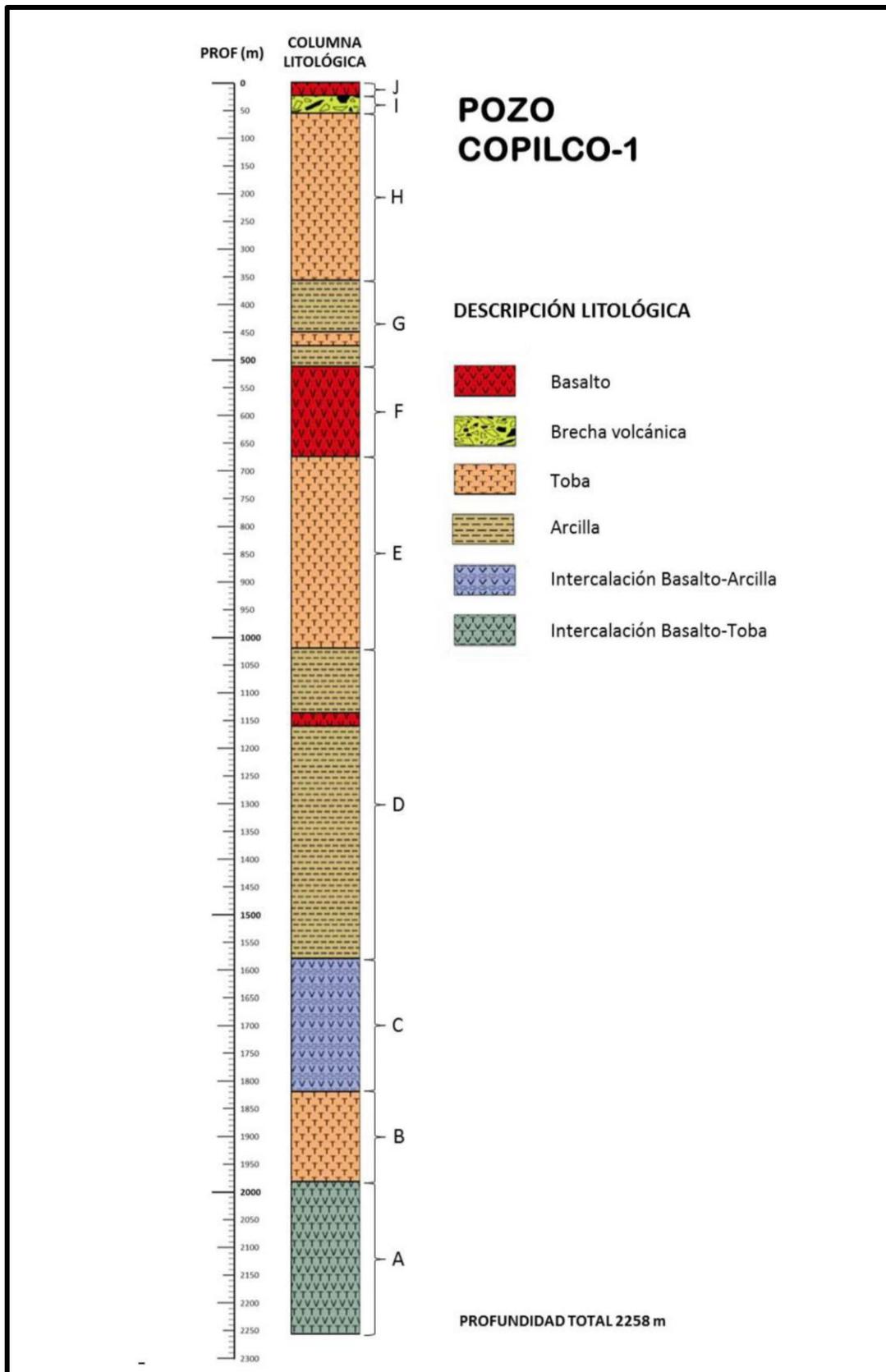


Figura 6.2: Columna litológica del pozo Copilco-I elaborada a partir de la descripción de muestras de canal. Tomada de: López-Unda, 2016.

Por otro lado, el análisis espectral de ondas superficiales muestra que el primer estrato tiene un rango de velocidades generales de los 190 a 350 m/s, lo que en  $V_s$  correspondería a suelos arcillosos suaves, en el segundo estrato las velocidades de onda de corte van de los 280 a los 800 m/s, a lo cual se le puede asociar con suelo rígido, y el tercero con velocidades de 780 a 1200 m/s correspondiente a un suelo rígido pero más denso.

Los resultados de prospección sísmica permiten establecer que la distribución de los materiales son tobas, basaltos fracturados que mejoran su calidad con la profundidad y materiales de relleno. Esta distribución de materiales blandos o poco compactos pudo ser verificada por los cocientes espectrales H/V.

Los espectros H/V de la primera etapa de medición (puntos A) mantienen una frecuencia fundamental mínima de 6.71 a una máxima de 8.13 y una amplitud relativa de entre 1 y 2.5. A pesar de que de la amplitud relativa no se obtiene un valor significativo, la amplitud obtenida indica el poco contraste de impedancia entre las capas. Como se explicó anteriormente, los espectros presentan picos marcados para los 10 puntos de medición, en un rango de frecuencias de 6.7 a 8.1 Hz por lo que se atribuye un tipo de suelo suave/blando, correspondido por su amplitud menor a 3, según Bonnefoy-Claudet et-al (2009).

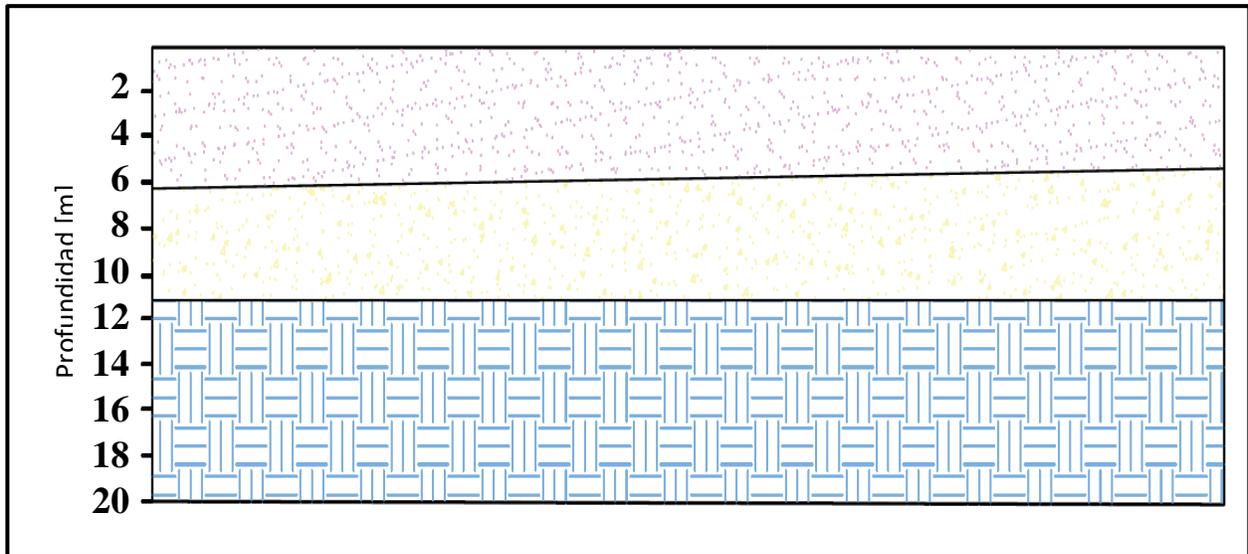
Como se puede observar en las tablas 5.10 y 5.11 no existe una gran diferencia entre los diez periodos medidos de suelo, ya que estos se ubicaron en el rango de 0.12 a 0.14 s, lo cual resulta congruente con la Zona Sísmica I, y la zona de lomas, ya que según las Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo de la Ciudad de México (NTCDs) el periodo correspondiente dentro de esta debe de rondar por debajo de los 0.5 s.

Para esta técnica se puede concluir que existe la presencia de una capa delgada de suelo a superficie en un rango de 6 a 8 m, la cual provee al sitio de un periodo natural de vibración. Esta capa coincide con la a capa superficial determinadas con sísmica de refracción.

Analizando los resultados del procesamiento del espectro de Fourier se puede identificar que la estructura de estudio carece de un diseño único a comparación de las otras dos edificaciones de referencia, siendo así edificaciones gemelas, puesto que al comparar la parte longitudinal de las tres estructuras se puede vislumbrar que su espectro tanto Norte, como Sur es similar en un 85%. Por el contrario de la parte transversal del edificio A1 (figura 5.33), el primer y segundo modo de vibración se ve aumentado en amplitud en la parte sur, lo que no sucede en nuestros edificios B1 y B2 cuyos espectros se empalman tanto en la parte norte como sur. Por lo tanto se especularía que únicamente habría una variación dinámica en la dirección transversal.

Finalmente, se determinó que los métodos de refracción sísmica, MASW y cocientes espectrales ubicados en los terrenos de estudio muestran muchas semejanzas y presentan estructuras geológicas similares. Todos los perfiles dan como resultado un modelo de suelo de tres capas. Tanto la velocidad de la onda  $V_p$  como la  $V_s$  aumentan con la profundidad.

El comportamiento de las velocidades nos da a deducir que en los primeros 3-8 m de profundidad están conformados por tobas o materiales de relleno semi-compactados o ligeramente no consolidados, de 8 m en adelante se especulan basaltos fracturados que mejoran su calidad con la profundidad (figura 6.3). Esto también se confirma por la geología y topografía del lugar.



**Figura 6.3: Perfil general litológico propuesto del suelo. El primer estrato correspondiente a tobas o materiales de relleno, el segundo estrato a basaltos fracturados, y el tercer estrato basaltos que mejoran de calidad en función de la profundidad.**

## Conclusiones y recomendaciones

En este trabajo se abordan problemáticas específicas pero importantes en el campo de la ingeniería Geotécnica y Sísmica, las cuales son: el estudio del comportamiento sísmico de cimentaciones someras y la evaluación de un posible daño en su capacidad de carga.

-Se infiere que la unidad habitacional se construyó sobre un terreno cuyo suelo se conforma por tobas, basaltos fracturados que mejoran su calidad con la profundidad,

-El déficit de resistencia en un edificio se puede detectar rápidamente comparando sus fuerzas cortantes sísmicas (laterales y longitudinales) del año de diseño y el año de evaluación. En este estudio, se realizó la comparación entre edificios gemelos o diseñados idénticamente. Por lo cual se concluye que la estructura no tiene daño alguno en entresijos, ya que no presenta cambios en el dominio de la frecuencia. Sin embargo, el cambio en amplitud espectral indica efectos de amplificación debido a una posible pérdida de amortiguamiento (Piro *“et al”*, 2020). En este caso, en la parte sur del edificio de estudio se encontraría subamortiguada, es decir, desgaste en elementos subestructurales.

-La rigidez de la superestructura y la cimentación siempre debe de considerarse en relación con la frecuencia natural de la capa sobre la cual será soportada, pues en relación a las propiedades del suelo de la cimentación, resultan comunes las roturas por pérdida de capacidad de carga portante, generalmente en suelos cohesivos blandos, esto en relación a la primera capa de suelo que se tiene debajo de nuestro edificio.

-La falta/cambio de la resistencia estructural de la cimentación (atribuida a la disminución en la amplitud del edificio en la parte sur) podría deberse a una mala adaptación de las dimensiones de la cimentación, cargas aplicadas, mal cálculo de desplazamientos y condiciones hidrológicas variables. En el edificio de estudio pudiera deberse más a la última razón, ya que se sabe por reportes que en temporadas de lluvia el cajón de cimentación tiende a inundarse. Otras causas posibles pero poco probables para este caso son el funcionamiento no adecuado del sistema de drenaje, incidentes externos como rotura de redes de alcantarillado, y el uso de materiales de relleno inadecuados podrían llevar en condiciones hidrológicas adecuadas a un hinchamiento del suelo o densidad subestimada (que cambia con el tiempo).

-Las técnicas empleadas (la combinación de métodos geofísicos) en este trabajo son accesibles y eficientes para su correcto uso en cualquier estructura que requiera una primera evaluación post-sísmica, en el sistema suelo-estructura. Estas técnicas también podrían resultar determinantes, en el sentido de definir si la estructura requerirá o no estudios de mayor indagación, ya que en el caso de nuestro edificio de estudio se determinó que el edificio no presenta peligro actual de caída o desplome a simple vista, pero se

recomienda tomar medidas de reforzamiento en la parte sur del edificio, además de realizar estudios de vibración ambiental por cada sismo de importancia.

-Esta tesis propone para todos los edificios existentes y futuros de la Ciudad de México comenzar a realizar un historial de salud estructural (a partir de su construcción), que incluya por lo menos dos de las técnicas de estudio empleadas en esta tesis. Con la finalidad de crear una fuente de consulta, información y comparación, en dado caso que la salud estructural del edificio se encuentre comprometida en algún momento debido a sismos de gran magnitud. Ya que al encontrarnos en una zona de potencial peligro, lo que se busca como ingenieros en la rama sísmica siempre será la innovación, creación y estudio de estructuras cada vez más sismorresistentes, que nos lleven como resultado a una nueva normatividad.

En la mayoría de los casos actuales de incremento de vibración natural de los edificios no se podría realizar una comparativa, como la que se realizó en este trabajo (a menos que se tuviera una estructura gemela del edificio dañado, en este caso, los edificios gemelos en estudio son el B1, B2 y B6, con un mismo diseño estructural desde la figura de planta, materiales, acabados, elevador de unión y cimentación), haciendo así imposible la visualización de un antes y después de un sismo importante.

-El estudio de la interacción suelo-estructura es actualmente una técnica costosa y problemática por medios convencionales, sin embargo, la toma de ruido sísmico analizado por medio de las técnicas presentadas en este trabajo resulta un medio rápido y simple de análisis, el cual nos puede dar una descripción suficiente si existiera tal el efecto (ISE) en cualquier estructura. Para este caso, se concluyó que no existe una interacción suelo-estructura.

-En cualquier tipo de cimientos, sus patologías se presentan principalmente en asentamientos diferenciales o desplomes. El método de espectro de amplitud de Fourier arroja resultados relacionados con la amortiguación del cimiento, por lo que se podría dividir a las patologías de cimentación en visibles y no visibles, siendo estas últimas de igual importancia para salvaguardar la salud estructural de cualquier edificio de un daño irreversible en el futuro.

## Referencias

- Albuérne Phen, B. (2000). *Análisis de la respuesta estructural de un con amortiguadores* (Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México.) <http://132.248.9.195/pd2000/279294/Index.html>
- Arnold, C y Reitherman, R. (1986). *Configuración y diseño sísmico de edificios*. Primera edición. Editorial Limusa.
- Bard, P. Y. (1999). *Microtremor measurements: a tool for site effect estimation. The effects of surface geology on seismic motion*.

<https://www.researchgate.net/publication/235623097> Microtremor measurements A tool for site effect estimation

- Basset Salom, L. (2015). *Patología de las cimentaciones: causas*. Universitat Politècnica de Valencia.  
<https://www.researchgate.net/publication/324170625> Patologia de las cimentaciones causas
- Basset Salom, L. (2016). *Sintomatología de fallos en la cimentación*. Universitat Politècnica de Valencia. <http://hdl.handle.net/10251/68334>
- Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., and Bard, P. Y. (2006). *The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies: A literature review*. Earth-Science Reviews. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2006.07.004>.
- Caicedo, M. D. (2014). Períodos de vibración de las edificaciones. *Revista Arquitectura e Ingeniería*.
- Cavada, J. M. (2000) *Guía de Prospección Sísmica por Refracción*. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Departamento de ingeniería Geofísica.
- CFE. (1993). *Manual de Diseño de Obras Civiles*. Instituto de Investigaciones Eléctricas. Diseño Sísmico. Editado por CFE, México.  
<https://www.researchgate.net/publication/319643184> C13 Manual de Diseño de Obras Civiles - Diseño por Sismo CFE-IIE Version 2015
- Chatzigogos C. (2007). Comportement sismique des fondations superficielles: vers la prise en compte d'un critère de performance dans la conception. Sciences de l'ingénieur. Ecole Polytechnique. France. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00212279/>
- Cruz V., Krishna S. y Ordaz M. (2017) *¿Qué ocurrió el 19 de septiembre de 2017 en México?* Ciencia, UNAM. <http://ciencia.unam.mx/leer/652/-que-ocurrio-el-19-de-septiembre-de-2017-en-mexico->
- Day, R. W. (2006) *Foundation Engineering Handbook - Design and Construction with the 2006 International Building Code*.
- Del Distrito Federal, G. (2004). *Normas técnicas complementarias para diseño por sismo*. Gaceta Oficial del Gobierno del DF.  
<https://www.smie.org.mx/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas->

[complementarias/gaceta-oficial-df-2004-tomo-1.pdf](https://www.gacetaoficialdf.com/complementarias/gaceta-oficial-df-2004-tomo-1.pdf)

- Del Distrito Federal, G. (2004). *Normas técnicas complementarias para diseño y construcción de cimentaciones*. Gaceta Oficial del Distrito Federal, VII. <https://www.smie.org.mx/archivos/informacion-tecnica/normas-tecnicas-complementarias/ntc-criterios-gaceta-oficial-df-2004.pdf>
- Del Distrito Federal, G. (2004). *Reglamento de construcciones para el Distrito Federal*. México DF. <http://cgservicios.df.gob.mx/prontuario/vigente/r38501.htm>
- Del Distrito Federal, G. (2017). *Normas Técnicas Complementarias*. Reglamento de las Construcciones para la Ciudad de México. Diario Oficial del Gobierno de la Ciudad de México. <https://www.smig.org.mx/archivos/NTC2017/normas-tecnicas-complementarias-reglamento-construcciones-cdmx-2017.pdf>.
- Domínguez, e. G. (2013). *Análisis y diseño de una cimentación profunda a base de pilas y muros milán de un rascacielos en el Valle de México* (Tesis doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México).
- Dunham, C. W., Tejedor, G. E., & Montoya, P. G. (1979). *Cimentaciones de estructuras*. McGraw-Hill de México.
- Durán M., Sáenz C. y Aguilar M. (1987) *Medición de Periodos Propios en Edificios de La Serena Mediante Vibraciones Ambientales*, Departamento de Obras Civiles, Universidad de La Serena, Chile. <https://www.redalyc.org/pdf/618/61849772004.pdf>
- Espinoza Barreras, F. (1999). *Determinación de características dinámicas de estructuras* Tesis doctoral. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2117/93533>
- Ferrari, L., Orozco-Esquivel, T., Manea, V., Manea, M. (2012). *The dynamic history of the Trans-Mexican Volcanic Belt and the Mexico subduction zone*. Tectonophysics.
- Florentín, M., y Granada, R. (2009). *Patologías Constructivas en los Edificios. Prevenciones y Soluciones*. Asunción, Paraguay: Universidad Nacional de Asunción.

- Gayá F., M. A. (2004). Procesado de Sísmica de Reflexión Superficial en el Complejo Turbidítico de Ainsa (Huesca). Escuela Técnica Superior de Ingenieros de caminos, canales y puertos de Barcelona. Departamento de Ingeniería del Terreno, Cartografía y Geofísica. Universitat Politècnica de Catalunya. Recuperado de: <http://hdl.handle.net/2099.1/3404>
- Gazetas G. (1997). *Dynamic Soil-Structure Interaction During Earthquakes. Proceedings of the Advanced Study Course on seismic Risk "SERINA-Seismic Risk: An Integrated Seismological, Geotechnical and Structural Approach"*. Thessaloniki, Greece.
- Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, M.T., Ferrari, L. (2005) *Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Volumen Conmemorativo del Centenario, Temas Selectos de la Geología Mexicana. <https://doi.org/10.18268/bsgm2005v57n3a2>
- González Torres, E. A., Morán Zenteno, D. J., Mori, L., y Martiny, B. M. (2015). *Revisión de los últimos eventos magmáticos del Cenozoico del sector norte-central de la Sierra Madre del Sur y su posible conexión con el subsuelo profundo de la Cuenca de México*. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222015000200012](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222015000200012)
- Gutiérrez, C., Quaas, R., Ordaz, M., Guevara, E., Muriá, D., y Krishna, S. (2008). *Fascículo Sismos*. CENAPRED. 1ª reimpresión de la quinta edición. <http://cenapred.gob.mx/es/Publicaciones/archivos/163-FASCCULOSISMOS.PDF>.
- Jaramillo, A., Piña, J., y Aguilar, R. (2012). *Aplicación del método de cocientes espectrales para la reconfiguración detallada del mapa de Isoperiodos en la cuenca del valle de México*. Memoria XXVI Reunión Nacional de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. [https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1\\_Reunion\\_Cancun/2\\_XXVI\\_Reunion\\_Nacional/6\\_Geotecnia\\_sismica/15AGBH\\_1.pdf](https://www.smig.org.mx/admArticulos/eventos/1_Reunion_Cancun/2_XXVI_Reunion_Nacional/6_Geotecnia_sismica/15AGBH_1.pdf).
- Jiménez Salas, J. A., Justo, J. L., y Serrano, A. (1980). *Geotecnia y cimientos III. Cimentaciones, excavaciones y aplicaciones de la geotecnia*. Editorial Rueda, Alcorcón (Madrid).
- Juárez-Camarena, M., Auvinet.-Guichard, G., y Méndez-Sánchez, E. (2014). *Nuevos elementos para la zonificación geotécnica del subsuelo del valle de México*. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S1405-](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S1405-)

- Kanai, K., and Yoshizawa, S. (1956). *Relation between the Amplitude of Earthquake Motions and the Nature of Surface Layer IV: The Case of Finite Train*. Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo. <https://repository.dl.itc.u-tokyo.ac.jp/record/33984/files/ji0342004.pdf>
- Knott, C. G. (1899). III. *Reflection and refraction of elastic waves, with seismological applications*. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. <https://doi.org/10.1080/14786449908621305>
- Lachet, C., Hatzfeld, D., Bard, P. Y., Theodulidis, N., Papaioannou, C., & Savvaidis, A. (1996). *Site effects and microzonation in the city of Thessaloniki (Greece) comparison of different approaches*. Bulletin of the Seismological Society of America.
- Lezana González, F. (2014). *Correlación de razones espectrales H/V de registros sísmológicos y características geotécnicas de suelos de Santiago*. Recuperado de: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/131066>
- López, J., Mejía, J., & Vega, N. (2008). *Aplicación del método de refracción sísmica para la determinación de velocidades de ondas P*. Universidad De El Salvador. <http://ri.ues.edu.sv/id/eprint/4379>
- López-Unda, J. A. (2016). *Construcción y correlación de columnas geológicas de los pozos profundos del Valle de México* (Tesis profesional). UNAM, México. [http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB\\_UNAM/TES01000739455](http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000739455)
- Lozano-García, S., & Sosa-Nájera, S. (2015). *Análisis palinológico del Cenozoico de la cuenca de México: el registro polínico de los pozos Texcoco-I y San Lorenzo Tezonco*. *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1405-33222015000200009&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-33222015000200009&lng=es&nrm=iso)
- Lrfd, A. (2012). *Bridge design specifications. American Association of State Highway and Transportation Officials*. AASHTO: Washington, DC, USA. <http://mirjalili.net/download/uploads/Codes/American/AASHTO.pdf>
- Marsal, R. J., y Mazari, M. (1979). *El subsuelo de la Ciudad de México*. Instituto de Ingeniería. UNAM.
- Martínez Gonzalez, J. F. J. (2009). *Escenarios de respuesta estructural ante sismo para la Ciudad de México*. Universidad Nacional Autónoma de México.

- Meli Piralla, R., Miranda Mijares, E., López Navarrete, C., y López Bátiz, Ó. (2019). *Evaluación de los efectos de los sismos de septiembre de 1985 en los edificios de la CDMX*. [http://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Libros/Documents/Meli/01\\_Prologo\\_Inicio01.pdf](http://www.iingen.unam.mx/es-mx/AlmacenDigital/Libros/Documents/Meli/01_Prologo_Inicio01.pdf)
- Merlos Espericueta, J. (2002). *Movimientos permanentes causados por sismo en cimentaciones superficiales y profundas*. Universidad Nacional Autónoma de México, México. [http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB\\_UNAM/TES01000312867](http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000312867)
- Miranda E., Akkar S., (2006). *Generalized interstory drift spectrum*. Journal of Structural Engineering, ASCE, June 2006. <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9445%282006%29132%3A6%28840%29>
- Moncada Lugo, S. K., y Vega Acuña, C. C. (2016). *Validación de patologías de cimentaciones superficiales* (Bachelor's thesis, Universidad Piloto de Colombia). <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/1488>
- Muriá-Vila D. y González A. R., 1995. *Propiedades Dinámicas de Edificios de la Ciudad de México*. Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México. <https://doi.org/10.18867/ris.51.261>
- Muriá-Vila D. and González A. R., 1996. *Seismic Response of a Tall Building in Mexico City*. Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Acapulco, México, Paper No. 570.
- Newland, D. E., 1993. *An Introduction to Random vibrations and wavelet analysis*. 3 Ed. Harlow: Prentice Hall.
- Nogoshi, M., and Igarashi, T. (1971). *On the amplitude characteristics of microtremor—Part 2*. Journal of the Seismological Society of Japan. [https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1\\_26](https://doi.org/10.4294/zisin1948.24.1_26)
- Park, C. B., Miller, R. D. and Xia, J. (1997). *Summary report on surface-wave project at Kansas Geological Survey (KGS)*. Lawrence, KS: Kansas Geological Survey. <ftp://geom.geometrics.com/pub/seismic/literature/SurfaceWaves/KGS/KGS-97-80.pdf>
- Park, C., Miller, R. D., Xia, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. <https://doi.org/10.1190/1.1444590>

- Park, C. (2013). *MASW for geotechnical site investigation*. The Leading Edge. <https://doi.org/10.1190/tle32060656.1>
- Peck, R. B., & Thomas H. Thornburn. (2007). *Ingeniería de cimentaciones* (1a. edición. Editorial Limusa). México.
- Pecker A., G. Auvinet, M. P. Romo, J. Salençon. (1996). *Capacité portante des fondations superficielles dans la ville de Mexico pendant le séisme de Michoacan de 1985*. 4eme Colloque National AFPS, Saint Rémylès- Chevreuses. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00116436>
- Pérez-Cruz, G (1988), "*Estudio Sismológico de Reflexión del Subsuelo de la Ciudad de México*". Tesis de Maestría, Facultad de Ingeniería, UNAM, México. [http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB\\_UNAM/TES01000074449](http://132.248.9.41:8880/jspui/handle/DGB_UNAM/TES01000074449)
- Piro, A., de Silva, F., Parisi, F., di Santolo, A. S., and Silvestri, F. (2020). *Effects of soil-foundation-structure interaction on fundamental frequency and radiation damping ratio of historical masonry building sub-structures*. *Bulletin of Earthquake Engineering*. <https://doi.org/10.1007/s10518-019-00748-4>
- Ramírez, L., & Francisco, D. (2015). Avances en aislamiento de vibración por impacto usando rigidez no lineal.
- Ramírez Villalobos, A. (2009). *Perfiles sísmicos en la zona conurbada Veracruz-Boca del rio (refracción sísmica)*. Universidad Veracruzana, México.
- Romo, M., P. and Auvinet, G. (1991). *Seismic behaviour of foundations on cohesive soft soils*. *Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Ouest Editions, Nantes.
- Rodríguez, J. A. D. (2016). *El subsuelo de la Ciudad de México*.
- Ruiz, S., y Saragoni, G. R. (2005). *Fórmulas de atenuación para la subducción de Chile considerando los dos mecanismos principales de sismogénesis y los efectos del suelo*. IX Jornadas Chilenas de Sismología e Ingeniería Antisísmica, Concepción, Chile.
- Ruiz, S. and Saragoni, G. R. (2009) "*Free Vibration of Soils during Large Earthquakes*". *Soil Dynamic and Earthquake Engineering*. Chile. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2008.01.005>
- Safak E., 1995. *Detection and Identification of Soil-Structure Interaction in Buildings from Vibration Recordings*. *Journal of Structural Engineering*. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(1995\)121:5\(899\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(1995)121:5(899))

- Salas, T. A. T. (2007). *Influencia de la amplificación local de las ondas sísmicas y la interacción suelo-fundación en el puente Marga-Marga*. Trabajo doctoral, Universidad de Chile.
- Sezawa, B. K., and Kanai, K. (1935). *Seismic Waves*. Proceedings of the Japan Academy.
- Strobbia, C. (2003). *Surface Wave Methods: Acquisition, processing and inversion*. Doctoral thesis. Polytechnic of Torino.
- Takewaki I., 1998. *Remarkable Response Amplification of Building Frames Due to Resonance with the Surface Ground*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(98\)00006-2](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(98)00006-2)
- Tham L. G., Qian J. and Cheung Y. K., 1998. *Dynamic Response of a Group of Flexible Foundations to Incident Seismic Waves*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(97\)00021-3](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(97)00021-3)
- Wathelet, M., Chatelain, J. L., Cornou, C., Giulio, G. D., Guillier, B., Ohrnberger, M., & Savvaidis, A. (2020). *Geopsy: A user-friendly open-source tool set for ambient vibration processing*. Seismological Research Letters. <https://doi.org/10.1785/0220190360>
- Wolf J. P., 1994. *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*. Editorial Prentice Hall. New Jersey, United States of America.
- Woolery, E W and Street (2002). *3D near-surface soil response from H/V ambient-noise ratios*. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. [https://doi.org/10.1016/S0267-7261\(02\)00109-4](https://doi.org/10.1016/S0267-7261(02)00109-4)
- Xia, J., Miller, R. D. and Park, C. B. (1999). *Estimation of near-surface shear-wave velocity by inversion of Rayleigh waves*. Geophysics. <https://doi.org/10.1190/1.1444578>

Anexos 1

Tablas de propiedades de las líneas de refracción 1-6.

TablaA1: Propiedades de la estructura del estudio de sísmica de refracción en la Línea 1

Línea 1																								
W												E												
Geófono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Dist (m)	0	3.5	7	10.5	14	17.5	21	24.5	28	31.5	35	38.5	42	45.5	49	52.5	56	59.5	63	66.5	70	73.5	77	80
x (m)	-1		7			17.5			28			38.5			49			59.5			70			81
Dist de tiro	G	8	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	11	G	
Núm de tiro	1		2			3			4			5			6			7			8			9

TablaA2: Propiedades de la estructura del estudio de sísmica de refracción en la Línea 6

Línea 6																								
W												E												
Geófono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24
Dist (m)	0	3.5	7	10.5	14	17.5	21	24.5	28	31.5	35	38.5	42	45.5	49	52.5	56	59.5	63	66.5	70	73.5	77	80
x (m)	-1		7			17.5			28			38.5			49			59.5			70			81
Dist de tiro	G	8	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	10.5	G	11	G	
Núm de tiro	1		2			3			4			5			6			7			8			9

**TablaA3: Propiedades de la estructura del estudio de sismica de refracción en la Línea 2**

Línea 2																		
	N									S								
Geófono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Dist (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
x (m)	-2		4			10			16			22			28			34
Dist de golpe	G	6	G		6	G		6	G		6	G		6	G		6	G
Núm de tiro	1		2			3			4			5			6			7

\*Nota: 1 golpe por fuente. Detrás del edificio B1, en la jardinera del lado oeste del edificio.

**TablaA4: Propiedades de la estructura del estudio de sismica de refracción en la Línea 3**

Línea 3																		
	N									S								
Geófono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Dist (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
x (m)	-2		4			10			16			22			28			34
Dist de golpe	G	6	G		6	G		6	G		6	G		6	G		6	G
Núm de tiro	1		2			3			4			5			6			7

\*Nota: 1 golpe por fuente. Al Este del edificio B1 y al costado Oeste del edificio A1.

**TablaA5: Propiedades de la estructura del estudio de sismica de refracción en la Línea 4**

Línea 4																		
	N									S								
Geófono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Dist (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
x (m)	-2		4			10			16			22			28			34
Dist de golpe	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	G
Núm de tiro	1		2			3			4			5			6			7
*Nota: 1 golpe por fuente. Se realizó una corrección por topografía.																		

**TablaA6: Propiedades de la estructura del estudio de sismica de refracción en la Línea 5**

Línea 5																		
	N									S								
Geófono	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Dist (m)	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34
x (m)	-2		4			10			16			22			28			34
Dist de golpe	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	6	G	G
Núm de tiro	1		2			3			4			5			6			7
*Nota: 1 golpe por fuente. A un costado del edificio A2. Se realizó una corrección por topografía.																		

Domocronas de las líneas 1 a la 6

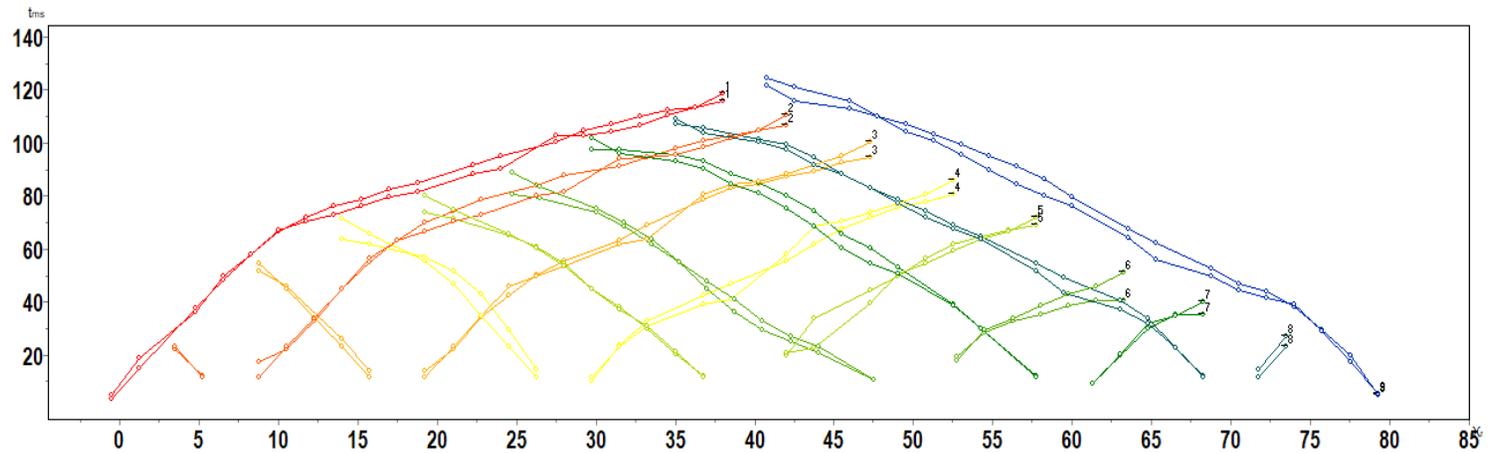


Figura A1: Domocronas resultantes de Vp para la línea 1 de prospección sísmica por refracción. En el eje "x" se tiene la distancia del tendido [m], y en el eje "y" el tiempo [ms].

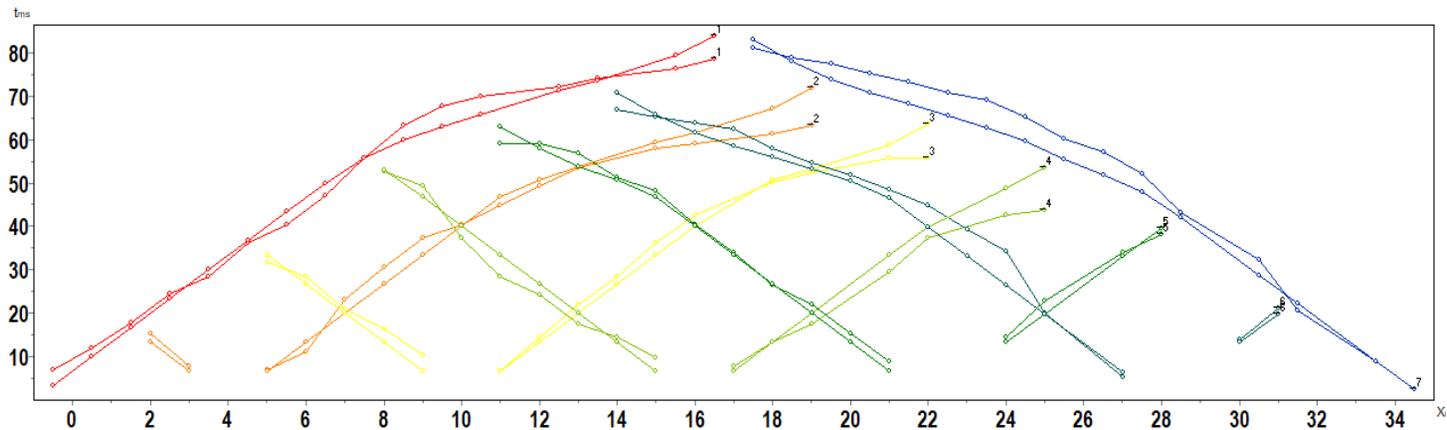


Figura A2: Domocronas resultantes de Vp para la línea 2 de prospección sísmica por refracción. En el eje "x" se tiene la distancia del tendido [m], y en el eje "y" el tiempo [ms].

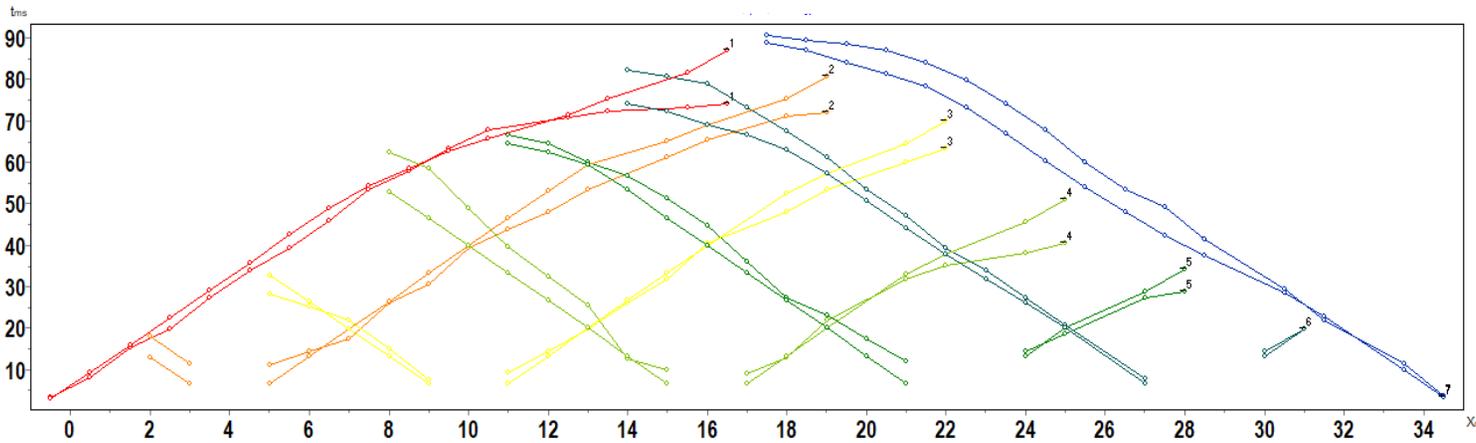


Figura A3: Domocronas resultantes de Vp para la línea 3 de prospección sísmica por refracción. En el eje "x" se tiene la distancia del tendido [m], y en el eje "y" el tiempo [ms].

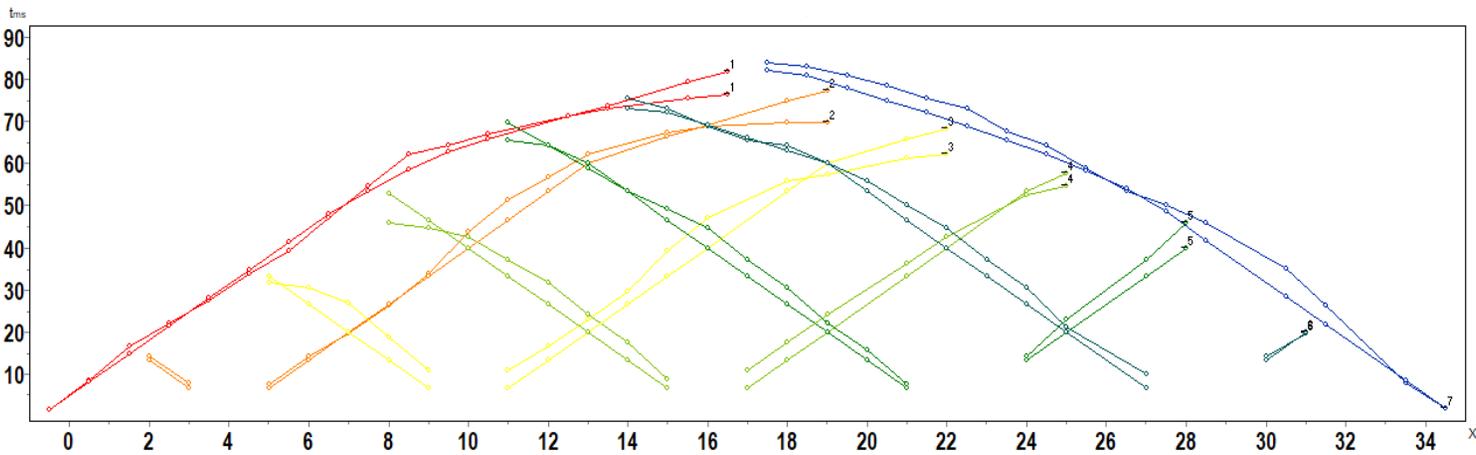


Figura A4: Domocronas resultantes de Vp para la línea 4 de prospección sísmica por refracción. En el eje "x" se tiene la distancia del tendido [m], y en el eje "y" el tiempo [ms].

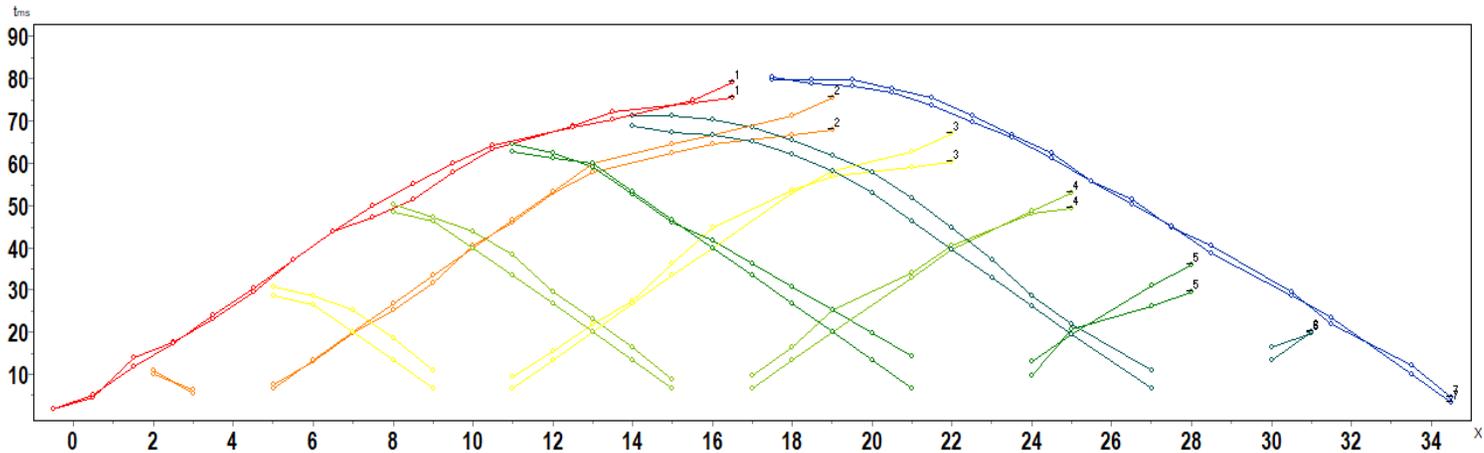


Figura A5: Domocronas resultantes de Vp para la línea 5 de prospección sísmica por refracción. En el eje "x" se tiene la distancia del tendido [m], y en el eje "y" el tiempo [ms].

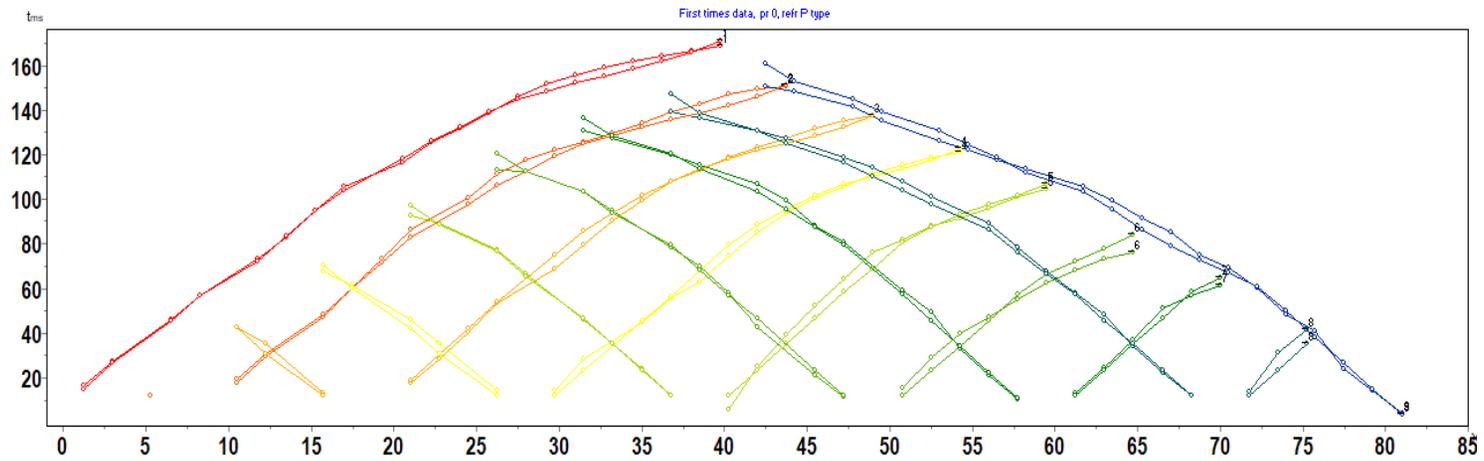


Figura A6: Domocronas resultantes de Vp para la línea 6 de prospección sísmica por refracción. En el eje "x" se tiene la distancia del tendido [m], y en el eje "y" el tiempo [ms].

## Anexos 2

Línea 1: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.

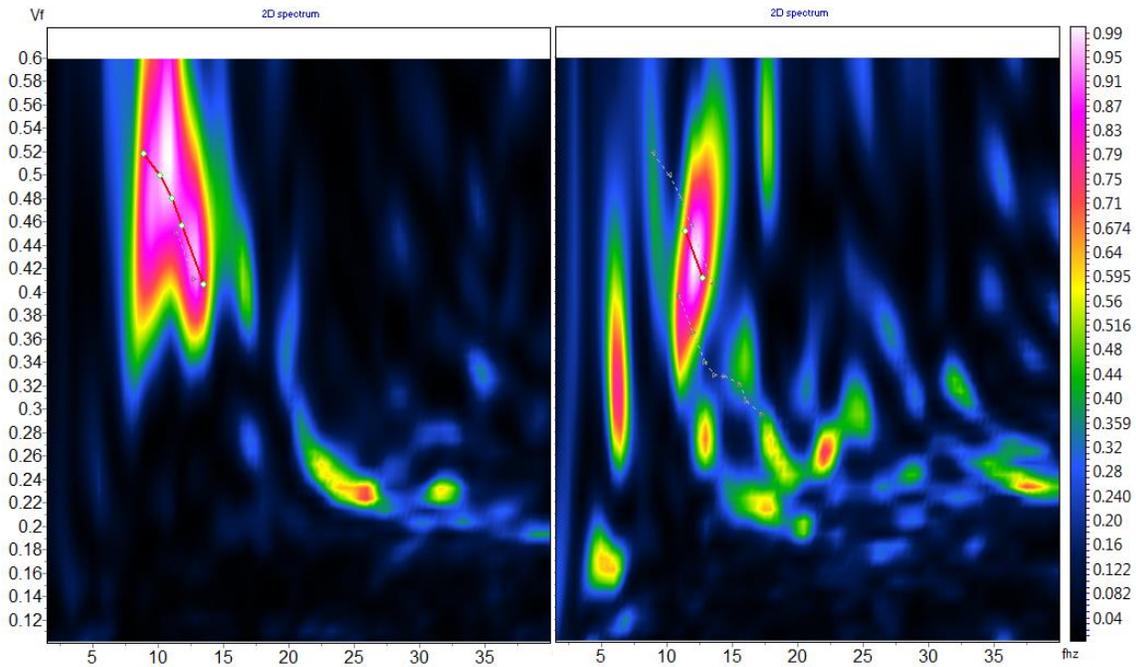


Figura A7: Curva de dispersión correspondiente al disparo 1 de la línea 1.

Figura A8: Curva de dispersión correspondiente al disparo 2 de la línea 1.

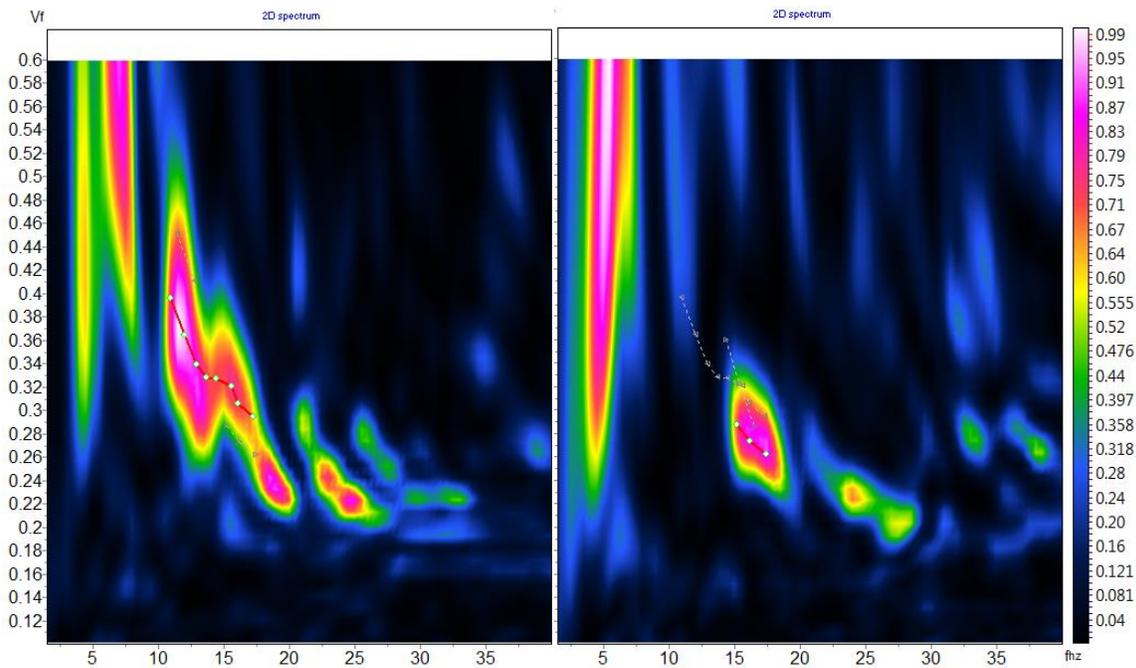
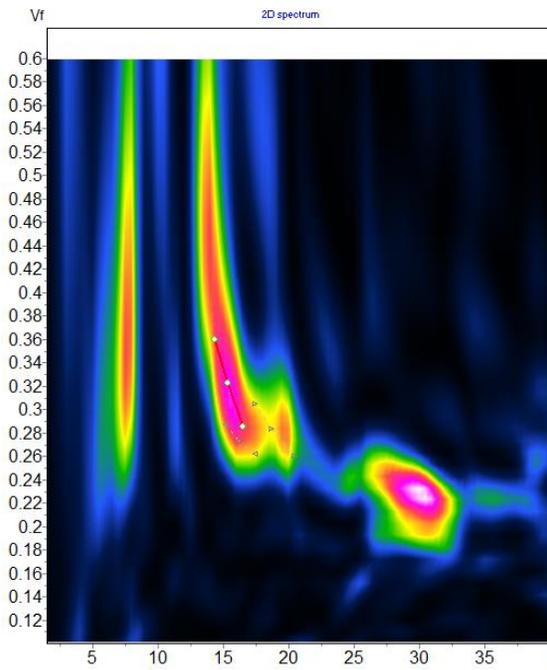
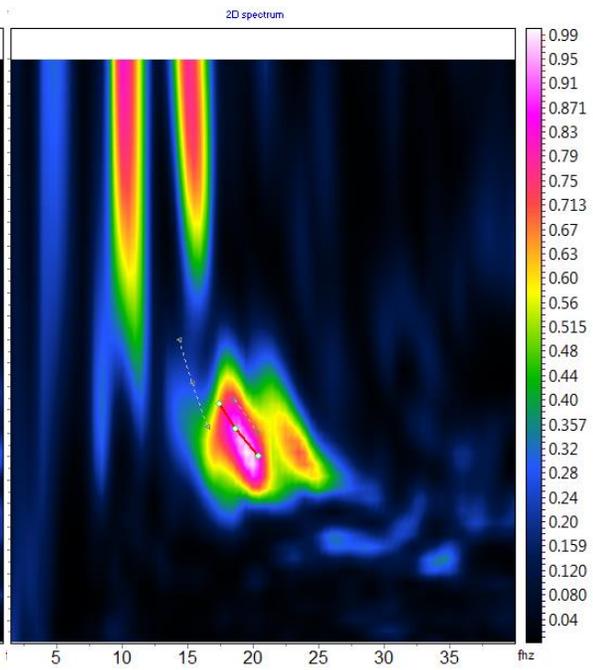


Figura A9: Curva de dispersión correspondiente al disparo 3 de la línea 1.

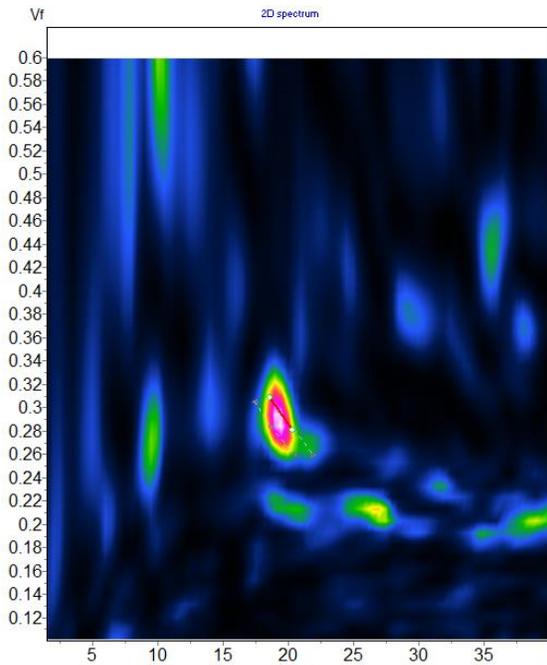
Figura A10: Curva de dispersión correspondiente al disparo 4 de la línea 1.



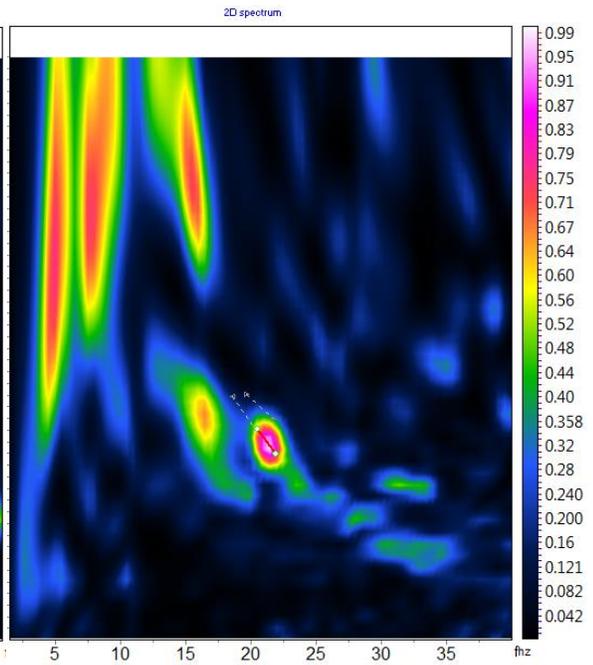
**Figura A11:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 5 de la línea 1.



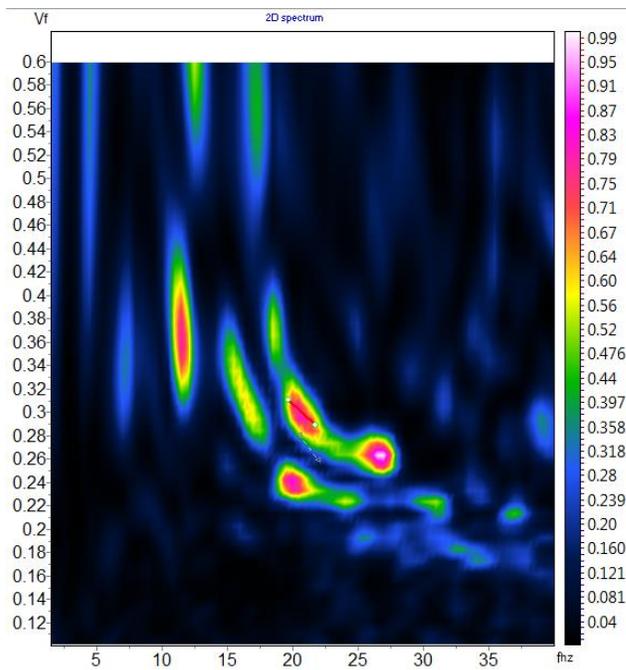
**Figura A12:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 6 de la línea 1.



**Figura A13:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 1.



**Figura A14:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 8 de la línea 1.



**Figura A15: Curva de dispersión correspondiente al disparo 9 de la línea 1.**

Línea 2: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.

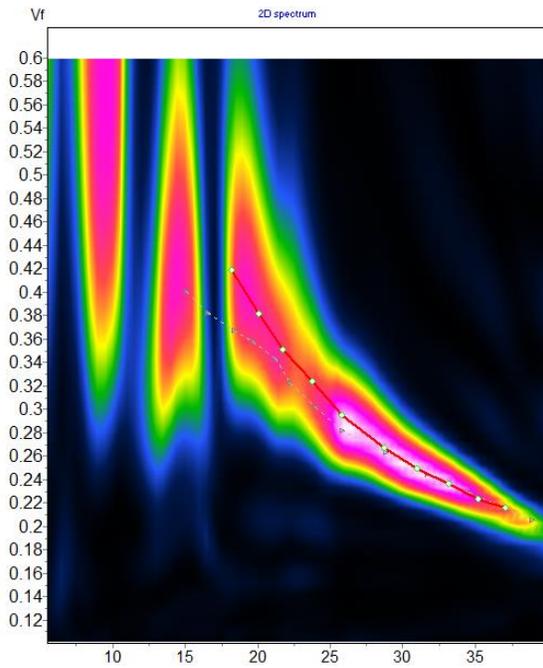


Figura A16: Curva de dispersión correspondiente al disparo 1 de la línea 2.

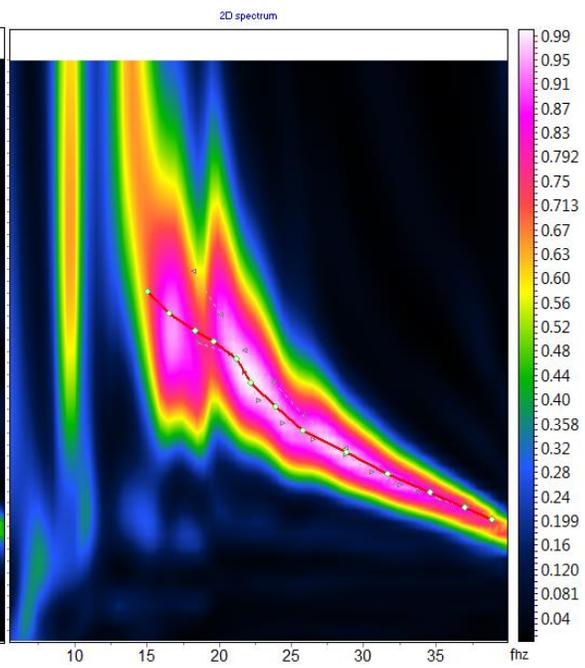


Figura A17: Curva de dispersión correspondiente al disparo 2 de la línea 2.

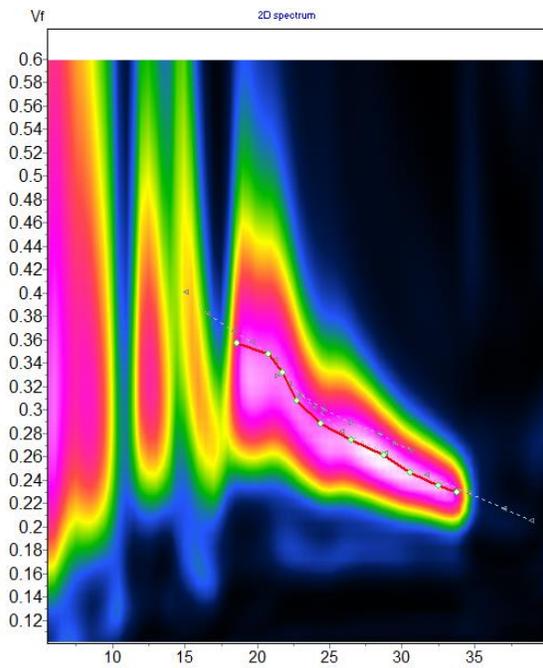


Figura A18: Curva de dispersión correspondiente al disparo 3 de la línea 2.

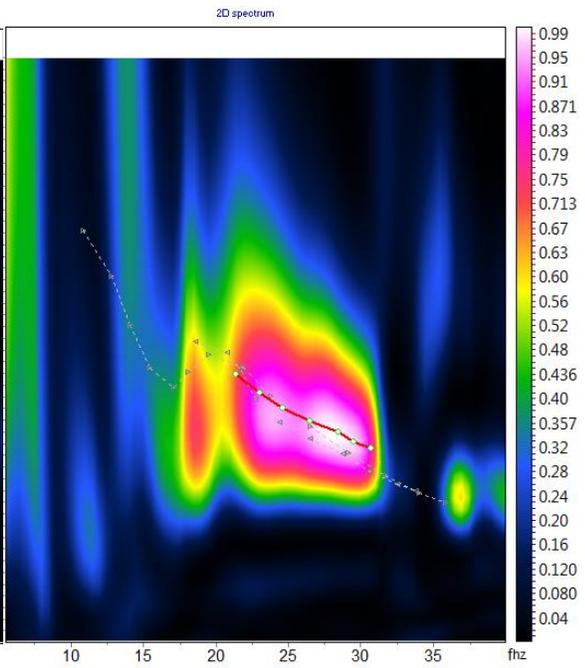
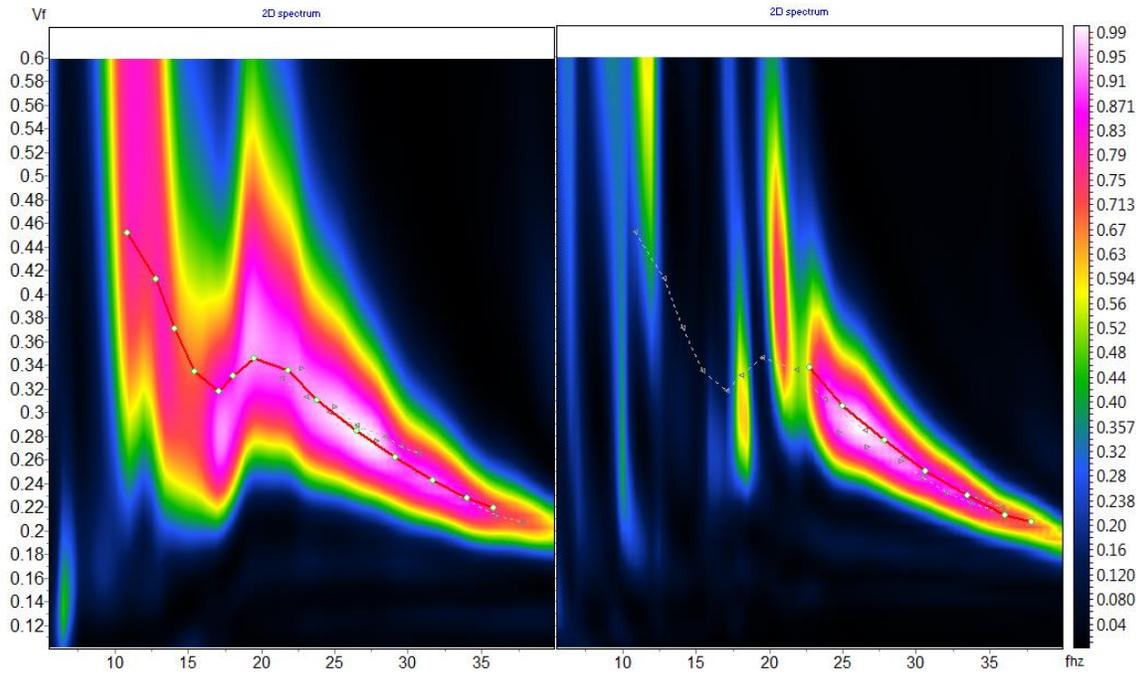
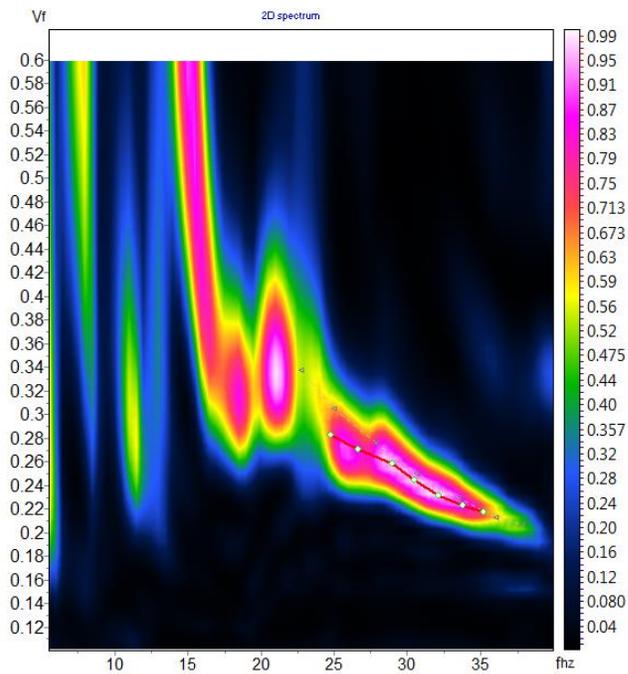


Figura A19: Curva de dispersión correspondiente al disparo 4 de la línea 2.



**Figura A20: Curva de dispersión correspondiente al disparo 5 de la línea 2.**

**Figura A21: Curva de dispersión correspondiente al disparo 6 de la línea 2.**



**Figura A22: Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 2.**

Línea 3: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.

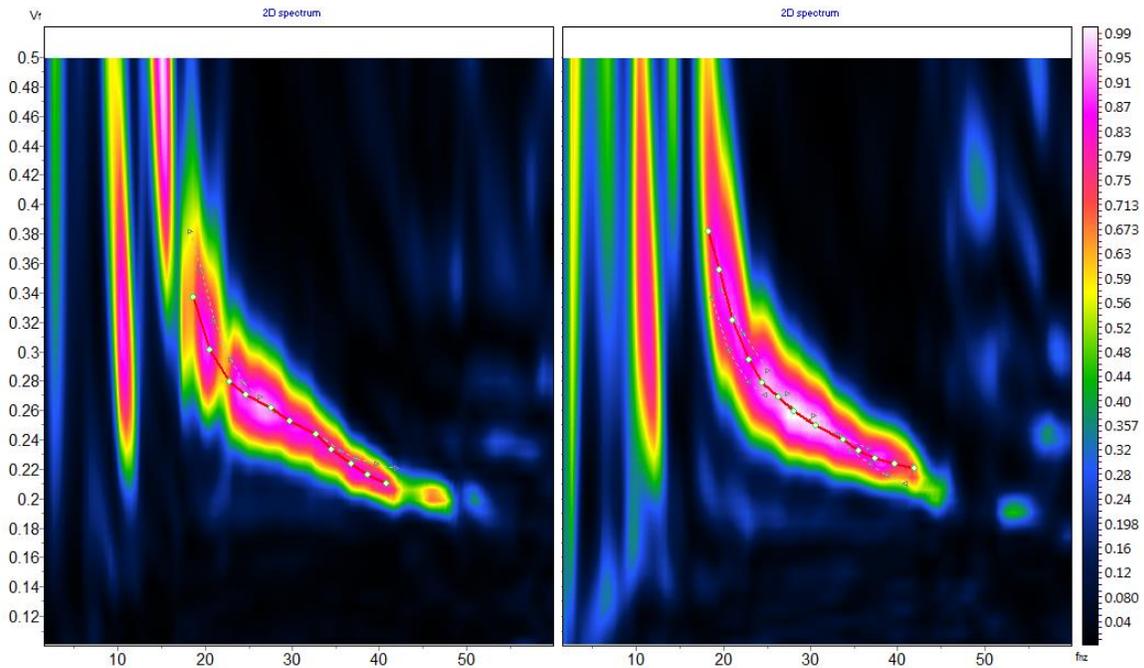


Figura A23: Curva de dispersión correspondiente al disparo 1 de la línea 3.

Figura A24: Curva de dispersión correspondiente al disparo 2 de la línea 3.

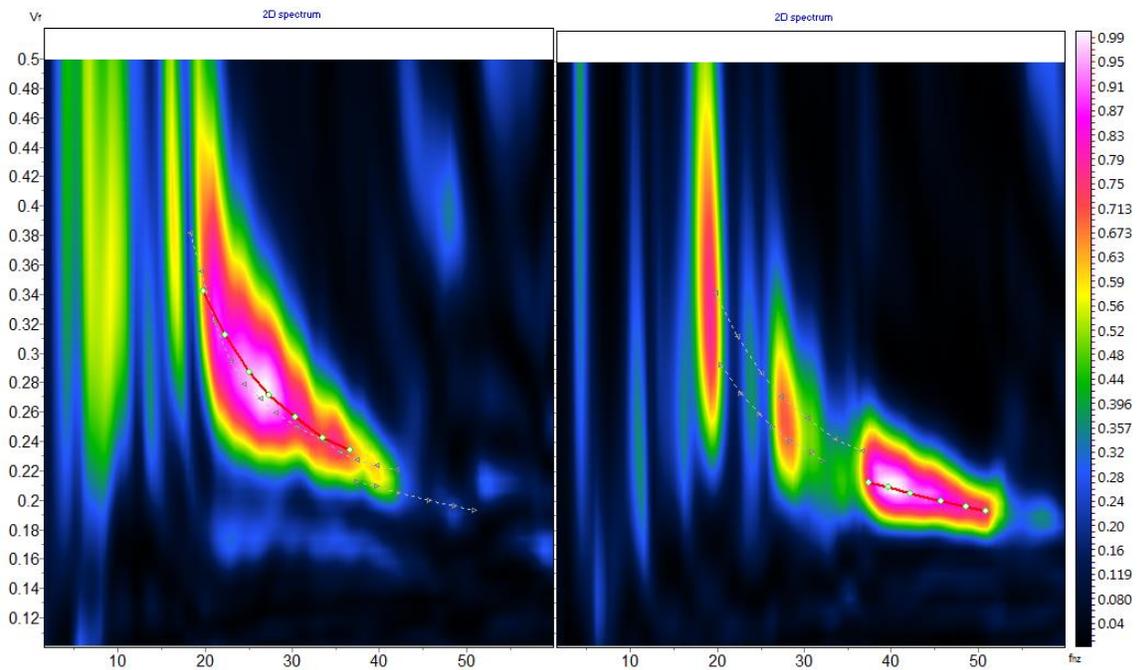
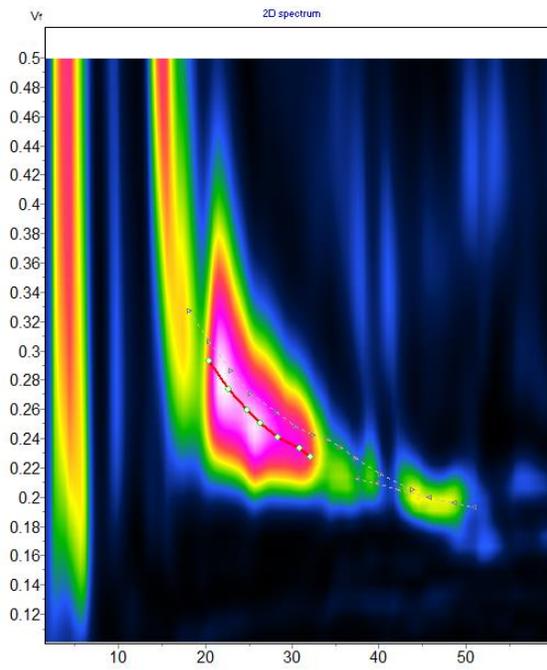
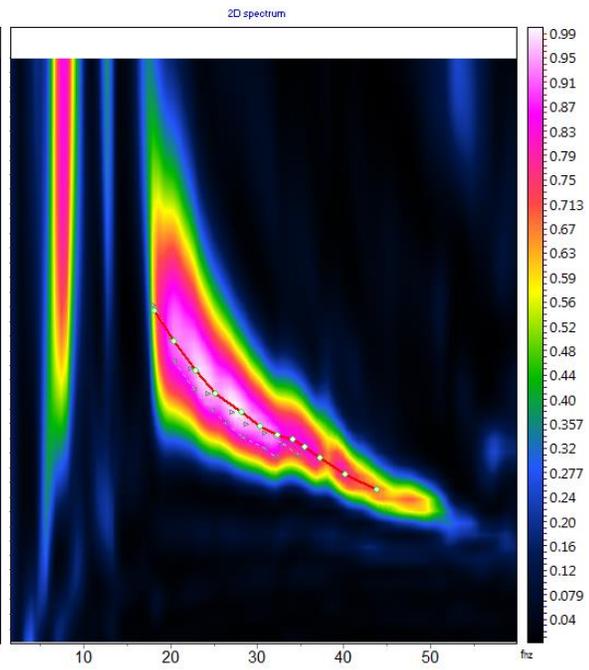


Figura A25: Curva de dispersión correspondiente al disparo 3 de la línea 3.

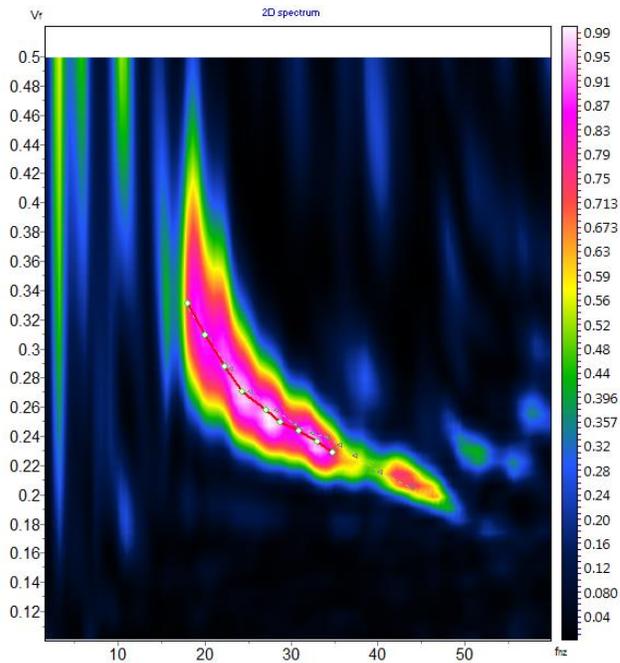
Figura A26: Curva de dispersión correspondiente al disparo 4 de la línea 3.



**Figura A27:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 5 de la línea 3.



**Figura A28:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 6 de la línea 3.



**Figura A29:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 3.

Línea 4: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.

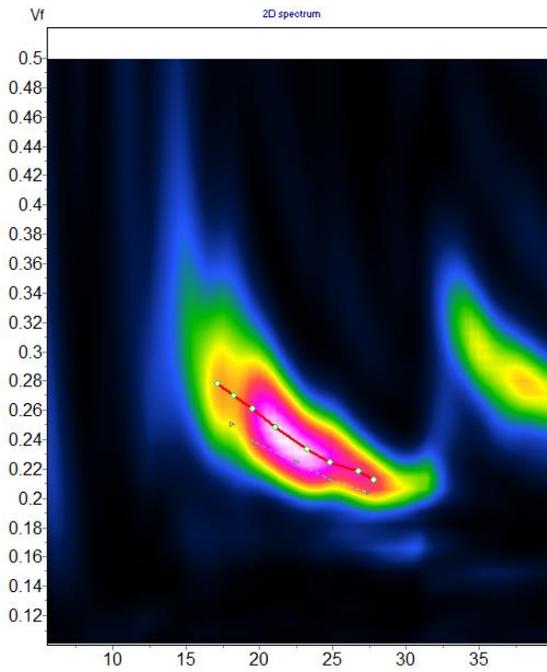


Figura A30: Curva de dispersión correspondiente al disparo 1 de la línea 4.

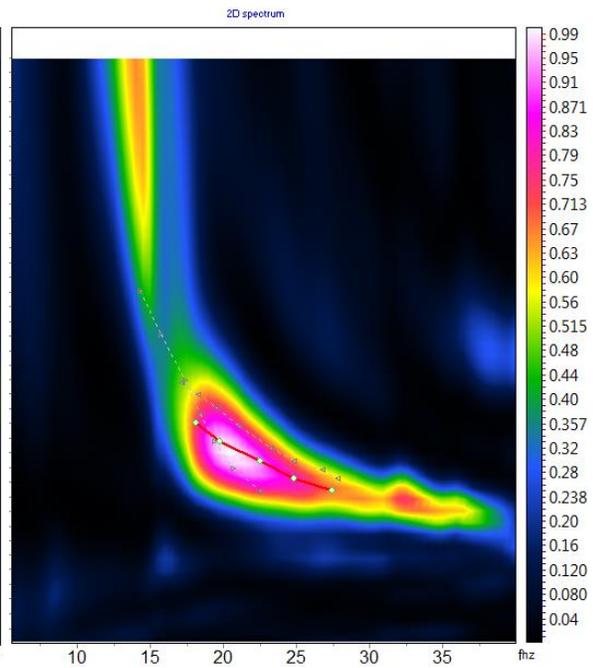


Figura A31: Curva de dispersión correspondiente al disparo 2 de la línea 4.

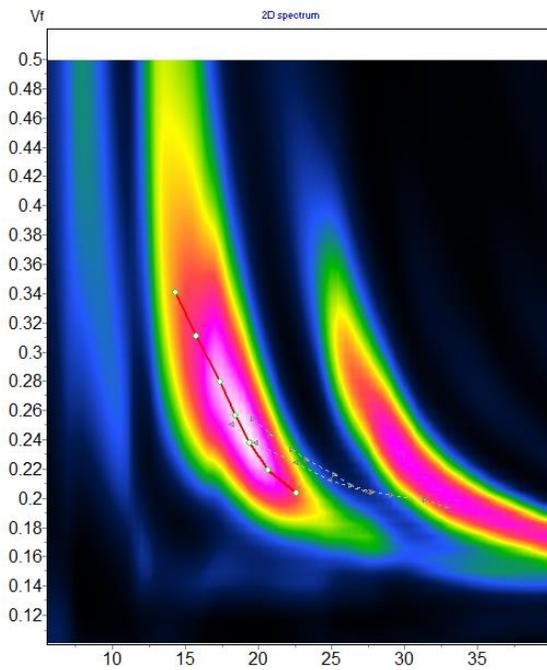


Figura A32: Curva de dispersión correspondiente al disparo 3 de la línea 4.

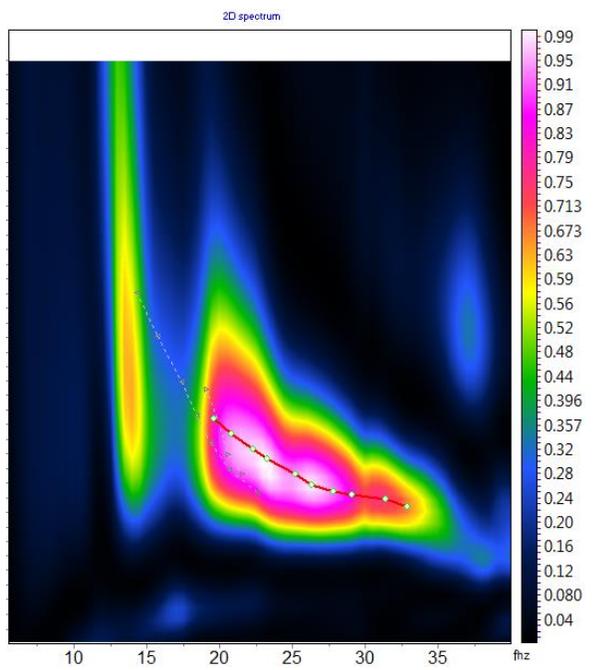
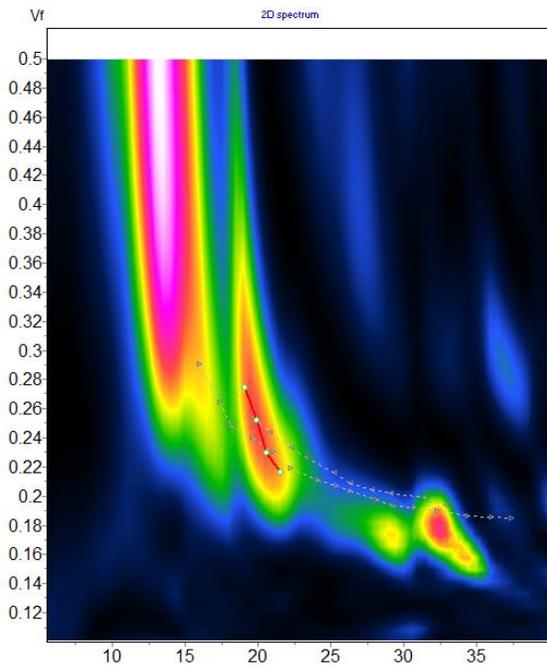
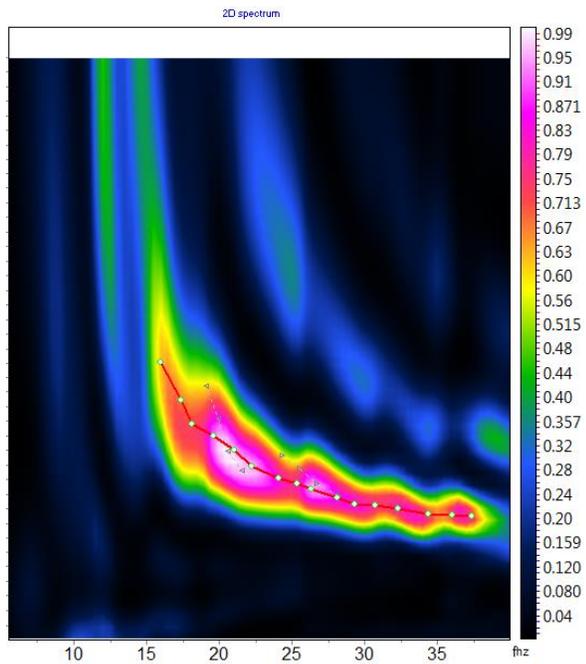


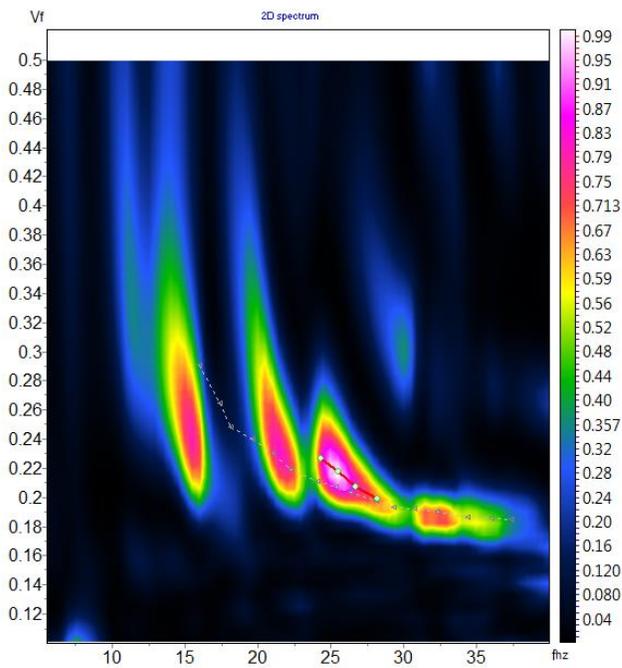
Figura A33: Curva de dispersión correspondiente al disparo 4 de la línea 4.



**Figura A34: Curva de dispersión correspondiente al disparo 5 de la línea 4.**

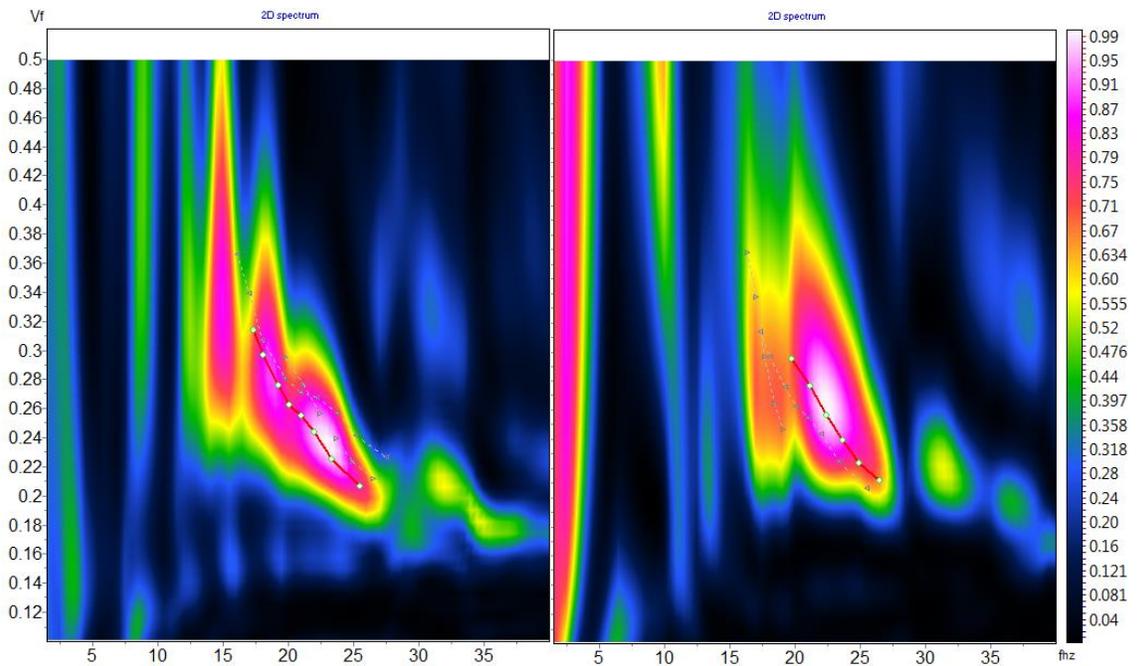
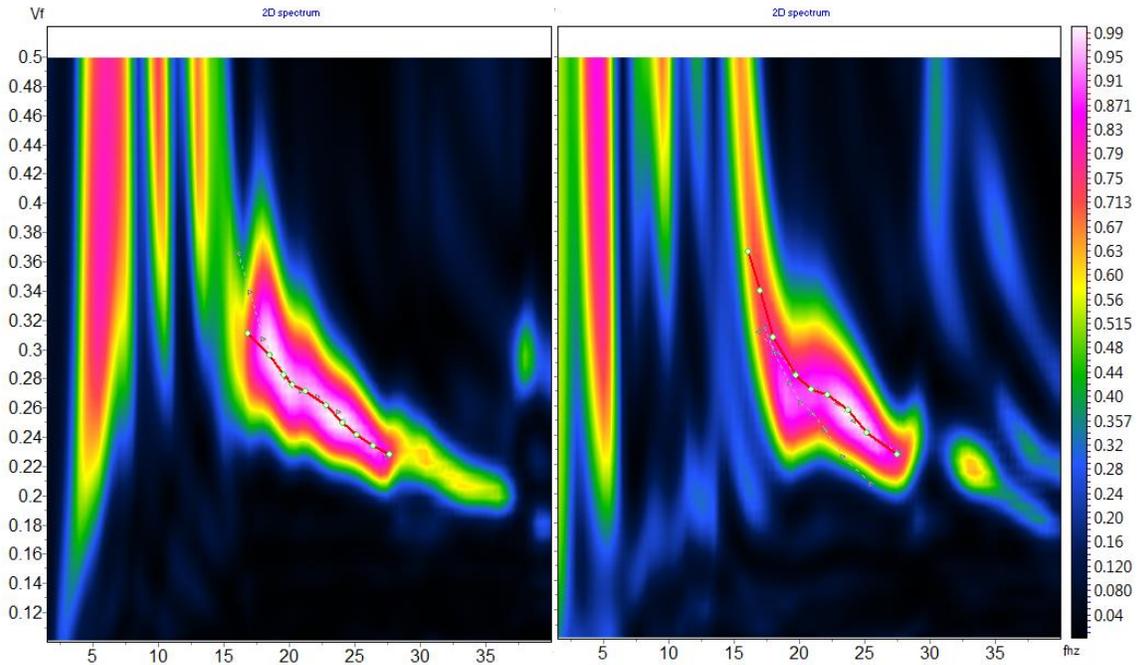


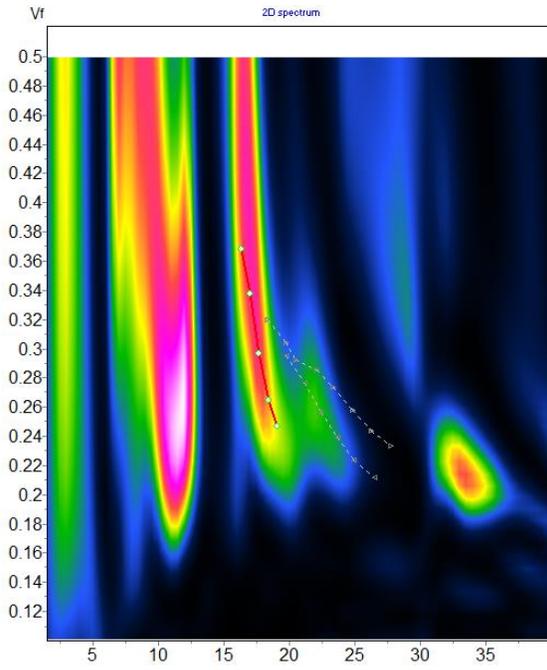
**Figura A35: Curva de dispersión correspondiente al disparo 6 de la línea 4.**



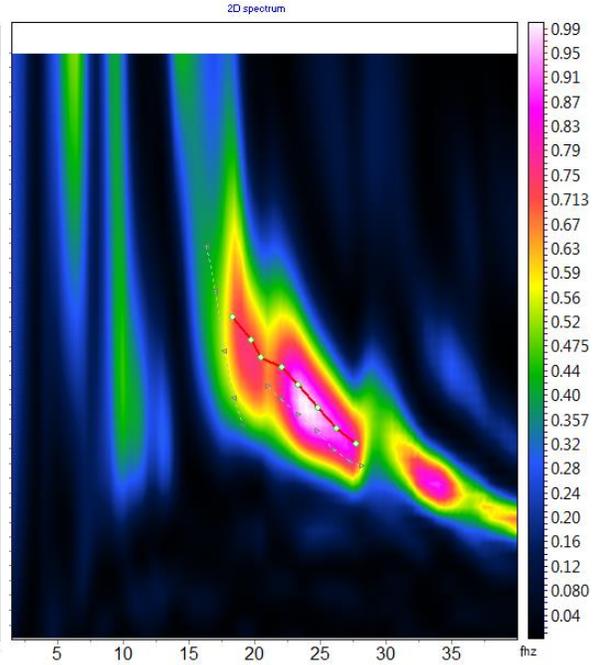
**Figura A36: Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 4.**

Línea 5: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.

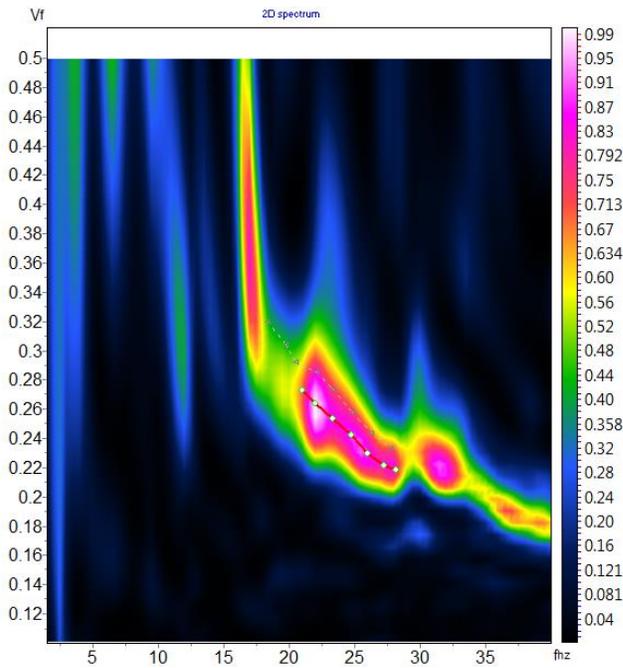




**Figura A41: Curva de dispersión correspondiente al disparo 5 de la línea 5.**



**Figura A42: Curva de dispersión correspondiente al disparo 6 de la línea 5.**



**Figura A43: Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 5.**

Línea 6: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.

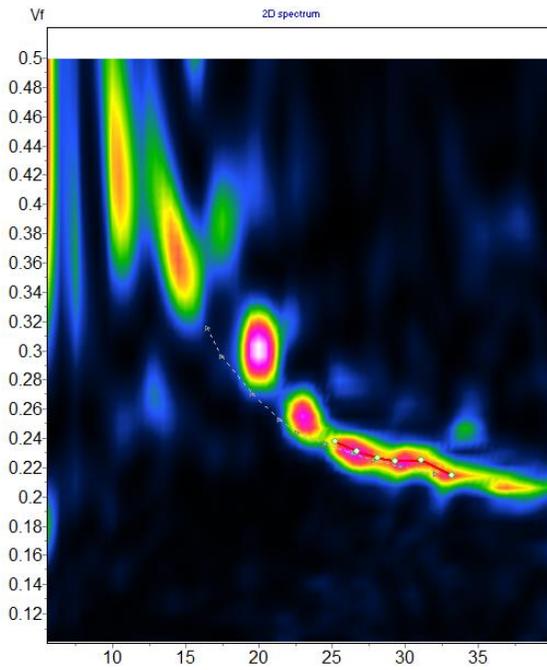


Figura A44: Curva de dispersión correspondiente al disparo 1 de la línea 6.

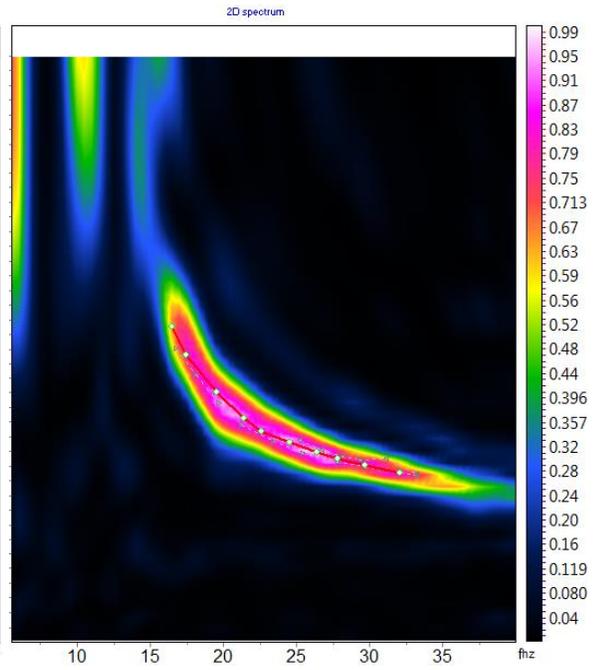


Figura A45: Curva de dispersión correspondiente al disparo 2 de la línea 6.

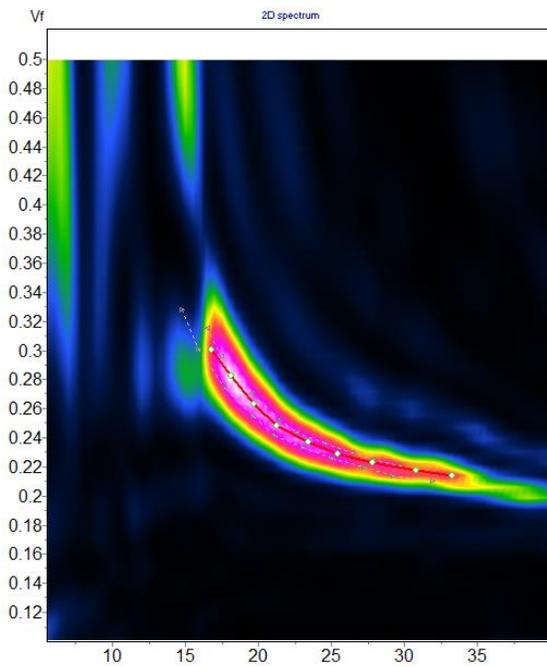


Figura A46: Curva de dispersión correspondiente al disparo 3 de la línea 6.

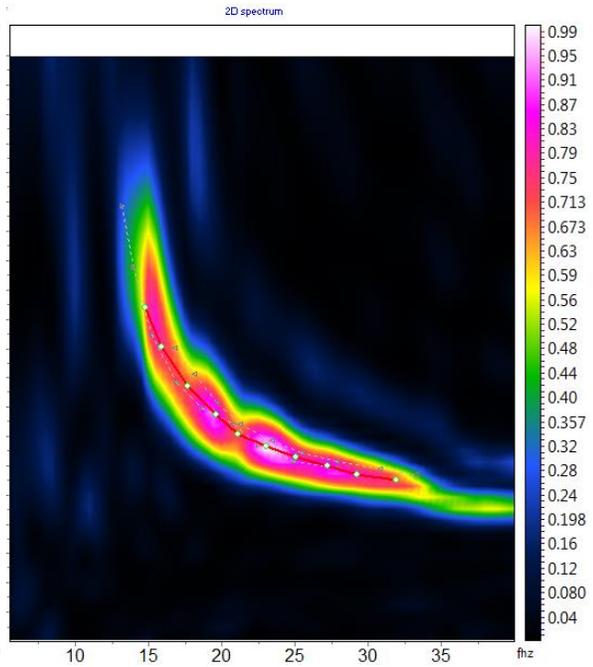
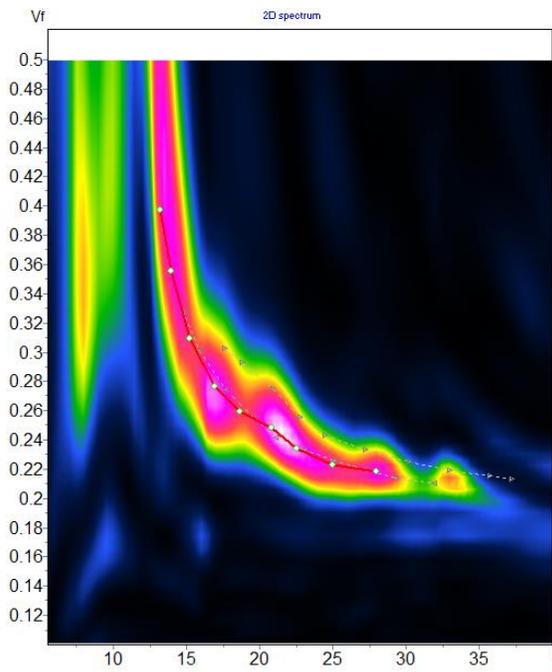
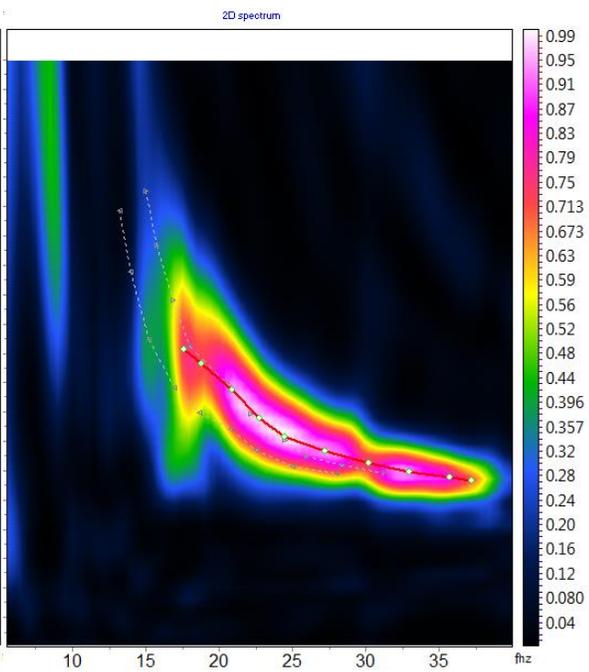


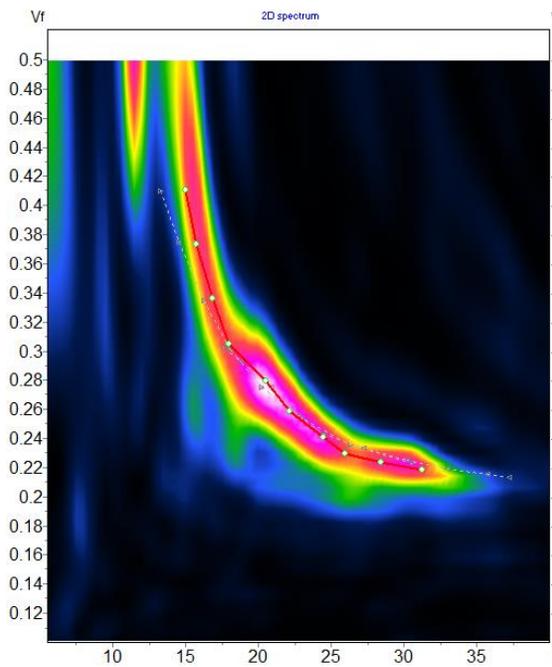
Figura A47: Curva de dispersión correspondiente al disparo 4 de la línea 6.



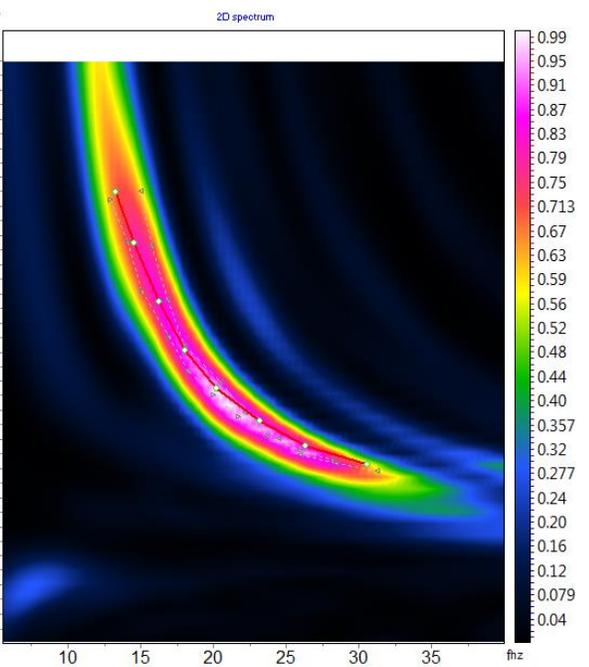
**Figura A48:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 5 de la línea 6.



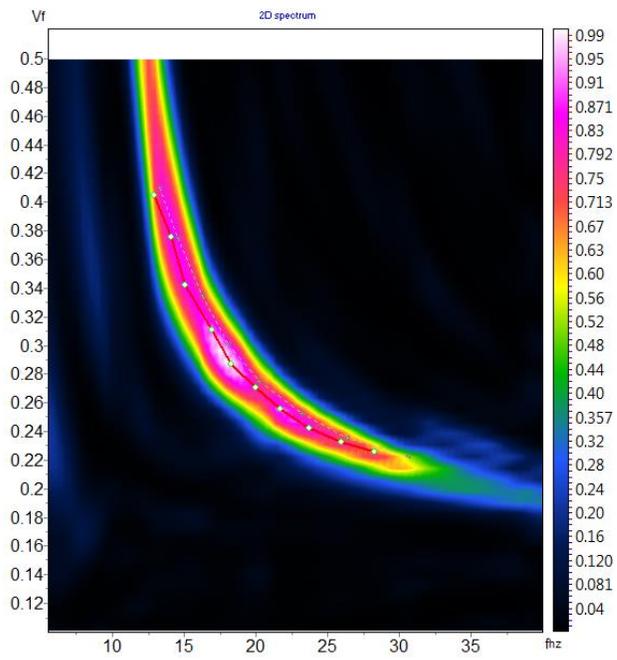
**Figura A49:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 6 de la línea 6.



**Figura A50:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 7 de la línea 6.

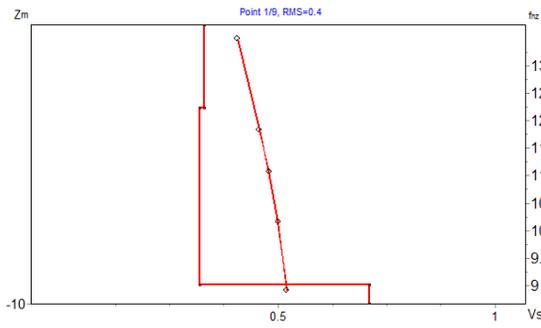


**Figura A51:** Curva de dispersión correspondiente al disparo 8 de la línea 6.

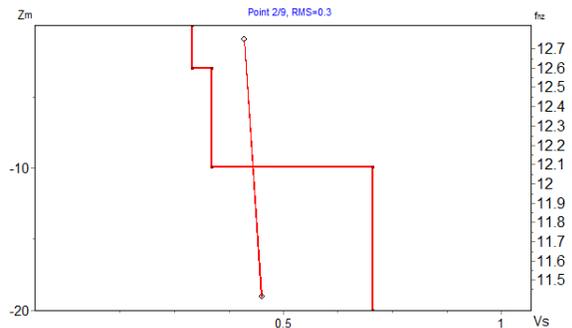


**Figura A52: Curva de dispersión correspondiente al disparo 9 de la línea 6.**

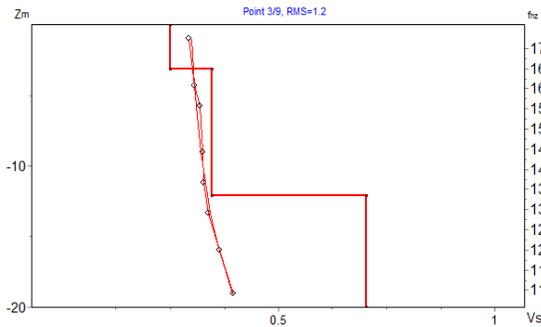
Línea 1: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.



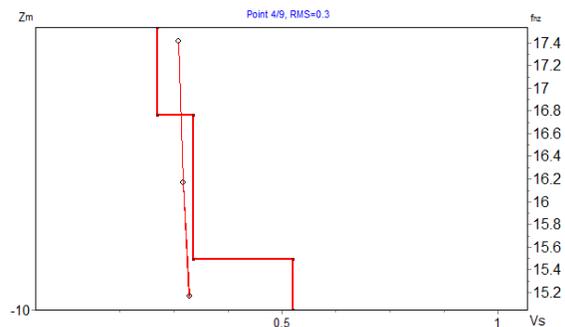
**Figura A53: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 1 de la línea 1.**



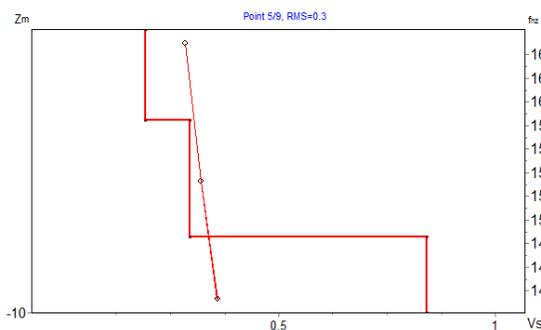
**Figura A54: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 2 de la línea 1.**



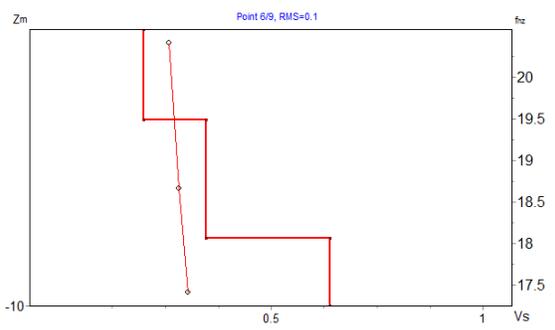
**Figura A55: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 3 de la línea 1.**



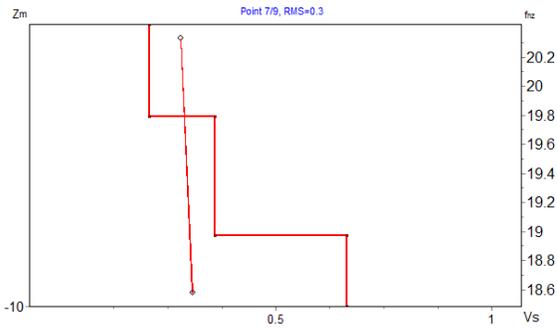
**Figura A56: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 4 de la línea 1.**



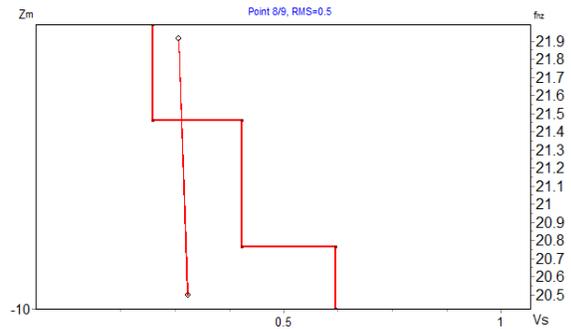
**Figura A57: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 5 de la línea 1.**



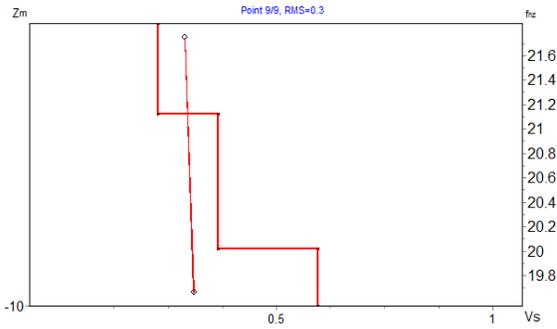
**Figura A58: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 6 de la línea 1.**



**Figura A59: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 7 de la línea 1.**

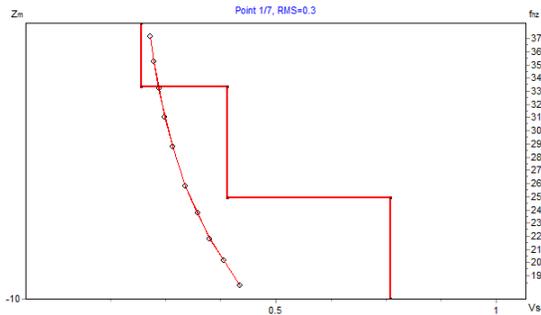


**Figura A60: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 8 de la línea 1.**

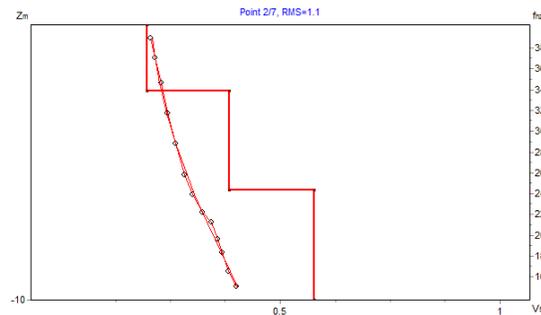


**Figura A61: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 9 de la línea 1.**

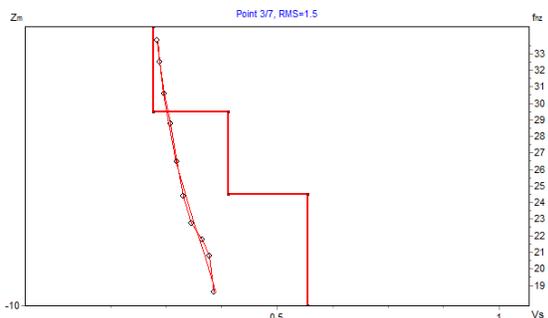
Línea 2: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.



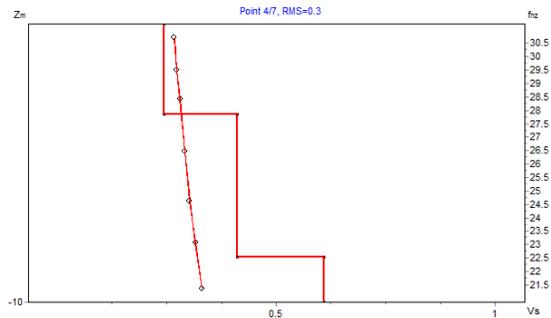
**Figura A62: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 1 de la línea 2.**



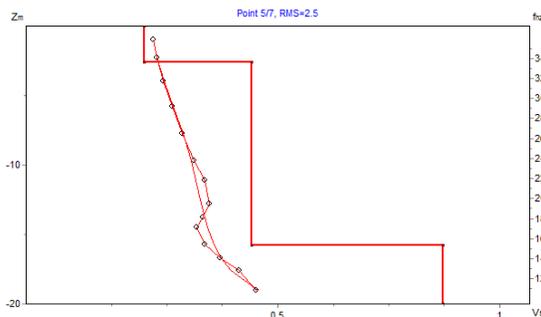
**Figura A63: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 2 de la línea 2.**



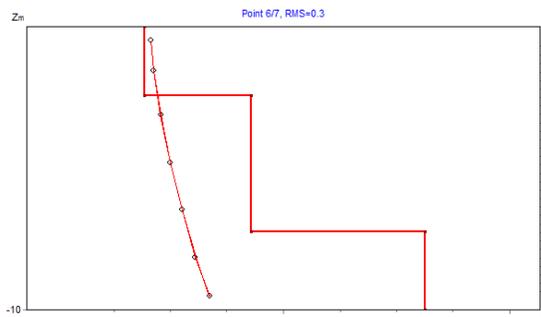
**Figura A64: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 3 de la línea 2.**



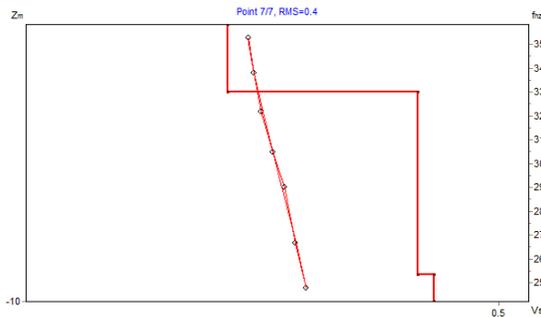
**Figura A65: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 4 de la línea 2.**



**Figura A66: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 5 de la línea 2.**

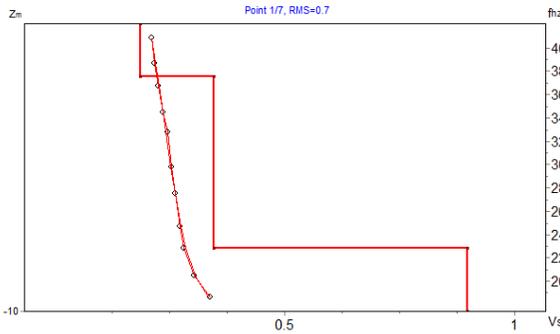


**Figura A67: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 6 de la línea 2.**

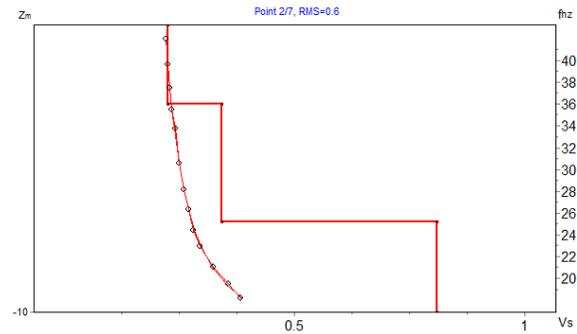


**Figura A68: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 7 de la línea 2.**

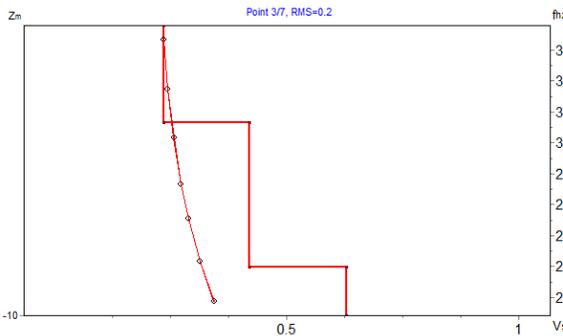
Línea 3: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.



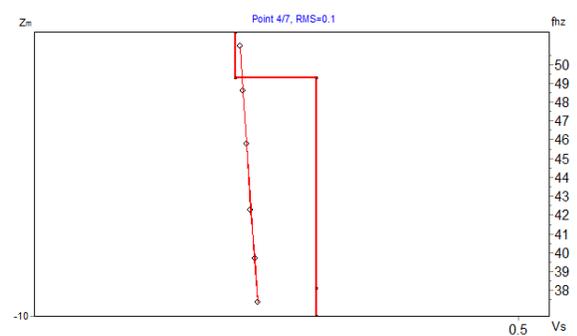
**Figura A69:** Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 1 de la línea 3.



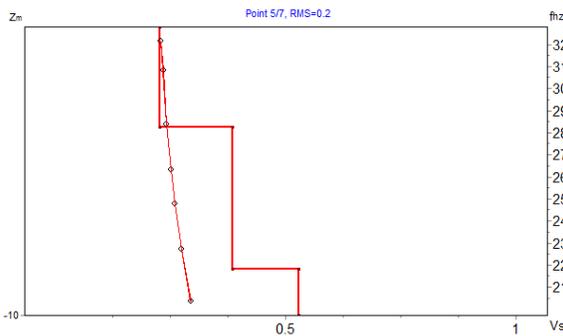
**Figura A70:** Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 2 de la línea 3.



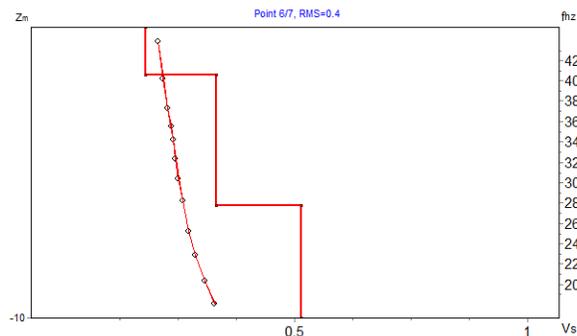
**Figura A71:** Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 3 de la línea 3.



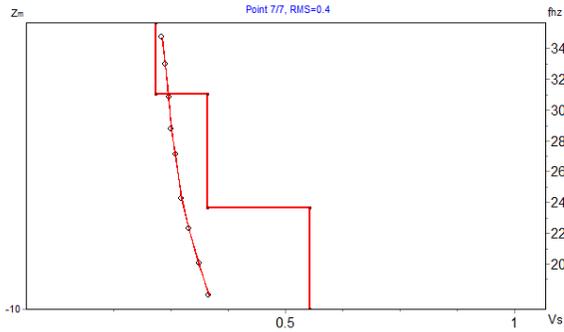
**Figura A72:** Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 4 de la línea 3.



**Figura A73:** Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 5 de la línea 3.

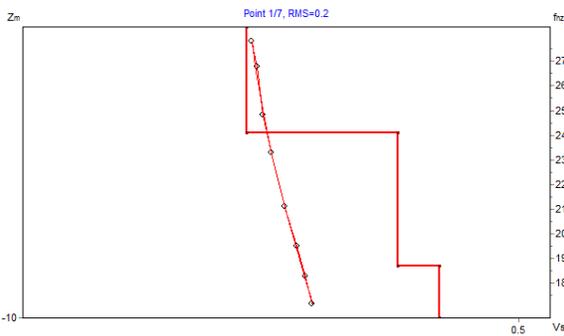


**Figura A74:** Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 6 de la línea 3.

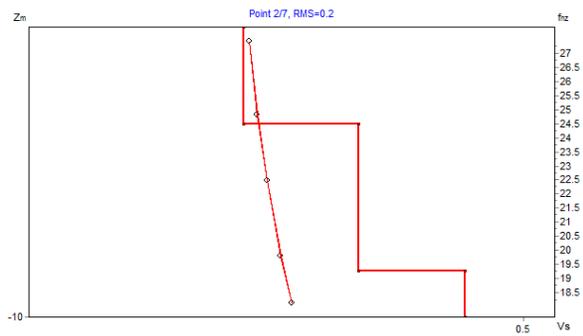


**Figura A75: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 7 de la línea 3.**

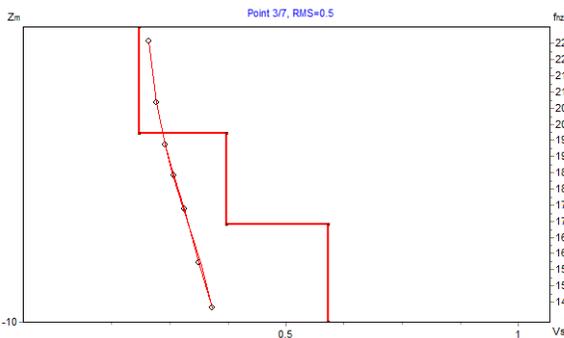
Línea 4: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.



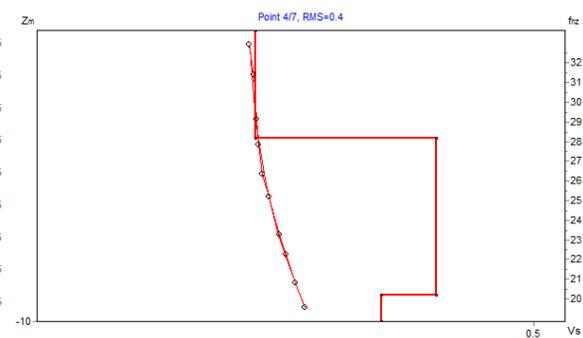
**Figura A76: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 1 de la línea 4.**



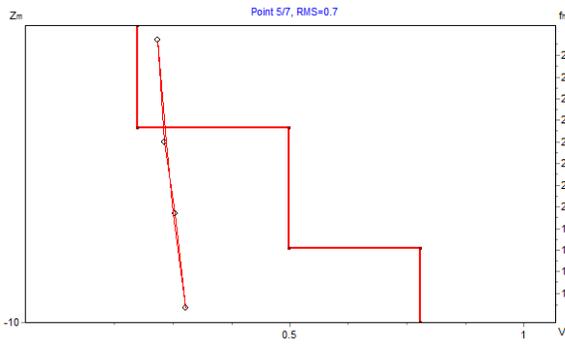
**Figura A77: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 2 de la línea 4.**



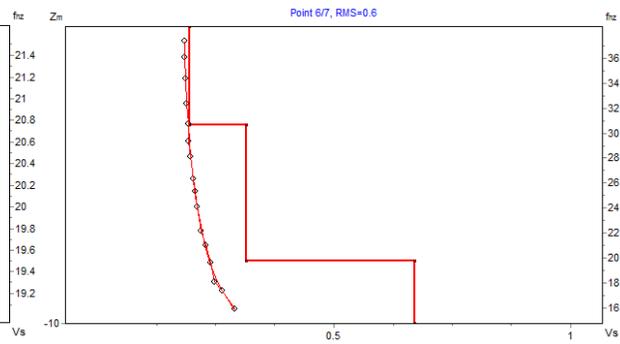
**Figura A78: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 3 de la línea 4.**



**Figura A79: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 4 de la línea 4.**



**Figura A80: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 5 de la línea 4.**

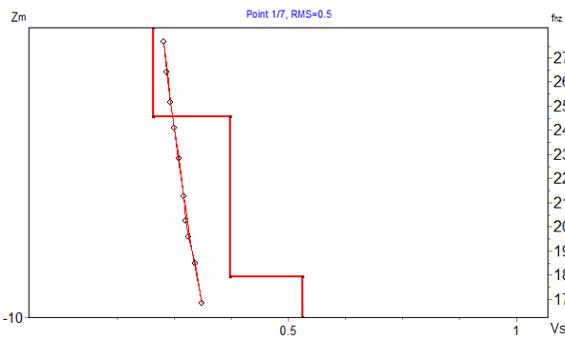


**Figura A81: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 6 de la línea 4.**

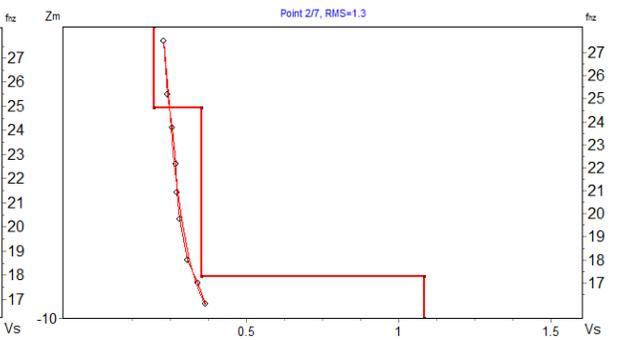


**Figura A82: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 7 de la línea 4.**

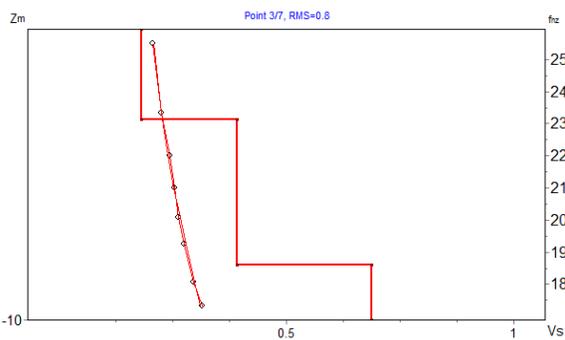
Línea 5: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.



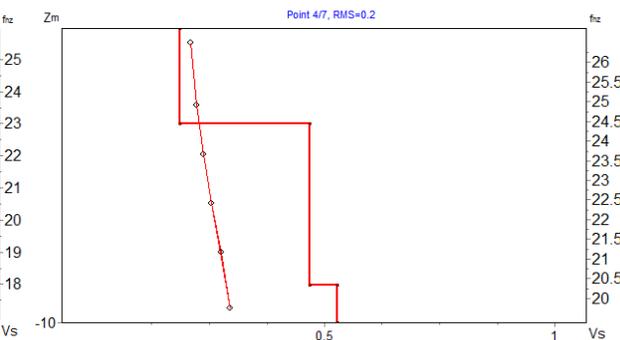
**Figura A83: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 1 de la línea 5.**



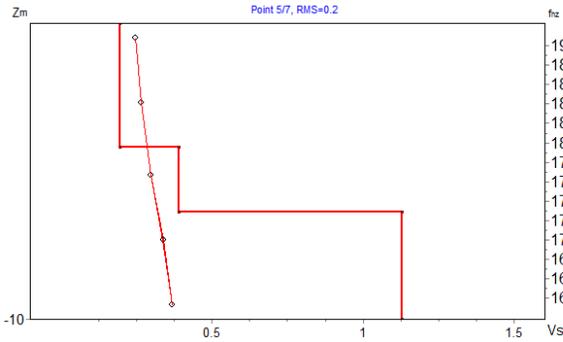
**Figura A84: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 2 de la línea 5.**



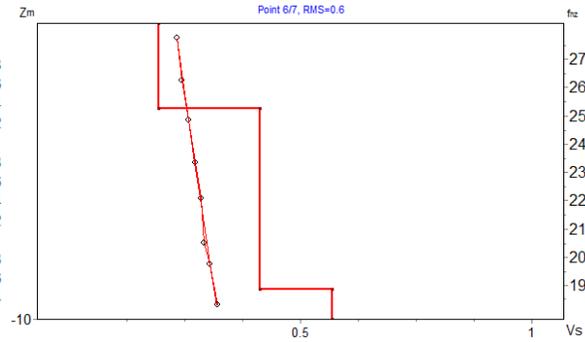
**Figura A85: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 3 de la línea 5.**



**Figura A86: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 4 de la línea 5.**



**Figura A87: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 5 de la línea 5.**

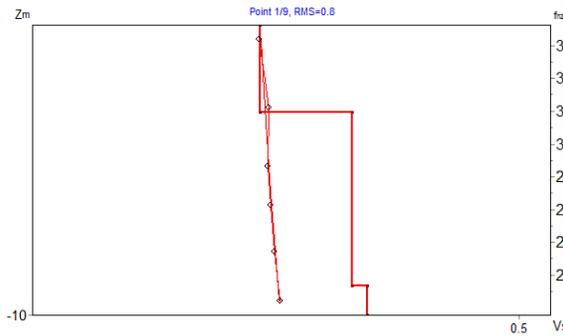


**Figura A88: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 6 de la línea 5.**

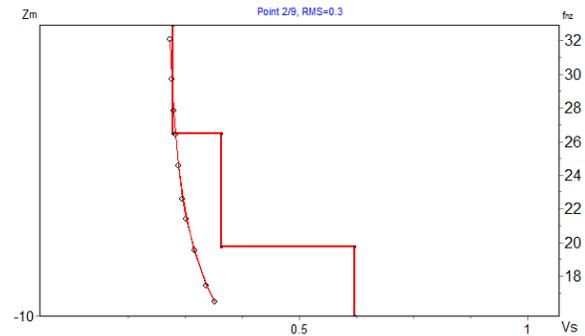


**Figura A89: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 7 de la línea 5.**

Línea 6: Curvas de dispersión. Imágenes generadas en el programa ZondST2D.



**Figura A90: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 1 de la línea 6.**



**Figura A91: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 2 de la línea 6.**

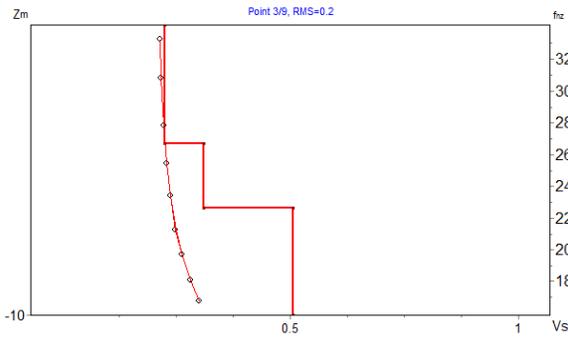


Figura A92: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 3 de la línea 6.

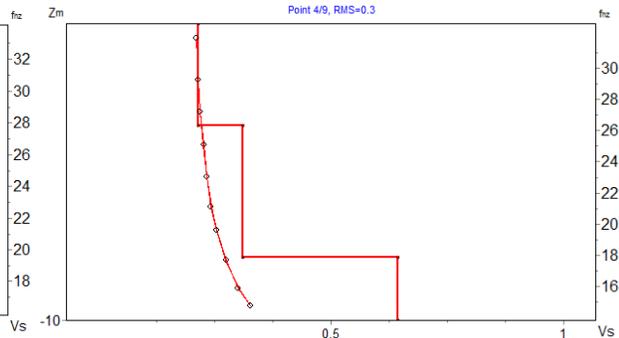


Figura A93: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 4 de la línea 6.

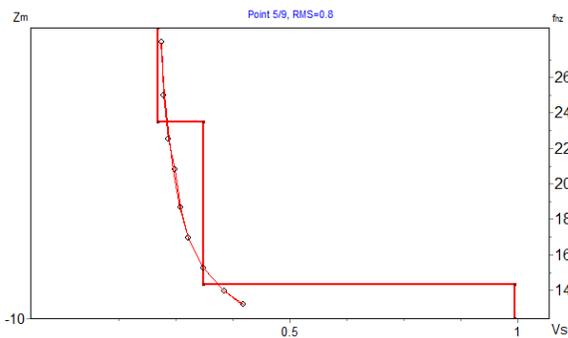


Figura A94: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 5 de la línea 6.

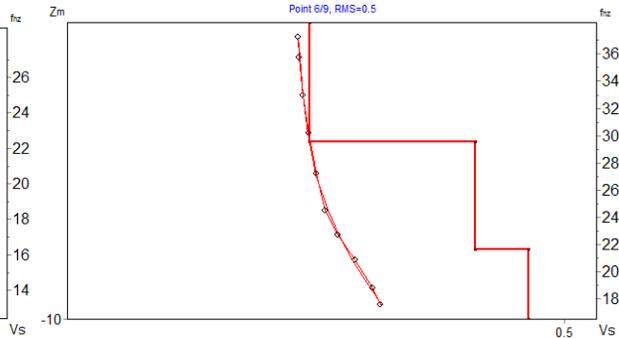


Figura A95: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 6 de la línea 6.

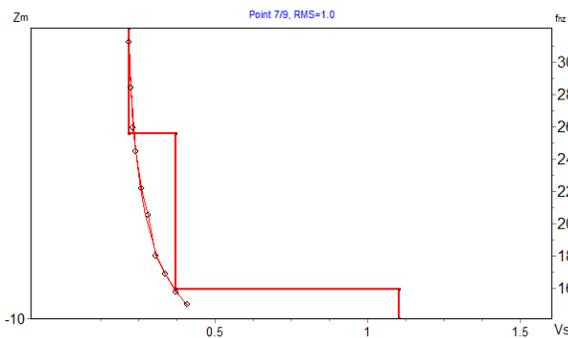


Figura A96: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 7 de la línea 6.

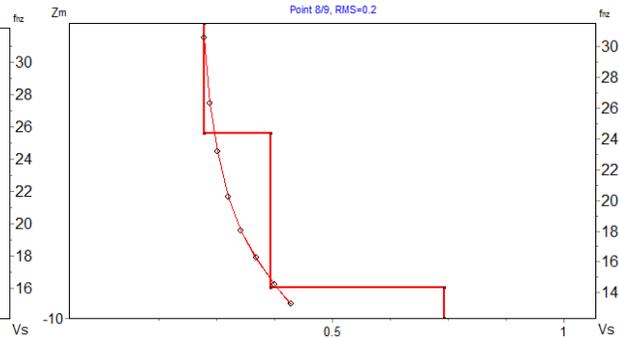
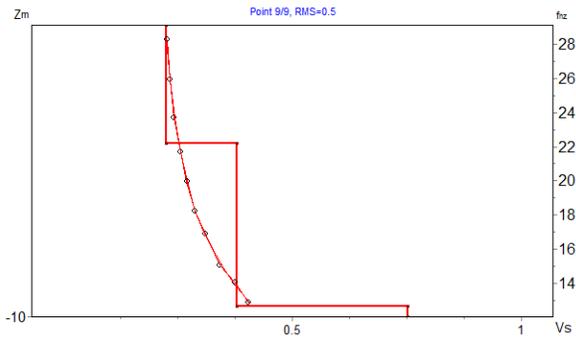


Figura A97: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 8 de la línea 6.



**Figura A98: Modelo estimado 1D de velocidad de onda S, correspondiente al disparo 9 de la línea 6.**