



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**Espectro Sísmico de Sitio para una  
Zona Hotelera en Puerto Vallarta,  
Jalisco**

**INFORME DE ACTIVIDADES PROFESIONALES**

Que para obtener el título de  
**Ingeniera Geofísica**

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

Karina Yehemi Castañeda González

**ASESORA DE INFORME**

Dra. Iza Canales García



**Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2021**



Ciudad de México, Abril 2021.

A quien corresponda:

Por este medio me permito informarle que la C. **Karina Yehemi Castañeda González**, se encuentra laborando formalmente en GEOTEM INGENIERIA S.A. de C.V. desde enero 2019 a la actualidad, cubriendo así un periodo de dos años tres meses.

Durante su estancia ha desempeñado las siguientes actividades: Desarrollo de trabajos en campo, colaboración en proyectos de ingeniería aplicada e implementación de metodologías para la eficiencia en procesos.

Por lo tanto, validamos su experiencia profesional y el reporte adjunto que lo acredita para fines académicos, hacemos de su conocimiento que los datos presentados no tienen problemas de confidencialidad.

Sin otro particular reciba un cordial saludo.

  
\_\_\_\_\_  
Director General  
**Ing. Carlos Pita de la Paz**



■ ISO 9001:2015  
MX15/968345  
■ TRACE  
TC4192-7924

GEOTEM Ingenieria S.A. de C.V.

[www.geotem.com.mx](http://www.geotem.com.mx)

CDMX, Tlalpan, P. México



## CONTENIDO

<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>4</b>
<b>OBJETIVOS</b>	<b>7</b>
<b>1.EFECTOS DE SITIO</b>	<b>8</b>
<b>1.1 MODELO GEOFÍSICO-GEOTÉCNICO</b>	<b>9</b>
1.1.1 Vibración Ambiental	13
1.1.2 Tendidos de Refracción Sísmica (TRS)	19
<b>1.2 CONCLUSIÓN DEL MODELO GEOFÍSICO-GEOTÉCNICO</b>	<b>28</b>
<b>1.3 FUNCIÓN DE TRANSFERENCIA</b>	<b>29</b>
<b>2.PELIGRO SÍSMICO: ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO</b>	<b>30</b>
<b>2.1 ESPECTRO DE RESPUESTA</b>	<b>30</b>
<b>2.2 ESPECTRO DE RESPUESTA (CON EFECTOS DE SITIO)</b>	<b>31</b>
<b>2.3 ESPECTRO ELÁSTICO DE DISEÑO PROPUESTO</b>	<b>32</b>
<b>2.4 ESPECTROS INELÁSTICOS DE DISEÑO</b>	<b>37</b>
<b>3.CONCLUSIONES</b>	<b>39</b>
<b>4.REFERENCIAS</b>	<b>41</b>
<b>5.ANEXOS</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO I. METODOLOGÍA DE TENDIDOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA (TRS)</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO II. METODOLOGÍA DE VIBRACIÓN AMBIENTAL (VA)</b>	<b>51</b>
<b>ANEXO III PELIGRO SÍSMICO</b>	<b>61</b>

# INTRODUCCIÓN

En este trabajo se explicará de forma clara y detallada el trabajo técnico desarrollado para la estimación del Espectro sísmico en una zona hotelera de Puerto Vallarta.

La zona de estudio se ubica al oeste de Puerto Vallarta, se encuentra referenciada la zona de estudio mediante el sistema UTM 14N (Universal Transversal de Mercator y el Datum WGS-84), quedando comprendida entre las coordenadas 474217.44 m E, 474450.76m E de longitud y 2284200.66m N, 2284349.44 m N de latitud, como se muestra en la figura 1.

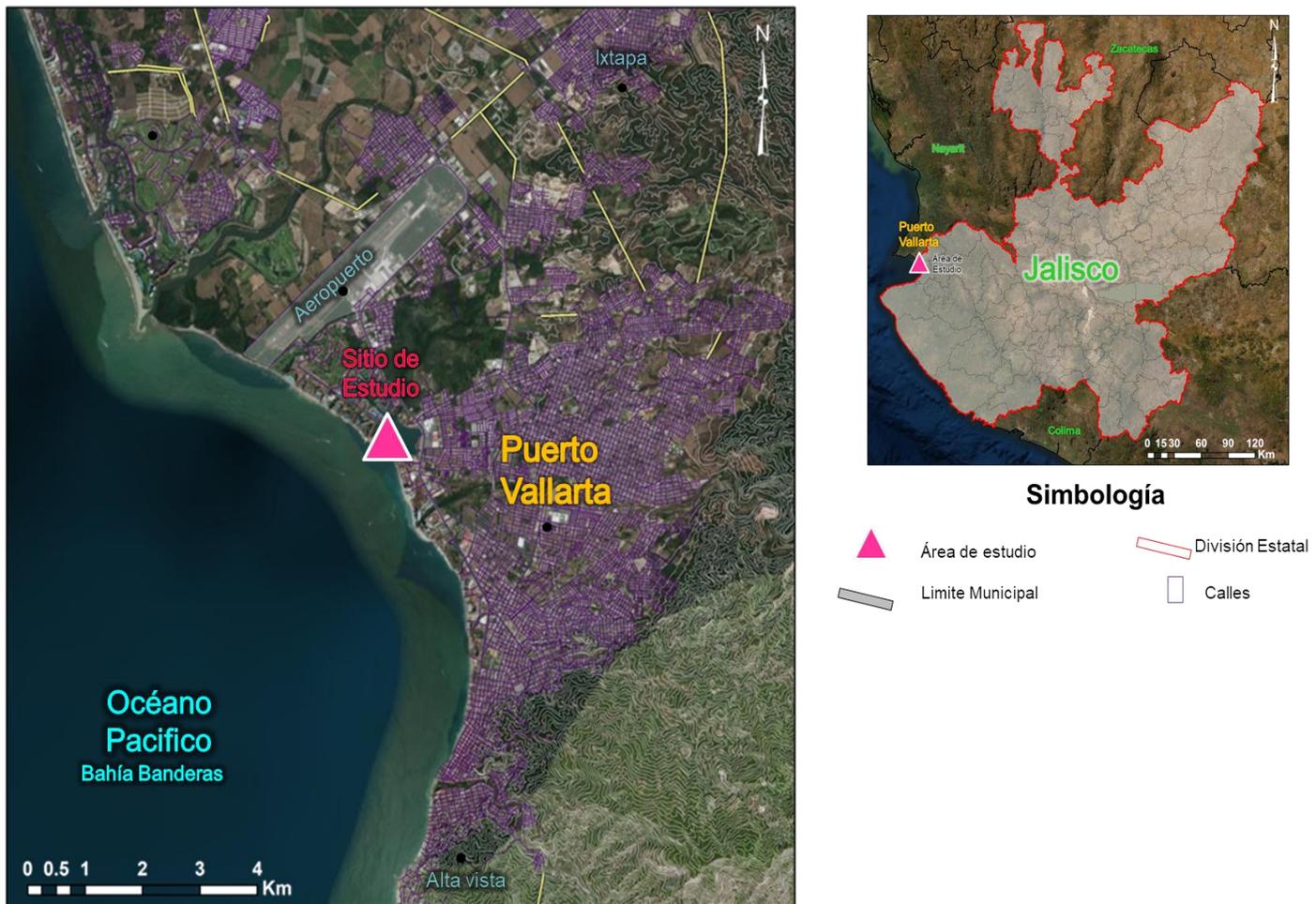


Figura 1: Ubicación del sitio de estudio.

De acuerdo con la tradicional zonificación sísmica de la República Mexicana propuesta por la Comisión Federal de Electricidad (CFE 2015), el sitio en estudio se encuentra en la zona sísmica D, figura 2.

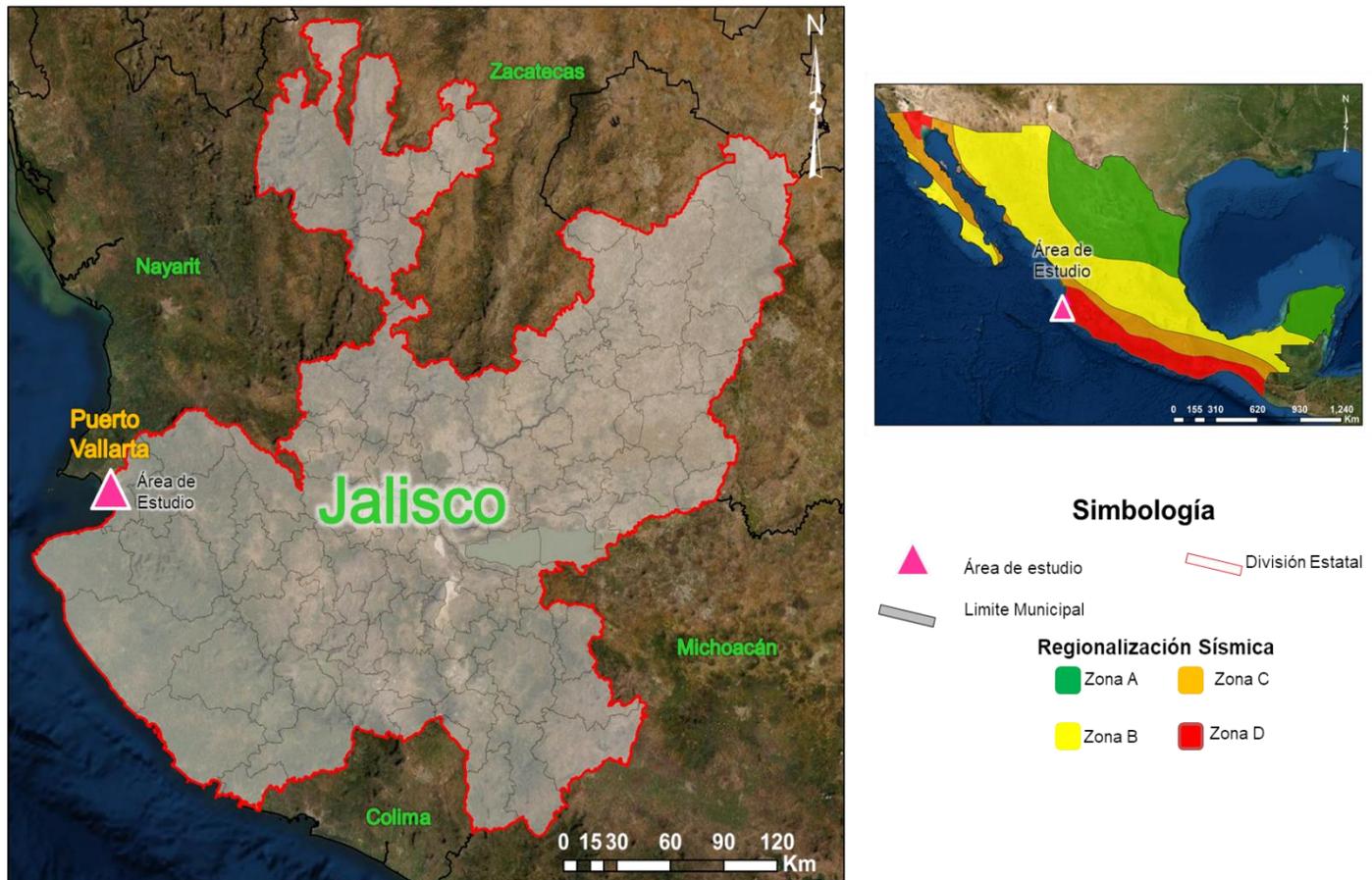


Figura 2. Ubicación del sitio en estudio respecto a la tradicional regionalización sísmica de la República Mexicana, propuesta en el Manual Diseño de Obras Civiles. El sitio de estudio se encuentra en la zona sísmica D, mapa base, tomado de: (CFE, 2015).

El principal beneficio de obtener un espectro sísmico específico de sitio es la estimación de forma particular de los parámetros y coeficientes sísmicos de diseño, los cuales son generalmente menores a los parámetros envolventes reglamentarios, pero conservando el mismo nivel de seguridad estructural.

Aquí se presentan los espectros elásticos ( $Q=1.0$ ) e inelásticos ( $Q=1.5$  y  $2.0$ ), que están asociados a un periodo de retorno ( $T_r$ ) de 190 años (periodo óptimo), el cual se seleccionó de acuerdo con la práctica usual en México (CFE,2015). Para ello primero se estimaron los efectos de sitio en el predio en estudio y posteriormente se estimó el peligro sísmico a nivel de roca o base firme del sitio.

En el Capítulo I se presentan los procedimientos y los resultados de estimar los efectos de sitio, los cuales consistieron en el análisis de los registros de vibración ambiental y de la elaboración de un modelo geofísico-geotécnico que se obtuvo a partir exploración geofísica realizados en el sitio de estudio, con la finalidad de determinar en forma indirecta, las características estratigráficas del suelo.

En el Capítulo II se presenta el espectro de respuesta en el sitio y el espectro de diseño recomendado para la revisión de la estructura por sismo. Para la obtención de este último se realizaron algunas transformaciones al espectro de respuesta que toma en cuenta incertidumbres que surgen durante el proceso de análisis y diseño.

El Capítulo II se muestran los resultados que se obtuvieron del proyecto, así como los conocimientos y habilidades adquiridos durante mi etapa profesional.



## OBJETIVOS

El objetivo de este estudio es proponer el espectro de diseño sísmico acorde a las características de una zona hotelera ubicada en Puerto Vallarta, Jalisco.

Para cumplir con lo anterior, se enuncian los siguientes objetivos específicos:

Se desarrollarán diferentes técnicas Geofísicas aplicadas en los trabajos Geotécnicos para estimar la influencia de las diferentes fuentes sísmicas que afectan el sitio para lograr la estimación del espectro de diseño sísmico.

Proponer una zonificación sísmica, considerando la definición de peligro sísmico y los efectos de sitio.



## 1.EFECTOS DE SITIO

---

En este estudio se entiende, por efectos de sitio, a las modificaciones que sufren las ondas sísmicas ante la presencia en el terreno de depósitos blandos. Para ello se tomaron en cuenta los resultados del análisis de vibración ambiental y de la elaboración de un modelo geotécnico-geofísico por medio de técnicas de exploración geofísica.

De estos trabajos se obtienen parámetros importantes como el periodo fundamental de vibrar del suelo y el incremento o amplificación del movimiento sísmico que se puede presentar en el sitio para dicho periodo.

### **1.1 Modelo Geofísico-Geotécnico**

Una forma de calcular los efectos de sitio es modelando los depósitos de suelo utilizando sus características estratigráficas, las propiedades mecánicas y dinámicas de los materiales que los componen.

Mediante el modelo dinámico del suelo se obtiene una estimación de la función de transferencia en la superficie del terreno. Para obtener la función de transferencia se requiere estimar varios parámetros para cada estrato como son: el espesor, el peso volumétrico de los materiales que lo constituyen, la velocidad de propagación de ondas de corte y el amortiguamiento de estos.

El espesor de los estratos es conocido por medio de estudios geofísico-geotécnicos (Refracción Sísmica, Sonda Suspendida, Sondeo de Penetración Estándar-SPT, etc.). La determinación de las velocidades de ondas de corte y el amortiguamiento pueden estimarse dadas las características de los materiales que forman el suelo, tomando en cuenta los resultados de investigaciones sobre materiales similares en otras partes del mundo (Seed e Idriss, 1970).

Para el desarrollo de este estudio, se define la Exploración Geofísica mediante los métodos de: Vibración ambiental (VA), Tendidos de Refracción Sísmica (TRS) y Sonda Suspendida (SS), estas técnicas nos permitirán, de una manera eficiente, detectar heterogeneidades en el subsuelo, para comprender mejor las condiciones a profundidad en términos de las variaciones de las propiedades físicas que manejan, como velocidades de propagación de ondas.

Posterior al proceso, análisis e interpretación de la información, se procede a la integración de los resultados, mediante modelos de subsuelo confiables y representativos, de la zona de estudio.



Los estudios geofísicos aplicados en este trabajo nos permitieron contribuir con la caracterización de los materiales dentro del área de estudio, cumpliendo los siguientes objetivos:

- Vibración Ambiental (VA): Determinar la frecuencia fundamental del sitio en estudio.
- Tendidos de Refracción Sísmica (TRS): Con la finalidad de conocer el espesor de los materiales y velocidad de onda P, asociado a compacidad y naturaleza de estos, con una profundidad de investigación del orden de los 30 m (la profundidad de investigación en los TRS se definió por la longitud del tendido y lo planteado en la propuesta económica).
- Sonda Suspendida (SS)<sup>1</sup>, Determinar las velocidades de onda P y S, y poder definir espesores a una mayor profundidad.

La distribución espacial de las técnicas empleadas antes mencionadas se puede observar en la figura 1.1.

---

<sup>1</sup> Por efectos de protección de datos en este reporte no se integrarán los resultados de Sonda Suspendida.

### Distribución de la Geofísica a lo largo del Predio

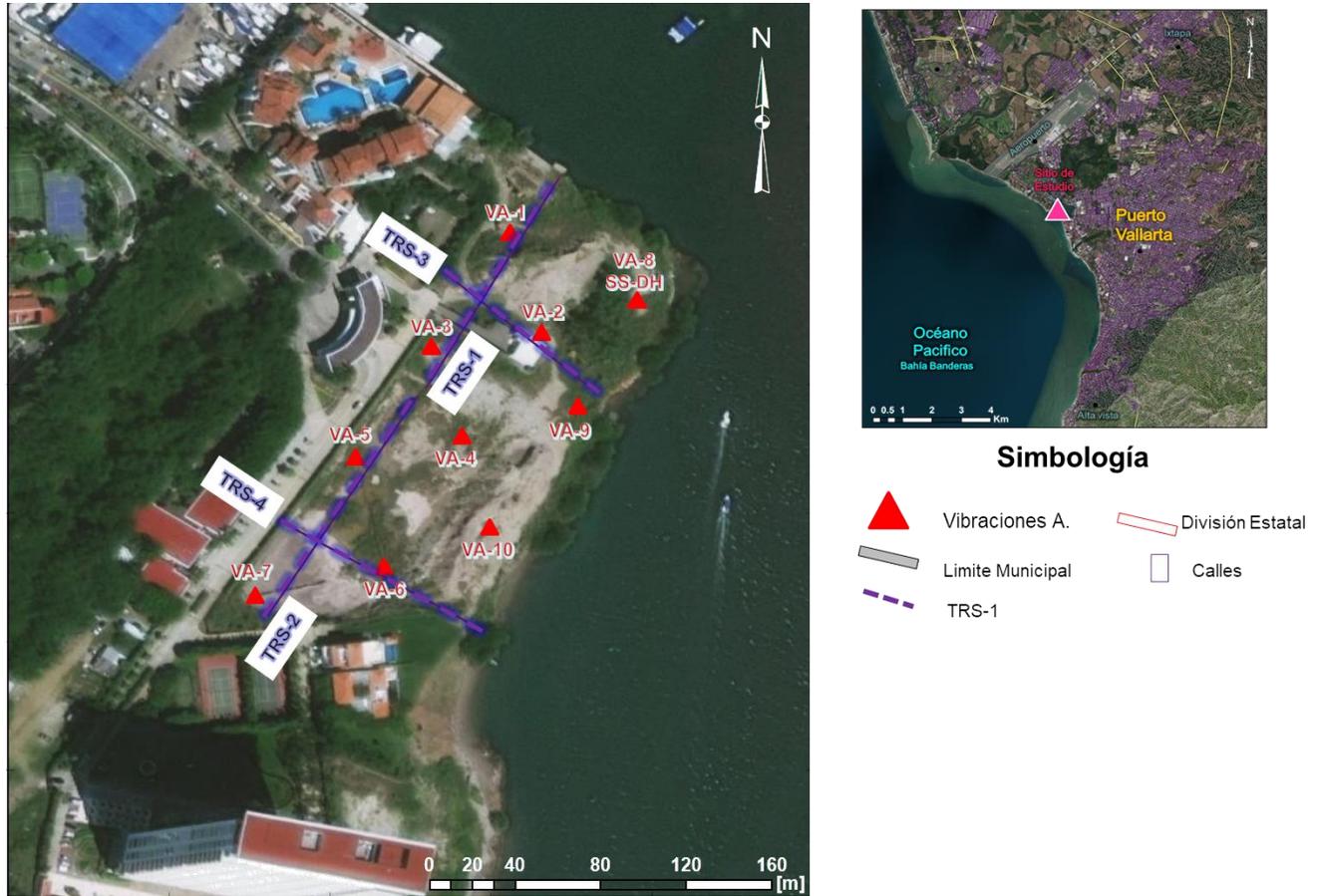


Figura 1.1. Distribución de exploración Geofísica.

### Información Directa

Como parte de la evaluación de las características del subsuelo, se integró al modelo geofísico los resultados preliminares obtenidos de los sondeos SPT-1, figura 1.2.

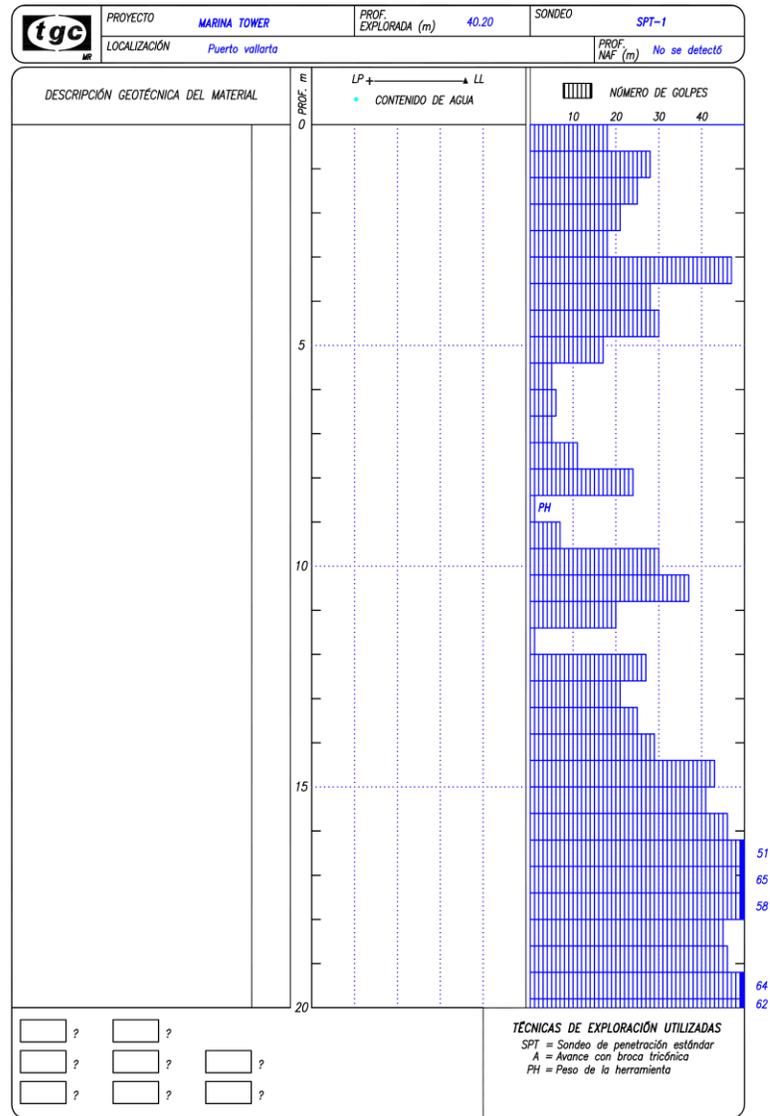


Fig. 1.2 Registro de exploración geotécnica (SPT)

Figura 1.2 Sondeo SPT-1.

### 1.1.1 Vibración Ambiental

Una de las técnicas más ampliamente utilizada en los últimos años, para estimar los parámetros dinámicos del suelo emplea datos registrados mediante vibración ambiental. El método empleado para el procesamiento y fundamentos teóricos se describe en el **ANEXO II. METODOLOGÍA DE VIBRACIÓN AMBIENTAL (VA)**.

Para estimar los efectos de sitio mediante esta técnica, se realizaron mediciones de vibración ambiental, utilizando Sismómetros SARA *Electronic Instruments* de 0.5 Hz. Estos equipos son sensores triaxiales que registran los tres componentes del ruido sísmico, el componente N-S (dirección Y), componente E-W (dirección X), componente V (dirección Z).

#### 1.1.1.1 Puntos estudiados

Se realizaron mediciones de vibración ambiental en 10 puntos del terreno distribuidos de manera estratégica. La orientación de los sensores fue elegida de tal forma que la componente Y del equipo coincidiera con el Norte-Sur, la componente X se orientó con dirección Este-Oeste y la componente Z con la dirección Vertical.

#### 1.1.1.2 Resultados

Los Cocientes Espectrales calculados a partir de cada una de las señales se muestran en las figuras 1.3a y 1.3b.

De acuerdo con el análisis de vibración ambiental en el predio se concluyó que la frecuencia fundamental del terreno se encuentra en un rango 1.239 Hz y un periodo de 0.81s.

Los resultados de vibración ambiental arrojan una buena idea de la frecuencia dominante de los depósitos de suelo que se encuentran en el sitio de interés. Estudios recientes de esta técnica han demostrado que solo las mediciones durante periodos largos de tiempo brindan un buen estimado de la frecuencia y amplitud del movimiento, *Williams*

*et al. (2011)*; sin embargo, se ha visto que los valores de frecuencia obtenidos mediante esta técnica presentan dispersiones que pueden llegar a ser del orden de 30%.

De aquí que, para estimar los efectos de sitio se deben realizar análisis alternos, tales como la elaboración de modelos geotécnicos a partir del estudio de mecánica de suelos o modelos geofísicos.

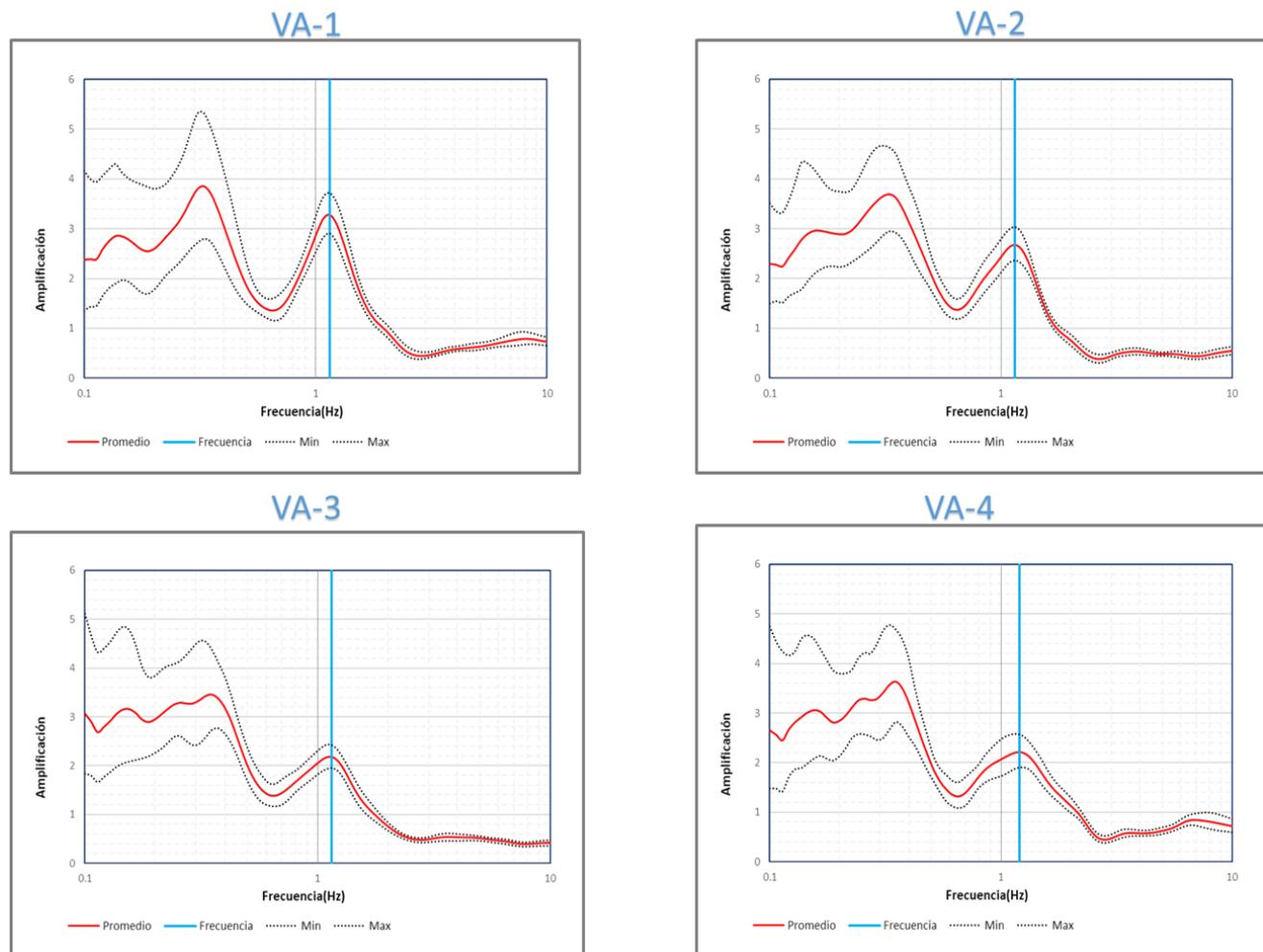


Figura 1.3 a. Cocientes espectrales H/V para cada punto, la línea roja representa el promedio y las líneas punteadas negras la desviación estándar máxima y mínima para cada cociente espectral.

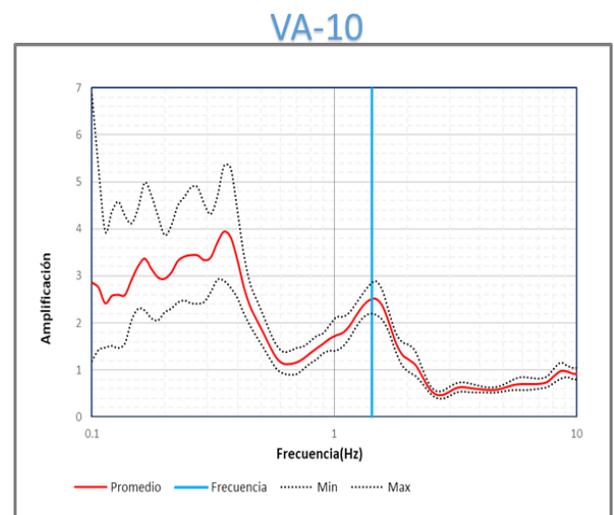
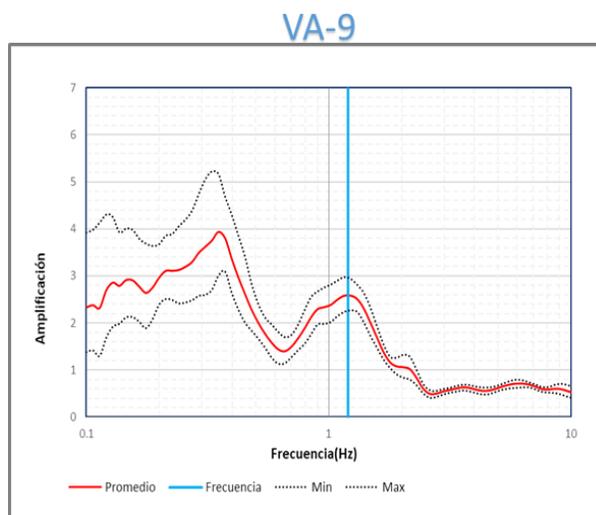
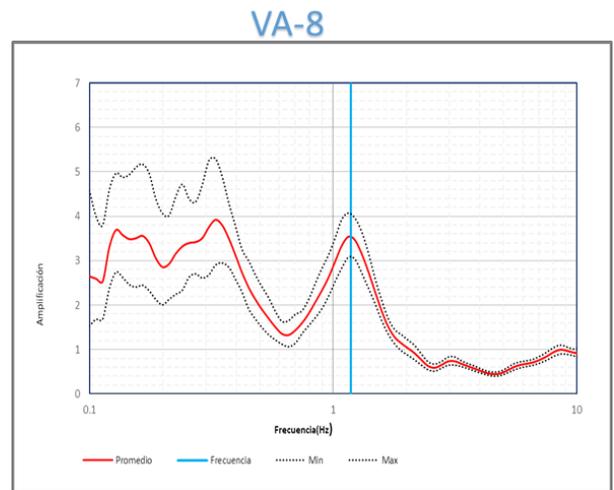
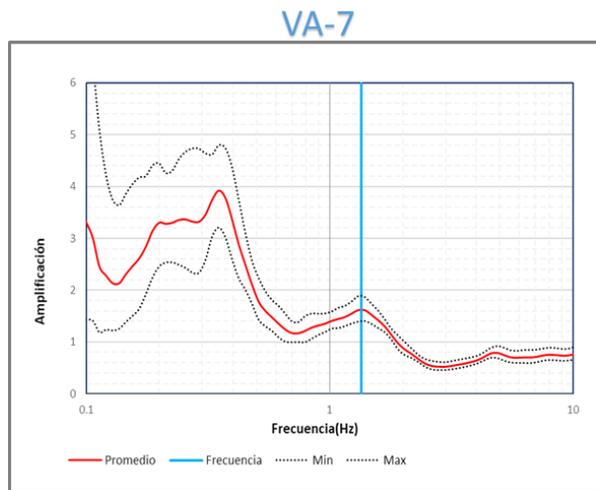
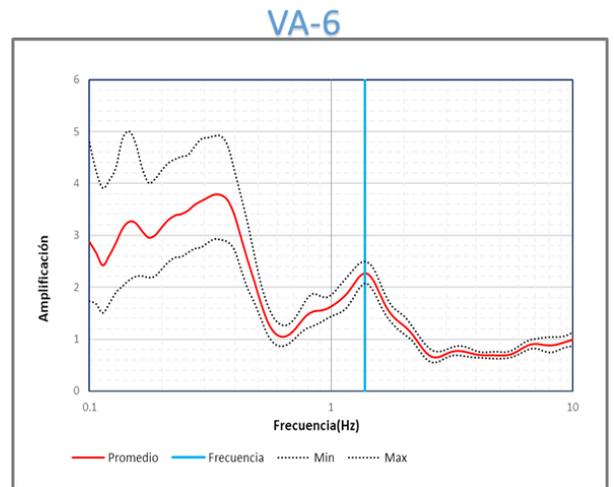
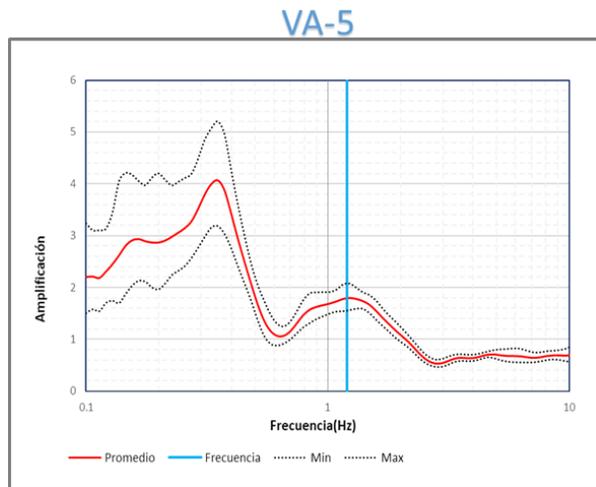


Figura 1.3 b. Cocientes espectrales H/V para cada punto, la línea roja representa el promedio y las líneas punteadas negras la desviación estándar máxima y mínima para cada cociente espectral.

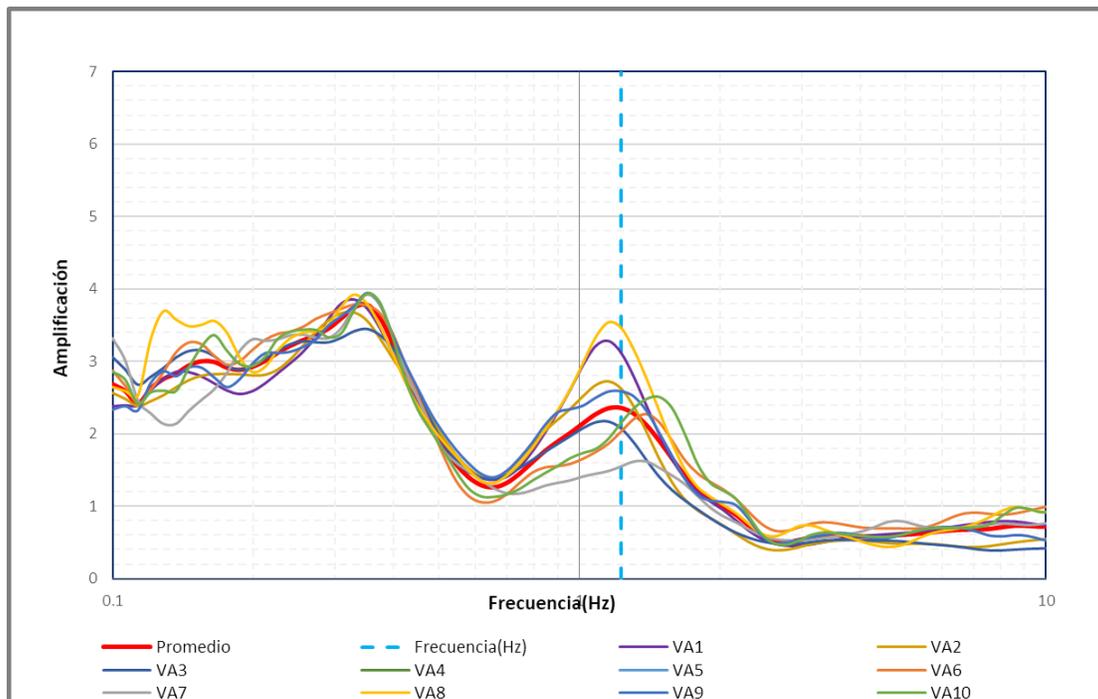


Figura 1.4. Cocientes espectrales H/V para cada punto, en rojo el promedio.

Como se puede observar en la figura 1.4, se define claramente la frecuencia fundamental del sitio, arrojando valor de 1.239 Hz con un periodo de aproximadamente 0.81s y una amplificación promedio de 2.5, como se muestra en la figura 1.4 se muestra un pico en aproximadamente 0.35 Hz este pico promedio se puede atribuir a oleaje ya que el sitio se encuentra cerca de la costa.

Dentro de los trabajos de campo, se tomaron fotografías durante la adquisición, esto para evidenciar los trabajos realizados, a continuación, en la figura 1.5, se muestran algunas fotos en campo.

VA-1



VA-2



VA-3



VA-4



Figura 1.5. Adquisición de vibración ambiental en el sitio de estudio.

Tabla 1.1: Resultados del análisis de los cocientes espectrales.

Estación	Frecuencia Equipo (Hz)	Frecuencia (Hz)	Periodo(s)
VA1	0.5	1.15	0.870
VA2	0.5	1.15	0.870
VA3	0.5	1.15	0.870
VA4	0.5	1.2	0.833
VA5	0.5	1.2	0.833
VA6	0.5	1.38	0.725
VA7	0.5	1.35	0.741
VA8	0.5	1.18	0.847
VA9	0.5	1.2	0.833
VA10	0.5	1.43	0.699
		1.239	0.81

En la figura 1.1 se encuentra la localización de cada uno de los puntos estudiados de Vibración Ambiental que se describen anteriormente.

### 1.1.2 Tendidos de Refracción Sísmica (TRS)

Para la exploración se ejecutaron cuatro Tendidos Sísmicos (TRS), tal como se muestra en la tabla 1.2. Se realizaron 4 líneas de exploración sísmica con longitud de 120 metros cada una; las líneas consistieron en arreglos de geófonos de 4.5 Hz con un espaciamiento de 5 m. Las fuentes se posicionaron en los metros 5, 25, 40, 55, 70, 85, 100 y 115.

Tabla 1.2 Coordenadas de inicios y finales de tendidos de refracción sísmica

Técnica	Línea	Longitud
		[m]
Tendidos de Refracción Sísmica (TRS)	TRS-1	120
	TRS-2	120
	TRS-3	100
	TRS-4	120

Con ayuda de los Tendidos de Refracción Sísmica, se pueden detectar cambios discretos en la velocidad y se pueden delimitar diferencias en la compacidad de los materiales. La aplicación del método está orientada a la caracterización de los materiales hasta una profundidad máxima de 30 m.

Los fundamentos teóricos y la descripción del equipo se describen en el **ANEXO I. METODOLOGÍA DE TENDIDOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA (TRS)**.

Para la adquisición de datos se utilizó un sismógrafo DAQLink III, desarrollado por Seismic Source®.

Dentro de los trabajos de campo, se tomaron fotografías durante la adquisición, esto para evidenciar los trabajos realizados, a continuación, en las figuras 1.6 y 1.7, se muestran algunas fotos en campo.



Figura 1.6 Evidencias de la adquisición del TRS-4.



Figura 1.7 Evidencias de adquisición del TRS-2.



Posteriormente a los trabajos de campo, comienza el tratamiento de datos en gabinete, mediante software especializado y procesamiento de los datos, como los que se describen en el siguiente apartado.

*Procesamiento de datos sísmicos*

El tratamiento de la información Geosísmica se realizó con el software ZondST2D, el cual consiste en:

- Control de calidad en campo (análisis de velocidades en tiempo real).
- En campo es importante obtener datos de calidad, es decir, no presenten ruido. Permitiendo distinguir los tiempos de arribo de las ondas sísmicas.
- Picado de tiempos de arribo y generación de curvas dromocronas (Tiempo-Distancia).
- Estimación de velocidades de onda a partir de la variación en las pendientes.
- Construcción de función de velocidad y tiempo-profundidad.
- Interpretación del Método Recíproco Generalizado (GRM)
- Obtención de velocidades promediadas y espesor de los refractores.

La prospección por refracción proporciona una información acerca del espesor y las velocidades de las principales capas del subsuelo. Por ello, el método sirve para determinar la estructura del subsuelo.

La técnica (TRS), permite obtener los perfiles de ondas P de una zona de investigación; el principio del método consiste en medir el tiempo de llegada de las ondas de compresión ( $V_p$ ) de una fuente artificial (marro) hasta el equipo, en general los materiales más compactos muestran velocidades altas de ondas P, por el contrario, las velocidades bajas se asocian a materiales poco consolidados.

La interpretación con el método determina las velocidades promedio en los estratos y el espesor de cada refractor por debajo del geófono. Tal espesor representa la profundidad mínima desde el geófono, por lo que la morfología del refractor está definida por la envolvente de las semicircunferencias, al final del procesado, se obtienen modelos en 2D.

Como parte del procesado de la información, al modelo 2D, se hace un ajuste topográfico, a fin de obtener la geometría de las velocidades conforme el área de estudio.

### 1.1.2.1 Resultados TRS

Después del proceso, se inicia la etapa de la interpretación, considerando el análisis del comportamiento de las ondas; lo que nos permite identificar diferentes velocidades de onda P, asociadas a los materiales dentro del área de exploración.

Enseguida se incluye la tabla 1.3, que resume las características de cada unidad sísmica diferenciada. Posteriormente se ilustra la distribución de dichas unidades.

Tabla 1.3. Unidades Sísmicas

Unidad Sísmica	Profundidad-Aproximada[m]	Velocidad de onda P [m/s]
<b>US-1</b>	0-5	400-500
<b>US-1a</b>	5-17	500-900
<b>US-2</b>	17-25	900-1300

**Unidad US-1:** Esta unidad presenta magnitudes de velocidad de onda P de 400 a 500 m/s, se define como la capa de cobertura con espesores de 2 y 5m.

**Unidad US-1a:** Unidad definida por un incremento en las velocidades de onda P de 500-900 m/s.

**Unidad US-2:** La base de las secciones sísmicas está caracterizada por velocidades de entre 900 y 1300 m/s para la onda P.

### Línea TRS-1

Se muestra una primera capa de cobertura la cual, a partir de los valores de velocidad, muestra valores de onda P menores a los 500 m/s, los espesores van de los 2 hasta los 5m hacia el final de la línea. Por debajo se presenta un incremento de las velocidades de onda P, valores que se encuentran de 500 a 900 m/s, la profundidad oscila de 5 a los 17 m hacia el centro de la línea. La base del perfil muestra velocidades de onda P de 900 a 1300 m/s. En el encadenamiento 49 m se colocó la intersección con la línea TRS-3, como se observa en la figura 1.8.

Se proyectaron los resultados de velocidad de onda P del sondeo de la SS en el encadenamiento 86 m.

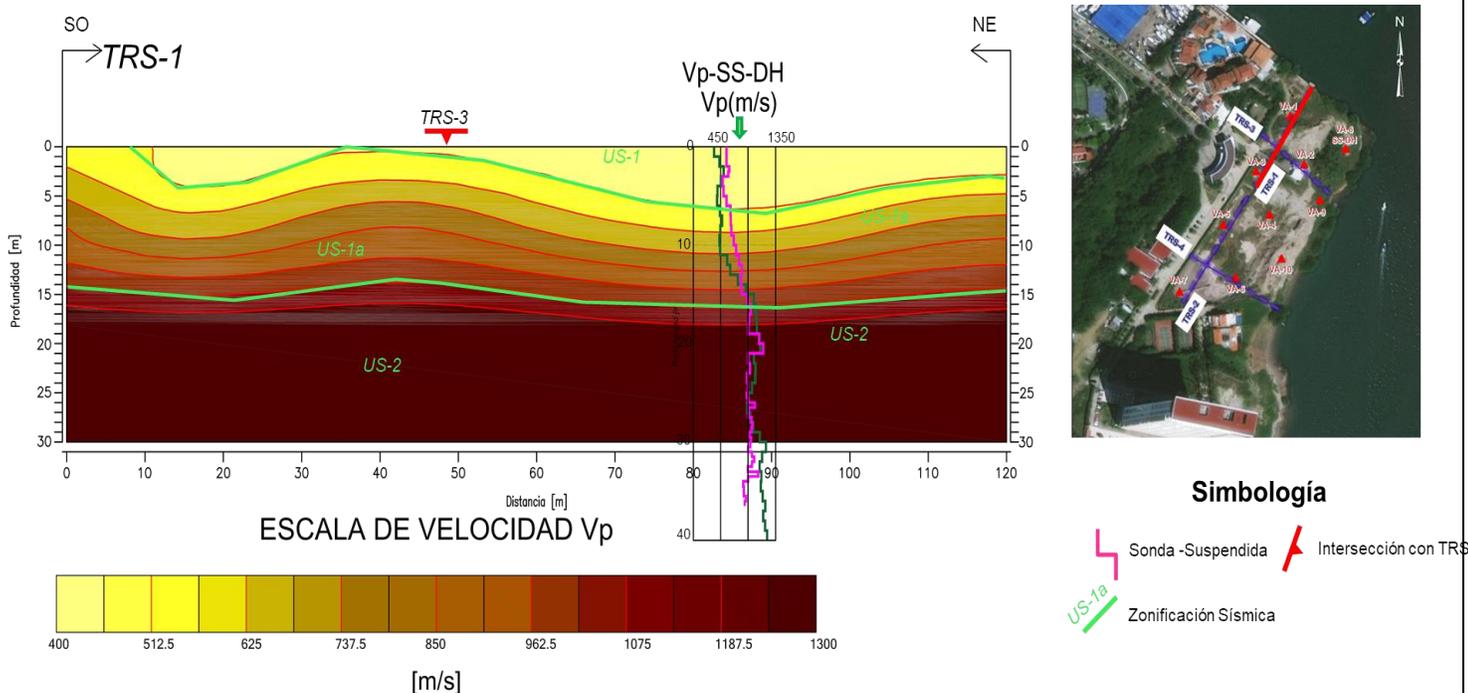


Figura 1.8. Línea TRS-1.

### Línea TRS-2

La sección sísmica TRS-2 se localiza continua a la TRS-1. De 1 a 5 m de profundidad, muestran la respuesta de la capa de cobertura con velocidades de onda P de 400 a 500 m/s. Conforme incrementa la profundidad, la velocidad de onda P muestra un incremento. La unidad US-1a está a una profundidad aproximada de 5 a 17 m.

La base del perfil se muestra la unidad US-2 presenta velocidades de onda P de 900 a 1300 m/s. En el encadenamiento 38m se colocó la intersección con la línea TRS-4, como se observa en la figura 1.9.

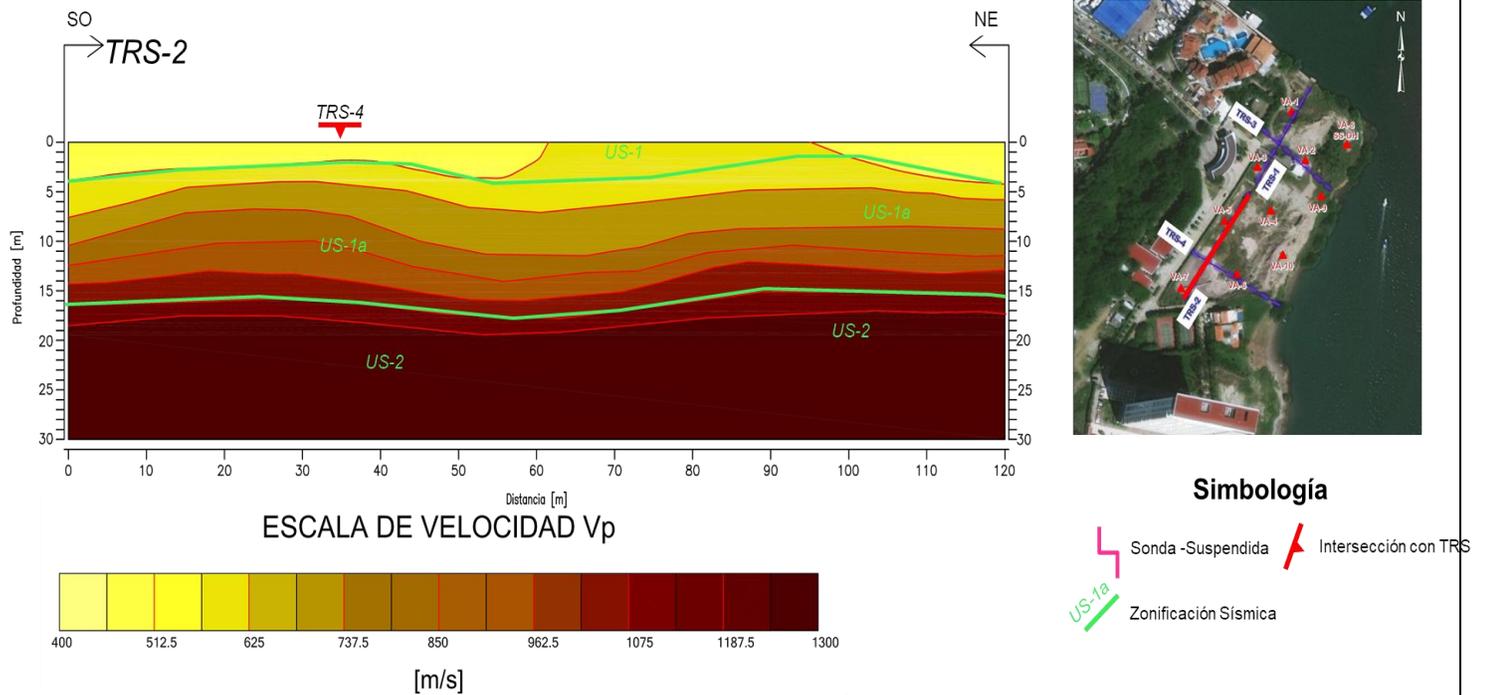


Figura 1.9. Línea TRS-2.

### Línea TRS-3

Se muestra una primera capa de cobertura la cual, a partir de los valores de velocidad, muestra valores de onda P menores a los 500 m/s, los espesores van de los 2 hasta los 5m. Por debajo se presenta un incremento de las velocidades de onda P, valores que se encuentran de 500 a 900 m/s, la profundidad oscila de 5 a los 17 m. La base del perfil muestra velocidades de onda P de 900 a 1300 m/s. En el encadenamiento 23m se colocó la intersección con la línea TRS-1.

Se proyectaron los resultados de velocidad de onda P del sondeo de la SS en el encadenamiento 76 m, como se observa en la figura 1.10.

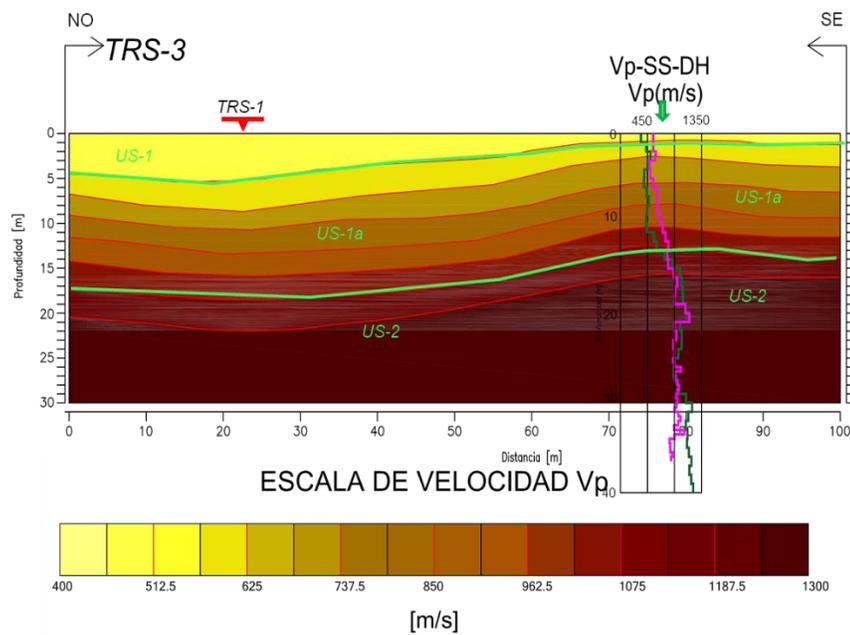


Figura 1.10. Línea TRS-3.

### Línea TRS-4

La sección sísmica TRS-4 se localiza paralela a la TRS-3 .De 1 a 5 m de profundidad, muestran la respuesta de la capa de cobertura con velocidades de onda P de 400 a 500 m/s. Conforme incrementa la profundidad, la velocidad de onda P muestra un incremento. La unidad US-1a está a una profundidad aproximada de 5 a 17 m.

La base del perfil se muestra la unidad US-2 presenta velocidades de onda P de 900 a 1300 m/s. En el encadenamiento 19 m se colocó la intersección con la línea TRS-2, como se observa en la figura 1.11.

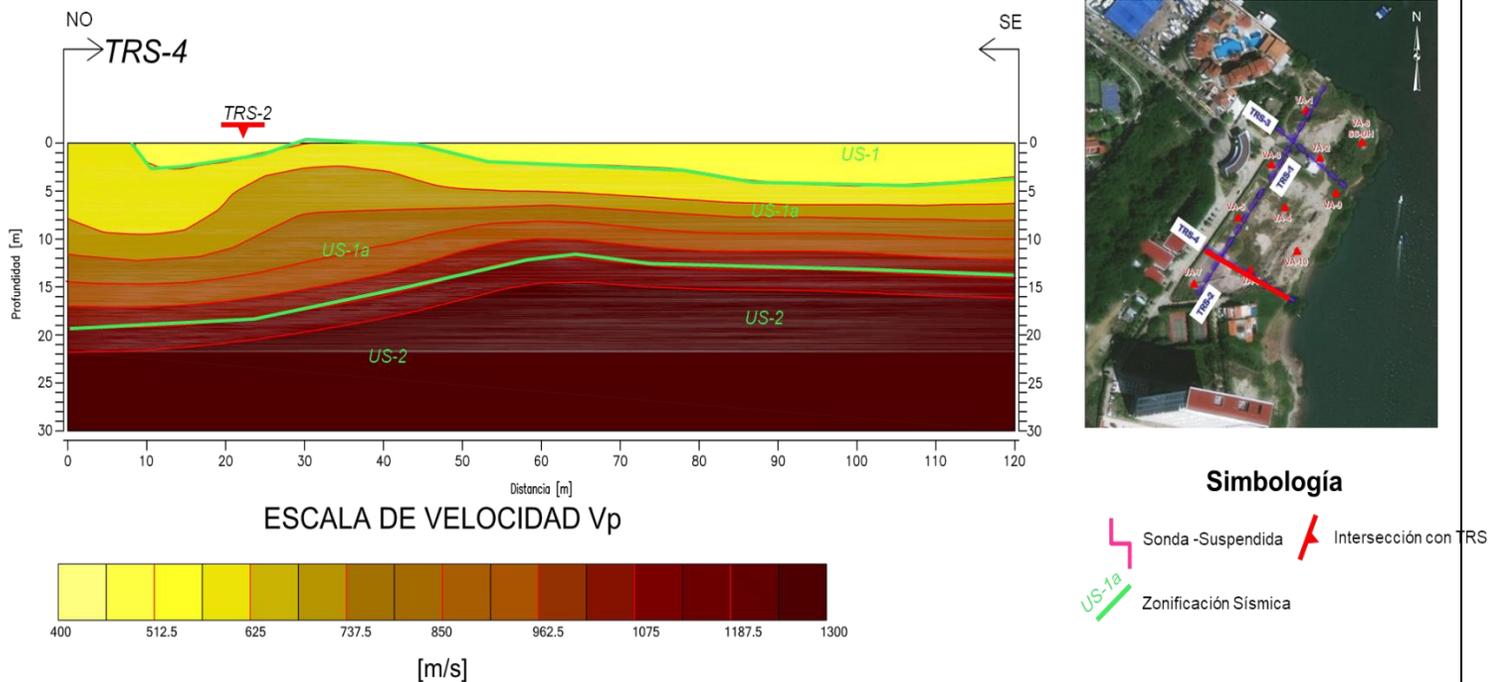


Figura 1.11. Línea TRS-4.

## **1.2 Conclusión del Modelo Geofísico-Geotécnico**

### *TENDIDO DE REFRACCIÓN SÍSMICA (TRS)-SONDA SUSPENDIDA (SS)*

En las secciones sísmicas, se muestra una continuidad lateral de los materiales, definiendo cuatro unidades sísmicas:

- **Unidad US-1:** Esta unidad presenta magnitudes de velocidad de onda P de 400 a 500 m/s, se define como la capa de cobertura con espesores de 2 y 5m. Las velocidades de onda S se asocian a valores de entre 200 y 300 m/s. Se asocia a Arcilla arenosa de consistencia blanda y contenido de materia orgánica.
- **Unidad US-1a:** Unidad definida por un incremento en las velocidades de onda P de 500-900 m/s y de onda S de 300-450 m/s. Se puede asociar a arcilla arenosa de consistencia blanda y Arcilla Limosa de consistencia media.
- **Unidad US-2:** Está caracterizada por velocidades de entre 900 y 1300 m/s para la onda P y velocidades de onda S de 450 a 700 m/s. Asociado a Limos y arenas de consistencia media a firme.
- **Unidad US-3:** Está caracterizada por velocidades de entre 900 y 1000 m/s para la onda P y velocidades de onda S de 300 a 500 m/s. Esta unidad tiene la característica de que los valores tanto en velocidad de onda S y P bajan con respecto a la unidad anterior. Arena fina a media y limos con presencia de gravas.

La unidad US-1 muestra una continuidad lateral de la línea TRS-1 a TRS-2.

La medición directa de las velocidades de onda P y S que se obtuvieron con las metodologías de Sonda Suspendida, permitieron corroborar la zonificación sísmica propuesta por la TRS, y definir parámetros elasto- dinámicos en intervalos muy cortos de profundidad por lo que la caracterización en el sitio de estudio esta completa para la propuesta de espectro de diseño que se presenta en el siguiente capítulo.

### 1.3 Función de Transferencia

Después del análisis de cada uno de los sondeos de vibración ambiental y el análisis del modelo geofísico-geotécnico obtenido con los resultados de la exploración geofísica-geotécnica se obtuvieron las funciones de transferencia como se presenta en la figura 1.12. Estas funciones de transferencia se desarrollan a partir de modelos matemáticos unidimensionales del suelo utilizando el método de Haskell.

Como se logra apreciar en la figura 1.12 se muestra el cociente espectral promedio obtenido de la vibración ambiental, y la función de transferencia generada a partir del SPT-1 y SS.

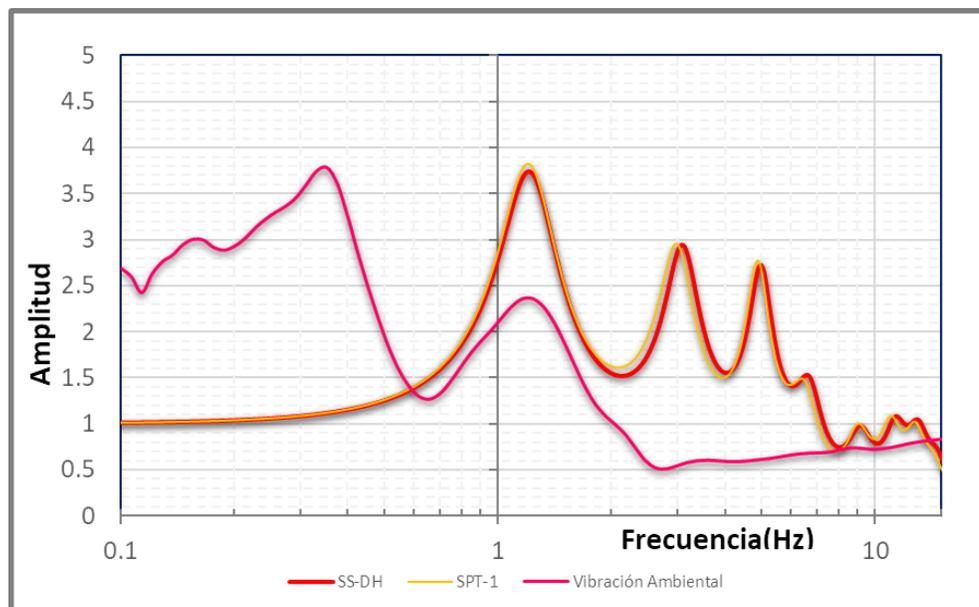


Figura 1.12: Función de transferencia obtenidas con el modelo geotécnico-geofísico y SPT-1.

## 2. PELIGRO SÍSMICO: ESPECTROS DE RESPUESTA Y DE DISEÑO

### 2.1 Espectro de Respuesta

Para obtener el espectro de sitio para el presente proyecto se calculó el espectro de peligro uniforme en un sitio firme de referencia, es decir, los espectros cuyas ordenadas (aceleración espectral) para cada periodo estructural tienen la misma probabilidad de ser excedidas en un lapso dado.

En la figura 2.1 se muestra el espectro de peligro uniforme (EPU) para 190 años de periodo de retorno, donde las abscisas representan el periodo estructural y las ordenadas la aceleración promedio de las componentes NS y EW en centímetros por segundo cuadrado.

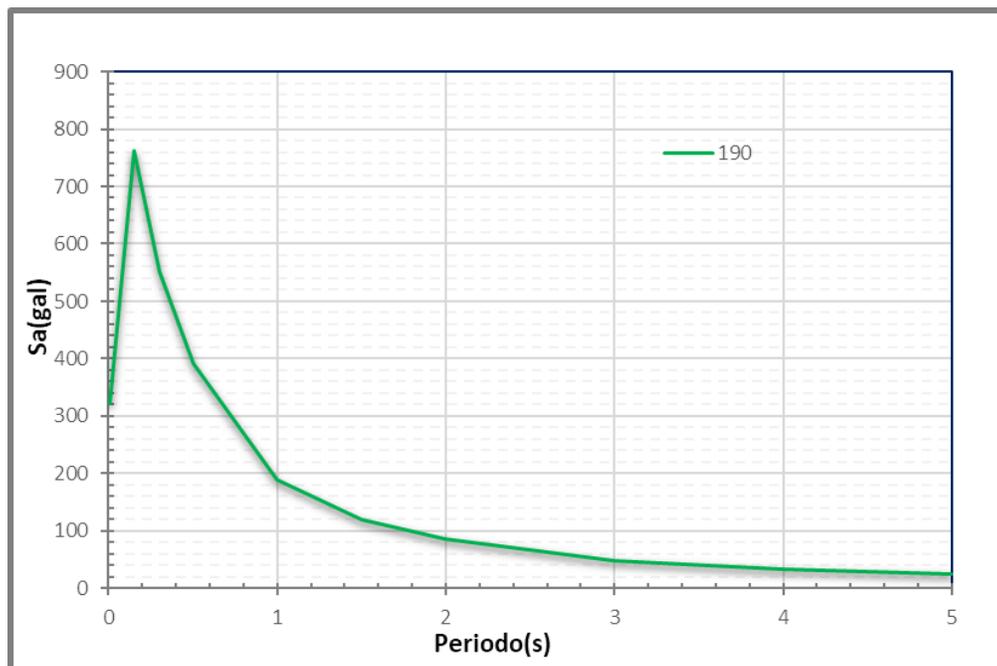


Figura 2.1. Espectro de peligro uniforme (EPU),  $T_r$  de 190 años.

## 2.2 Espectro de Respuesta (con Efectos de Sitio)

Una vez calculado el espectro de respuesta de aceleraciones en el sitio firme de referencia, se obtuvo el espectro de respuesta de aceleraciones para el sitio en la superficie. Para esto se tomaron en cuenta los efectos de sitio obtenidos mediante el análisis de los registros de vibración ambiental y el modelo geofísico-geotécnico.

En la figura 2.2 se muestra el espectro de respuesta del sitio para un periodo de retorno de 190 años. Este espectro está calculado para la superficie del terreno (campo libre), y representa la respuesta que tendrá una familia de estructuras con diferentes características dinámicas ante el temblor de diseño.

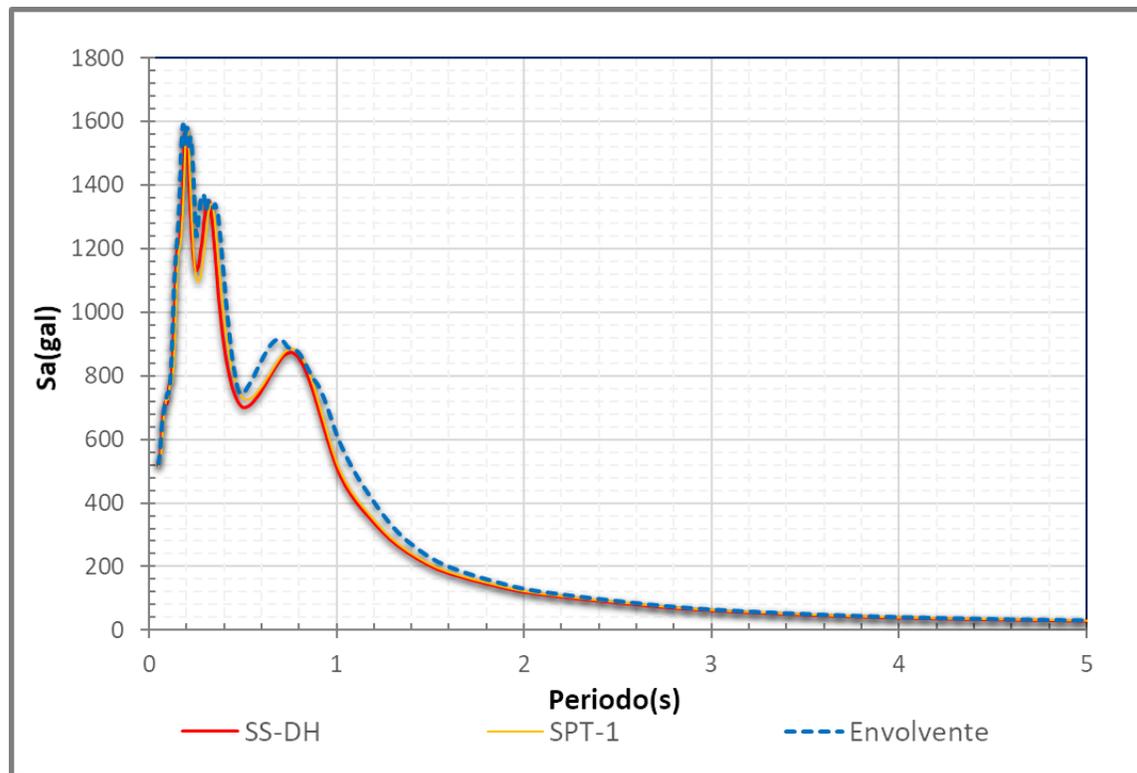


Figura 2.2. Espectro de Respuesta para un periodo de retorno de 190 años de periodo de retorno.

### 2.3 Espectro Elástico de Diseño Propuesto

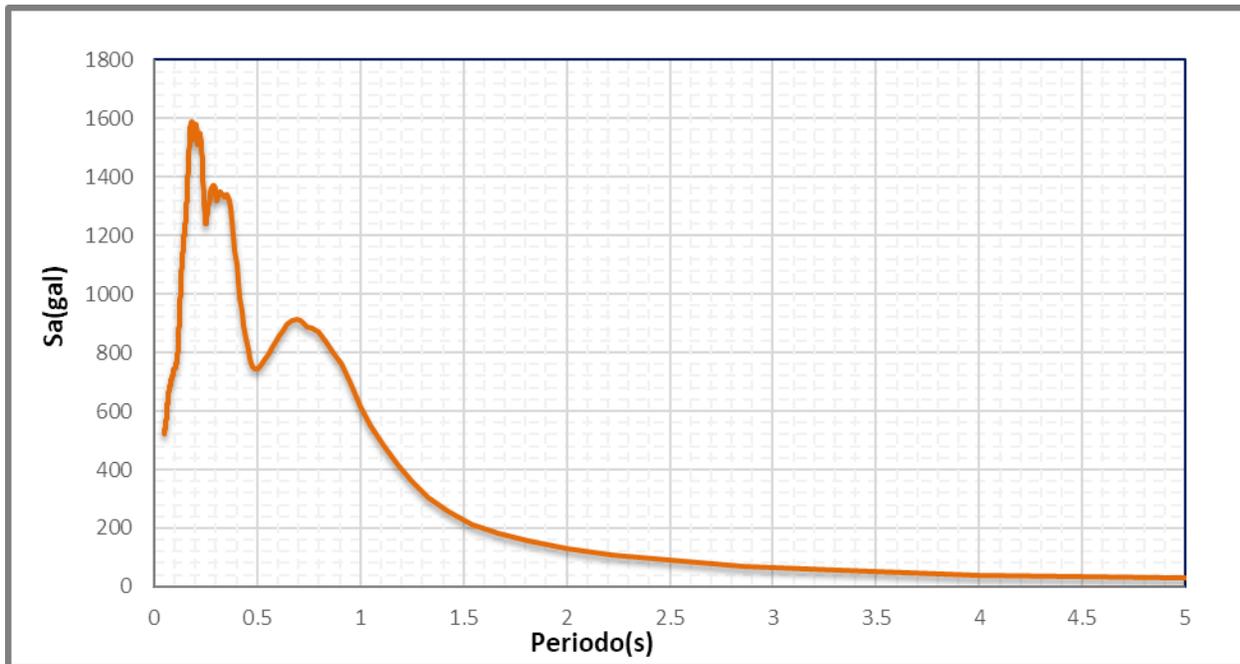
El espectro de la figura 2.2 no puede usarse directamente como espectro de diseño. Para poder transformar este espectro en espectro de diseño se deben llevar a cabo las siguientes modificaciones:

- a) Debe considerarse la incertidumbre en las propiedades del suelo, y por lo tanto en el contenido de frecuencias del movimiento de este.
- b) Debe considerarse la incertidumbre en la estimación de la rigidez lateral de la estructura, que está relacionada con la estimación de los periodos de vibrar de la misma.
- c) Debe considerarse explícitamente la sobrerresistencia estructural.

En la figura 2.3 se muestra el espectro de respuesta modificado para tomar en cuenta las posibles incertidumbres en la estimación de la rigidez lateral de la estructura. Los cálculos se realizaron considerando que la estructura real puede ser 50% más flexible que el modelo estructural ( $K_{real}=0.5K_m$ ), y considerando una posible subestimación de rigidez de 60% en el modelo estructural ( $K_{real}=1.6K_m$ ) (Durán R., 1996; Miranda E., 1991; Miranda E., 1996). Para ello se utilizó la expresión que relaciona el periodo de vibrar con la rigidez:

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{K}}$$

El espectro elástico de diseño para revisar estructuras del grupo B ante el estado límite de falla, se obtiene a partir de la figura 2.3, la cual toma en cuenta las posibles incertidumbres que se asocian a la estimación de los parámetros dinámicos del suelo y aquellas que se asocian a la estructura. Para ello, dicho espectro de respuesta elástico se ajusta a curvas con formas paramétricas, es decir, curvas que quedan descritas mediante expresiones algebraicas de las variables que intervienen en los espectros. En segundo lugar, al espectro de respuesta elásticos se aplican reducciones por sobrerresistencia, empleando un valor de 1.75, dando como resultado el espectro elástico de diseño que debe usarse en la revisión estructural.



**Figura 2.3:** Espectro de respuesta de la figura 2.2, para un periodo de retorno de 190 años modificado para tomar en cuenta la incertidumbre en la estimación de la rigidez estructural.

El espectro de diseño elástico para estructuras del grupo B se presenta en la figura 2.4, el cual está caracterizado por una primera rama lineal que va desde la aceleración máxima del terreno  $a_0$ , hasta la aceleración espectral máxima  $c$ ; una segunda rama o meseta que tiene un valor constante igual a  $c$ , limitada por los periodos  $T_a$  y  $T_b$ ; una tercera rama que cae en forma exponencial de acuerdo con el parámetro  $r$ , hasta un periodo  $T_c$ ; y una cuarta rama que también cae en forma exponencial de acuerdo con el parámetro  $k$ , en cual se define como la relación entre el desplazamiento máximo del suelo y el desplazamiento espectral máximo.

Las expresiones que describen las curvas del espectro elástico son:

$$\frac{S_a(T)}{g} = a_0 + (c - a_0) \frac{T}{T_a} \quad \text{para } 0 \leq T < T_a$$

$$\frac{S_a(T)}{g} = c \quad \text{para } T_a \leq T < T_b$$

$$\frac{S_a(T)}{g} = c \left( \frac{T_b}{T} \right)^r \quad \text{para } T_b \leq T < T_c$$

$$\frac{S_a(T)}{g} = p c_{Tc} \left( \frac{T_c}{T} \right)^2 \quad \text{para } T \geq T_c$$

donde :

$c_{Tc} = c(T_b/T_c)^r$ , valor del coeficiente sísmico en  $T=T_c$

$$p = k + (1 - k)(T_c/T)^2$$

$k$ , es el parámetro que define la caída de la cuarta rama,

$T$ , es el periodo estructural,

$S_a$ , es la ordenada del espectro de diseño.

Los valores de cada uno de los parámetros de las expresiones anteriores para el espectro de 190 años en el predio de la figura 2.4 y 2.5, se presentan en las siguientes tablas.



**Tabla 2.1 Parámetros utilizados para la construcción del Espectro de Diseño Transparente.**

PARÁMETROS SÍSMICOS TRANSPARENTES							
Tr	a <sub>o</sub>	c	T <sub>a</sub>	T <sub>b</sub>	T <sub>c</sub>	k	r
190	0.523	1.6	0.08	0.45	1.1	1	0.7

**Tabla 2.2 Parámetros utilizados para la construcción del Espectro de Diseño.**

PARÁMETROS SÍSMICOS							
Tr	a <sub>o</sub>	c	T <sub>a</sub>	T <sub>b</sub>	T <sub>c</sub>	k	r
190	0.232	0.926	0.08	0.45	1.1	1	0.7

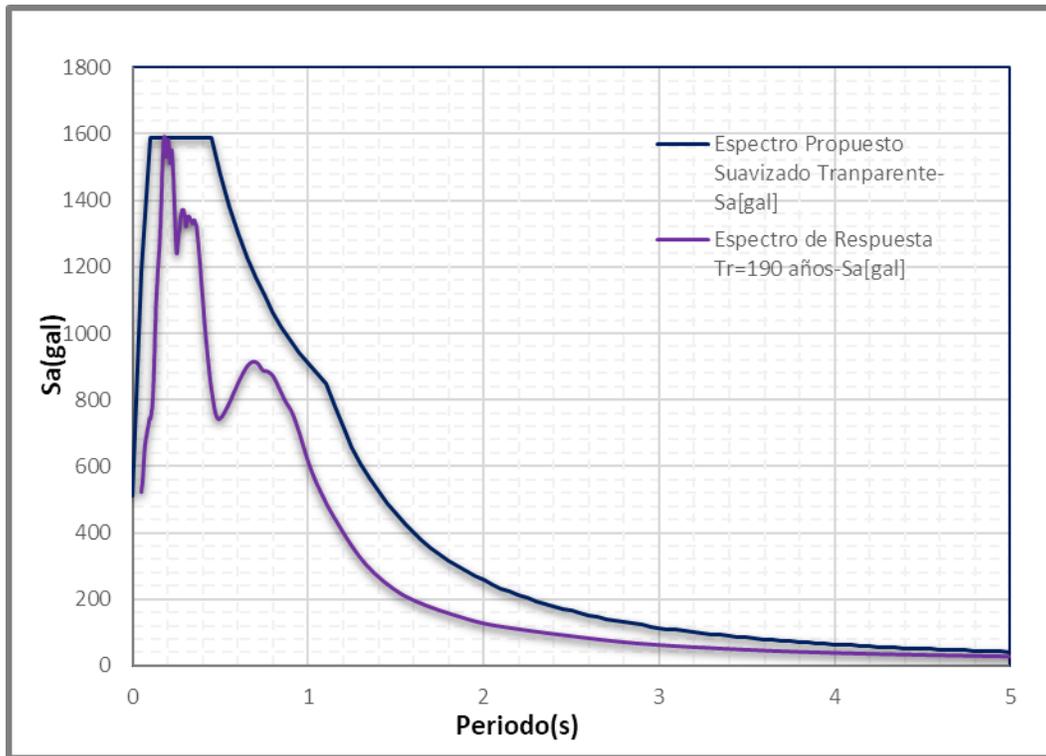


Figura 2.4: Espectro propuesto suavizado transparente y espectro de respuesta para un periodo de retorno de 190 años.

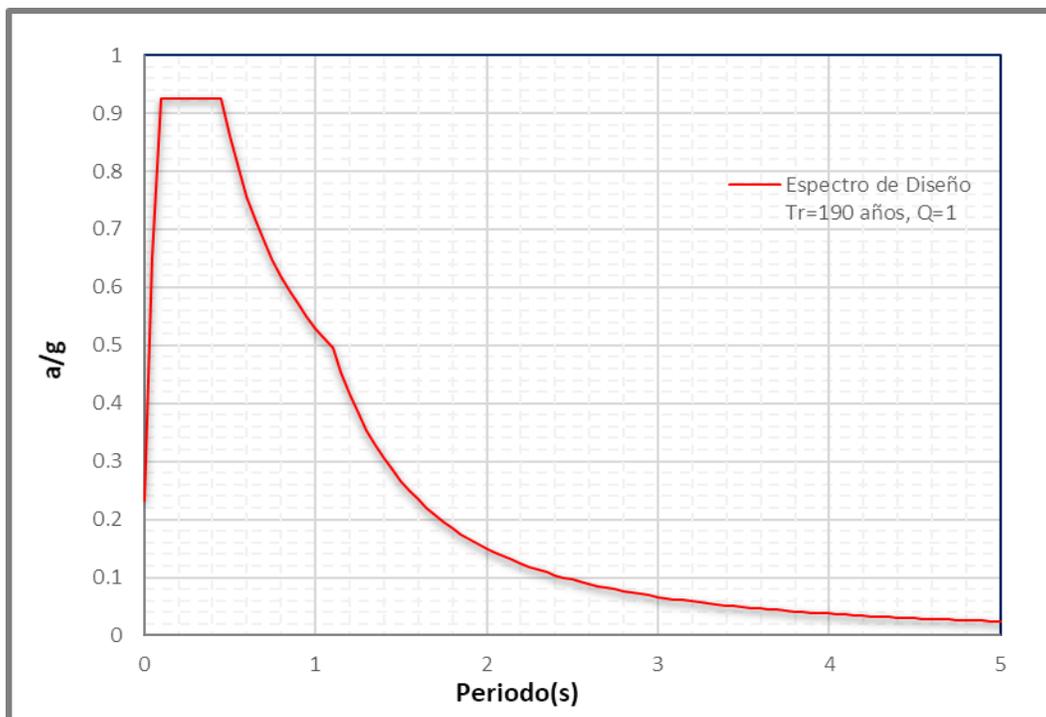


Figura 2.5: Espectro elástico de diseño propuesto para un periodo de retorno de 190 años.

## 2.4 Espectros Inelásticos de Diseño

El espectro calculado es elástico ( $Q=1.0$ ) y está asociado a un amortiguamiento de 5%. En la figura 2.6 se presentan los espectros inelásticos de diseño para un factor de comportamiento sísmico,  $Q$ , igual a 1.5 y 2.0. Para ello el espectro elástico de diseño se reduce por  $Q'$ , usando las expresiones siguientes:

$$Q' = 1 + \frac{Q-1}{\sqrt{k}} \frac{T}{T_a} \quad \text{para } T \leq T_a$$

$$Q' = 1 + \frac{Q-1}{\sqrt{k}} \quad \text{para } T_a < T \leq T_b$$

$$Q' = 1 + (Q - 1)\sqrt{\frac{p}{k}} \quad \text{para } T > T_b$$

Donde:

$$p = k + (1 - k)\left(\frac{T_b}{T}\right)^2,$$

Nótese que  $p$ , está en función de  $T_b$  para obtener  $Q'$ .

En la figura 2.6 también se presentan los espectros elásticos de diseño para estructuras del grupo B. Estos espectros deben usarse para el diseño de estructuras por estado límite de falla, y siempre que se garanticen las condiciones de diseño y capacidad de los elementos y materiales involucrados.

Los espectros propuestos se han reducido explícitamente por sobrerresistencia,  $R$ . Este factor está dado por la expresión:

$$R = K_1 R_0 + K_2$$

Donde:

$$R_0 = 1.75$$

$$K_1 = 1$$

$$K_2 = 0.5 \left[ 1 - \left( \frac{T}{T_a} \right)^{1/2} \right] > 0$$

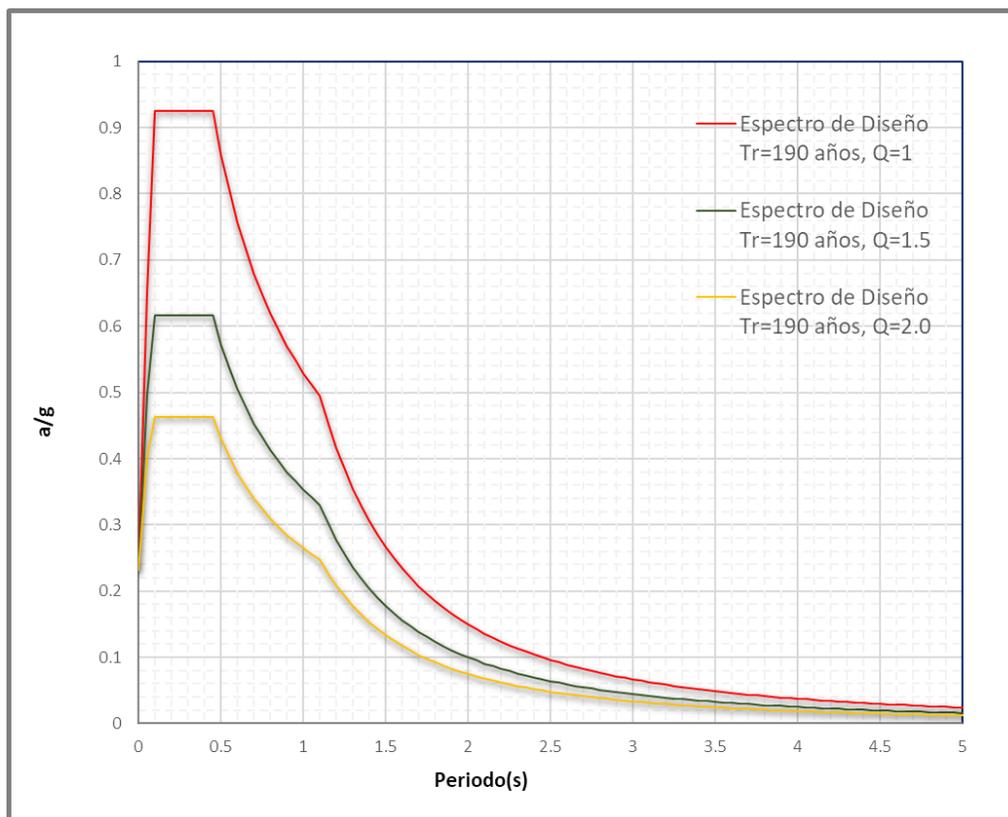


Figura 2.6: Espectros elásticos ( $Q=1$ ) e inelásticos ( $Q=1.5, 2$ ) de diseño, asociados a un periodo de retorno de 190 años para estructuras del grupo B,  $Q$  es el factor de comportamiento sísmico especificado en el Manual de Diseño de Obras Civiles de la CFE.

## 3.CONCLUSIONES

### ***Del estudio***

Se estimó el Espectro de Diseño Sísmico para el Estudio de peligro sísmico en una zona Hotelera de Puerto Vallarta. La estimación de este espectro ha involucrado un estudio detallado de la influencia de las distintas fuentes sísmicas que afectan al sitio de interés, logrando así la estimación del Espectro de Peligro Uniforme característico del lugar.

En la estimación de los efectos de sitio, se utilizó la información del estudio de vibración ambiental y de exploración geofísica. Los resultados se presentan en términos de funciones de transferencia que describen el comportamiento del suelo en frecuencia y amplitud, y son congruentes con sus características.

Las consideraciones involucradas en la definición del peligro sísmico, en combinación con una estimación de los efectos de sitio (por los valores de frecuencia fundamental obtenidos en los estudios realizados), se sustentan con la zonificación sísmica propuesta en este estudio. La propuesta incluye el uso de expresiones en la definición de los espectros de diseño que son acordes con los principios de la dinámica estructural.

### ***Experiencia adquirida***

Durante mi estancia en la empresa Geotem Ingeniería S.A de C.V, he adquirido conocimientos de Ingeniería Aplicada que me han ayudado a plantear propuestas geofísicas para la resolución de problemas integrales, adquiriendo habilidades interpretativas basadas en resultados puntuales y analizando el medio en el que se encuentran.

Otros de los aprendizajes con mayor relevancia para mi crecimiento profesional han sido el manejo de equipo geofísico, en específico sismómetros y acelerómetros, ya que una parte importante del manejo de datos geofísicos es la adquisición de datos en campo, además de aplicar una metodología eficiente, que es clave en la adquisición, ya que con esto se favorecen los resultados en gabinete y su respectivo análisis e interpretación.



Mi colaboración con personas especialistas en otras ramas de la ingeniería ha servido para complementar los conocimientos y poder ofrecer un servicio que satisfaga las necesidades del cliente, tomando en cuenta las características del medio evitando el menor daño posible a éste, y a la seguridad humana. Tal como lo presento en este reporte colaboré con ingenieros civiles e ingenieros geólogos para poder determinar el Peligro Sísmico de un determinado Sitio, que ofrezca seguridad estructural y por lo tanto seguridad a la población.

## 4.REFERENCIAS

---

**Arboleda J., Ordaz M. (2001)**, “Cocientes espectrales en Acapulco Gro., México”, proyecto “Sistema de

Evaluacion de Riesgo Sismico en la República Mexicana V.2.0”, mayo.

**Bard, P.Y., A.M. Duval, B. Lebrun, C. Lachet, J. Riepl., and D. Hatzfeld (1997)**, “*Reliability of the H/V technique for site effects measurement and experimental assesment*”, Seventh International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering, Istambul, July, 19-24.

**Boore D. M. (2003)**. Simulation of ground motions using the stochastic method. *Pure and applied geophysics* 160 (3), 635-376. URL <https://doi.org/10.1007/PL00012553>

**Durán, R. (1996)** “*Nonstationary seismic response of an instrumented five-story precast reinforced concrete building*”, 11WCEE proceedings, Acapulco, paper No.63.

**Finn, W D L (1991)**, “*Geotechnical engieneering aspects of microzonation*”, Proc, Fourth Int, Conf. on Seismic Zonation, Stanford, California, I, 199-259.

**García, D., Singh, S.K., Herráiz, M., Ordaz, M. and Pacheco, F.J. (2005)** “*Inslab earthquake of central Mexico II: peak parameters and response spectra*”, submitted to Bull. Seism. Soc. Am.

**Gutiérrez, C and S K Singh (1992)**, “*A site effect study in Acapulco, Guerrero, Mexico: comparison of results*”, Bull. Seism. Soc. Am. 78, 42-63.

**Estudios de Exploración.** “*Estudio de mecánica de suelos proporcionado por el cliente*”.

**Kausel E, Whitman R V, Morray J P y Elsabe F (1978)**, “*The spring method for embedded foundations*”, Nuclear Engineering and Design, Vol. 48, pp. 377-392.

**Kanai, K and Tanaka (1954)**, “*Measurement of the microtremor*”, Bull Earthquake Res Inst. Tokyo Univ. 32, 199-209.

**Kanamori H. y Anderson D. L. (1975)**, Theoretical basis of some empirical relations in seismology. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 65 (5), 1073-1094. URL <https://pubs.geoscienceworld.org/ssa/bssa/article-abstract/65/5/1073/117458>

**Lachet, C. and P Y Bard (1994)**, “Numerical and theoretical investigations on the possibilities and limitations of Nakamura’s technique”, *J. Phys. Earth.*, 42, 377-397.

**Lermo, J. y F.J.Chávez-García (1994a)**, *Are microtremors useful in site response evaluation?*, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **84**, 1350-1364.

**Lermo, J. y F.J.Chávez-García (1994b)**, *Site effect evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records*, *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **13**, 413-423.

**Manual de Diseño de Obras Civiles, Diseño por Sismo (2015)**, Comisión Federal de Electricidad. México.

**Mena, Ulises, Pérez-Rocha, L.E. y Avilés, J. (2006)** “Espectros de diseño sísmico para el territorio mexicano”, *Soc. Mex. Ing. Estructural*, XV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Pto. Vallarta, México, 2-29.

**Nakamura Y (1989)**, “A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremors on the ground surface”, *QR of RTRI*, 30, No.1, 25-33.

**Reglamento de Construcciones para el Distrito Federal RCDF (2004). Normas Técnicas Complementarias para Diseño por Sismo**. Gaceta oficial del Distrito Federal, 6 de octubre de 2004.

**Ordaz, M., Miranda, E. y Avilés, J. (2000)**, “Propuesta de espectros de diseño por sismo para el DF”, *Sociedad Mexicana de Ingeniería Sísmica*, VI Simposio Nacional de Ingeniería Sísmica, 22 y 23 septiembre, Querétaro.

**Ordaz, M., Miranda, E., Reinoso, E., y Perez-Rocha, L.E. (2000a)** “*Seismic loss estimation model for México city*”, XII World Conference on Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand.

**Ordaz, M., Arboleda, J. y Singh, S.K. (1995)**, “*A scheme of random summation of an empirical Green's function to estimate ground motions from future large earthquakes*”, Bull. Seism. Soc. Am., **85-6**.

**Ordaz, M., Jara, J.M. y Singh, S.K. (1989)** “*Riesgo sísmico y espectros de diseño en el estado de Guerrero*”, Informe Interno No. 8782, Instituto de Ingeniería, UNAM.

**Ordaz, M. y Reinoso, E. (1987)** “*Uso de teoría de vibraciones aleatorias en la determinación de los espectros de diseño del reglamento para las construcciones del Distrito Federal*”, Soc. Mex. Ing. Sism., VII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Querétaro, México.

**Reyes, C. (1999)**, “*El estado límite de servicio en el diseño sísmico de edificios*”, Tesis Doctoral, Facultad de Ingeniería, UNAM.

**Rosenblueth, E., Ordaz M., Sánchez-Sesma, F.J. y Singh S.K. (1989)**, “*Design Spectra for Mexico's Federal District*”, Earthquake Spectra, **5**, 273-291.

**Sadigh, K., Chang, C. Y., Egan, J.A., Makdise, F. y Youngs, R. R. (1997)**, “*Attenuation relationships for shallow crustal earthquakes based on California strong motion data*”, *Seismological Research Letters*, Vol. 68, No. 1, pp. 180-189.

**Sánchez-Sesma F., Rodríguez M., Iturrarán-Viveros U., Luzón F., Campillo M., Margerin L., García-Jerez A., Suárez M., Santoyo M., Rodríguez-Castellanos A. (2011)** “*A Theory for microtremor H/V spectral ratio: Application for a layered médium*”. Accepted for publication abril 2011, Geophysical Journal International.

**Seed, H. B. and Idriss, I. M. (1970)** “*Soil Moduli and damping factors for dynamic response analyses*”, EERC 70-10, December 1970.

**Udwadia, F. E. and Trifunac, M. D. (1973)** “*Comparison of earthquake and microtremor ground motions in El Centro, California*”, Bull. Seism. Soc. Am., **63**, 4.

**Williams F., Lermo J., Sánchez-Sesma F., Riquer G., Leyva R., Pérez S., Rivera R. (2011)** “*Mapas de intensidades sísmicas en la zona conurbada Veracruz-Boca de Río (ZCV), México, para el sismo de Sayula del 25 de febrero de 2011 (Mw6.0)*”. Soc. Mex. Ing. Sism., XVIII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Aguascalientes, México.



**Zúñiga, R. (1994)** *“Main seismogenic sources zones in Mexico”*, Reporte Técnico Proyecto 89-0190 IPGH Instituto Panamericano de Geografía e Historia.

## 5. ANEXOS

### *ANEXO I. METODOLOGÍA DE TENDIDOS DE REFRACCIÓN SÍSMICA (TRS)*

El método sísmico de refracción se desarrolló en la década de los 50's y fue muy empleado en la industria petrolera antes de las innovaciones tecnológicas alcanzadas por los métodos de reflexión. Sin embargo, este método tiene grandes ventajas de aplicación, en sitios donde las discontinuidades o cambios de formación están muy próximos a la superficie.

La propiedad física para medir en los métodos sísmicos es la velocidad de propagación de las ondas que viajan a través del suelo. El método de refracción estudia la respuesta del subsuelo ante la propagación de la onda de compresión (P) producida por medios mecánicos desde superficie. La velocidad de propagación de esta onda está en función de la compacidad de los materiales del subsuelo, tal parámetro proporciona información acerca de las características geomecánicas de la zona de estudio. La profundidad y resolución de esta técnica está en función del número de geófonos empleados, y su separación, de los puntos de tiro y la fuente sísmica empleada para el levantamiento.

Empleando los resultados de una serie de perfiles en un sitio con diferencia topográfica, es posible construir modelos 3D con base en las velocidades de onda P ( $V_p$ ).

### **Principio físico del método.**

El método de refracción sísmica está basado en las trayectorias de tiempo mínimo que emplean las ondas elásticas en propagarse desde un punto de la superficie, en donde son generadas, hasta los diferentes horizontes refractores del subsuelo y de éstos hasta otro punto, ubicado en la superficie, en donde las señales son detectadas por una serie de sensores o geófonos, alineados con la fuente de energía o punto de tiro. Las ondas sísmicas se crean artificialmente mediante el impacto que produce en la superficie la caída de objetos pesados o golpes de marro.

Los ensayos se basan en la medición de los tiempos de recorrido de las ondas elásticas para las cuales -suponiendo amplias superficies de separación con respecto a la longitud de onda o en todo caso con una débil curvatura- los frentes de onda se representan por medio de los relativos rayos sísmicos. El análisis se basa en el principio de Fermat y en la ley de Snell.

La prospección por refracción sísmica permite interpretar la estratigrafía del subsuelo basándose en el fenómeno de refracción total de una onda sísmica que incide sobre una interface localizada entre dos cuerpos con diferentes propiedades mecánicas (horizonte de refracción). La condición fundamental para llevar a cabo estudios de sísmica por refracción es que la sucesión de los estratos a investigar se caracterice por velocidades sísmicas crecientes al aumentar la profundidad. De este modo se pueden evaluar hasta 4 ó 5 horizontes de refracción diferentes. En la figura A.I.1. se presenta el principio físico utilizado en esta técnica, con la representación de un punto de tiro realizado.

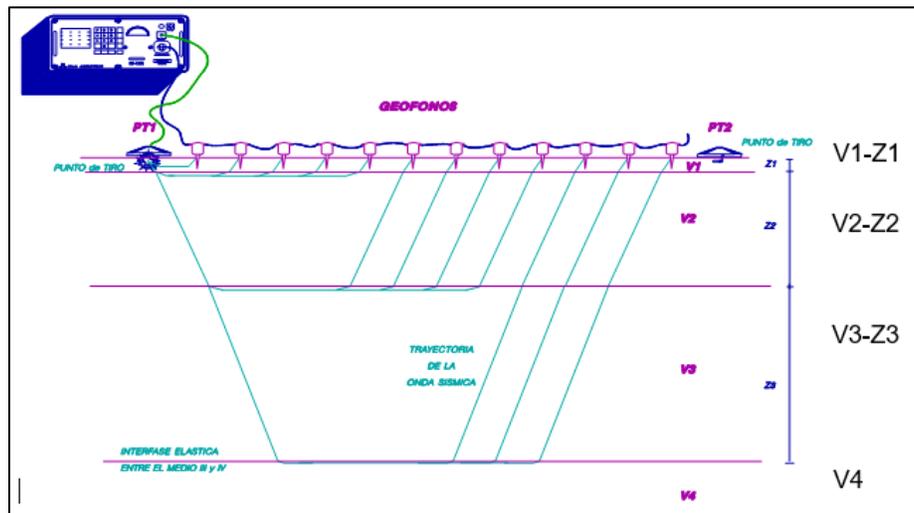


Figura A.I.1 Principio físico de la técnica de refracción sísmica.

### Sistemas de adquisición.

Para los estudios sísmicos, se utilizan equipos geofísicos denominados sismómetros, que están diseñados para el registro y digitalización de los movimientos del terreno detectados por sensores (geófonos), dispuestos en superficie en un arreglo conocido, también cuenta con un convertidor análogo–digital que determina el nivel de precisión de registro de la amplitud del movimiento del terreno (Figura A.I.2).

Para la adquisición de datos se utilizó un sismógrafo DAQLink III, desarrollado por Seismic Source®.

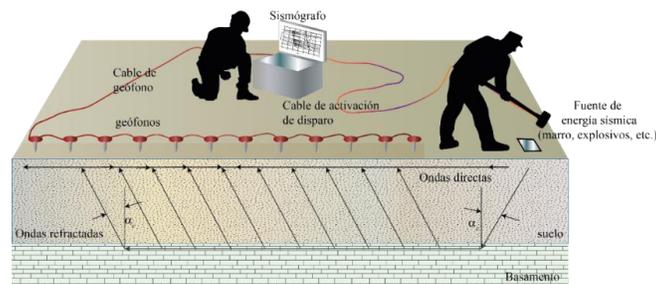


Figura A.I.2 Diagrama de adquisición para TRS.



A partir de la observación, procesado y análisis de registros o sismogramas es posible construir gráficas tiempo-distancia.

Las ondas sísmicas longitudinales P viajan a través del medio con frentes de onda, de donde se obtienen los tiempos de arribo, desde el punto de tiro hasta los detectores y las distancias están determinadas por la separación entre geófonos. Con el análisis y procesado se determina el número de capas que conforman el subsuelo, sus espesores y velocidades de propagación.

### **Descripción general del procesamiento.**

El proceso de los datos consiste en:

- Operaciones de Filtrado sobre la señal Sísmica (Dominio de Fourier).
- Picado de tiempos de arribo y generación de curvas dromocronas (tiempo-distancia).
- Estimación de velocidades de onda a partir de la variación en las pendientes.
- Construcción de función de velocidad y tiempo-profundidad.
- Interpretación del Método Reciproco Generalizado (GRM)
- Obtención de velocidades promediadas y espesor de los refractores.

El procesado de los datos por TRS está basado en la descripción del trayecto que toman los rayos sísmicos por el subsuelo y su tiempo de viaje. Los diferentes métodos de interpretación en refracción sísmica encuentran sus diferencias principalmente por el tipo de modelos de tierra que asumen y las suposiciones que los sustentan por mencionar algunos de ellos:

- Tiempos de Intercepto
- Velocidades Aparentes
- Tiempos de Retardo
- Método Recíproco Generalizado (GRM)

## Programa ZONDST2D

Programa para obtener tiempos de arribo de cada sismograma generado en campo, así como modificar la amplitud de ésta (Figura A.I.3).

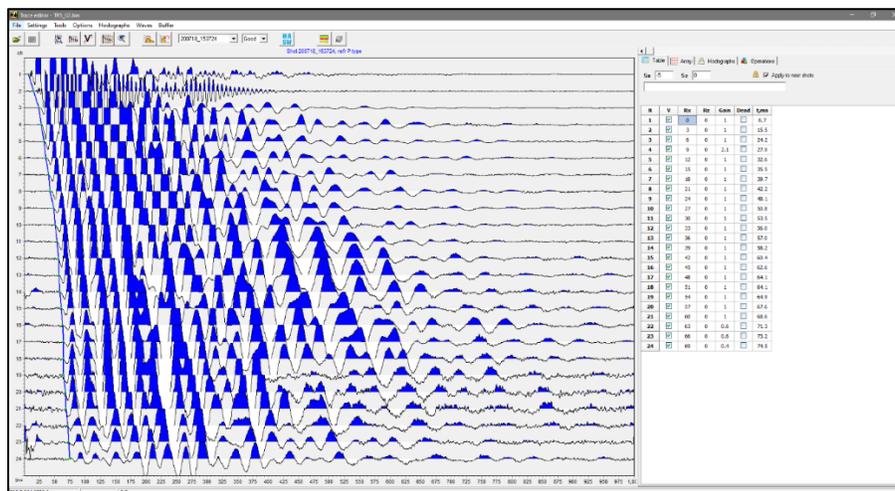


Figura A.I.3. Vista de la obtención de los tiempos de arribo de las ondas "P".

El programa ZONDST2D que permite generar las dromocrónicas o gráficas tiempo-distancia (Figura A.I.4), y posteriormente procesar la información con la finalidad de obtener un modelo estratificado con espesores y velocidades en dos dimensiones, así como generar modelos tomográficos (Figura A.I.5).

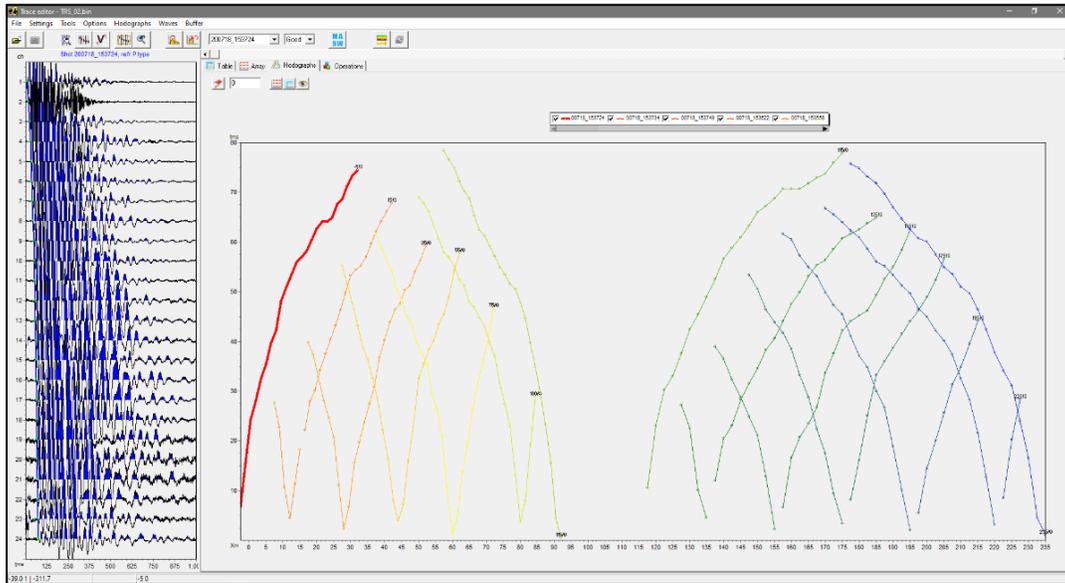


Figura A.I.4. Dromocrónicas mostrando modelo de campo y procesado.

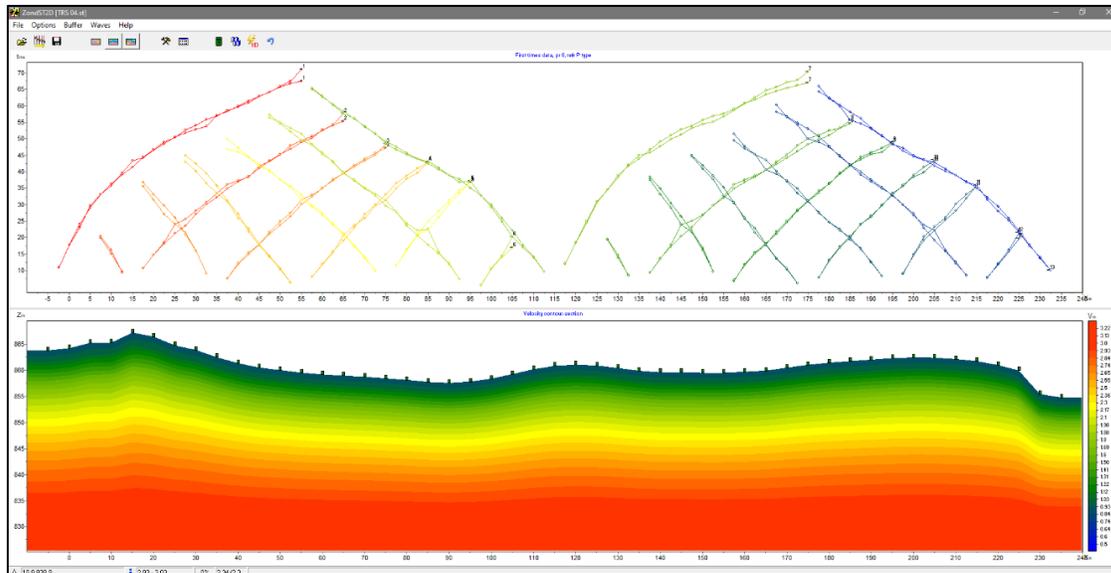


Figura A.I.5. Modelo obtenido del procesado con tomografía.

## **ANEXO II. METODOLOGÍA DE VIBRACIÓN AMBIENTAL (VA)**

Este método ha demostrado ser una herramienta simple, de bajo costo, pero eficaz en la caracterización de las condiciones de sitio locales a través del período natural fundamental del suelo. El uso de vibración ambiental es una excelente alternativa, que brinda muy buenos resultados, comparados con los obtenidos con otras técnicas, además se ha demostrado que los resultados de la técnica de cociente espectral H/V son estables en el tiempo.

Muchos de los estudios de microzonificación sísmica para la estimación de los efectos de sitio que se han elaborado alrededor del mundo aplicando el método del cociente espectral H/V con mediciones de vibración ambiental.

### **Principio físico del método.**

También conocido como HVNR por sus siglas en inglés Horizontal Vertical Noise Ratio. Este método fue usado inicialmente por Nogoshi e Iragashi (1970). Sin embargo, fue Nakamura en 1989 quien hizo famoso el método para aplicarlo en microzonificación. Es un método que utiliza vibraciones ambientales para obtener características dinámicas del suelo. Para ello se realizan las mediciones de los tres componentes, componentes horizontales (Norte-Sur, Este-Oeste) y el componente vertical. Partiendo de la hipótesis que las vibraciones ambientales están compuestas de las ondas de Rayleigh.

Nakamura (1989) afirma que se puede estimar el efecto de amplitud de la fuente:

$$Af = \frac{a_{vs}}{a_{vh}} \quad (\text{AII.1})$$

Donde  $a_{vs}$  se define como el espectro de amplitud del componente vertical en el suelo y  $a_{vh}$  espectro de amplitud de la componente vertical en un semiespacio.

Para determinar el efecto de sitio del suelo

$$E_s = \frac{e_{HS}}{e_{Hh}} \quad (\text{AII.2})$$

Donde  $e_{HS}$  es el efecto de sitio en el suelo del componente horizontal, y  $e_{Hh}$  es el efecto de sitio del componente horizontal en un semiespacio.

$$\frac{E_S}{A_f} = \frac{\frac{e_{HS}}{a_{vs}}}{a_{vh}} \quad (\text{AII.3})$$

El efecto en la fuente es igual a la unidad por lo que  $\frac{e_{Hh}}{a_{vh}} = 1$ .

Finalmente se obtiene el espectro de amplitud en la superficie (suelo) definido por la siguiente ecuación:

$$\frac{E_S}{A_f} = \frac{e_{HS}}{a_{vs}} \quad (\text{AII.4})$$

### **Relación: Velocidad, Espesor y Frecuencia Fundamental.**

Para relacionar estos tres parámetros se hace uso de la impedancia sísmica, que por definición es el producto de la velocidad por la densidad.

Si la forma de las curvas H/V están controladas por la resonancia de onda S dentro de los sedimentos entonces tanto la frecuencia máxima de H/V como la amplitud pueden relacionarse directamente con la función de transferencia del suelo. Esto se produce cuando las ondas sísmicas entran en una cuenca sedimentaria, cuyo terreno presenta un contraste de velocidades (Impedancia Sísmica), importante con la del basamento rocoso. Estas ondas se quedan amplificándose fuertemente que son las frecuencias propias de la cuenca. La relación de elipticidad de las ondas de Rayleigh el contraste de impedancia es suficientemente alto y exhibe un pico pronunciado cerca de la frecuencia de resonancia de la Onda S fundamental (Bonney-Claudet Sylvette,2006).

Para relacionar estos valores de H/V con la profundidad se utiliza la siguiente fórmula que relacione la frecuencia fundamental con el espesor y velocidad de onda de corte, como se muestra en la figura A.II.1

$$f_0 = \beta_s / 4H_1$$



Figura A.II.1. Modelo obtenido del procesado con tomografía.

### Sistemas de adquisición.

En general estas mediciones se realizan utilizando Acelerómetros y/o Sismómetros SARA Electronic Instruments, estos equipos son sensores triaxiales que miden los tres componentes del ruido sísmico, el componente N-S (Dirección Y), componente E-W (Dirección X), componente V (Dirección Z). Los cuales están especialmente diseñados para registrar eventos sísmicos de distintas intensidades y/o realizar monitoreo de vibraciones.

Se recomienda utilizar un sensor cuya frecuencia natural se encuentre al menos en el orden de la frecuencia fundamental de sitio.

### Descripción general del levantamiento.

Uno de los aspectos más importantes para la medición de VA en campo, es ubicar el equipo en una zona de terreno firme para que exista un buen acoplamiento entre el suelo y equipo. En general se hacen registros de 1 h de duración.

Como parte del proyecto "Guía de interpretación del cociente espectral SESAME", 2004, se dieron las siguientes recomendaciones para el levantamiento de información:

- Los parámetros de registro (ganancia del instrumento, horizontalidad del instrumento, frecuencia de muestreo) no tienen ninguna influencia sobre los resultados del cociente H/V.

- Sin considerar las condiciones climáticas, las mediciones sobre césped, cemento y asfalto no cambian dramáticamente los resultados; se debe siempre evitar hacer mediciones sobre grava o caliza.
- Si es necesario utilizar una interfaz artificial para instalar el sensor, lo mejor es utilizar cualquier tipo de arena en un recipiente, lo cual no tiene influencia sobre los resultados.
- La cercanía tanto de grandes como de pequeñas construcciones pueden afectar los resultados debido a la interacción suelo-estructura y por lo tanto debe incluirse esta información en la hoja de campo.
- Debe evitarse registrar ruido ambiental sobre terrenos ubicados encima de vacíos tales como grandes tuberías o sistemas de transporte subterráneo.
- El viento y la lluvia por sí mismos no influyen en los resultados, pero la combinación de viento con césped o estructuras cercanas (árboles, edificios, etc.) puede severamente cambiar las curvas H/V, especialmente en las bajas frecuencias (debajo de 1 Hz).
- Excepto en las pruebas realizadas con sismómetros de periodo largo, no se observó variación con el tiempo del cociente H/V, para períodos que variaron desde horas a semanas y años.
- Tomar registros próximos a fuertes fuentes de ruido influye sobre los resultados: el problema principal se presenta con fuentes continuas.
- Se recomienda evitar tomar registros próximos a fuentes de ruido tales como tráfico pesado, mar agitado o maquinaria y también evitar producir perturbaciones en las cercanías del sensor.

También es recomendado que para el caso de que objetivo sea realizar una microzonificación de la zona, se empiece con una separación grande entre equipos (por ejemplo, de 500 m) y si se llegaran a presentar variaciones grandes en los resultados disminuir esta distancia.

En general es recomendado realizar utilizar por lo menos tres puntos de medición con la finalidad de obtener resultados más precisos.

### **Descripción general del procesamiento.**

Sin importar el software que se utilice para el análisis de VA se deben tomar en cuenta los siguientes puntos, el software que se utiliza para este análisis fue Geopsy. Éste presenta varias opciones de procesamiento como: longitud de ventanas de procesamiento, tipo de suavizado de la curva H/V con la función de Konno y Ohmachi, rango de muestreo en frecuencia, etc.

El algoritmo de Geopsy trabaja con la Técnica de Nakamura y en general consiste en calcular la transformada rápida de Fourier (FFT) para cada componente (N-S, E-O y V), posteriormente se calcula el promedio de los dos componentes horizontales (N-S, E-O) y finalmente se realiza el cociente de los componentes horizontales sobre el componente vertical, ver figura A.II.2.

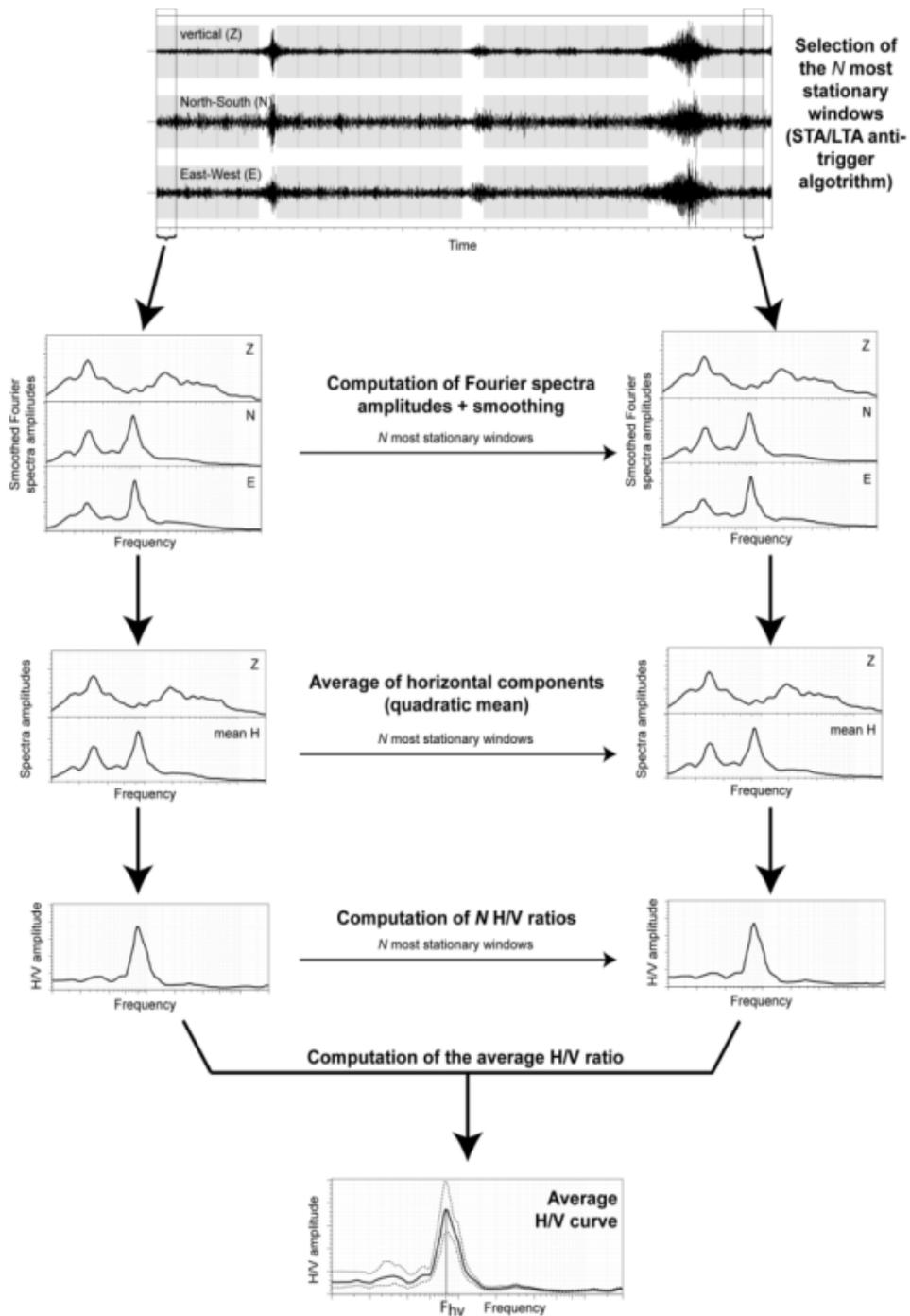


Figura AII.2. Diagrama de Procesamiento, tomada de: <http://www.geopsy.org/documentation/geopsy/hv.html>.

## Preprocesamiento

El primer paso para trabajar con las señales medidas es hacer un análisis de dichas señales tomando en cuenta los siguientes puntos:

- La señal debe estar corregida por la línea de base.
- Los tres componentes (N-S, E-O, V) deben tener la misma longitud en tiempo, frecuencia de muestreo y número de muestras.
- Si es necesario se debe aplicar un filtro pasa-banda a los tres componentes de la señal, usualmente es de 0.1 a 30 Hz.

## Procesamiento

Después de haber cumplido los puntos anteriores, podemos procesar la señal:

El primer paso es seleccionar el tiempo y número de ventanas, para ello se hace uso de la “Guía de interpretación del cociente espectral SESAME”, 2004. En esta guía se presentan recomendaciones en cuanto a la duración de la señal registrada de VA y longitud de la ventana dependiendo de la frecuencia que se pretende muestrear, estas recomendaciones se basan en el teorema de muestreo (ec. AII.5) para recuperar la señal completa sin pérdida de información (Tabla A.II.1).

$$F_N = \frac{1}{2\Delta t} \quad (\text{AII.5})$$

**Tabla AII. 1. Tiempo mínimo de grabación y valor mínimo de ventana para evitar pérdida de información.**

<b>F<sub>0</sub>(Hz) a muestrear</b>	<b>Mínimo valor para la ventana lw(s)</b>	<b>Tiempo de grabación mínimo para la señal (min)</b>
0.2	50	30'
0.5	20	20'
1	10	10'
2	5	5'
5	5	3'
10	5	2'

Otra de las cuestiones a considerar es que el tamaño de ventana debe estar sujeto al parámetro de  $2^n$  para el tiempo en segundos de la ventana, de esa manera garantizamos que el algoritmo trabaje de una manera eficiente ya que el análisis divide la transformada en una parte par e impar de esa manera aseguramos la simetría de la FFT.

El siguiente punto es eliminar el ruido transitorio, aquellos eventos de gran amplitud en la señal, para ello solo se elimina las ventanas que contengan estos eventos, como se muestra en la figura AII.3.

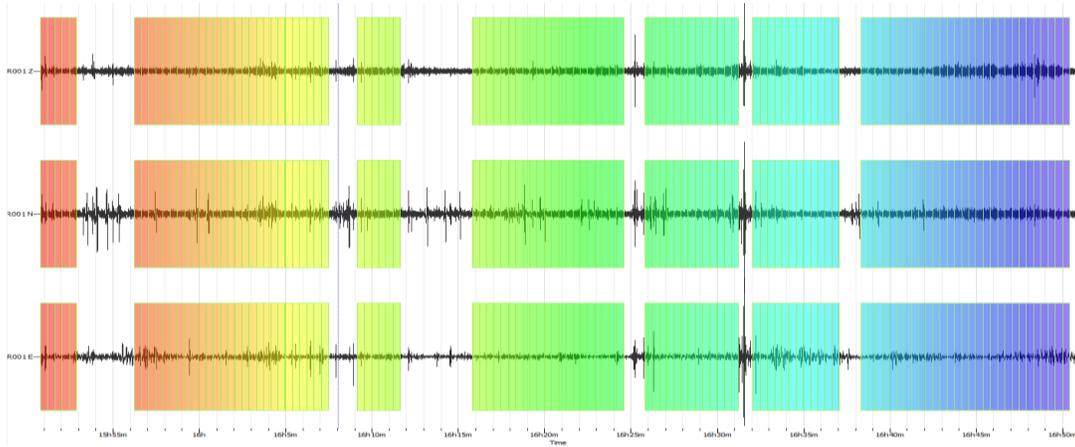


Figura AII. 3. Elección de ventanas sin ruido transitorio, para el cociente espectral.

Después se genera la curva H/V de salida, esta curva debe tener al menos un rango de frecuencia para analizar de 0.1 a 10Hz. Para encontrar el pico del periodo fundamental del sitio donde se midió la Vibración ambiental.

Para el análisis de la curva del cociente espectral debemos analizar las bajas frecuencias y las altas frecuencias.

En ocasiones el pico que se muestra en la curva del cociente espectral es evidente, por lo que se toma ese valor. Pero a veces la curva muestra más de un pico, por lo que hay que discriminar los picos que no se deban al contraste de impedancia de los sedimentos ya que estos podrían deberse a ruido o a contrastes de impedancia más someros, como se muestra en la figura AII.4.

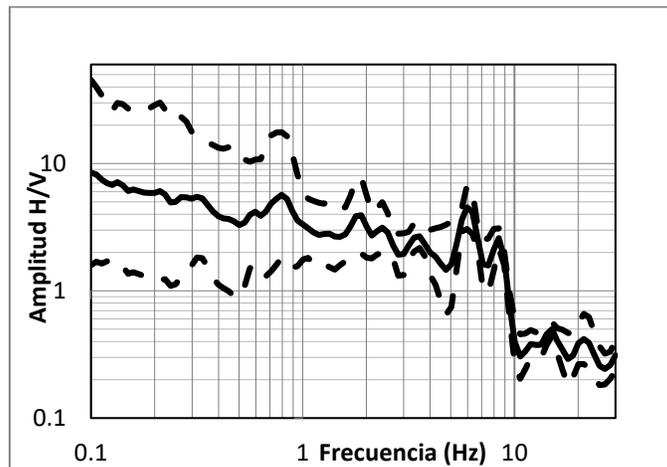


Figura AII.4. Ejemplo de un cociente H/V en donde la presencia de ruido o contrastes de impedancia someros afectan el resultado.

Otro de los casos que se pueden presentar al momento de analizar la curva H/V, es que el espectro se vea plano sin ningún pico presente, esta situación se puede asociar a dos factores:

- Ruido sin información congruente
- No existe un contraste de impedancia presente.

## **ANEXO III PELIGRO SÍSMICO**

### **Introducción**

Nuestro país se localiza en el Cinturón Circumpacífico, la región con mayor sismicidad de todo el mundo. Desde el sur de Sinaloa hasta el oeste de Chiapas, numerosos sismos ocurren por el choque de las placas oceánicas de Cocos y Rivera contra la placa continental de Norteamérica. En esta zona del Pacífico se generan terremotos de gran magnitud ( $M_s > 7$ ) con tiempos de recurrencia relativamente cortos. El temblor de Jalisco de 1932 ( $M_s = 8.2$ ) es el más grande que ha ocurrido en México desde el siglo pasado, y el sismo de Michoacán de 1985 ( $M_s = 8.1$ ) también pertenece a esta clase de sismos. La zona en estudio ha estado vinculada a través del tiempo con la actividad sísmica de esta fuente.

Sismos grandes también ocurren en el continente a profundidades de 60 km, aproximadamente. El mecanismo de falla que genera estos temblores es de tipo normal y reflejan el rompimiento de la litosfera oceánica subducida. Aunque no son muy frecuentes, estos temblores pueden causar gran daño (Ordaz *et al.*, 2000a). Ejemplos de estos temblores es el de Oaxaca (15 de enero, 1931,  $M_s = 7.8$ ), Orizaba (23 de agosto, 1973,  $M_s = 7.3$ ), el de Huajuapán de León (24 de octubre, 1980,  $M_b = 7.0$ ), y el de Puebla (15 de junio, 1999,  $M_s = 6.5$ ).

Eventos sísmicos menos frecuentes ocurren en el Eje Neo-Volcánico, los cuales dependiendo de su localización pueden causar daños considerables. Ejemplos de estos sismos son el de Xalapa ocurrido el 3 de enero de 1920,  $M_s = 6.4$  y el de Acambay del 19 de noviembre de 1912,  $M_s = 7.0$ . Si los epicentros de estos sismos se encuentran debajo o cerca de estructuras de infraestructura y urbanismo, pueden ocasionar grandes pérdidas materiales y cuantiosos daños.

## Sismicidad

Por lo general, es imposible determinar el peligro sísmico contando simplemente las veces en que se han excedido valores dados de intensidad en el sitio en cuestión. Esto ocurre porque rara vez se dispone de catálogos completos de las aceleraciones que han producido en tal sitio los sismos pasados. Es necesario, pues, calcular el peligro sísmico de manera indirecta. Para ello, se evalúa primero la tasa de actividad sísmica en las fuentes generadoras de temblores, y después se integran los efectos que producen en un sitio dado, los sismos que se generan en la totalidad de las fuentes.

La actividad de la  $i$ -ésima fuente sísmica se especifica en términos de la tasa de excedencia de las magnitudes que ahí se generan,  $\lambda_i(M)$ . A semejanza de la tasa de excedencia de intensidades, la tasa de excedencia de magnitudes mide qué tan frecuentemente se generan en una fuente temblores con magnitud superior a una dada.

Las fuentes utilizadas en el estudio que aquí se describe están dictadas por la tectónica del país y por la historia instrumental de sismos registrados en el pasado (Zúñiga, 1994). El país se ha dividido en alrededor de 30 grandes zonas de actividad sísmica, distribuidas en la mayor parte del territorio nacional; éstas a su vez se subdividen en cientos de subfuentes. Cada una de estas subfuentes genera temblores a una tasa constante, dada por:

$$\lambda_i(M) = \lambda_{0i} \frac{e^{-b_i M} - e^{-b_i M_{ui}}}{e^{-b_i M_0} - e^{-b_i M_{ui}}} \quad (\text{AIII.1})$$

donde  $M_0$  es la mínima magnitud relevante, tomada igual a 4.5 en este estudio.  $\lambda_{0i}$ ,  $b_i$ , y  $M_{ui}$  son parámetros que definen la tasa de excedencia de cada una de las fuentes sísmicas. Estos parámetros, diferentes para cada fuente, han sido estimados por procedimientos estadísticos bayesianos (Rosenblueth *et al.*, 1989; Ordaz, Arboleda y Singh, 1995), que incluyen información sobre regiones tectónicamente similares a las de nuestro país, más información experta, especialmente sobre el valor de  $M_{ui}$ , la máxima magnitud que puede generarse en cada fuente.

## Leyes de Atenuación

Una vez determinada la tasa de actividad de cada una de las fuentes sísmicas, es necesario evaluar los efectos que, en términos de intensidad sísmica, produce cada una de ellas en un sitio de interés. Para ello se requiere saber qué intensidad se presentaría en el sitio en cuestión si en la  $i$ -ésima fuente ocurriera un temblor con magnitud dada. A las relaciones entre magnitud, posición relativa fuente-sitio e intensidad se les conoce como *leyes de atenuación*. Usualmente, la posición relativa fuente-sitio se especifica mediante la distancia focal, es decir, la distancia entre el foco sísmico -el centro de la fuente- y el sitio. Las leyes de atenuación pueden adoptar muy diversas formas. Una muy común es la siguiente:

$$E(\ln Sa | M, R) = a_0 + a_1 M + a_2 \ln R + a_3 R \quad (\text{AIII.2})$$

Donde  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  y  $a_3$  son parámetros determinados semiempíricamente. Suele suponerse que, dadas magnitud y distancia, la ordenada espectral  $Sa$  es una variable aleatoria distribuida lognormalmente con mediana dada por la ecuación AIII.2 y desviación típica del logaritmo natural igual a  $\sigma_{\ln Sa}$ .

En este estudio se emplearon tres leyes de atenuación diferentes dependiendo de las trayectorias que recorren las ondas en su camino de la fuente al sitio. Es importante resaltar que se utilizan leyes de atenuación espectrales, es decir, que toman en cuenta el hecho de que la atenuación es diferente para ondas de diferentes frecuencias, por lo que se tienen parámetros de atenuación diferentes para cada periodo de vibración considerado. Estas leyes se describen a continuación.

- *Temblores costeros*. Se utilizó, para la aceleración máxima del terreno provocada por temblores generados en la costa sur del Pacífico, la ley de atenuación debida a Rosembueth (1989).
- *Temblores de profundidad intermedia*. Se empleó en este caso un modelo de atenuación que toma en cuenta este tipo de temblores. Se trata de un modelo que considera exclusivamente los sismos producidos por fallamiento normal.

- *Temblores superficiales.* Para modelar la atenuación de los temblores superficiales, tanto los que ocurren en el Eje Neovolcánico como los que se presentan en la zona conocida como sismicidad difusa, se utilizaron las leyes de atenuación debidas a Sadigh (1997).

### Peligro Sísmico

Una vez conocidas la sismicidad de las fuentes y los patrones de atenuación de las ondas generadas en cada una de ellas, puede calcularse el peligro sísmico mediante la siguiente expresión:

$$v(Sa) = \sum_{i=1}^N \int_{M_0}^{M_{ii}} -\frac{d\lambda_i(M)}{dM} \Pr(SA > Sa | M, R_i) dM \quad (\text{AIII.3})$$

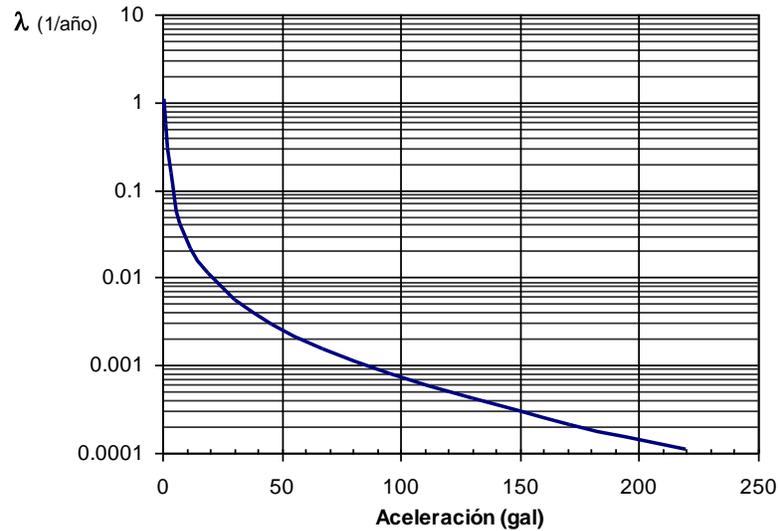
donde la sumatoria abarca la totalidad de las fuentes sísmicas,  $N$  y  $\Pr(SA > Sa | M, R_i)$  es la probabilidad de que la intensidad exceda un cierto valor, dadas la magnitud del sismo,  $M$  y la distancia entre la  $i$ -ésima fuente y el sitio,  $R_i$ .

Suponiendo, que, dadas la magnitud y la distancia, la intensidad tiene distribución lognormal, esta probabilidad se calcula de la siguiente manera:

$$\Pr(SA > Sa | M, R_i) = \Phi\left(\frac{E(\ln Sa | M, R_i) - \ln Sa}{\sigma_{\ln Sa}}\right) \quad (\text{AIII.4})$$

siendo  $\Phi(\cdot)$  la distribución normal estándar.

Los resultados de un análisis de este tipo se representan en curvas como la mostrada en la figura AIII.1, donde en las ordenadas se tiene la tasa de excedencia de la intensidad de diseño, cuyo parámetro es usualmente la aceleración espectral en terreno firme, y las abscisas representan el valor de la intensidad de diseño para el periodo estructural considerado.



**Figura A.III.1: Curva típica de tasa de excedencia de aceleración espectral en terreno firme para un periodo estructural dado.**

El espectro de peligro uniforme en terreno firme se obtiene de curvas como estas para distintos periodos estructurales y para una misma tasa de excedencia.

## Espectro de respuesta

Una vez calculado el espectro de respuesta en el sitio firme de referencia se puede calcular el espectro de respuesta de campo libre para el sitio en cuestión, introduciendo los efectos de sitio por medio de las funciones de transferencia (FT) obtenidas por los procedimientos de análisis usados.

Para poder introducir de esta forma los efectos de sitio primero se estima el espectro de Fourier asociado al espectro de respuesta de peligro uniforme en terreno firme que tiene un periodo de retorno dado. La solución de este problema no es única; sin embargo, se recurre a un procedimiento iterativo cuyo resultado arrojará el espectro de Fourier del espectro de terreno firme en cuestión.

En este momento tanto el espectro de terreno firme como los efectos de sitio (FT) se encuentran en el dominio de la frecuencia, en términos de espectros de amplitudes de Fourier. Multiplicando estos espectros se obtiene el espectro de Fourier en campo libre, el cual contiene ya los efectos de sitio. Finalmente, usando teoría de vibraciones aleatorias (Ordaz y Reinoso, 1987) para dicho espectro de Fourier se obtiene el espectro de respuesta del sitio.

El espectro que así se obtiene es el espectro de respuesta del sitio asociado a un periodo de retorno que está dado por el correspondiente del espectro de terreno firme.