



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

Evaluación de cambios de propiedades elásticas del Valle de México

TESIS

Que para obtener el título de

Ingeniera Geofísica

P R E S E N T A

Yannick Ascencio López

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Mathieu Félix Pertón



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2026



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



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

De acuerdo con lo anterior, manifiesto que el trabajo escrito titulado EVALUACION DE CAMBIOS DE PROPIEDADES ELASTICAS DEL VALLE DE MEXICO que presenté para obtener el título de INGENIERA GEOFÍSICO es original, de mi autoría y lo realicé con el rigor metodológico exigido por mi Entidad Académica, citando las fuentes de ideas, textos, imágenes, gráficos u otro tipo de obras empleadas para su desarrollo.

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

YANNICK ASCENCIO LOPEZ
Número de cuenta: 315015566

Agradecimientos

A mis padres, con el corazón lleno de un amor y una gratitud que las palabras apenas pueden contener. Ustedes son el cimiento inquebrantable sobre el cual se ha construido cada uno de mis logros, no solo académicos, sino humanos. Les agradezco no solo por el apoyo incondicional durante esta carrera, sino por una vida entera de enseñanzas, por esos sacrificios silenciosos que nunca pidieron reconocimiento y por ser mi ejemplo vivo de integridad, humildad y resiliencia. Sus palabras de aliento en los momentos de duda y su fe inquebrantable en mí fueron el motor que me impulsó a seguir adelante, incluso cuando yo misma vacilaba. Esta tesis es, en gran medida, el fruto de su amor inagotable y de los valores que con tanto cuidado sembraron en mí.

A mi querida hermana Ale, mi compañera de vida desde el primer día. Tu hermandad ha sido un pilar fundamental y un refugio seguro. En ti siempre encontré una complicidad única, una mano extendida en cada tropiezo y un consejo sincero cuando más lo necesitaba. Gracias por ser mi constante, por tu risa contagiosa y por tu fortaleza que siempre me inspira.

A mis adoradas sobrinas, Sofí y Gaby, mis rayos de sol. Ustedes, con su ternura pura, sus travesuras llenas de imaginación y su curiosidad infinita, han llenado mis días de un color y una alegría incomparables. Verlas crecer y asombrarse ante el mundo ha sido el recordatorio más hermoso y poderoso de por qué vale la pena perseguir el conocimiento, la verdad y trabajar por construir un futuro mejor. Me enseñaron a ver el mundo con asombro nuevamente.

A Dante, mi compañero en este viaje y en la vida. No existen palabras suficientes para agradecerle tu presencia constante a mi lado. Fuiste mi cómplice en las batallas diarias, el puerto sereno que me escuchó en los momentos de mayor estrés, el que me recordó respirar cuando todo parecía demasiado y el que celebró con genuina alegría cada pequeño avance. Tu paciencia infinita, tu amor tranquilo y tu fe en mí renovaron mis fuerzas en los días más agotadores. Esta tesis lleva también tu nombre, entre líneas, en cada desvelo que compartimos y en cada sueño que comenzamos a construir juntos.

A mis amigos, esos faros de alegría y normalidad. A Clemente y Juan Carlos, en especial, por su lealtad a prueba de todo, por esos momentos de distensión que eran un bálsamo y por recordarme, justo cuando lo necesitaba, que hay una vida vibrante y esperándome más allá de las páginas de los libros. A todos mis demás amigos, mi gratitud por su comprensión, su paciencia y por estar presentes, de una forma u otra, incluso cuando la distancia o la vorágine del trabajo me absorbían por completo. Su amistad ha sido un regalo y un sostén invaluable.

A toda mi familia extendida, gracias por el tejido de cariño y apoyo que han creado a mi alrededor.

A todos mis profesores, quienes a lo largo de mi formación no solo me transmitieron conocimientos, sino también una pasión por el aprendizaje que culmina en este proyecto. Mi gratitud más especial y profesional es para el Dr. Mathieu Perton, mi asesor de tesis. Le expreso mi más profundo agradecimiento por su guía experta, su infinita paciencia y su invaluable aporte a este trabajo. Su rigor académico y sus consejos precisos fueron faros que iluminaron el camino de esta investigación. Más allá de lo profesional, le agradezco por la confianza y la libertad que me brindó para explorar y desarrollar mis ideas. Ha sido un verdadero honor tenerlo como mentor.

Finalmente, deseo honrar con profundo respeto la memoria de mi Abuelo Eduardo Ascencio T. y de Humberto López H. Sus legados de esfuerzo honesto, dignidad inquebrantable y amor por los suyos han sido una inspiración silenciosa pero constante. Ojalá esta obra, fruto de tanto apoyo colectivo, honre en alguna medida el camino de valores que ellos iniciaron.

*A cada uno de ustedes, les debo lo que soy y lo que he logrado. Este logro no es solo mío, es **nuestro**. Por siempre, gracias.*

"El futuro está en los cielos, y el futuro siempre ha sido ciencia."

Michael Crichton

"La ciencia, muchacho, está hecha de errores, pero son errores que es mejor cometer que no aprender nada."

Julio Verne

"Nada es imposible; es solo una cuestión de cuánto uno está dispuesto a sacrificar por ello."

Julio Verne

"Todos somos exploradores, impulsados a saber qué hay más allá del horizonte, qué hay más allá de nuestras propias costas."

Michael Crichton

Contenido

Agradecimientos	1
Resumen	7
Abstract	9
Capítulo I. Generalidades	11
I.1 introducción	11
I.2 Objetivos y Alcances	13
I.2.1 Objetivo principal	13
I.2.2 Objetivos particulares	13
Capítulo II Marco Teórico	14
II.1 Marco Geológico	15
II.2 Marco Hidrológico	17
II.3 Marco Sismológico	19
II.3.1 Ondas Sísmicas	21
II.3.2 Relaciones empíricas entre densidad y velocidad elásticas	22
II.3.3 Cocientes espectrales HV	23
II.4 Marco de Medición	26
II.4.1 Sensores Distribuidos de Fibra Óptica (DAS)	26
II.4.2 Red Sismológica del Valle de México	26
Capítulo III Sensibilidad de los HV al cambio de propiedades	28
III.1 Procesamiento de los registros	28
III.2 Datos Experimentales	29
III.3 Sensibilidad teórica	32
III.2.1 Generación del Modelo Inicial	33
III.2.2 Simulación de HV y efecto de cambios de propiedades en profundidad sobre HV	34
Capítulo IV. Simulación de sismos y sensibilidad a cambios de propiedades del subsuelo	36
IV.1 Registros del Servicio Sismológico Nacional	36
IV.1.1 Generación del modelo de velocidades	37
IV.1.2 Simulación sísmica	39
IV.1.3 Ubicación de las estaciones y tensor de momento sísmico	40
IV.2 Registros del DAS	49

<i>IV.2.1 Catálogo de Registros y Características Principales</i>	<i>50</i>
<i>IV.2.2 Análisis de la Respuesta Espacio-Temporal</i>	<i>50</i>
<i>IV.2.3 Análisis de Formas de Onda</i>	<i>54</i>
<i>Capítulo V. Conclusiones</i>	<i>57</i>
<i>Referencias</i>	<i>58</i>

Índice de Figuras

FIGURA 1: (A) LA FAJA VOLCÁNICA TRANSMEXICANA Y SU UBICACIÓN EN MÉXICO; (B) UBICACIÓN DEL VALLE DE MÉXICO	15
FIGURA 2: MODELO DE ELEVACIÓN DIGITAL QUE MUESTRA LA LOCALIZACIÓN DE LA CIUDAD DE MÉXICO, ASÍ COMO LAS SIERRAS QUE LIMITAN A ESTAS ÚLTIMAS: (1) SIERRA DE LAS CRUCES, (2) SIERRA NEVADA, (3) SIERRA DE CHICHINAUTZIN; (4) SIERRA DE GUADALUPE; (5) SIERRA DE PACHUCA. EN LA PORCIÓN SUR DEL MAPA SE MUESTRAN LA REGIÓN DE (6) TEPOZTLÁN, MORELOS, EN DONDE SE ENCUENTRAN EXPUESTOS LOS PRIMEROS EPISODIOS VOLCÁNICOS DE LA FAJA VOLCÁNICA TRANS-MEXICANA EN SU SECTOR CENTRO-ORIENTAL Y LOS CAMPOS VOLCÁNICOS DE LA SIERRA MADRE DEL SUR: (7) HUAUTLA, MORELOS, (8) LA CALDERA DE TILZAPOTLA Y (9) TAXCO, GUERRERO. (TOMADA DE GONZÁLEZ TORRES ET AL., 2015).....	16
FIGURA 3 IMAGEN REPRESENTATIVA DE LA HIDROLOGÍA DEL VALLE DE MÉXICO, TOMADA DE DGDC-UNAM	17
FIGURA 4 MAPA REPRESENTATIVO DEL ARCO DE FUEGO	19
FIGURA 5 PLACAS TECTÓNICAS DE MÉXICO, MODIFICADO DEL SSN.	20
FIGURA 6 UBICACIONES DE LOS REGISTROS OCUPADOS	29
FIGURA 7 CURVAS HV DE LA ESTACIÓN BENITO JUAREZ (BJVM)	30
FIGURA 8 EVOLUCIÓN DEL RATIO HV EN FUNCIÓN DEL TIEMPO Y LA FRECUENCIA.....	31
FIGURA 9 MODELO DE VELOCIDADES DEL MODELO DE LA ESCUELA PREPARATORIA 8	33
FIGURA 10 REPRESENTACIÓN DEL MODELO INICIAL DE HV	33
FIGURA 11. COMPARACIÓN ENTRE LA CURVA HV SIMULADAS Y LAS CURVAS EXPERIMENTALES	34
FIGURA 12 MAPA CON LA UBICACIÓN DEL EPICENTRO DEL SISMO DE 2017	37
FIGURA 13 A) SE MUESTRA LA UBICACIÓN DEL EPICENTRO (ROJO) Y DE LA ZONA DE INTERÉS EN AZUL, B) SE MUESTRA LA TOMOGRAFÍA GENERADA	38
FIGURA 14 PERFIL DE VELOCIDADES CON EL CUAL EMPEZAREMOS LA SIMULACIÓN DEL SISMO.....	38
FIGURA 15 DEMOSTRACION GRAFICA DEL AZIMUT	42
FIGURA 16 COMPARACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS PARA LAS ESTACIONES DE LA RED SÍSMICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HV (DÍA 110 Y DÍA 171). CIUDAD DE MÉXICO	45
FIGURA 17 COMPARACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS PARA LAS ESTACIONES DE LA RED SÍSMICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HV (DÍA 110 Y DÍA 171). EL POZO.....	46
FIGURA 18 COMPARACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS PARA LAS ESTACIONES DE LA RED SÍSMICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HV (DÍA 110 Y DÍA 171). POPOCATÉPETL	47
FIGURA 19 COMPARACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS PARA LAS ESTACIONES DE LA RED SÍSMICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HV (DÍA 110 Y DÍA 171). YAUTEPEC.	48
FIGURA 20 COMPARACIÓN DE SISMOGRAMAS SINTÉTICOS PARA LAS ESTACIONES DE LA RED SÍSMICA BAJO DIFERENTES CONDICIONES DE HV (DÍA 110 Y DÍA 171). FRESNILLO.	49
FIGURA 21 REGISTRO DEL DAS PARA EL DÍA 19 DE SEPTIEMBRE DEL 2022	51
FIGURA 22 REGISTRO DEL DAS PARA EL DÍA 22 DE SEPTIEMBRE DEL 2022	52
FIGURA 23 REGISTRO DEL DAS PARA EL DÍA 03 DE NOVIEMBRE DEL 2022	52
FIGURA 24 REGISTRO DEL DAS PARA EL DÍA 30 DE DICIEMBRE DEL 2022	53
FIGURA 25 REGISTRO DEL DAS PARA EL DÍA 29 DE MAYO DEL 2022	53
FIGURA 26 FORMAS DE ONDA NORMALIZADAS	54
FIGURA 27 FORMA DE ONDAS NORMALIZADAS Y FILTRADAS	54

Resumen

En esta investigación se evaluaron los efectos de las variaciones temporales de las propiedades del subsuelo: 1) sobre los cocientes espectrales horizontales a verticales (HV) en la estación BJVM de tres componentes de la red sísmica del Valle de México, a principios del año 2020, y 2) sobre la respuesta sísmica registrada mediante mediciones DAS en 2022. Para cada observación, comprobamos la sensibilidad a esas variaciones mediante simulaciones. Para ello, se implementó una metodología integral que combinó enfoques teóricos, experimentales y de simulación.

En primer lugar, se calcularon los HV teóricos, variando sistemáticamente las propiedades del subsuelo alrededor de un perfil de velocidad de referencia. Los resultados demostraron alta sensibilidad de los cocientes espectrales ante cambios en la velocidad de onda cortante (V_s) y en el espesor de los estratos sedimentarios.

En segundo lugar, se procesaron registros de la estación Benito Juárez (BJVM) durante 171 días de 2020 para calcular los HV experimentales. El análisis de la variabilidad de los HV mediante un mapa de calor tiempo-frecuencia reveló variaciones temporales significativas en el rango de 0.1-0.5 Hz, con fluctuaciones de amplitud de hasta 30%. Estas anomalías, particularmente notorias entre los días 60 y 100, mostraron una correlación con los patrones de precipitación estacional, lo que confirma la influencia de los cambios de saturación en las propiedades elásticas del subsuelo.

Paralelamente, se analizó la respuesta sísmica a partir de mediciones de sensores distribuidos de fibra óptica (DAS). El análisis de cinco registros representativos (Mw4.7 a Mw7.7), procesados mediante normalización y filtrado (0.4-1.2 Hz), permitió caracterizar la propagación de ondas con alta resolución espacial, identificando alta coherencia espacial y duración prolongada en los eventos de mayor magnitud, asociadas al atrapamiento de ondas superficiales en la cuenca.

Finalmente se simuló la propagación de ondas sísmicas utilizando los modelos de subsuelo correspondientes a los días 110 y 171, un modelo tomográfico regional y un tensor de momento sísmico rotado geométricamente. Las formas de onda sintéticas generadas mostraron alta coherencia con los registros observados. Las simulaciones cuantificaron diferencias de hasta 50% en la amplitud de la respuesta sísmica de la CDMX bajo diferentes condiciones de saturación, frente a la estabilidad de las estaciones en sustratos rocosos, donde las variaciones no superaron el 7%.

La integración metodológica desarrollada constituye un aporte significativo para la caracterización sísmica del Valle de México, proporcionando herramientas para la microzonificación sísmica, diseño sismorresistente y sistemas de alerta temprana.

Palabras clave: HVSr, Valle de México, DAS, simulaciones sísmicas, variaciones temporales del subsuelo, efectos de sitio.

Abstract

This research evaluates the effects of temporal variations in subsurface properties: 1) on the horizontal-to-vertical (HV) spectral ratios at the BJVM station of three components of the Valley of Mexico seismic network in early 2020, and 2) on the seismic response recorded by DAS measurements in 2022. For each observation, we verified the sensitivity to these variations through simulations. To this end, we implemented a comprehensive methodology that combined theoretical, experimental, and simulation approaches.

First, the theoretical HV values were calculated by systematically varying the subsurface properties around a reference velocity profile. The results demonstrated high sensitivity of the spectral ratios to changes in shear wave velocity (V_s) and in the thickness of the sedimentary strata.

Second, records from the Benito Juárez station (BJVM) were processed over 171 days in 2020 to calculate experimental HV values. Analysis of HV variability using a time-frequency heat map revealed significant temporal variations in the 0.1-0.5 Hz range, with amplitude fluctuations of up to 30%. These anomalies, particularly noticeable between days 60 and 100, showed compensation with seasonal precipitation patterns, confirming the influence of saturation changes on the elastic properties of the subsurface.

In parallel, seismic response was analyzed using measurements from distributed fiber optic sensors (DAS). The analysis of five representative records ($M_w 4.7$ to $M_w 7.7$), processed using normalization and filtering (0.4-1.2 Hz), allowed for the characterization of wave propagation with high spatial resolution. This revealed high spatial coherence and prolonged duration in the larger magnitude events, associated with surface wave trapping in the basin.

Finally, seismic wave propagation was simulated using subsurface models corresponding to days 110 and 171, a regional tomographic model, and a geometrically rotated seismic

moment tensor. The generated synthetic waveforms show high coherence with the observed records. The simulations quantified differences of up to 50% in the amplitude of the seismic response in Mexico City under different saturation conditions, compared to the stability of stations on bedrock, where variations did not exceed 7%.

The methodological integration developed constitutes a significant contribution to the seismic characterization of the Valley of Mexico, providing tools for seismic microzonation, earthquake-resistant design, and early warning systems.

Keywords: HVSR, Valley of Mexico, DAS, seismic simulations, temporal variations of the subsurface, site effects.

Capítulo I. Generalidades

I.1 introducción

En la actualidad, la actividad sísmica en México ha tenido un impacto considerable en la sociedad, caracterizado por la pérdida de vidas humanas y daños materiales. Esta situación se atribuye a la compleja interacción tectónica entre cinco placas principales: la del Pacífico, la de Rivera, la del Caribe, la de Cocos y la de Norteamérica. Dicha interacción concentra un alto porcentaje de la sismicidad a lo largo de la costa del Pacífico. Por ello, resulta fundamental contar con una medida que permita clasificar esta actividad. Dicha clasificación se basa en la intensidad sísmica, una medida cualitativa cuyo objetivo es evaluar tanto los daños ocasionados como la sensación generada por el movimiento sísmico.

Es crucial destacar que la intensidad sísmica puede variar significativamente en distancias cortas y áreas reducidas, lo que vincula el daño estructural primordialmente al efecto de sitio. Este fenómeno se refiere a la modificación de las ondas sísmicas debido a las propiedades geológicas y geotécnicas del suelo, como su rigidez, espesor y contenido de agua, lo que puede amplificar o atenuar el movimiento sísmico en la superficie. Por ejemplo, en zonas con suelos blandos y saturados, como los encontrados en la Ciudad de México, el efecto de sitio puede amplificar considerablemente las ondas sísmicas, aumentando el riesgo de daños estructurales. Para evaluar este efecto, una técnica ampliamente utilizada es la **técnica HV**, también conocida como método de Nakamura. Esta técnica se basa en el análisis del cociente espectral entre las componentes horizontales y verticales del movimiento sísmico registrado, permitiendo identificar las frecuencias de resonancia del suelo y estimar su capacidad de amplificación (Nakamura, 1989a). La técnica HV es especialmente útil en estudios de microzonificación sísmica, ya que proporciona información valiosa sobre la respuesta dinámica del suelo sin necesidad de fuentes sísmicas activas, lo que la convierte en una herramienta eficiente y económica.

Además de la técnica HV, en años recientes se ha incorporado el uso de tecnologías innovadoras como el **DAS (Distributed Acoustic Sensing)** para el monitoreo sísmico. El DAS es una técnica que utiliza fibra óptica como sensor distribuido, capaz de medir deformaciones y vibraciones a lo largo de grandes distancias con una alta resolución espacial y temporal (Hartog, 2017a). Esta tecnología permite captar datos sísmicos de manera continua y en tiempo real, lo que resulta particularmente útil en áreas urbanas como la Ciudad de México, donde el monitoreo tradicional puede ser limitado debido a la infraestructura existente. El DAS ha demostrado ser una herramienta prometedora para estudiar el efecto de sitio, ya que puede proporcionar información detallada sobre la propagación de ondas sísmicas y la respuesta del suelo en diferentes ubicaciones, complementando así los métodos tradicionales como la técnica HV.

La Ciudad de México es susceptible a la influencia de ondas sísmicas provenientes de tres fuentes principales: sismos poco profundos y distantes, generados por la zona de subducción en la costa del Pacífico; sismos profundos y cercanos, originados por fallas intraplaca; y sismos locales, generados por fallas superficiales. En este contexto, la aplicación de técnicas como la HV y tecnologías avanzadas como el DAS resulta fundamental para comprender mejor la respuesta del suelo ante diferentes tipos de sismos y para implementar medidas de mitigación de riesgos más efectivas.

I.2 Objetivos y Alcances

I.2.1 Objetivo principal

Evaluar los efectos de las variaciones temporales de las propiedades del subsuelo del Valle de México sobre los cocientes espectrales horizontales a verticales (HV), los registros de sismos medidos por DAS, y en formas de onda simuladas.

I.2.2 Objetivos particulares

- ✦ Calcular los HV teóricos, variando las propiedades del subsuelo.
- ✦ Calcular los HV experimentales para diferentes estaciones del año 2020.
- ✦ Analizar la respuesta sísmica mediante mediciones de sensores distribuidos de fibra óptica (DAS) en diferentes días, mediante el procesamiento de las formas de onda y diagramas espacio-temporales.
- ✦ Simular formas de onda debido a sismos, validarlas e identificar los cambios observados.

Capítulo II Marco Teórico

La Ciudad de México constituye un escenario de excepcional complejidad geográfica y geológica, que la configura como una zona de alto interés para el estudio de la sismicidad. Esta complejidad surge de la interacción de varios factores clave. En primer lugar, su ubicación sobre la antigua cuenca lacustre del lago de Texcoco, caracterizada por suelos blandos y altamente compresibles, genera un efecto de amplificación de las ondas sísmicas. En segundo lugar, la intensa actividad tectónica de la región, situada en una zona de convergencia entre las placas de Cocos, Norteamérica y del Pacífico, la expone constantemente a fenómenos sísmicos de diversa magnitud.

La composición del subsuelo del Valle de México, formado por una secuencia de sedimentos lacustres y volcánicos, influye decisivamente en la propagación y el comportamiento de las ondas sísmicas. Para comprender y mitigar los riesgos asociados a esta condición única, se han implementado métodos avanzados de medición y análisis, como el monitoreo sísmico continuo, los estudios de microzonificación y el desarrollo de normativas de construcción específicas.

La integración de estos elementos —la geología local, la dinámica tectónica, las propiedades del suelo y los avances tecnológicos— proporciona el marco de referencia esencial para interpretar el comportamiento sísmico de la ciudad. En este contexto, el presente capítulo establece los fundamentos multidisciplinarios necesarios para analizar las variaciones temporales en la respuesta sísmica del subsuelo, que serán examinadas en capítulos posteriores a través de los cocientes HV, las mediciones con fibra óptica (DAS) y los modelos de simulación.

Para ello, se presenta una revisión integral de tres pilares fundamentales:

- ✚ El marco geológico que define la arquitectura de la cuenca.
- ✚ El sistema hidrológico, el cual modula las propiedades dinámicas del suelo a corto plazo.
- ✚ El contexto sismológico que controla la excitación del sistema.

Finalmente, se fundamentan las técnicas de medición empleadas, prestando especial atención al método de cocientes espectrales HV y a la emergente tecnología de sensores distribuidos de fibra óptica (DAS). Los principios físicos y las aplicaciones de estas técnicas son esenciales para la detección de las variaciones temporales que son el objeto central de esta investigación.

II.1 Marco Geológico

El Valle de México, situado en el Altiplano Central de México, es una región de gran interés geológico debido a su compleja historia tectónica, volcánica y sedimentaria. Forma parte de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) que atraviesa a la República Mexicana de este a oeste, como se muestra en la Figura 1. Es una extensa planicie elevada que ocupa un área de 9600 km² con altitudes entre 2230 y 2250 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m). (Vazquez-Sanchez & Jaimes-Palomera, 1989).

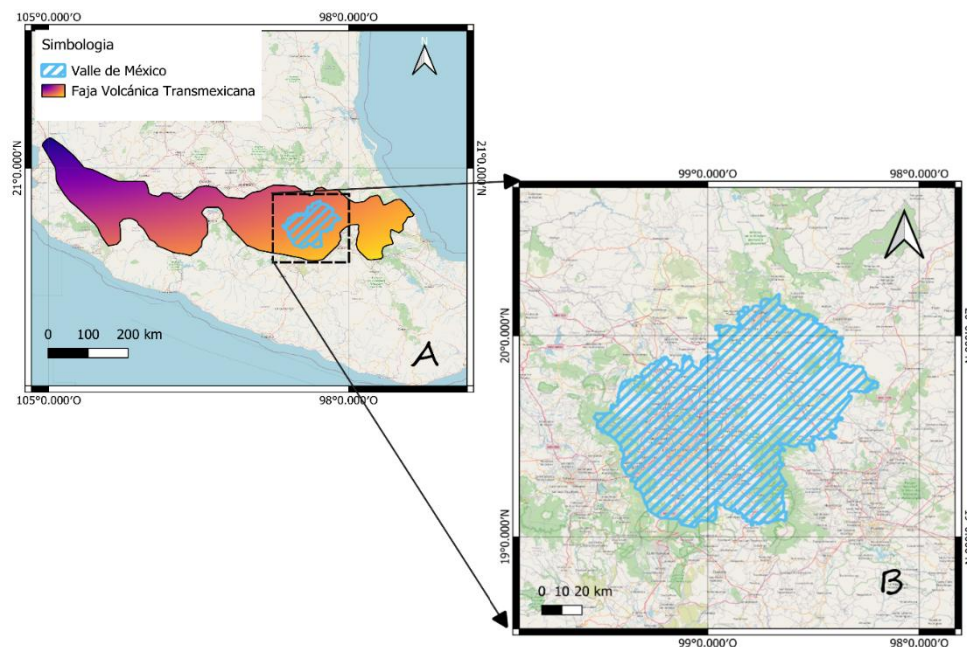


Figura 1: (A) La Faja Volcánica Transmexicana y su ubicación en México; (B) ubicación del Valle de México

La Cuenca de México, se encuentra rodeada por sierras y volcanes, incluyendo la Sierra Nevada al este y la Sierra de las Cruces al oeste, así como por importantes volcanes como el Popocatépetl y el Iztaccíhuatl (Figura 2).

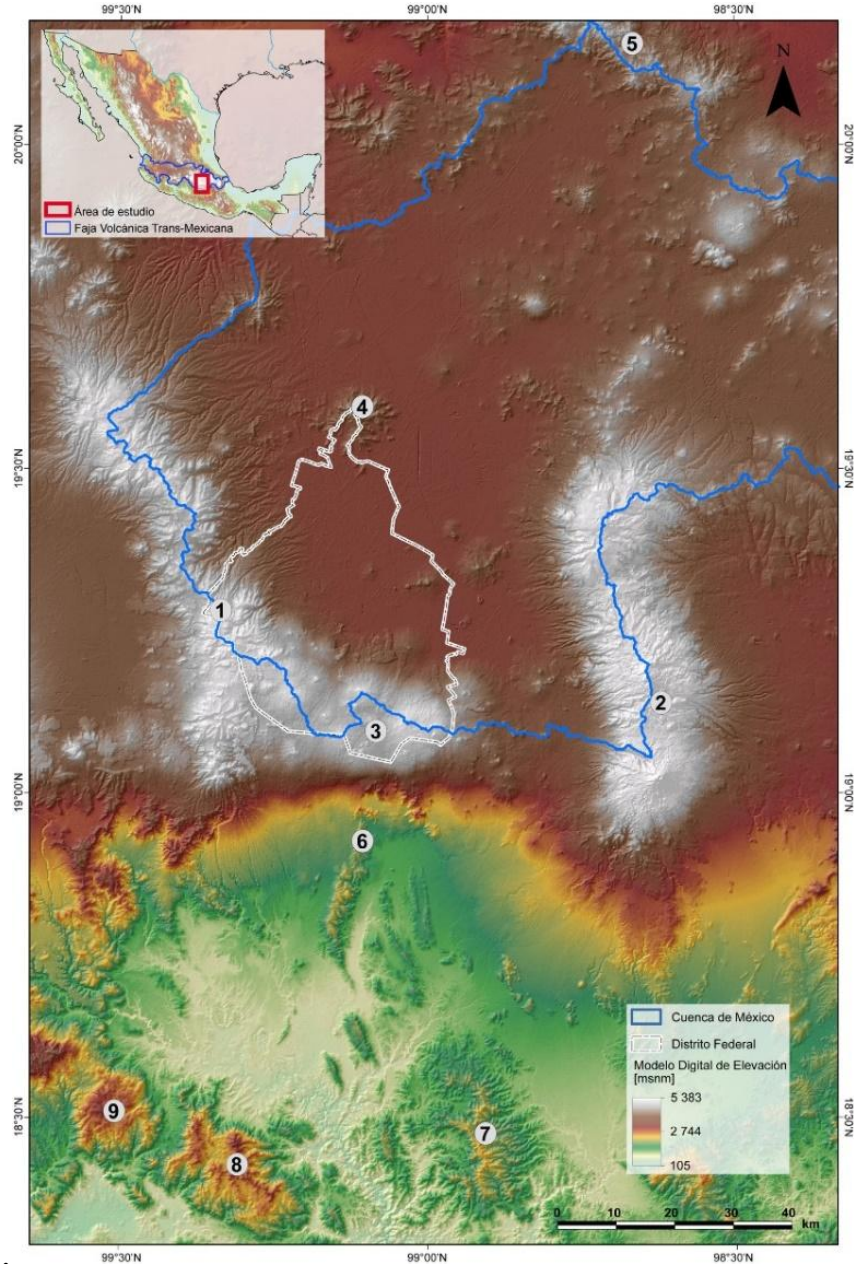


Figura 2: Modelo de elevación digital que muestra la localización de la ciudad de México, así como las sierras que limitan a estas últimas: (1) Sierra de las Cruces, (2) Sierra Nevada, (3) Sierra de Chichinautzin; (4) Sierra de Guadalupe; (5) Sierra de Pachuca. En la porción sur del mapa se muestran la región de (6) Tepoztlán, Morelos, en donde se encuentran expuestos los primeros episodios volcánicos de la Faja Volcánica Trans-Mexicana en su sector centro-oriental y los campos volcánicos de la Sierra Madre del Sur: (7) Huautla, Morelos, (8) la caldera de Tilzapotla y (9) Taxco, Guerrero. (Tomada de González Torres et al., 2015)

II.2 Marco Hidrológico

“El paisaje de hoy día, del Valle de México es consecuencia de milenios de fenómenos naturales y actividades culturales realizados por el hombre, que ocurrieron incluso antes de la fundación de ciudades en la zona” (García Vedrenne & Kuhliger Martínez, 2010). Este valle, rodeado de montañas, es una cuenca endorreica, lo que significa que no tiene salida natural hacia el mar. Antiguamente, la región estaba cubierta por una serie de lagos que se conectaban entre sí, siendo el más grande el lago de Texcoco, acompañado por los lagos de Chalco, Xochimilco, Zumpango y Xaltocán (Figura 3). Como una gran cuenca cerrada, toda el agua que caía en el valle ya fuera a través de la lluvia o por los ríos que lo alimentaban, permanecía dentro de este, acumulándose en los lagos. Estos cuerpos de agua no solo regulaban el flujo, sino que también eran vitales para la agricultura y la vida cotidiana de las civilizaciones que habitaron la región (como los mexicas).



Figura 3 Imagen representativa de la Hidrología del Valle de México, tomada de DGDC-UNAM

Con la llegada de la época colonial y, más tarde, en los siglos XIX y XX, la relación entre el ser humano y el agua cambió drásticamente. Se iniciaron obras masivas para drenar los lagos, con el objetivo de evitar inundaciones y permitir la expansión de áreas habitables. Se construyeron canales, desagües y se excavó el monumental Tajo de Nochistongo, una enorme zanja destinada a desviar el agua. Estas intervenciones resultaron en la desaparición de la mayor parte de los lagos, dejando solo pequeños cuerpos de agua, como los canales de Xochimilco, que hoy en día son un eco de lo que alguna vez fue un sistema acuático vibrante.

Esta transformación del paisaje ha llevado a una serie de problemas hídricos que persisten hasta nuestros días. La sobreexplotación de los acuíferos subterráneos ha contribuido al hundimiento del suelo en varias partes de la ciudad, un proceso conocido como subsidencia. Este hundimiento no es uniforme, creando diferencias en la compactación del suelo que pueden afectar cómo se propagan las ondas sísmicas. Áreas con mayor subsidencia podrían experimentar un mayor riesgo de daños durante un terremoto.

Otro factor es la desecación histórica de los lagos y la urbanización, que han cambiado las propiedades del suelo. La falta de agua en los antiguos depósitos lacustres puede alterar las características del suelo, como su densidad y elasticidad, lo que también influye en cómo se comportan durante un sismo. En resumen, la hidrología del Valle de México, desde los sedimentos lacustres hasta la explotación de los acuíferos, juega un papel crucial en la intensificación de los movimientos sísmicos en la Ciudad de México, haciendo que los sismos sean más perceptibles en esta región comparado con otras áreas.

El abastecimiento de agua se ha convertido en uno de los mayores retos para la creciente población del valle. La región depende en gran medida de fuentes externas, como el Sistema Cutzamala, que transporta agua desde cuencas distantes. En respuesta a estos desafíos, actualmente se están llevando a cabo esfuerzos para mejorar la recarga de los acuíferos, gestionar mejor las aguas pluviales y promover la reutilización del agua. Sin embargo, estos esfuerzos enfrentan obstáculos significativos debido a la alta demanda de agua en la ciudad y la contaminación de los cuerpos de agua que aún existen.

II.3 Marco Sismológico

México es conocido por su alta actividad sísmica, atribuida a su ubicación dentro del Cinturón de Fuego del Pacífico (Figura 4). Esta región, caracterizada por su intensa actividad sísmica y volcánica, así como por la formación de grandes montañas, alberga algunas de las zonas de subducción más significativas del mundo. El cinturón consiste en una extensa cadena tectónica que destaca por la concentración de dichos fenómenos, donde la interacción entre las placas tectónicas es particularmente dinámica.

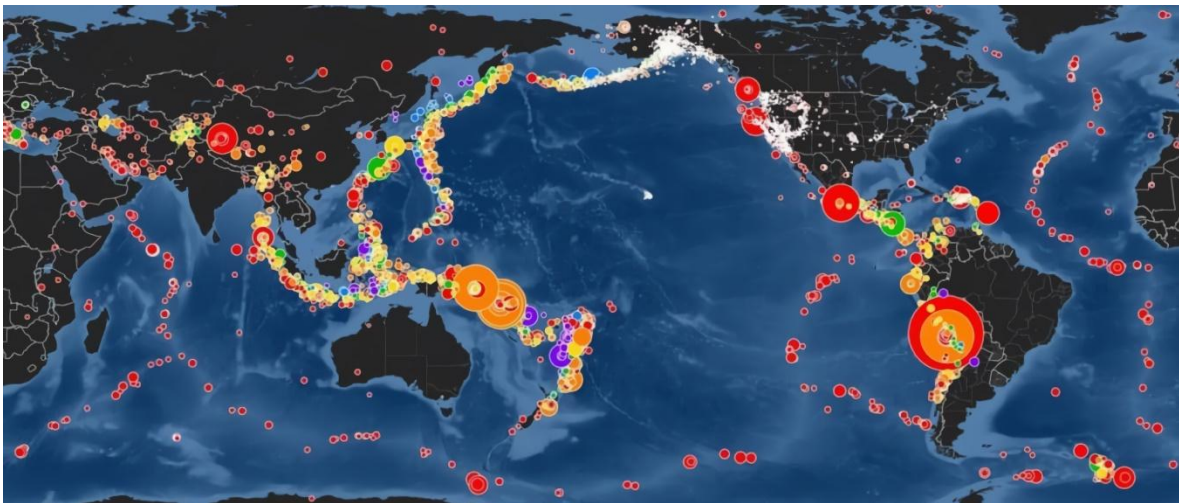


Figura 4 Mapa Representativo del Arco de Fuego

Las placas tectónicas interactúan a través de tres tipos de límites: convergentes, divergentes y transcurrentes (Figura 5). La subducción, asociada con los límites convergentes, ocurre cuando una placa se introduce debajo de otra. Este proceso es responsable de la formación de profundas fosas oceánicas y cadenas montañosas volcánicas, como la Sierra Madre Occidental en México. En los límites divergentes, dos placas se separan, permitiendo la ascensión de material magmático desde el manto y la formación de nueva corteza oceánica, un proceso observado en dorsales oceánicas como la Dorsal del Pacífico Oriental. Por otro lado, los límites transcurrentes implican el deslizamiento lateral de las placas en direcciones opuestas, generando fallas transformantes como la Falla de San Andrés en California.

El Cinturón de Fuego está compuesto por numerosos volcanes resultantes de la subducción de las placas tectónicas, incluyendo la placa de Cocos y la placa de Rivera. Sin embargo, México también se encuentra influenciado por otras placas tectónicas como la del Caribe, la del Pacífico y la Norteamericana. La interacción de estas placas no solo genera actividad sísmica, sino también una notable actividad volcánica, ejemplificada por el volcán Popocatepetl y el volcán de Colima.

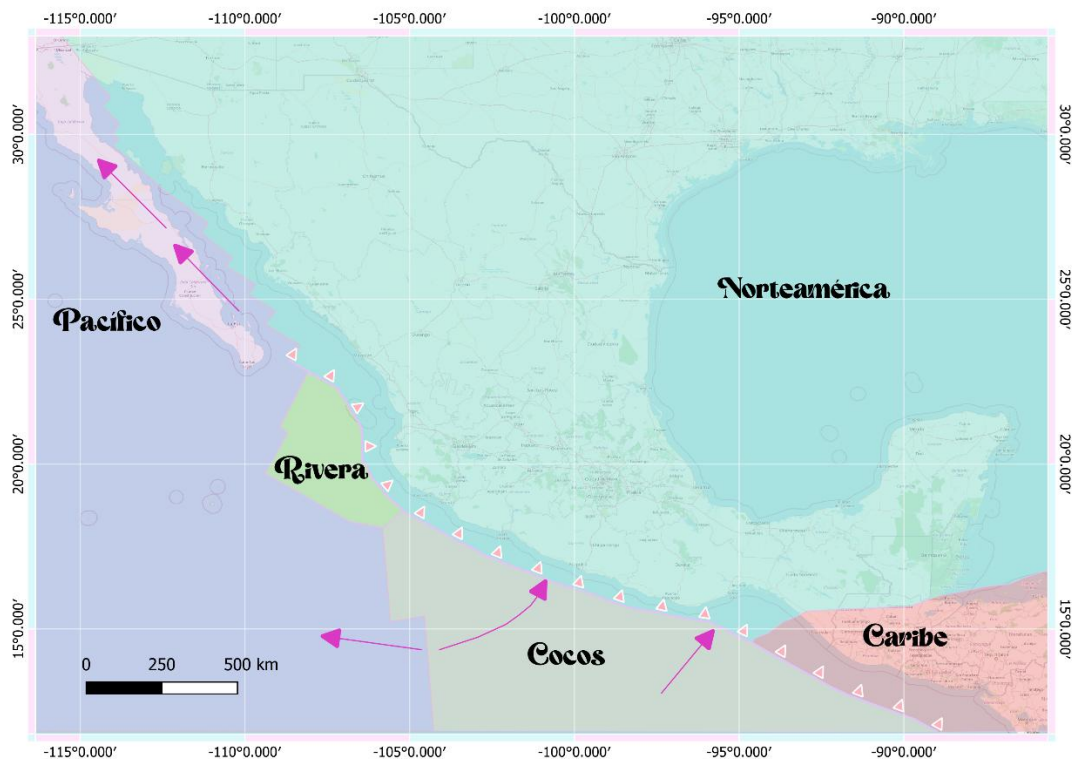


Figura 5 Placas Tectónicas de México, modificado del SSN.

El Valle de México está rodeado de volcanes, lo cual contribuye a la actividad sísmica en la región. Adicionalmente, la Ciudad de México presenta diversas fallas geológicas y una compleja hidrología que provoca hundimientos en el suelo, aumentando así la susceptibilidad a movimientos sísmicos. Estos factores, combinados con la naturaleza lacustre del subsuelo de la ciudad, amplifican las ondas sísmicas, haciendo que incluso terremotos lejanos sean fuertemente percibidos en la capital.

La interacción entre estas placas tectónicas y la geología particular del Valle de México resulta en una región con un alto riesgo sísmico y volcánico, que requiere de un constante monitoreo y preparación para mitigar los efectos de estos eventos naturales sobre la población y la infraestructura.

II.3.1 Ondas Sísmicas

Las ondas sísmicas son perturbaciones elásticas que se propagan a través de materiales sólidos, líquidos o gaseosos como resultado de una liberación súbita de energía, como la ocasionada por terremotos o explosiones volcánicas. Estos eventos generan ondas que se propagan desde el foco sísmico en todas direcciones, y su estudio es esencial para comprender la dinámica interna de la Tierra.

Existen dos categorías principales de ondas sísmicas:



Ondas de volumen, que se propagan a través del interior de la Tierra:

- Ondas P (primarias): Son las más rápidas, y su movimiento es longitudinal, donde las partículas del medio vibran en la misma dirección que la propagación de la onda. Se transmiten a través de medios sólidos y líquidos.
- Ondas S (secundarias): Son más lentas que las ondas P y su propagación es transversal, es decir, las partículas del medio vibran perpendicularmente a la dirección de la onda. Estas ondas sólo se propagan en sólidos.



Ondas superficiales, que se desplazan a lo largo de la superficie terrestre y tienden a ser las más destructivas:

- Ondas de Love: Generan un movimiento horizontal perpendicular a la dirección de propagación.
- Ondas de Rayleigh: Provocan un movimiento elíptico en las partículas del suelo, similar al movimiento de las olas en el agua.

El análisis de las ondas sísmicas permite a los científicos inferir la estructura interna de la Tierra, estudiar la localización y magnitud de los sismos, y evaluar los peligros y riesgos sísmicos en áreas geográficas específicas (Lay & Wallace, 1995).

II.3.2 Relaciones empíricas entre densidad y velocidad elásticas

El estudio de las relaciones entre las propiedades físicas de las rocas de la corteza terrestre, en particular las velocidades de las ondas sísmicas (ondas P y S) y la densidad de masa, es fundamental para comprender la estructura y composición de la corteza. Estas relaciones permiten interpretar datos sísmicos, construir modelos geofísicos y caracterizar las propiedades mecánicas y elásticas de las rocas, lo cual es esencial en aplicaciones como la exploración de recursos naturales.

II.3.2.1 Relación entre la Velocidad de las Ondas P (V_p) y la Densidad de masa (ρ)

Brocher, (2005) propone una ecuación empírica que permite estimar la densidad (ρ) de las rocas a partir de la velocidad de las ondas P (V_p), válida para un rango de V_p entre 1.5 y 8.5 km/s. La relación se expresa de la siguiente manera:

$$\rho = 1.6612 V_p - 0.4721 V_p^2 + 0.0671 V_p^3 - 0.0043 V_p^4 + 0.000106 V_p^5 \quad (1)$$

donde ρ se expresa en g/cm³ y V_p en km/s. Esta ecuación es aplicable a una amplia variedad de rocas corticales, desde sedimentos no consolidados hasta rocas ígneas y metamórficas de la corteza superior e inferior.

II.3.2.2 Relación entre la Velocidad de las Ondas S (V_s) y la Velocidad de las Ondas P (V_p)

Brocher, (2005) establece una correlación empírica entre la velocidad de las ondas S (V_s) y la velocidad de las ondas P (V_p), la cual resulta particularmente útil en casos donde solo se dispone de mediciones de V_p . La relación propuesta es:

$$V_s = 0.7858 - 1.2344 V_p + 0.7949 V_p^2 - 0.1238 V_p^3 + 0.0064 V_p^4 \quad (2)$$

Esta ecuación permite estimar V_s a partir de V_p , facilitando el cálculo de parámetros elásticos como el módulo de cizalla y la relación de Poisson, esenciales para la caracterización mecánica de las rocas, así como la prevención de riesgos geológicos y el estudio de la tectónica de placas.

II.3.3 Cocientes espectrales HV

El análisis espectral HV (Horizontal/Vertical), también conocido como método HVSR (Horizontal-to-Vertical Spectral Ratio), es una técnica ampliamente utilizada en sismología para caracterizar las propiedades dinámicas del suelo y evaluar su comportamiento ante un evento sísmico. Fue introducido por Nakamura, (1989a) y se basa en la relación espectral entre las componentes horizontales y verticales de las ondas sísmicas registradas. Su objetivo principal es identificar la frecuencia fundamental de resonancia del sitio, un parámetro clave en la evaluación del riesgo sísmico.

Bour et al. (1998) realizaron mediciones del cociente HV en un rango de frecuencias de 0.2 a 20 Hz y observaron que, en el fondo de las capas rígidas (es decir, sobre sustrato duro), el valor del cociente se aproxima a 1. Esto significa que, en ese tipo de suelo, las componentes horizontal y vertical de las ondas sísmicas tienen amplitudes equivalentes. Este hallazgo valida las observaciones originales de Nakamura, ya que demuestra que el método funciona correctamente en condiciones de referencia (suelo rígido) y, por lo tanto, cualquier anomalía en el cociente HV medida en suelos blandos puede atribuirse con confianza a efectos locales de amplificación sísmica.

Este cociente es especialmente útil para identificar los efectos locales del sitio, información fundamental para la microzonificación sísmica (proceso mediante el cual se delimitan zonas en función de su respuesta sísmica). Una alta relación HV en ciertas frecuencias sugiere que el suelo puede amplificar el movimiento sísmico, lo que incrementa el riesgo estructural. Dichas frecuencias no son arbitrarias: corresponden a la resonancia natural del depósito de suelo, la cual depende inversamente del espesor del sedimento y directamente de su compresibilidad. Cuando la relación HV es elevada en esas frecuencias, indica que las ondas de corte horizontales quedan atrapadas entre la

superficie y el basamento rocoso, generando ondas estacionarias que multiplican la amplitud del movimiento. Este fenómeno actúa de manera selectiva: solo las estructuras con períodos naturales cercanos a esos picos experimentarán un incremento significativo de la demanda sísmica. Por ello, este análisis resulta particularmente relevante en ciudades como la Ciudad de México, donde los sedimentos lacustres y la heterogeneidad del suelo pueden generar una fuerte amplificación sísmica (Nakamura, 1989b).

II.3.3.1 Fundamento del método HV

En el método HV (Nakamura, 1989b) se consideran los tres componentes de un registro de ruido ambiental sísmico: Norte-Sur (NS), Este-Oeste (EW) y Vertical (Z). Para calcular el cociente espectral, primero se determina la componente horizontal H como la raíz cuadrática media (RMS) de los espectros de las componentes NS y EW, según la siguiente expresión:

$$H(w) = \frac{\sqrt{N^2(w)+E^2(w)}}{2} \quad (3)$$

Luego, se obtiene el espectro de la componente vertical $V(\omega) = Z(\omega)$, y finalmente se calcula el cociente espectral HV:

$$\frac{H(w)}{V(w)} = \frac{H(w)}{Z(w)} \quad (4)$$

Donde:

- $N(w)$, $E(w)$ y $Z(w)$ son los espectros de Fourier de las componentes Norte-Sur, Este-Oeste y Vertical, respectivamente.

Esta relación proporciona información sobre las frecuencias de resonancia del sitio, las cuales dependen directamente de la rigidez, la geometría y la estratigrafía del subsuelo.

II.3.3.2 Interpretación física: Función de Green y campos sísmicos difusos

Una perspectiva más reciente para interpretar el cociente HV se basa en la teoría de la **función de Green** y en el análisis de **campos sísmicos difusos**. En este enfoque, se asume que el ruido sísmico ambiental proviene de múltiples fuentes aleatorias distribuidas espacialmente (campo difuso). Si se analiza un punto donde la fuente y el receptor coinciden (autocorrelación), se puede establecer una relación entre la energía registrada y la función de Green.

Según Pertot et al., (2009), la densidad espectral de energía en la dirección donde se encuentra el receptor y la fuente está relacionada con la parte imaginaria del elemento correspondiente de la función de Green $G_{ii}(x, x; \omega)$:

$$E_i(x, \omega) = \rho \omega^2 \langle |u_i(x, \omega)|^2 \rangle \propto \text{Im}[G_{ii}(x, x; \omega)] \quad (5)$$

Donde:

- $E_i(x, \omega)$: Densidad espectral de energía en la dirección i ,
- $u_i(x, \omega)$: Desplazamiento en la dirección i ,
- $G_{ii}(x, x; \omega)$: Función de Green evaluada en el mismo punto, en la dirección i ,
- ρ : Densidad del medio,
- ω : Frecuencia angular.

Este resultado implica que la energía registrada en cada componente direccional está relacionada con la disipación de energía del medio (parte imaginaria de la función de Green). En un campo difuso, se ha demostrado que la relación HV está directamente relacionada con el cociente entre las partes imaginarias de los elementos horizontales y verticales de la función de Green (Sánchez-Sesma et al., 2011; Piña-Flores et al., 2017).

$$\left[\frac{H}{V} \right] (\omega) = \sqrt{\frac{\text{Im}[G_{11}(X, X; \omega)] + \text{Im}[G_{22}(X, X; \omega)]}{\text{Im}[G_{33}(X, X; \omega)]}} \quad (6)$$

Con la ecuación 6, podemos ver que los subíndices 11 y 22 nos hacen referencia a las componentes horizontales y la componente 33 nos señala la componente vertical.

II.4 Marco de Medición

II.4.1 Sensores Distribuidos de Fibra Óptica (DAS)

El sistema Distributed Acoustic Sensing (DAS) es una tecnología emergente que utiliza fibras ópticas como sensores sismológicos distribuidos. Esta técnica se basa en el envío de pulsos de luz a través de un cable de fibra óptica y la medición de las reflexiones producidas por las vibraciones sísmicas a lo largo de la fibra. Cada punto a lo largo del cable actúa como un sensor independiente, permitiendo la captura de datos sísmicos a lo largo de distancias de hasta decenas de kilómetros.

La tecnología DAS ha demostrado ser extremadamente útil para monitorear redes de infraestructura crítica y para la detección temprana de eventos sísmicos en regiones de alta actividad tectónica. Su principal ventaja radica en la capacidad de cubrir grandes áreas con un solo cable de fibra óptica, a diferencia de los sismómetros convencionales, que deben instalarse en ubicaciones específicas (Hartog, 2017b).

En la Ciudad de México, el uso de sistemas DAS aún está en fase de implementación, pero su potencial para mejorar la capacidad de monitoreo sísmico es inmenso. La Ciudad de México se encuentra en una cuenca sedimentaria que amplifica significativamente las ondas sísmicas, lo que aumenta el riesgo de daños durante los terremotos. La implementación de DAS en esta región podría proporcionar una cobertura sísmica más detallada y precisa en tiempo real, ayudando a mejorar los sistemas de alerta temprana y la mitigación del riesgo.

II.4.2 Red Sismológica del Valle de México

La Red Sismológica del Valle de México (RSVM) es una de las redes más avanzadas de América Latina para el monitoreo de la actividad sísmica. Esta red está compuesta por

estaciones sismológicas distribuidas en la cuenca de México, una región particularmente vulnerable debido a las características del terreno y la densidad poblacional. La RSVM juega un papel crucial en la recopilación de datos sísmicos, que son utilizados tanto para la investigación científica como para el diseño de políticas públicas de mitigación del riesgo sísmico.

Gracias a los datos obtenidos por la RSVM, se han desarrollado sistemas de alerta temprana que permiten a la población recibir advertencias con unos segundos de anticipación antes de que un sismo de gran magnitud llegue a la capital. Estos segundos pueden ser vitales para salvar vidas, detener actividades industriales peligrosas y activar protocolos de emergencia.

Capítulo III Sensibilidad de los HV al cambio de propiedades

Esta sección tiene como objetivo principal analizar la sensibilidad de los HV ante variaciones en las propiedades del subsuelo. Para ello, se abordarán dos enfoques complementarios:

1. **Cálculo de los HV teóricos:** A través de modelos numéricos, se simularon y calcularon los espectros HV teóricos, variando sistemáticamente las propiedades del subsuelo, como la velocidad de las ondas de corte (V_s), la densidad y el espesor de las capas geológicas. Este análisis permite comprender cómo los cambios en estas propiedades influyen en la respuesta sísmica del terreno y, en particular, en la forma y frecuencia de los picos espectrales.
2. **Cálculo de los HV experimentales:** Se realizó un análisis comparativo de los espectros HV obtenidos a partir de mediciones experimentales en diferentes estaciones del año, considerando las variaciones de las capas del suelo.

En conjunto, esta sección busca establecer una relación clara entre las propiedades dinámicas del subsuelo y los espectros HV, tanto teóricos como experimentales.

III.1 Procesamiento de los registros

En este estudio se procesaron registros sísmicos con el propósito de comparar los resultados obtenidos a partir de datos experimentales y simulaciones numéricas. Se consideraron dos fuentes de información:

- Un **modelo geofísico numérico** basado en la caracterización geotécnica de la **Escuela Nacional Preparatoria No. 8 "Miguel E. Schulz"**, y
- Registros experimentales obtenidos en la estación sísmica **BJVM (Benito Juárez)**, perteneciente a la Red del Valle de México y ubicada en la Ciudad de México (Latitud 19.374986° , Longitud -99.17069°), ambos lugares se pueden observar en la Figura 6.

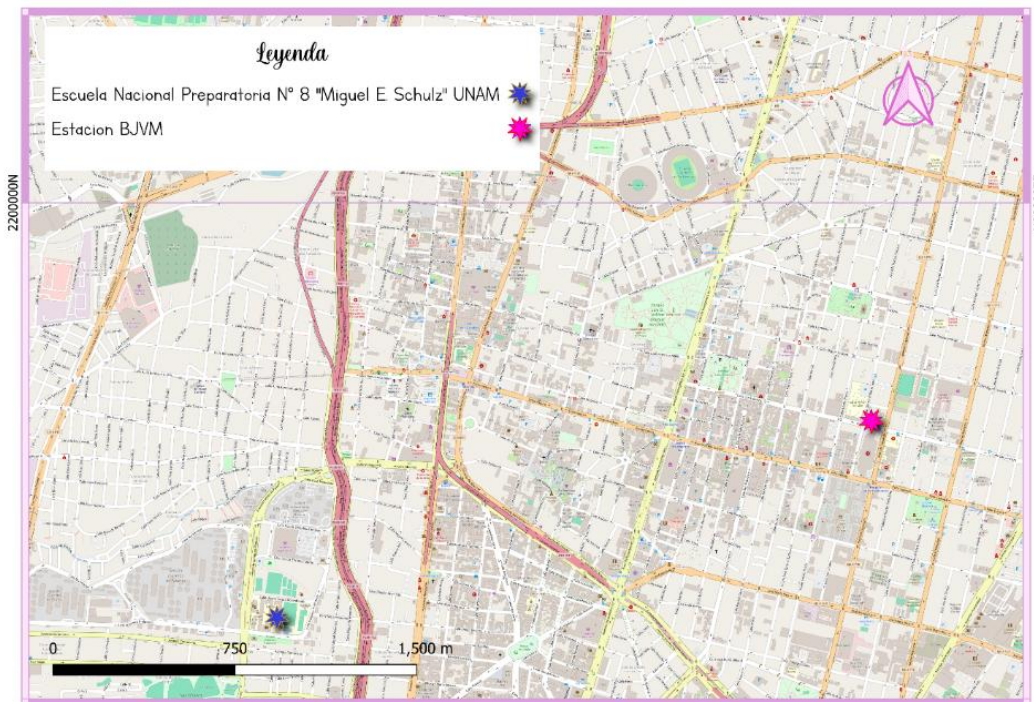


Figura 6 Ubicaciones de los registros ocupados

En el caso de los datos experimentales, se analizaron múltiples días de registro para generar curvas HV en función de la frecuencia. Estas curvas permiten identificar variaciones temporales en la respuesta dinámica del terreno. Además, la comparación entre distintos días facilita la detección de anomalías potencialmente asociadas a cambios en las condiciones del subsuelo, ya sea por efectos naturales o antrópicos.

Por su parte, el modelo numérico permite simular curvas HV mediante la modificación controlada de parámetros geofísicos, lo cual facilita la calibración del modelo frente a los datos reales y la evaluación de su capacidad predictiva.

III.2 Datos Experimentales

A partir de los registros obtenidos en la estación BJVM (Benito Juárez), ubicada en la Red del Valle de México (Ciudad de México), se generaron un total de 171 HV. Para facilitar el análisis, los datos fueron agrupados en intervalos de 10 días, lo que permitió una representación más clara y robusta. Esta segmentación temporal favorece la identificación de tendencias y posibles variaciones en la respuesta espectral del sitio a lo largo del tiempo.

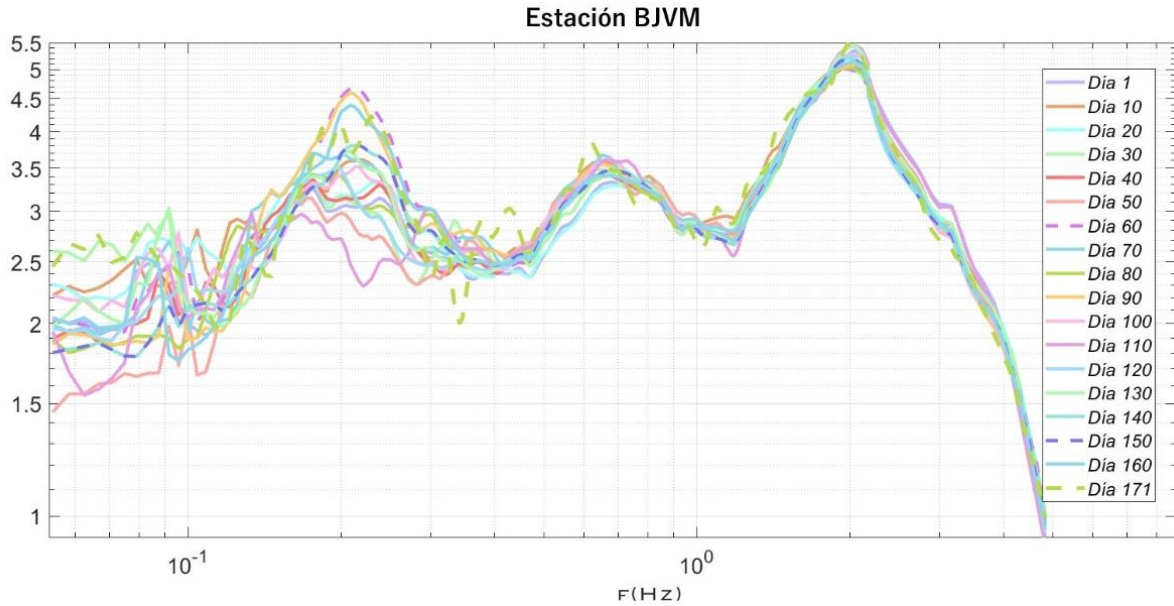


Figura 7 Curvas HV de la estación Benito Juárez (BJVM)

En la Figura 7 se muestran las curvas seleccionadas del cociente HV para diversos momentos del periodo de estudio. Se observa un comportamiento relativamente estable en la mayoría de las frecuencias, aunque con variaciones puntuales, principalmente en el rango de frecuencias bajas (alrededor de 0.1 a 0.5 Hz). Estas fluctuaciones podrían reflejar modificaciones temporales en las condiciones del subsuelo, posiblemente asociadas a cambios en el nivel freático, cargas antrópicas o actividad sísmica regional.

Para profundizar en el análisis, se generó una visualización de la evolución temporal del cociente HV mediante un **mapa de calor en dos dimensiones (frecuencia-tiempo)**, la cual se presenta en la Figura 8. En esta representación, la frecuencia se muestra en el eje vertical, el tiempo en el eje horizontal, y la amplitud del cociente HV está codificada en una escala de colores, donde los tonos rojos indican una mayor amplificación.

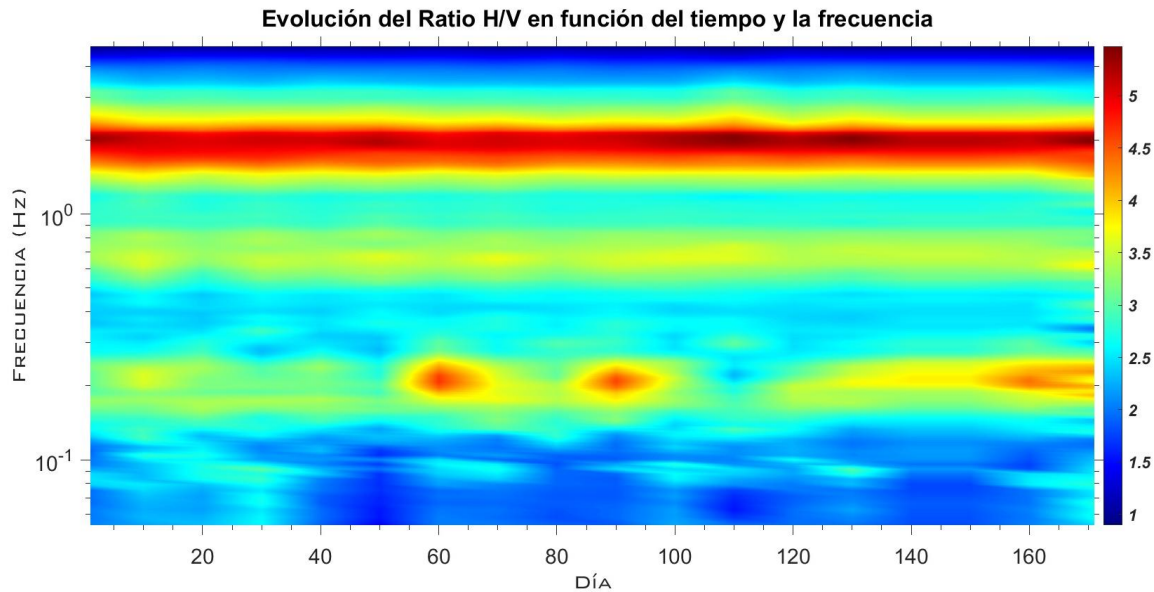


Figura 8 Evolución del ratio HV en función del tiempo y la frecuencia

Esta visualización permite observar la evolución del cociente HV a lo largo del tiempo, destacando bandas de mayor amplificación espectral (zonas en rojo) y su estabilidad o variabilidad en distintos periodos. Se identifican anomalías notorias entre los días 60 y 100 en frecuencias cercanas a 0.2 Hz. La naturaleza transitoria de esta anomalía y su ocurrencia en una época de posibles lluvias tempranas y recarga hídrica, que podría indicar una alteración transitoria en las propiedades dinámicas del terreno, posiblemente relacionada con un aumento en la saturación del subsuelo y la consecuente reducción en la velocidad de onda cortante (V_s) de los sedimentos lacustres (Pertón et al., 2026).

La combinación de ambas representaciones —curvas HV discretas y mapa tiempo-frecuencia— constituye una herramienta valiosa para el análisis comparativo de datos experimentales. En este estudio, se seleccionaron los días 110 y 171 para un análisis puntual. Aunque las curvas promedio de la Figura 7 muestran una similitud general, el análisis más detallado del mapa tiempo-frecuencia (Figura 8) revela **diferencias sutiles pero consistentes** en la amplitud del cociente HV entre ambos días, lo que sugiere un cambio en las propiedades del subsuelo. Estas variaciones permiten explorar la sensibilidad del subsuelo ante cambios temporales, y contribuyen a una mejor comprensión del comportamiento dinámico del terreno en la zona sur del Valle de México.

III.3 Sensibilidad teórica

Con el fin de evaluar la sensibilidad del cociente HV ante variaciones en las propiedades del subsuelo, se implementó un modelo geológico inicial a partir de registros obtenidos mediante un receptor de señales sísmicas Raspberry Shake instalado en la Escuela Nacional Preparatoria Número 8. Dicho modelo se construyó a partir de los parámetros geofísicos fundamentales: profundidad (H), velocidades de ondas compresionales (V_p) y de corte (V_s), y densidad (ρ), cuyos valores se detallan en la Tabla 1.

V_s	V_p	H	Rho
0.7554	2.1625	0.05	1.97415
0.7632	2.1724	0.05	1.97808
1.11875	2.5936	0.2	2.12131
1.36875	2.8706	0.2	2.19248
1.96875	3.5545	0.65	2.37715
1.2187	2.7052	0.65	2.15245
1.7	3.23891	1.3	2.2737
3	5.0506	1	2.5426

Tabla 1 Se muestra cómo varían las velocidades de onda con la profundidad, permitiendo una primera visualización del comportamiento de las ondas en función de la estructura subsuperficial.

La Tabla 1 refleja la variación estratigráfica de las propiedades elásticas, esencial para simular la propagación de ondas sísmicas en medios heterogéneos.

Mediante el análisis de software experimentales implementadas en MATLAB, se generó un modelo de velocidades para el subsuelo asociado a la Escuela Nacional Preparatoria Plantel 8 "Miguel E. Schulz". Los resultados preliminares, visualizados en la Figura 9, permiten identificar contrastes litológicos y validar la respuesta sísmica teórica del sitio.

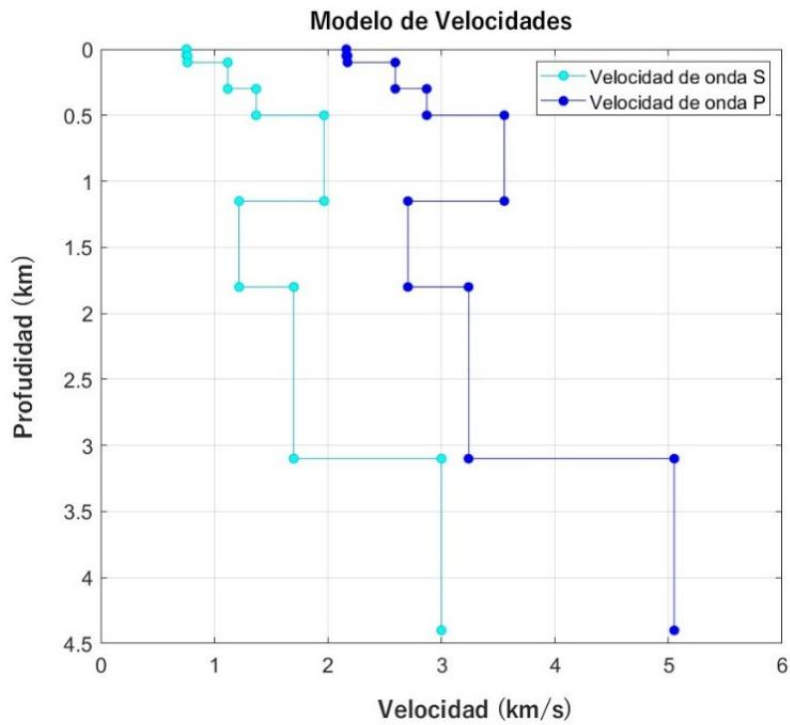


Figura 9 Modelo de velocidades del modelo de la Escuela Preparatoria 8

III.2.1 Generación del Modelo Inicial

El modelo fue definido asignando valores iniciales de V_p , V_s y ρ para cada capa, utilizando información geofísica disponible de la zona. A partir de este modelo se calculó una curva HV teórica, representada en la Figura 10.

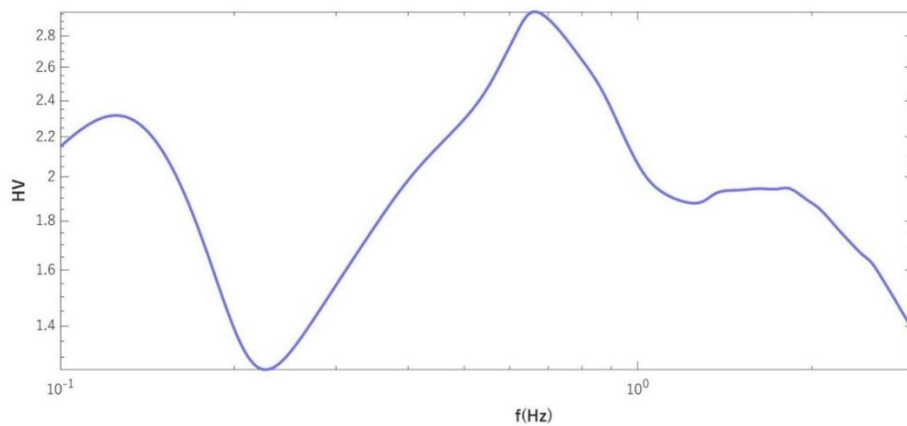


Figura 10 Representación del modelo inicial de HV

Esta curva permite estimar la frecuencia fundamental de resonancia del sitio y compararla con los resultados experimentales.

III.2.2 Simulación de HV y efecto de cambios de propiedades en profundidad sobre HV

Una vez definido el modelo inicial, se procedió a compararlo con los espectros HV experimentales para ajustar los parámetros del modelo mediante inversión. Esta comparación permite evaluar la capacidad del modelo para reproducir la respuesta dinámica del terreno observada.

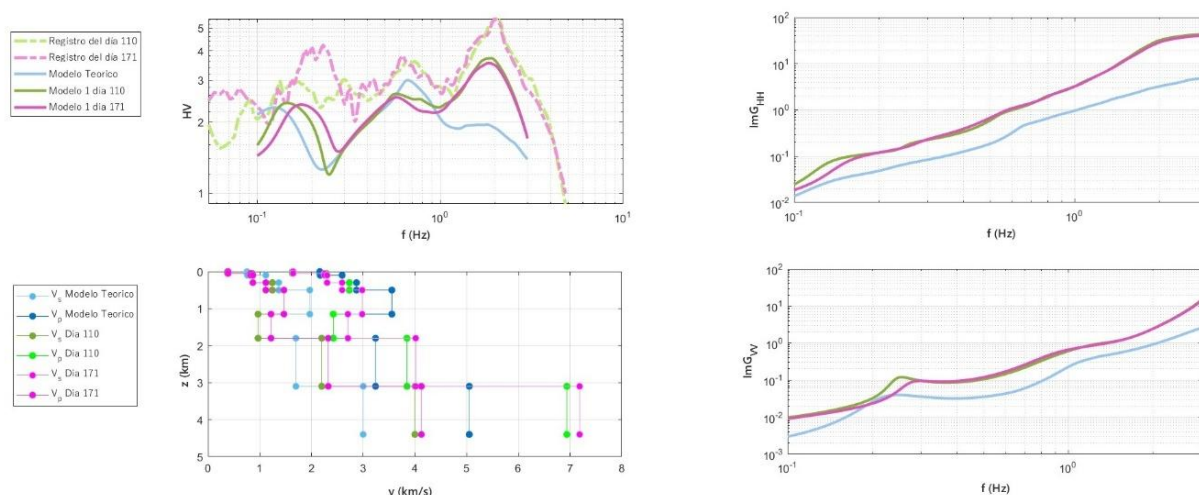


Figura 11. Comparación entre la curva HV simuladas y las curvas experimentales

El análisis comparativo revela qué tan sensibles son los espectros HV a variaciones puntuales en las propiedades del subsuelo, y permite validar o ajustar el modelo según los datos reales.

De la misma manera los HV obtenidos para los días 110 y 171 se muestran en la Tabla 2 y 3 respectivamente.

Profundidad	Espesor (km)	Vs (km/s)	Vp (km/s)
0.05	0.05	0.38	1.63
0.3	0.25	0.87	2.30
0.5	0.2	1.24	2.73
1.15	0.65	1.47	2.98
1.8	0.65	0.97	2.42
3.1	1.3	2.2	3.85

Tabla 2 Datos del HV para el día 110

Profundidad	Espesor (km)	Vs (km/s)	Vp (km/s)
0.05	0.05	0.38	1.64
0.1	0.05	0.83	2.25
0.3	0.2	0.87	2.30
0.5	0.2	1.12	2.59
1.15	0.65	1.47	2.98
1.8	0.65	1.22	2.71
3.1	1.3	2.33	4.01

Tabla 3 Datos de HV para día 171

Capítulo IV. Simulación de sismos y sensibilidad a cambios de propiedades del subsuelo

IV.1 Registros del Servicio Sismológico Nacional

Septiembre de 2017 ha sido testigo de dos eventos sísmicos de gran magnitud en México. Estos sismos dejaron una huella profunda en la memoria colectiva del país debido a su impacto en distintas regiones. En este contexto, el presente análisis tiene como propósito evaluar en detalle las características de varios eventos, y analizar las similitudes y diferencias en sus propiedades sísmicas. Esta evaluación resulta crucial para mejorar las estrategias de mitigación de riesgos y la respuesta ante futuros eventos de este tipo.

Para llevar a cabo este estudio, se seleccionaron los datos sísmicos correspondientes al sismo del 19 de septiembre de 2017, obtenidos de fuentes oficiales, como el Servicio Sismológico Nacional (SSN) de México, garantizando la confiabilidad de los datos. Los parámetros que se incluyeron en este análisis son:

Parámetro	Sismo 2017
Fecha	19 de septiembre de 2017
Epicentro	Chiautla de Tapia, Puebla
Profundidad	51.2 km
Hora	13:14 horas
Magnitud	7.1

Tabla 4 Parámetros del sismo del 19 de septiembre del 2017

Los registros sísmicos provienen de diversas estaciones del SSN distribuidas a lo largo del territorio nacional, pero este análisis se ha enfocado particularmente en cuatro estaciones

de banda ancha que tienen una especial relevancia por su proximidad al Valle de México: YAIG (Yautepec), PPIG (Popocatepetl), PZIG (El Pozo) y FTIG (Fresnillo). Estas estaciones permiten capturar con mayor precisión las ondas sísmicas que impactan esta región, que es una de las más vulnerables y densamente pobladas del país. La Figura 12 muestra un mapa con la ubicación del epicentro del evento.

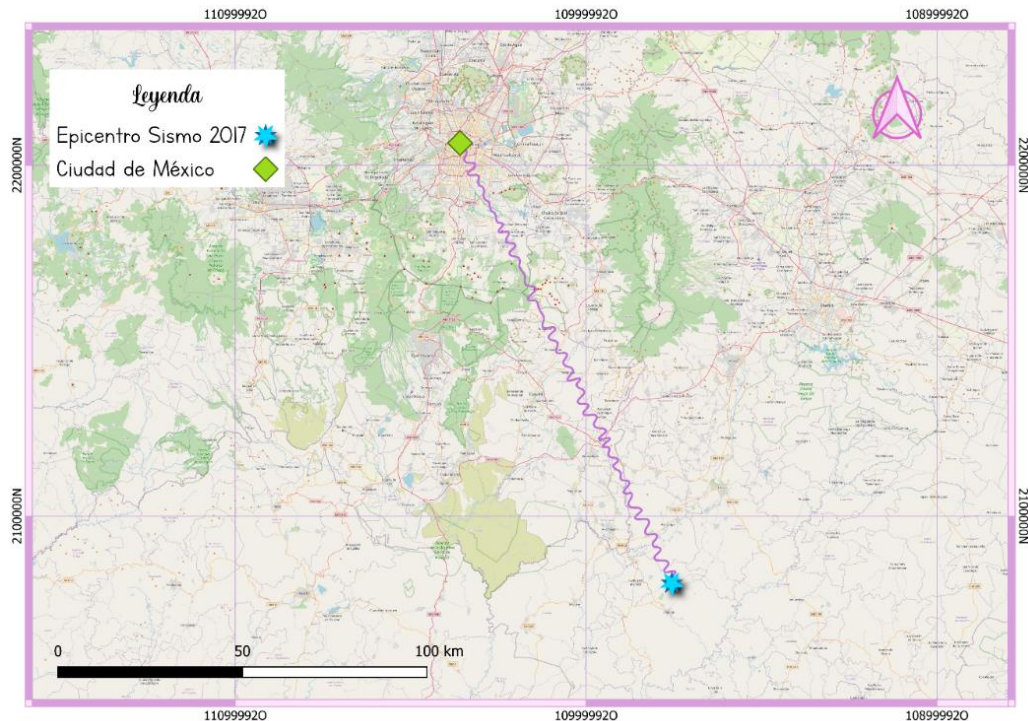
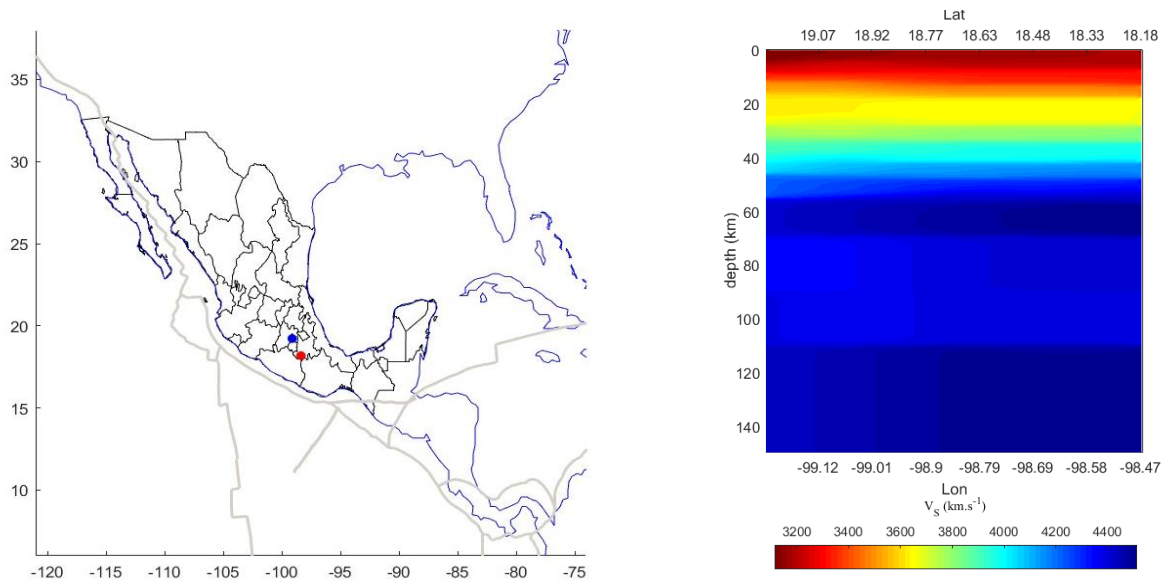


Figura 12 Mapa con la ubicación del epicentro del sismo de 2017

IV.1.1 Generación del modelo de velocidades

Para establecer un modelo de partida robusto que ayude a resolver el problema de no unicidad en la tomografía de ondas superficiales, se generó un modelo de velocidad 1D para el Valle de México. Este modelo se derivó del modelo de velocidad 3D, utilizando las herramientas de TomoMex (Spica et al., 2016) y procesamiento en Matlab. El proceso consistió en extraer y promediar los valores de velocidad sísmica del modelo 3D en una columna vertical, definida por las coordenadas de la región de interés (el Valle de México) y de los epicentros sísmicos relevantes. Este modelo 1D sirve como la representación preliminar esencial del subsuelo (Figura 13).



A

B

Figura 13 A) Se muestra la ubicación del epicentro (rojo) y de la zona de interés en azul, B) Se muestra la tomografía generada

El propósito de este proceso es obtener un modelo de velocidades de onda en la corteza terrestre sencillo que permita simular correctamente la propagación de las ondas sísmicas a través de las diferentes capas geológicas. En la Figura 14 se presenta una propuesta de velocidades derivada de la tomografía, mientras que en la Tabla 5 se muestran las profundidades de las capas y las velocidades de las ondas P (V_p), calculadas a partir de las velocidades de las ondas S (V_s) mediante la relación empírica de Brocher.

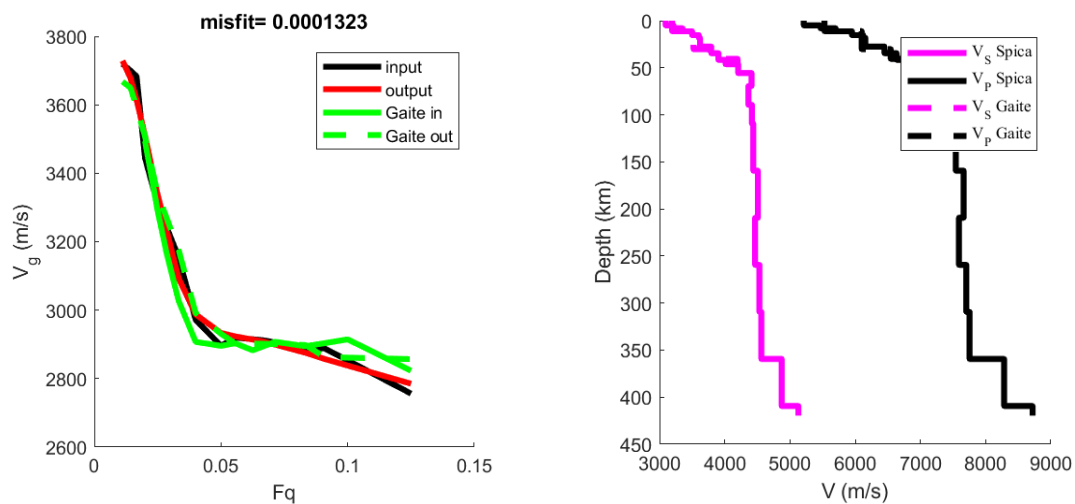


Figura 14 Perfil de velocidades con el cual empezaremos la simulación del sismo

Este modelo es fundamental para la simulación precisa y rápida de la propagación de ondas sísmicas. Además, para cada capa geológica identificada en la tomografía, se propuso una densidad adecuada en función de su profundidad, con lo que se logró caracterizar mejor el medio por el cual se desplazan las ondas (Tabla 5).

Profundidad	Espesor (km)	Vs (km/s)	Vp (km/s)	Densidad (g/cm ³)
4.98	4.98	3.09	5.21	2.57
8.11	3.12	3.21	5.46	2.61
11.23	3.12	3.35	5.70	2.65
15.39	4.16	3.49	5.94	2.70
27.54	12.14	3.62	6.15	2.75
34.57	7.03	3.79	6.44	2.82
41.60	7.03	3.90	6.63	2.87
46.29	4.68	4.013	6.82	2.92
55.66	9.37	4.20	7.15	3.01

Tabla 5 Propiedades elásticas para la simulación del sismo

IV.1.2 Simulación sísmica

A partir del modelo de velocidad 1D y de la localización de las estaciones, se empleó el programa desarrollado por el Dr. Mathieu Pertou, diseñado específicamente para la simulación de propagación de ondas sísmicas. Este software integra los parámetros geofísicos y la disposición espacial de las estaciones, lo que permite construir un modelo numérico capaz de predecir con mayor precisión la respuesta del terreno frente a futuros eventos sísmicos.

En la simulación se consideró una fuente dipolar con un perfil temporal tipo pulso de Ricker, de tres segundos de duración, cuyo inicio se estableció en el tiempo cero. Dado que el estudio se orienta a la caracterización de un sismo de escala regional, se definieron parámetros que aseguran una adecuada resolución en la representación de las ondas: una frecuencia máxima de 3 Hz, una longitud de onda de 0.05 y una frecuencia de Nyquist de 500 Hz. Estos valores fueron seleccionados de acuerdo con la distancia entre el epicentro y las estaciones receptoras, garantizando la correcta caracterización del fenómeno.

Respecto a la geometría del valle, se adoptó una configuración elíptica con un esquema de señal P/SV. El modelo consideró dos medios: el primero corresponde al valle, caracterizado a partir de los espectros HV experimentales, mientras que el segundo fue definido con base en los resultados de la tomografía sísmica. Bajo estas condiciones, el problema se formuló en un dominio bidimensional (2D), lo que permitió una representación más adecuada de la interacción entre la estructura geológica y la propagación de las ondas.

IV.1.3 Ubicación de las estaciones y tensor de momento sísmico

La rotación de componentes en el análisis sísmico se refiere a la transformación de las señales de movimiento del suelo registradas en un sistema de coordenadas (norte-sur, este-oeste y vertical) hacia un sistema más conveniente para la interpretación de las ondas sísmicas. Esto es particularmente útil para el análisis de las ondas superficiales, como las de Rayleigh y Love, donde es esencial separar las diferentes direcciones de movimiento.

Esta técnica permite la identificación precisa de la dirección de propagación de las ondas y la naturaleza del movimiento del suelo, lo que mejora la comprensión de la interacción entre la estructura de la superficie terrestre y las ondas sísmicas. El análisis rotacional se utiliza comúnmente en la ingeniería sísmica para mejorar los modelos predictivos del comportamiento estructural durante un sismo (Keiiti & Paul, 1980).

En el caso del sismo de Puebla ocurrido el 19 de septiembre de 2017 (M 7.1), la rotación de las componentes de la señal sísmica es esencial para interpretar la propagación de las ondas y el movimiento del suelo en diferentes direcciones. El Servicio Sismológico Nacional (SSN) generó un informe detallado que proporciona la siguiente información:

- Magnitud, ubicación del hipocentro, fecha y hora del evento.
- Componentes del tensor en el sistema esférico (r = rho, t = theta, p = phi).
- Ejes de tensión (T), nulo (N) y compresión (P), planos nodales y la proyección estereográfica del tensor (beach ball).

Con estos datos, es posible construir y manipular la matriz del tensor de momento sísmico, lo que permite entender mejor las características de este evento sísmico en particular.

IV.1.3.1 Proceso de Rotación del Tensor

La rotación del tensor se realiza mediante la operación matricial:

$$M_r = B^T M B \quad (7)$$

Donde:

- M_r : Matriz del tensor rotado.
- M : Matriz del tensor original.
- B : Matriz de rotación, definida como:

$$B = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) & 0 \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (8)$$

El ángulo θ se calcula como el azimut entre el norte y la recta que une el epicentro con el sitio de interés:

$$\theta = 90^\circ - \Phi \quad (9)$$

$$\Phi = \tan^{-1} \left(\frac{Lat_2 - Lat_1}{Long_2 - Long_1} \right) \quad (10)$$

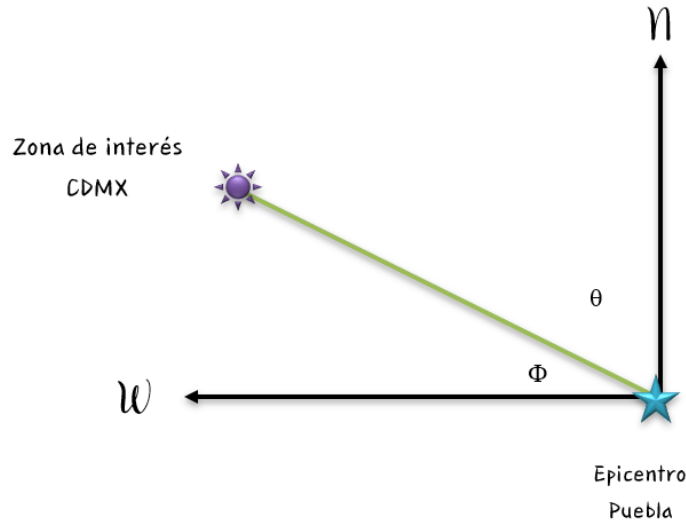


Figura 15 Demostracion grafica del azimut

Una vez determinado θ , se aplican las siguientes ecuaciones para obtener las componentes del tensor rotado:

$$M_{xx} = M_{rr} \cos^2(\theta) + M_{\theta\theta} \sin^2(\theta) - M_{r\theta} \sin(2\theta) \quad (11)$$

$$M_{yy} = M_{rr} \sin^2(\theta) + M_{\theta\theta} \cos^2(\theta) + M_{r\theta} \sin(2\theta) \quad (12)$$

$$M_{zz} = M_{\phi\phi} \quad (13)$$

$$M_{xy} = (M_{rr} - M_{\theta\theta}) \cos(\theta)\sin(\theta) + M_{r\theta}(\cos^2(\theta) - \sin^2(\theta)) \quad (14)$$

$$M_{zx} = M_{\phi r} \cos(\theta) - M_{\phi\theta} \sin(\theta) \quad (15)$$

$$M_{zy} = M_{\phi r} \sin(\theta) + M_{\phi\theta} \cos(\theta) \quad (16)$$

IV.1.3.2 Reducción a Dos Dimensiones

Para obtener el tensor reducido en dos dimensiones, se omite la componente θ bajo la nueva notación, dejando:

$$M_r = \begin{bmatrix} M_{xx} & M_{xz} \\ M_{zx} & M_{zz} \end{bmatrix} \quad (17)$$

Es importante tener en cuenta que el factor de escala del tensor no se ve afectado por el proceso de rotación.

En lo que respecta a los datos de la fuente sísmica, se utilizó el tensor de momento sísmico, basado en los datos del reporte especial emitido por el SSN. Sin embargo, debido a la ausencia de un tensor de momento directamente en dicho reporte, fue necesario calcularlo a partir de los parámetros de Strike, Dip y Rake de la falla asociada al sismo. El tensor de momento obtenido fue el siguiente:

$$M = \begin{bmatrix} -5.5019e + 27 & 3.048e + 26 \\ 3.048e + 26 & -1.5364e + 27 \end{bmatrix} \quad (18)$$

IV.1.3.2 Simulaciones respecto a diferentes HV

Una vez obtenidas las curvas HV teóricas para los días 110 y 171 (Figura11), los cuales representan condiciones contrastantes de saturación inferidas a partir de las variaciones temporales del cociente HV – y considerando que la parte imaginaria del teorema de Green para campos difusos permite a partir de la correlación del ruido sísmico ambiental, estimar cambios en la velocidad de onda cortante (V_s) y en la atenuación del medio al ser sensible a la rigidez específica y a la disipación energética del subsuelo – se procedió a simular la propagación de ondas sísmicas para distintas estaciones de la red sismológica: YAIG (Yautepec), PPIG (Popocatépetl), PZIG (El Pozo), FTIG (Fresnillo) y, como punto focal del estudio, la Ciudad de México (CDMX). El objetivo de este análisis comparativo fue cuantificar cómo los cambios temporales en las propiedades elásticas del suelo,

principalmente la velocidad de onda cortante (V_s), afectan la amplitud, el contenido frecuencial y la duración del movimiento sísmico simulado en diferentes contextos geológicos del Valle de México.

Los resultados de las simulaciones, comparados en las Figuras 16 a 20, revelaron un contraste entre la respuesta de la CDMX y la de las estaciones periféricas:

- **Ciudad de México (CDMX, Figura 16):** Las simulaciones mostraron una sensibilidad extrema a los cambios hidrológicos estacionales. Para el día 171 (asociado a una mayor saturación), se observó un incremento del **40-50% en la amplitud** de las ondas superficiales en la banda de **0.3-0.6 Hz**, junto con una mayor duración del movimiento fuerte. Este desplazamiento espectral hacia frecuencias ligeramente más bajas sugiere una reducción de la V_s efectiva en los sedimentos lacustres blandos debido al aumento de la presión de poro, un sello distintivo de la dinámica no lineal del subsuelo de la cuenca.
- **Estaciones Periféricas (Figuras 17-20):** En marcado contraste, las estaciones en sustratos rocosos o volcánicos mostraron una respuesta notablemente estable. En PZIG (Figura 17) y PPIG (Figura 18) las variaciones fueron mínimas ($<7\%$), mientras que FTIG (Figura 20), sobre roca, fue esencialmente idéntica en ambos escenarios. Esto confirma que la sensibilidad a los cambios hidrológicos estacionales es un fenómeno predominantemente asociado a los sedimentos blandos y profundos de la cuenca.

Esta comparación sistemática valida que las variaciones temporales observadas en el HV experimental se traducen en cambios significativos y cuantificables en la respuesta sísmica simulada, subrayando la criticalidad de considerar la condición hidrológica transitoria en la evaluación del riesgo sísmico para la CDMX.

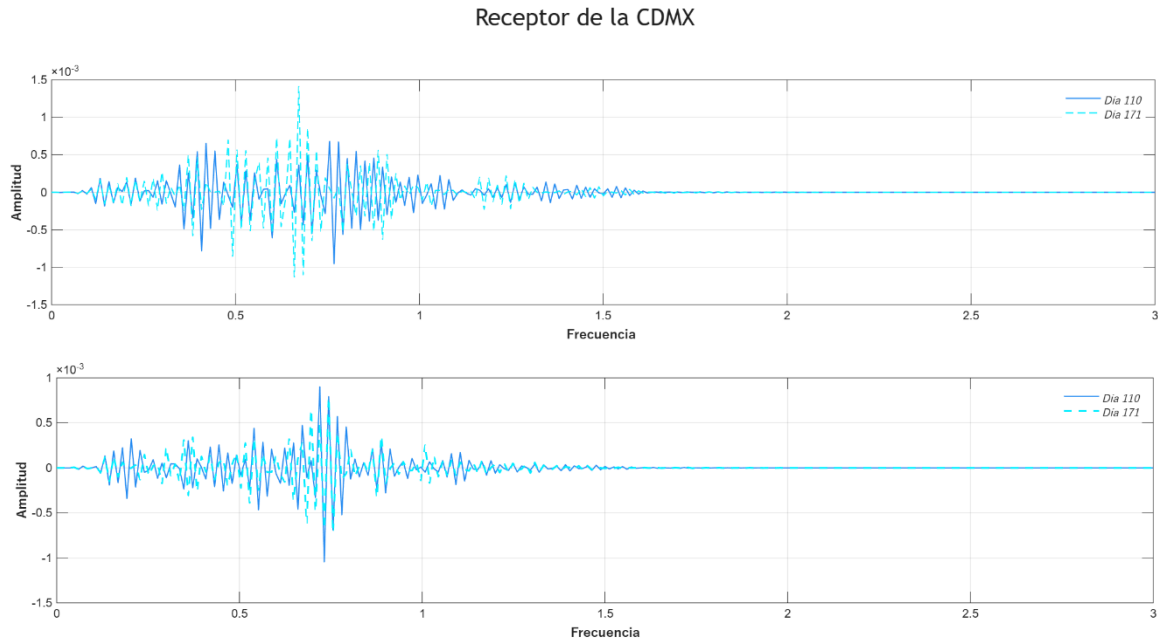


Figura 16 Comparación de sismogramas sintéticos para las estaciones de la red sísmica bajo diferentes condiciones de HV (día 110 y día 171). Ciudad de México

La estación PZIG (Figura 17), ubicada en una zona de transición geológica, mostró una respuesta sísmica notablemente estable entre ambos escenarios (día 110 vs. día 171). El análisis espectral reveló variaciones menores al 5% en la amplitud máxima de las ondas S y superficiales. Esta estabilidad sugiere que el sustrato local—compuesto probablemente por depósitos aluviales moderadamente consolidados y con menor contenido de arcillas expansivas—presenta una menor susceptibilidad a los cambios de humedad estacionales. La frecuencia fundamental se mantuvo constante en ~ 1.2 Hz, indicando una rigidez dinámica (V_s) esencialmente invariable.

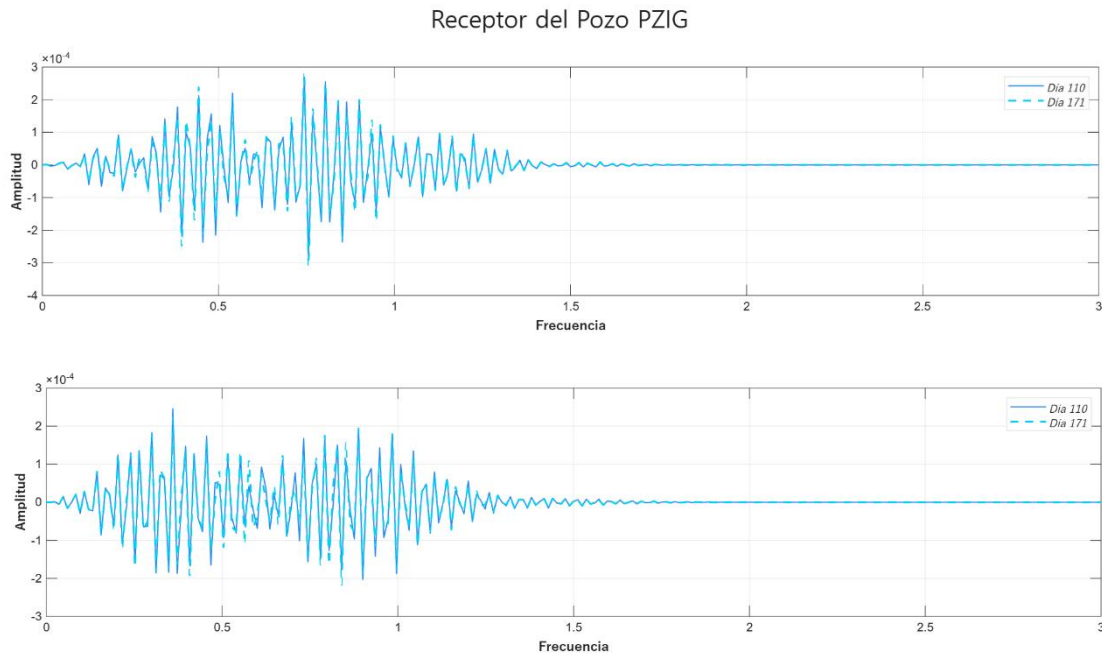


Figura 17 Comparación de sismogramas sintéticos para las estaciones de la red sísmica bajo diferentes condiciones de HV (día 110 y día 171). El Pozo.

La estación del Popocatepetl (Figura 18), situada en las faldas del volcán, exhibió una respuesta predominantemente estable. Se detectó una ligera amplificación en las frecuencias cercanas a ~ 0.8 Hz en ambos escenarios, atribuible a los depósitos piroclásticos y lavas fracturadas típicas del área. La diferencia entre los dos días fue mínima ($< 7\%$ en la amplitud espectral), confirmando que los materiales volcánicos, aunque pueden ser porosos, drenan rápidamente y mantienen sus propiedades elásticas relativamente constantes fuera de periodos de lluvia extrema inmediata.

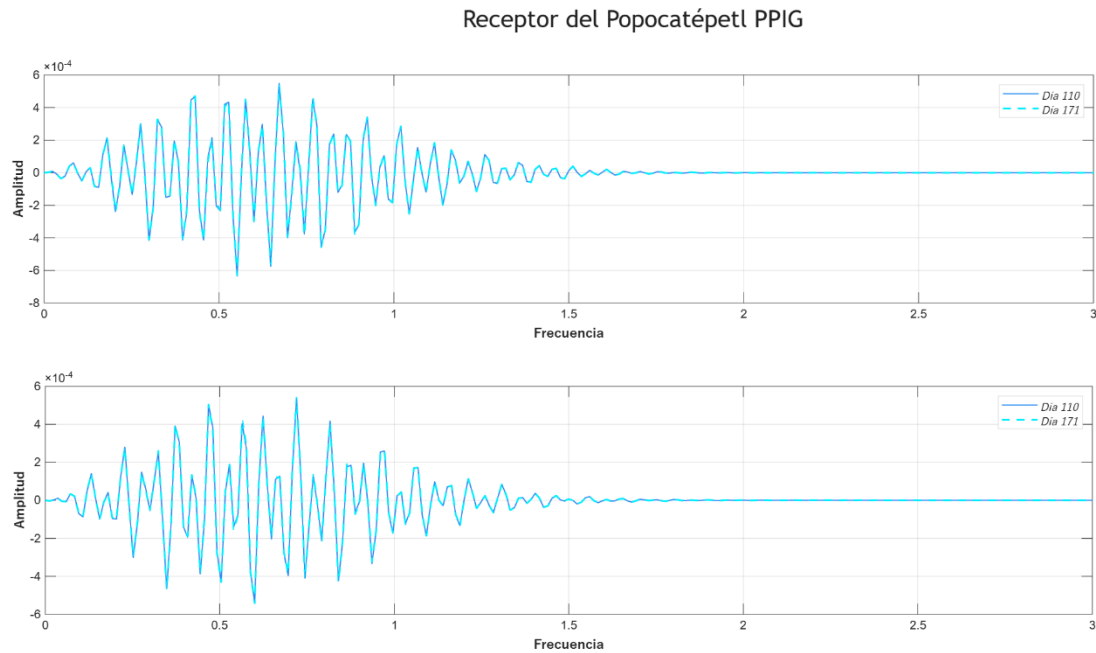


Figura 18 Comparación de sismogramas sintéticos para las estaciones de la red sísmica bajo diferentes condiciones de HV (día 110 y día 171). Popocatépetl

Para la estación de Yautepec (Figura 19), se observaron leves variaciones en las amplitudes medias (entre el 8-12%) en el rango de frecuencias de 0.5-1.5 Hz. Este cambio modesto sugiere la presencia de suelo granular o volcaniclastico que puede experimentar ligeros cambios en su módulo de corte con la saturación de agua. Sin embargo, la forma general del sismograma y el tiempo de llegada de las fases principales permanecieron sin cambios, indicando que cualquier capa blanda presente es poco profunda y no controla la respuesta sísmica general del sitio.

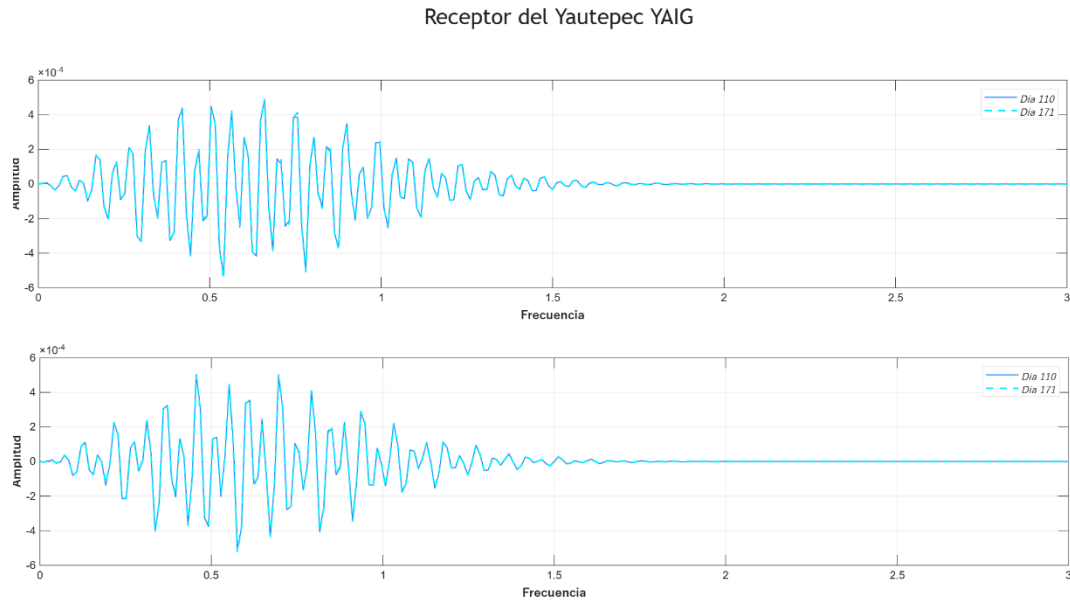


Figura 19 Comparación de sismogramas sintéticos para las estaciones de la red sísmica bajo diferentes condiciones de HV (día 110 y día 171). Yautepec.

La respuesta en la estación FTIG (Figura 20) fue consistente con un sustrato rocoso estable y de alta velocidad. Las formas de onda sintéticas, tanto para el día 110 como para el 171, mostraron amplitudes bajas y una atenuación mínima. El contenido de frecuencias altas (>3 Hz) se conservó prácticamente idéntico, y la duración del movimiento fuerte fue significativamente menor en comparación de las estaciones en la cuenca. Esto corrobora que la geología local, caracterizada por rocas ígneas o metamórficas cerca de la superficie, no amplifica significativamente las ondas sísmicas y es insensible a las variaciones hidrológicas a corto plazo.

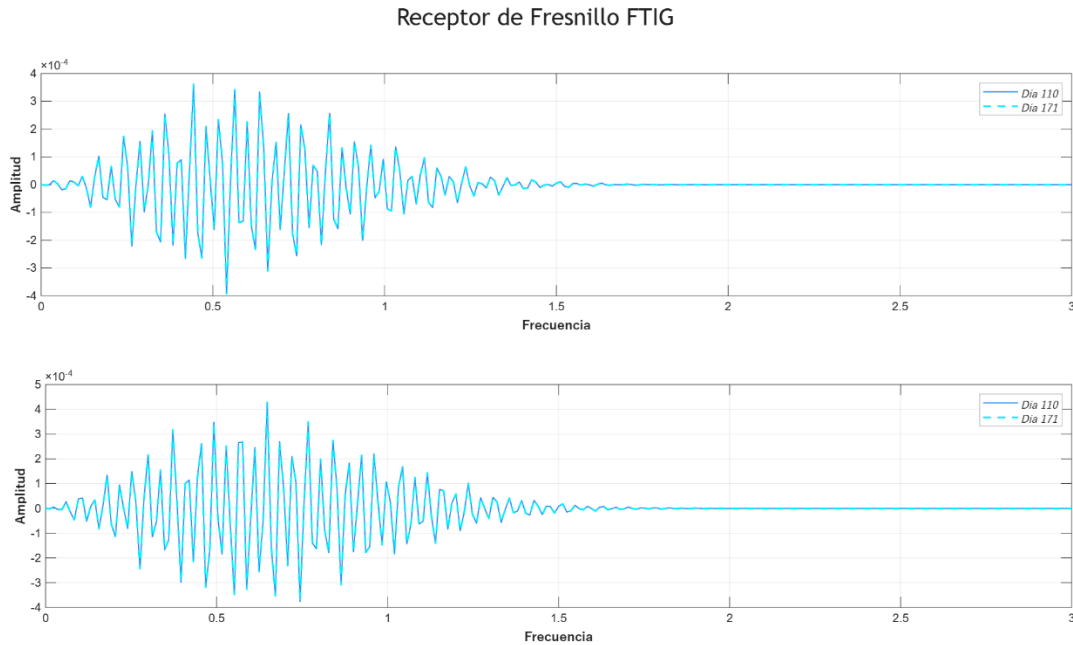


Figura 20 Comparación de sismogramas sintéticos para las estaciones de la red sísmica bajo diferentes condiciones de HV (día 110 y día 171). Fresnillo.

IV.2 Registros del DAS

La tecnología de **Detección Acústica Distribuida (DAS)** ha permitido capturar, con una resolución espacial y temporal sin precedentes, la respuesta sísmica del subsuelo de la Ciudad de México (CDMX) a lo largo de fibras ópticas desplegadas en el subsuelo urbano (Pertou et al., 2025). A diferencia de los sensores puntuales tradicionales, el DAS transforma un cable de fibra óptica en una densa red de sensores distribuidos, lo que posibilita la medición continua de deformaciones dinámicas a lo largo de trayectos de varios kilómetros. Esta capacidad resulta particularmente valiosa para caracterizar la respuesta sísmica en entornos urbanos complejos como el Valle de México, donde la heterogeneidad lateral del subsuelo ejerce un control fundamental sobre la amplificación de las ondas sísmicas.

El análisis presentado en esta sección se centra en cinco registros DAS representativos, correspondientes a eventos sísmicos ocurridos entre mayo y diciembre de 2022, con magnitudes en el rango de $M_w 4.7$ a $M_w 7.7$. Estos registros proveen una base de datos única para evaluar la capacidad del DAS en la caracterización de efectos de sitio.

IV.2.1 Catálogo de Registros y Características Principales

Los cinco registros DAS analizados capturan eventos sísmicos ocurridos entre mayo y diciembre de 2022, con magnitudes que varían entre Mw 4.7 y Mw 7.7. La Tabla 6 muestra las características clave de cada registro.

Fecha y Hora (UTC)	Magnitud (Mw)
2022-09-19 18:05:09	7.7
2022-09-22 06:16:09	6.9
2022-11-03 07:44:51	4.9
2022-12-30 15:35:50	4.9
2022-05-29 10:45:13	4.7

Tabla 6 Características de los registros del DAS

IV.2.2 Análisis de la Respuesta Espacio-Temporal

Los registros DAS, representados en diagramas espacio-tiempo (x-t) y espectros de frecuencia-distancia, permiten visualizar la propagación de las ondas sísmicas a lo largo de la fibra y caracterizar los efectos de sitio de manera espacialmente explícita.

- **Eventos de Alta Energía (19 de septiembre del 2022 y 22 de septiembre del 2022):** Para estos sismos de mayor magnitud, los diagramas x-t muestran **patrones de onda coherentes y sostenidos** a lo largo de segmentos significativos de la fibra, particularmente en las zonas que atraviesan los sedimentos blandos y profundos de la cuenca. Esta observación es consistente con el fenómeno de amplificación de ondas superficiales (Rayleigh), el cual está controlado por el contraste de impedancia entre los sedimentos lacustres y el basamento rocoso. El análisis espectral confirma que la energía sísmica se concentra predominantemente en la banda de **0.5 a 1.0 Hz**, la cual coincide con el periodo fundamental de resonancia (T_0) del Valle de México.

- **Eventos de Baja Energía (03 de noviembre del 2022, 30 de diciembre del 2022 y 29 de mayo del 2022):** En contraste, los registros de los eventos de menor magnitud presentan amplitudes notablemente reducidas y una duración más corta. Los diagramas x-t exhiben una coherencia espacial limitada y un mayor contenido de ruido ambiental. Si bien el DAS demuestra su capacidad para detectar estos eventos menores, la **baja relación señal-ruido (SNR)** dificulta la identificación clara de los patrones de onda y la extracción robusta de parámetros dinámicos, subrayando la importancia de aplicar técnicas avanzadas de procesamiento de señales para este tipo de registros.

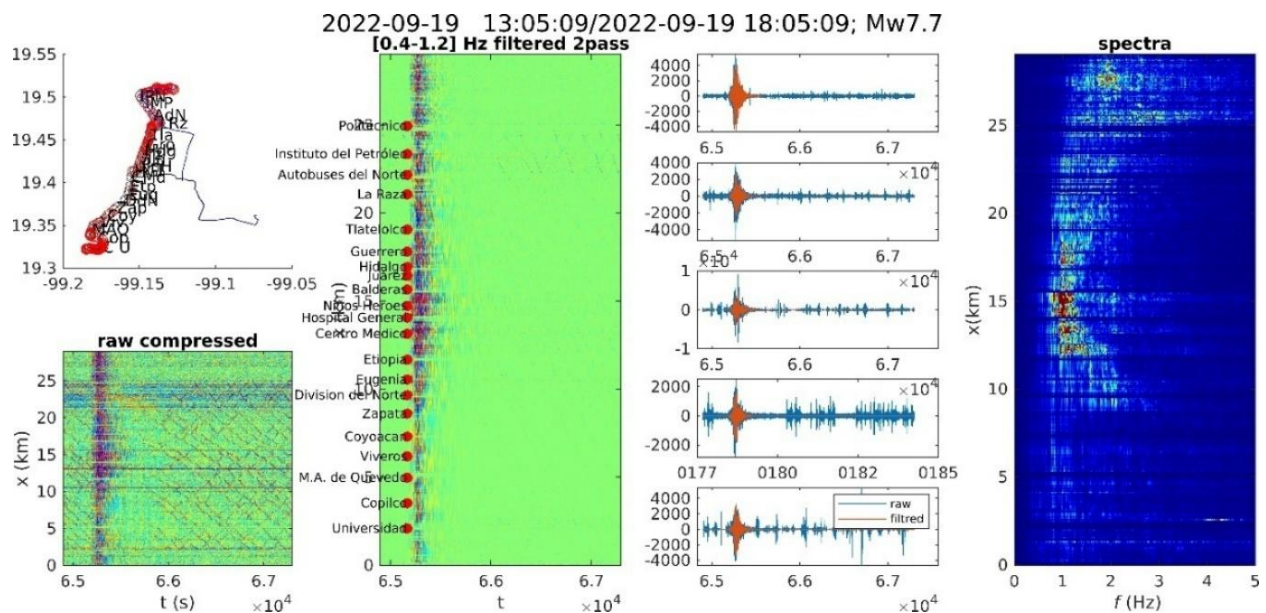


Figura 21 Registro del DAS para el día 19 de septiembre del 2022

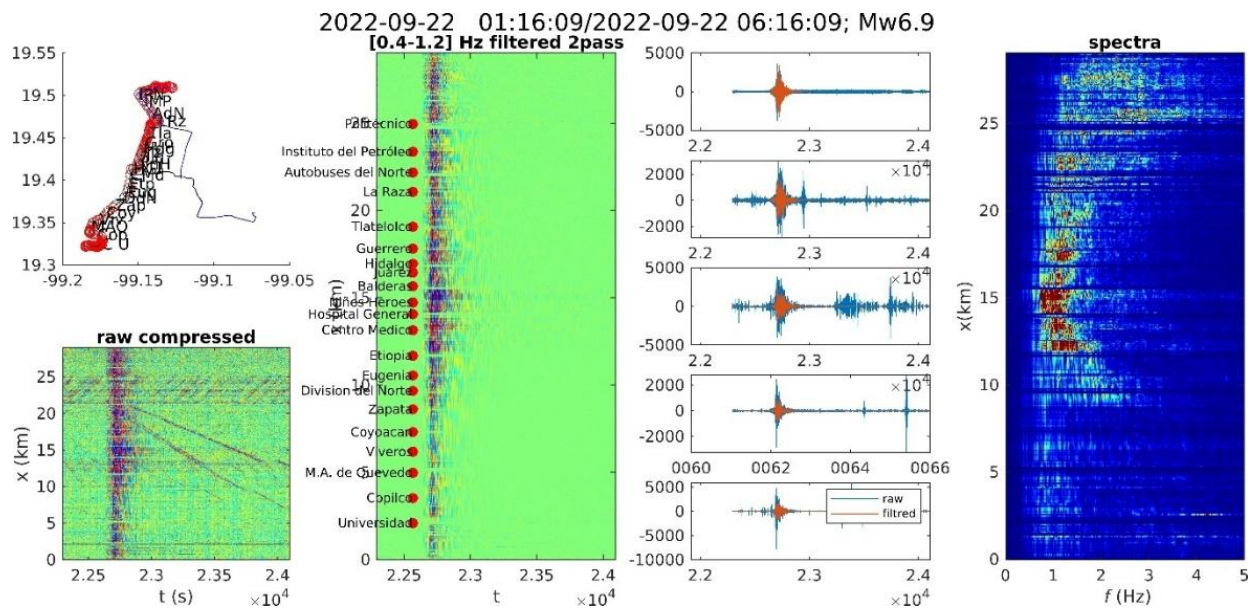


Figura 22 Registro del DAS para el día 22 de septiembre del 2022

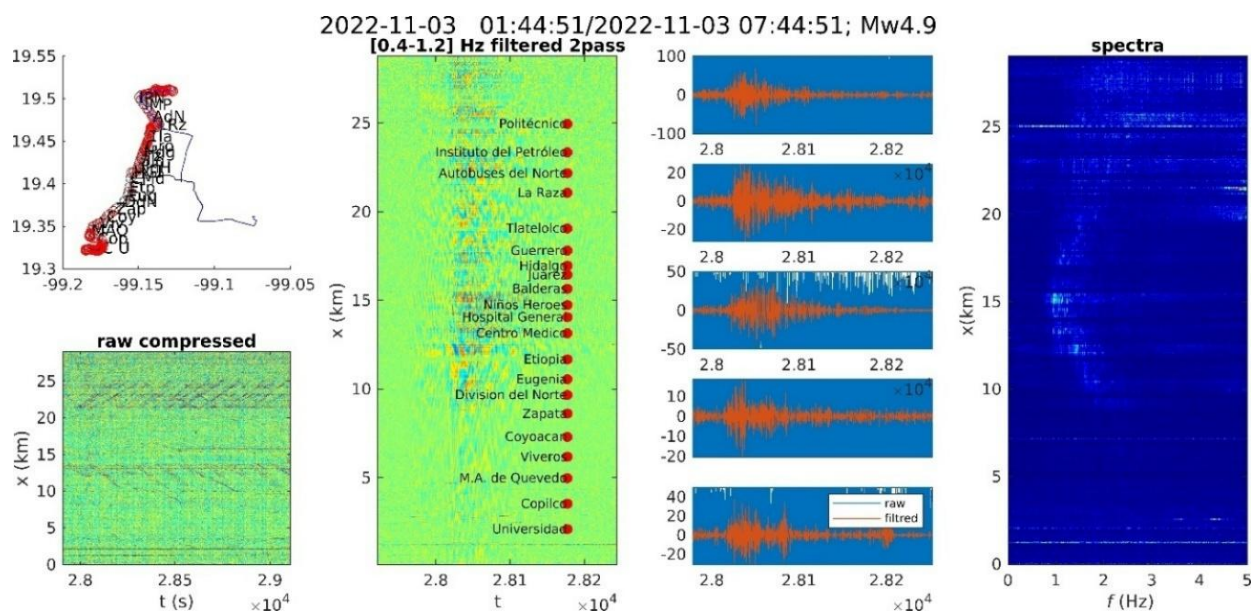


Figura 23 Registro del DAS para el día 03 de noviembre del 2022

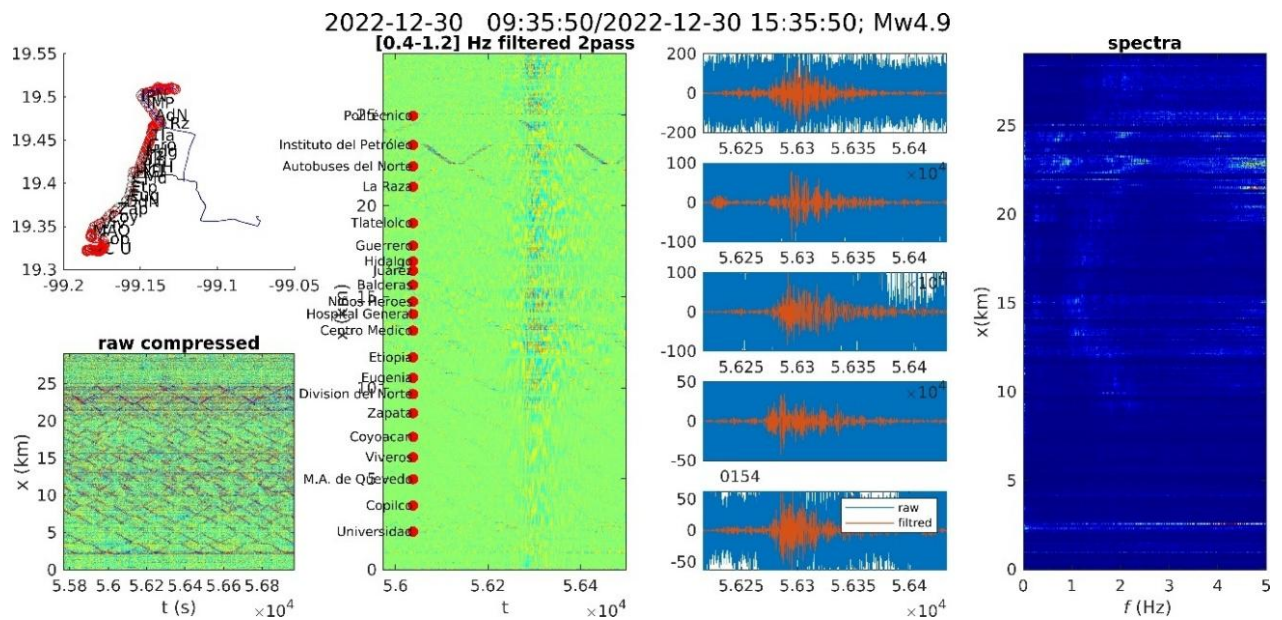


Figura 24 Registro del DAS para el día 30 de diciembre del 2022

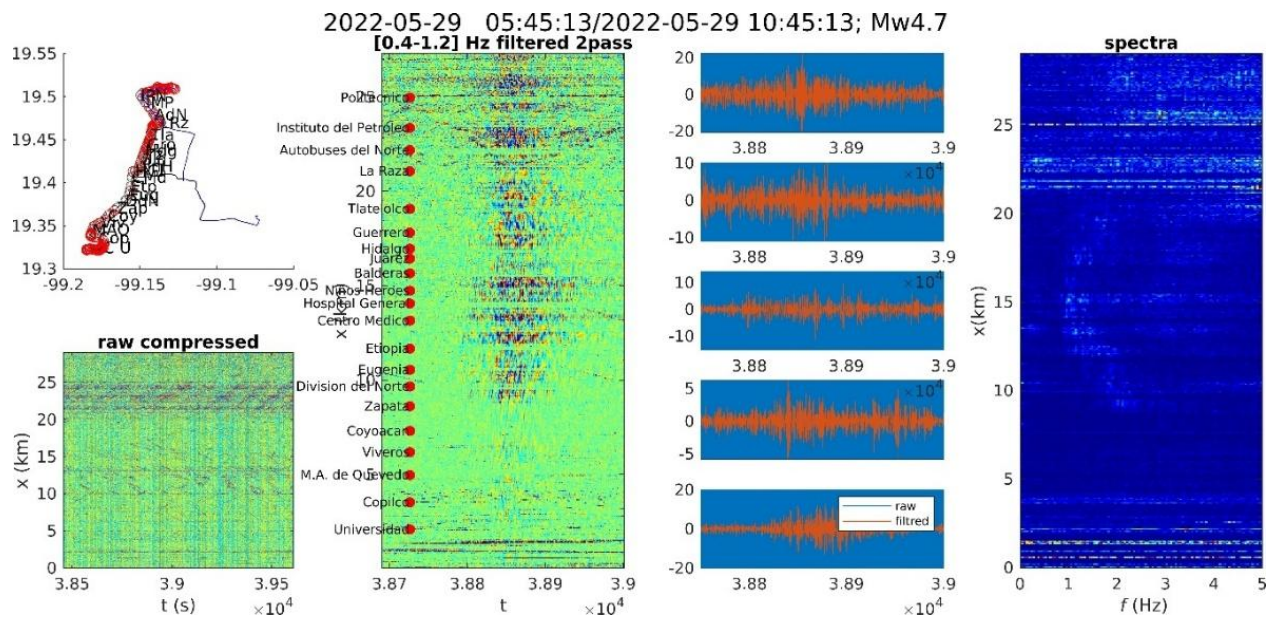


Figura 25 Registro del DAS para el día 29 de mayo del 2022

IV.2.3 Análisis de Formas de Onda

Para una caracterización robusta de la respuesta sísmica registrada por el DAS, se realizó un procesamiento sistemático de las formas de onda que incluyó su normalización y filtrado. Este procedimiento permite aislar la señal sísmica de fuentes de ruido instrumental y ambiental, así como resaltar el contenido frecuencial asociado a la resonancia de la cuenca.

Procesamiento Aplicado

1. **Normalización:** Cada traza de deformación fue normalizada por su valor máximo absoluto. Este paso es esencial para comparar cuantitativamente la amplitud relativa de la respuesta entre eventos de diferentes magnitudes y entre distintas posiciones a lo largo de la fibra, eliminando la dependencia de la escala absoluta de la amplitud (Figura 26).
2. **Filtrado:** Esto nos permite tener una mayor visualización de las formas de onda que podamos tener (Figura 27).

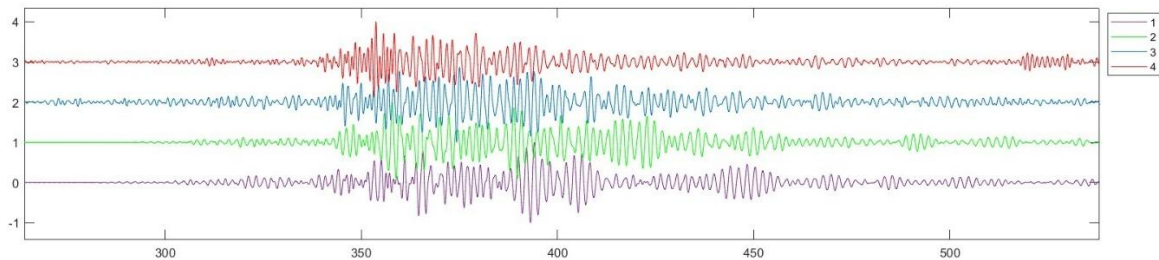


Figura 26 Formas de onda normalizadas

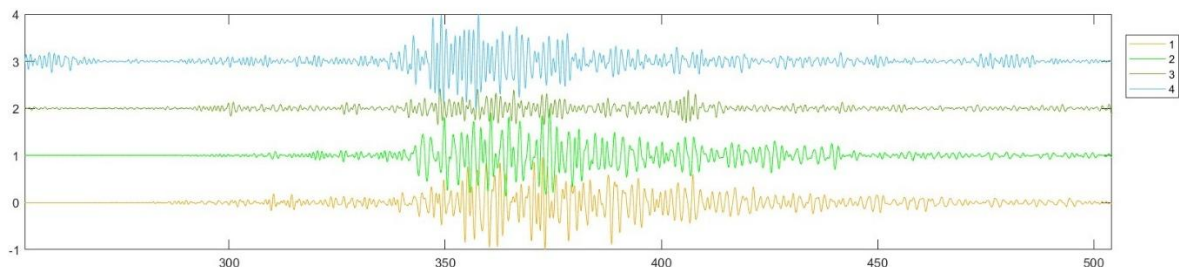


Figura 27 Forma de ondas normalizadas y filtradas

Análisis de las Formas de Onda Procesadas

El análisis de las señales normalizadas y filtradas revela patrones fundamentales de la respuesta dinámica de la cuenca:

- **Coherencia Espacial y Duración:** En los eventos de mayor magnitud (**19 de septiembre del 2022 - Mw7.7** y **22 de septiembre del 2022 - Mw6.9**), las formas de onda filtradas exhiben una **alta coherencia espacial** a lo largo de segmentos extensos de la fibra (canales ~#700 a ~#1600). La normalización evidencia que la forma de la onda, más que su amplitud absoluta, se mantiene consistente en estas zonas, indicando una excitación homogénea del modo fundamental de la cuenca. Además, se confirma la **gran duración** del movimiento sísmico, con una cola de vibración que persiste por más de 100 segundos, consecuencia del atrapamiento de ondas superficiales en los sedimentos blandos.
- **Contenido Frecuencial y Resonancia:** El filtrado en la banda 0.4-1.2 Hz pone de manifiesto la predominancia de las **ondas superficiales de Rayleigh** en la respuesta tardía del registro. En los diagramas x-t filtrados, se observa un patrón de ondas con frentes paralelos que se propagan a velocidades muy bajas (< 300 m/s), características de estas ondas en medios blandos. La energía se concentra de manera estable alrededor de los 0.5-0.6 Hz en la porción central de la fibra, lo que corrobora la firma espectral del periodo fundamental de la cuenca.
- **Respuesta a Eventos Menores:** Para los sismos de baja magnitud (**03 de noviembre del 2022, 30 de diciembre del 2022 y 29 de mayo del 2022**), el proceso de normalización y filtrado permite identificar la señal sísmica a pesar de la baja relación señal-ruido (SNR) original. Su **coherencia espacial es notablemente menor** y la duración de la señal filtrada es significativamente más corta en comparación con los eventos grandes como los documentados en el estudio de Li et al., (2025). Esto indica que la energía generada es insuficiente para excitar de manera sostenida y coherente el modo fundamental en toda la cuenca.

Heterogeneidad del Subsuelo: La comparación de las formas de onda normalizadas y filtradas a lo largo de la fibra permite identificar variaciones locales en la respuesta. Por ejemplo, se observan cambios en la amplitud normalizada, la frecuencia dominante y la

duración de la vibración entre canales adyacentes. Estas variaciones son un indicador directo de la **heterogeneidad lateral y en profundidad de las propiedades elásticas** del subsuelo, como cambios en el espesor de los sedimentos o en la velocidad de onda cortante (V_s).

Capítulo V. Conclusiones

El desarrollo de la presente investigación permitió cumplir satisfactoriamente con los objetivos planteados, integrando metodologías teóricas, experimentales y de simulación para caracterizar la respuesta sísmica del subsuelo del Valle de México y sus variaciones temporales. En este marco, el análisis de 171 curvas HV experimentales de la estación Benito Juárez (BJVM) demostró la presencia de variaciones temporales significativas en la respuesta sísmica del subsuelo, particularmente en el rango de frecuencias de 0.1-0.5 Hz, cuya correlación con los patrones de precipitación estacional confirma la influencia de los cambios en la saturación del suelo sobre las propiedades elásticas. Complementariamente, el procesamiento de registros DAS permitió caracterizar la respuesta sísmica con una resolución espacial sin precedentes, evidenciando el atrapamiento y la amplificación de ondas superficiales de Rayleigh en los sedimentos lacustres blandos, con energía concentrada en la frecuencia fundamental de la cuenca (~0.5 Hz). Paralelamente, la implementación de modelos numéricos confirmó que la velocidad de onda cortante (V_s) es el parámetro de control primario sobre la frecuencia fundamental de resonancia, mientras que la comparación entre curvas HV teóricas y experimentales validó la capacidad de los modelos para reproducir variaciones en la respuesta dinámica del terreno. Esta comprensión teórica se tradujo en simulaciones sísmicas que cuantificaron de manera contundente el impacto de las variaciones de saturación, registrando diferencias de hasta un 40-50% en la amplitud del movimiento sísmico simulado para la Ciudad de México bajo diferentes condiciones (día 110 vs. día 171), particularmente en la banda de 0.3-0.6 Hz, en contraste con las estaciones ubicadas en sustratos rocosos o volcánicos (FTIG, PPIG, PZIG) que mostraron variaciones inferiores al 5-7%. Finalmente, la sinergia entre técnicas tradicionales (HVSR) y emergentes (DAS), complementada con una modelación numérica robusta, demostró ser una herramienta poderosa para el monitoreo dinámico del subsuelo, constituyendo un aporte significativo para la caracterización sísmica del Valle de México, la actualización de reglamentos de construcción, el refinamiento de estrategias de microzonificación sísmica que consideren condiciones hidrológicas variables, y la optimización de sistemas de alerta temprana, con un alto potencial de transferibilidad a otras regiones con complejidad geológica similar.

Referencias

- ✦ Brocher, T. M. (2005). Empirical Relations between Elastic Wavespeeds and Density in the Earth's Crust. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 95(6), 2081-2092. <https://doi.org/10.1785/0120050077>
- ✦ García Vedrenne, L. G., & Kuhliger Martínez, V. L. (2010). Un legado de Hernán Cortés en el Museo Nacional de Historia (MNH-INAH), México. Diagnóstico, investigación histórica, análisis material y restauración de un pañuelo funerario de los siglos XVIII-XIX. *Intervención Revista Internacional de Conservación Restauración y Museología*, 1(1), 53-66. <https://doi.org/10.30763/Intervencion.2015.12.145>
- ✦ González Torres, E. A., Morán Zenteno, D. J., Mori, L., & 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*, 67(2), 285-297. <https://doi.org/10.18268/BSGM2015v67n2a11>
- ✦ Hartog, A. H. (2017a). *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
- ✦ Hartog, A. H. (2017b). *An Introduction to Distributed Optical Fibre Sensors*. CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781315119014>
- ✦ Keiiti, A., & Paul, G. R. (1980). Quantitative Seismology, Theory and Methods Volume I and Volume II. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 68(5), 1546-1546. <https://doi.org/10.1121/1.385057>
- ✦ Lay, T., & Wallace, T. C. (1995). *Modern global seismology*. Elsevier.
- ✦ Nakamura, Y. (1989a). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*.
- ✦ Nakamura, Y. (1989b). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*.
- ✦ Pertón, M., Li, Y., Ermert, L. A., Sánchez-Sesma, F. J., Escobar Maya, L. I., & Spica, Z. J. (2025). Monitoring Spatiotemporal Seismic Velocity Changes Using Seismic Interferometry and Distributed Acoustic Sensing in Mexico City. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 130(8). <https://doi.org/10.1029/2024JB030697>
- ✦ Pertón, M., Ramos Pérez, E., Aguilar-Velázquez, M. J., Li, Y., Spica, Z. J., Lermo Samaniego, J., Ortiz-Avila, A., & Ramos Avila, V. (2026). Hydroseismic interplays on perpendicular faults in Mexico City revealed by distributed acoustic sensing. *Geophysical Journal International*, 246(2). <https://doi.org/10.1093/gji/ggag199>
- ✦ Pertón, M., Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez-Castellanos, A., Campillo, M., & Weaver, R. L. (2009). Two perspectives on equipartition in diffuse elastic fields in three dimensions. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 126(3), 1125-1130. <https://doi.org/10.1121/1.3177262>

- ✦ Piña-Flores, J., Pertón, M., García-Jerez, A., Carmona, E., Luzón, F., Molina-Villegas, J. C., & Sánchez-Sesma, F. J. (2017). The inversion of spectral ratio H/V in a layered system using the diffuse field assumption (DFA). *Geophysical Journal International*, 208(1), 577-588. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw416>
- ✦ Sánchez-Sesma, F. J., Rodríguez, M., Iturrarán-Viveros, U., Luzón, F., Campillo, M., Margerin, L., García-Jerez, A., Suarez, M., Santoyo, M. A., & Rodríguez-Castellanos, A. (2011). A theory for microtremor H/V spectral ratio: application for a layered medium. *Geophysical Journal International*, 186(1), 221-225. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05064.x>
- ✦ Spica, Z., Pertón, M., Calò, M., Legrand, D., Córdoba-Montiel, F., & Iglesias, A. (2016). 3-D shear wave velocity model of Mexico and South US: bridging seismic networks with ambient noise cross-correlations (C^1) and correlation of coda of correlations (C^3). *Geophysical Journal International*, 206(3), 1795-1813. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw240>
- ✦ Vazquez-Sanchez, E., & Jaimes-Palomera, R. (1989). Geología de la cuenca de México. *Geofísica Internacional*, 28(2), 133-190. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1989.28.2.1026>