

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE NICARAGUA, MANAGUA**  
**UNAN-MANAGUA**  
**RECINTO UNIVERSITARIO RUBÉN DARÍO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍAS**  
**DEPARTAMENTO DE CONSTRUCCIÓN**  
**INGENIERÍA CIVIL**



**TRABAJO MONOGRÁFICO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**TÍTULO:**

**ANÁLISIS DE VIBRACIÓN AMBIENTAL EN EL EDIFICIO DEL INSTITUTO DE GEOLOGÍA Y GEOFÍSICA (IGG-CIGEO) DE LA UNAN-MANAGUA APLICANDO LA TÉCNICA DE COCIENTE ESPECTRAL HORIZONTAL/VERTICAL (HVSr).**

**Autores: Br. Denis Noel Sandoval Rostran.**  
**Br. Joel Enrique Santana Peña.**

**Tutor: PhD. Ing. Edwin A. Obando.**

**Managua, Nicaragua.**  
**Noviembre, 2016.**

## DEDICATORIAS

*Denis Noel Sandoval Rostran*

Dedico este trabajo primeramente al Creador de los cielos y de la tierra, a Dios el Todopoderoso, que me ha dado sabiduría y fortaleza para culminar mi meta.

Dedico con todo mi corazón y con mucho amor a mis dos madres; María del Socorro Espinoza y Mayra del Socorro Rostran Espinoza, quienes me han dado su apoyo y amor incondicional.

A mi papá, Noel Antonio Sandoval García, que ha sido un ejemplo en mi vida por sus consejos y su apoyo. Te quiero mucho papá.

A mi hermano, Ariel Antonio Sandoval Rostran, por apoyarme y siempre brindarme su amor como hermano, estando juntos en las buenas y en las malas, también a mi preciosa hermanita Clarita Ibett Sandoval Rostran.

A mi novia con mucho amor y cariño, Kerlyn Lilibel Orozco Lanzas, que ha sido de inspiración en mi vida.

A mis amigos, Humberto José García Alvarado, Daniel Alonso Blanco Sánchez, Jeffer Josué García Garmendía y Luis David García Garmendía.

A mi amigo y compañero, Lester Manuel López López, que ha sido como un hermano en mi vida, siempre dándome buenos consejos y apoyo.

A todos mis compañeros de la generación 2011 de ingeniería civil de la UNAN-Managua, quienes fueron partícipe en mi formación profesional.

*Joel Enrique Santana Peña*

Dedico este trabajo monográfico al único Fiel y Verdadero, a Jesucristo, el Hijo de Dios.

Dedico con mucho amor a mis dos madres; Esperanza Peña Ruiz y Kathy Judith Peña, quienes me han brindado un amor que guía, amor que cuida, y cuya fidelidad no se termina.

A mi cuñado, Iván Ernesto Sequeira López, quien ha sido un verdadero padre, y cuyo ejemplo lo ha dado con sus hechos, sin necesidad de mencionar muchas palabras.

A mis hermanos, Teresa Amelia Santana Peña, Melva Damaris Soza Peña y Kevin Jhowert Santana Peña, por haber sido de mucho servicio y motivación. A mi mamita, Margarita Ruiz Martínez, quien me ha transmitido valiosos consejos de vida.

A la familia de mi tía Melba Peña, quienes me recibieron gratamente en su casa de habitación cuando les visitaba, y fueron de mucho aporte.

A Edgar Antonio Zeledón Rivera y Greybin Josué Borge Castro, compañeros de clase, quienes han sido como “hermanos de otra madre”, colaborando en mi vida académica y espiritual.

## **AGRADECIMIENTOS**

*Denis Sandoval y Joel Santana*

Agradecemos primeramente a Dios por habernos dado la vida y permitirnos llegar a culminar nuestros estudios.

Al Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO) de la UNAN-Managua, por facilitar las instalaciones en la recolección de datos y equipos de laboratorio, también al PhD. Ing. Edwin A. Obando, por proveer conocimiento y consejos en la tutoría de nuestro trabajo monográfico.

A todos los compañeros de clase de la generación 2011 de ingeniería civil de la UNAN-Managua, quienes colaboraron en nuestra formación profesional, siendo fieles en cada día caluroso, en cada informe y en cada noche de desvelo.

Al Departamento de Becas de la UNAN-Managua, en especial a los maestros Gerardo Mendoza Jiménez y Vicente Pérez Torres, quienes proporcionaron consejos, técnicas y otros recursos relacionados al estudio.

A todos los profesores del Departamento de Construcción por habernos apoyado y brindado sus conocimientos, siendo de mucha importancia en nuestra formación académica.

A los pastores Pablo & Sara Kim, misioneros coreanos, quienes han sido nortes espirituales durante nuestra estancia en la universidad, brindándonos disciplinas espirituales ligadas al carácter cristiano. Igualmente gratifico a los chicos del Ministerio Discípulos de Jesús.

## TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIAS.....	i
AGRADECIMIENTOS .....	iii
TABLA DE CONTENIDO .....	iv
LISTADO DE FIGURAS .....	viii
LISTADO DE TABLAS .....	x
RESUMEN.....	xi
ABSTRACT .....	xii
<b>CAPÍTULO I – ASPECTOS GENERALES .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1    Introducción.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1.1    Planteamiento del problema.....</b>	<b>3</b>
<b>1.2    Antecedentes .....</b>	<b>4</b>
<b>1.3    Justificación .....</b>	<b>5</b>
<b>1.4    Objetivos .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4.1    Objetivo general .....</b>	<b>6</b>
<b>1.4.2    Objetivos específicos .....</b>	<b>6</b>
<b>1.5    Alcances y limitaciones .....</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO II – DESCRIPCIÓN DE SITIO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1    Características principales de la ciudad de Managua .....</b>	<b>8</b>
<b>2.2    Consideraciones del sitio en estudio, IGG/CIGEO .....</b>	<b>8</b>
<b>2.3    Sismicidad de Managua y composición geológica .....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.1    Sismicidad de Managua 1975-1999.....</b>	<b>10</b>
<b>2.3.2    Geología del área de Managua.....</b>	<b>12</b>
<b>2.3.3    Fallas y alineamientos principales.....</b>	<b>13</b>
<b>2.3.4    Descripción de los terremotos.....</b>	<b>14</b>
<b>2.4    Características geotécnicas de la ciudad de Managua .....</b>	<b>14</b>
<b>CAPÍTULO III – REVISIÓN DE LITERATURA .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1    Generalidades .....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1    Tectónica global.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1.1    Placas tectónicas.....</b>	<b>16</b>
<b>3.1.1.2    Bordes o límites de interacción de las placas.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.2    Ondas sísmicas.....</b>	<b>17</b>
<b>3.1.2.1    Tipos de ondas sísmicas.....</b>	<b>18</b>

3.1.2.1.1	<i>Ondas de cuerpo</i> .....	18
3.1.2.1.2	<i>Ondas superficiales</i> .....	19
3.2	<b>Vibración ambiental (microtremores)</b> .....	20
3.2.1	<b>Cocientes espectrales H/V</b> .....	23
3.3	<b>Serie de Fourier</b> .....	24
3.3.1	<b>Expansión en serie de Fourier</b> .....	25
3.3.1.1	<i>Funciones periódicas</i> .....	25
3.3.1.2	<i>Teorema de Fourier</i> .....	25
3.3.1.3	<i>Los coeficientes de Fourier</i> .....	26
3.3.2	<b>La transformada rápida de Fourier</b> .....	29
3.4	<b>Función de transferencia</b> .....	31
3.5	<b>Método de Nakamura</b> .....	35
3.6	<b>Funciones utilizadas en el software MatLab</b> .....	38
3.7	<b>Medidas descriptivas de estadística</b> .....	45
3.7.1	<b>Media aritmética</b> .....	45
3.7.2	<b>Rango</b> .....	46
3.7.3	<b>Varianza</b> .....	46
3.7.4	<b>Desviación estándar</b> .....	46
3.8	<b>Suelo y estructura</b> .....	47
3.8.1	<b>Período fundamental de las estructuras</b> .....	47
3.8.2	<b>Efecto de sitio y fenómeno de resonancia</b> .....	49
3.8.2.1	<i>Período y frecuencia natural de vibración del suelo</i> .....	49
3.8.2.2	<i>Espectros de respuestas</i> .....	51
3.8.2.2.1	<i>Características del espectro de respuesta</i> .....	52
3.8.2.3	<i>Espectros de diseño</i> .....	54
3.9	<b>Interacción suelo-estructura</b> .....	55
3.9.1	<b>Velocidad de ondas de corte</b> .....	56
<b>CAPÍTULO IV – TRABAJO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES</b> .....		57
4.1	<b>Equipo de medición</b> .....	57
4.2	<b>Colección de registros de ruido ambiental</b> .....	58
4.2.1	<b>Descripción de la recolección de datos</b> .....	59
4.3	<b>Procesamiento de las señales</b> .....	61
4.3.1	<b>Software de análisis: Geopsy v2.9.0</b> .....	61
4.3.1.1	<i>Procesamiento de las señales en Geopsy</i> .....	62

4.3.2	Software de análisis: MatLab R2015a.....	63
4.3.2.1	Procesamiento de las señales en MatLab. ....	63
4.4	Estimación de modelo de velocidad de ondas de corte.....	64
4.5	Espectro de respuesta de sitio .....	65
4.5.1	Magnitud de los terremotos incluidos en DEEPSOIL v.6.0. ....	65
4.5.2	Software de análisis: DEEPSOIL v6.0 .....	66
4.5.3	Determinación del espectro de respuesta de sitio. ....	67
CAPÍTULO V – ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		69
5.1	Obtención del período fundamental del suelo .....	69
5.1.1	Cociente espectral H/V.....	69
5.1.2	Variabilidad de los períodos de suelo. ....	70
5.1.2.1	Cálculo del período natural del suelo con períodos cortos. ....	71
5.1.2.2	Cálculo del período natural del suelo con períodos largos. ....	71
5.1.2.3	Cálculo del período fundamental del suelo. ....	72
5.2	Parámetros dinámicos de la estructura.....	74
5.2.1	Estimación del período fundamental de la estructura en la dirección NS. ....	76
5.2.2	Estimación del período fundamental de la estructura en la dirección EW.....	78
5.3	Interacción suelo-estructura.....	79
5.3.1	Interacción suelo-estructura en la componente NS/V.....	79
5.3.2	Interacción suelo-estructura en la componente EW/V. ....	79
5.4	Estimación de los modelos de velocidades de ondas de corte.....	81
5.5	Espectros elásticos de respuesta de sitio.....	82
CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		86
6.1	Conclusiones .....	86
6.2	Recomendaciones .....	87
CAPÍTULO VII – BIBLIOGRAFÍA .....		88
CAPÍTULO VIII - ANEXOS .....		91
8.1	Anexo A. Curvas de cociente espectral H/V del suelo.....	91
8.2	Anexo B. Estructura del código utilizado en MatLab para obtener las curvas de cociente espectral H/V de la estructura.....	96
8.3	Anexo C. Curvas de cociente espectral H/V de la estructura.....	98
8.4	Anexo D. Estructura del código en MatLab para crear la función de transferencia teórica <sup>102</sup>	
8.5	Anexo E. Pseudo-aceleraciones de los terremotos extraídos de DEEPSOIL v.6.0 ..	103

<b>8.5.1</b>	<b>Pseudo-aceleraciones para espectros de respuesta en superficie. ....</b>	<b>103</b>
<b>8.5.2</b>	<b>Pseudo-aceleraciones para espectros de respuesta en roca. ....</b>	<b>115</b>
<b>8.6</b>	<b>Anexo F. Amplificación del suelo.....</b>	<b>127</b>
<b>8.7</b>	<b>Anexo G. Fotografías referente a la investigación.....</b>	<b>130</b>



## LISTADO DE FIGURAS

<b>Figura 1.1.</b> Vista panorámica del sitio en estudio. <b>Fuente:</b> Autores.....	3
<b>Figura 1.2.</b> (a) Grieta en la unión de la losa de entrepiso con la viga de entrepiso; (b) Grieta en el muro de corte ubicado en el costado Sur del edificio. <b>Fuente:</b> Autores. ....	3
<b>Figura 2.1.</b> Mapa de macrolocalización y microlocalización del sitio en estudio. <b>Fuente:</b> Software Google Earth Pro 7.2. ....	9
<b>Figura 2.2.</b> Sitio en estudio (IGG-CIGEO/UNAN-Managua). <b>Fuente:</b> Autores.....	10
<b>Figura 2.3.</b> Registros de eventos sísmicos a partir de 1975. <b>Fuente:</b> (Talavera, 2005) .....	11
<b>Figura 2.4.</b> Posición tectónica del área de Managua y flexión de la alineación volcánica cerca de esta. <b>Fuente:</b> (Martínez Bermúdez & Rodríguez Altamirano, 1995). ....	12
<b>Figura 2.5.</b> Columna estratigráfica generalizada. <b>Fuente:</b> (Moore Coleman, 1990). ....	13
<b>Figura 3.1.</b> Tipos de ondas sísmicas. <b>Fuente:</b> (Rios, 2007).....	18
<b>Figura 3.2.</b> Ondas P u ondas de compresión. <b>Fuente:</b> (Armando, 2013).....	19
<b>Figura 3.3.</b> Ondas S u ondas transversales. <b>Fuente:</b> (Vargas, 2015).....	19
<b>Figura 3.4.</b> Ondas Rayleigh. <b>Fuente:</b> (Vargas, 2015).....	20
<b>Figura 3.5.</b> Ondas Love. <b>Fuente:</b> (Vargas, 2015).....	20
<b>Figura 3.6.</b> Comparación de la relación Frecuencia-Período entre sismos y microtemblores. ....	22
<b>Figura 3.7.</b> Una función periódica con período $T$ . <b>Fuente:</b> (James, y otros, 2007) .....	25
<b>Figura 3.8.</b> Diagrama en bloque de la función de transferencia. <b>Fuente:</b> (James, y otros, 2007)....	32
<b>Figura 3.9.</b> Diagrama de flujo para el procesamiento de señales con la técnica de cocientes espectrales H/V. <b>Fuente:</b> (Jaramillo, Piña, & Aguilar, 2012). ....	38
<b>Figura 3.10.</b> Ejemplo de un código en MatLab para encontrar las componentes de frecuencia de una señal. <b>Fuente:</b> Opción de ayuda en MatLab. ....	42
<b>Figura 3.11.</b> Gráfica de señal dañada con ruido aleatorio de media cero. <b>Fuente:</b> Opción de ayuda en MatLab. ....	42
<b>Figura 3.12.</b> Ejemplo de un código en MatLab donde especifica la transformada rápida de Fourier. <b>Fuente:</b> Opción de ayuda en MatLab.....	43
<b>Figura 3.13.</b> Gráfica de amplitud del espectro. <b>Fuente:</b> Opción de ayuda en MatLab.....	43
<b>Figura 3.14.</b> Período de vibración de un sistema de un grado de libertad. <b>Fuente:</b> (Giraldo, Alfaro, Pujades, & Canas, 1999).....	47
<b>Figura 3.15.</b> Movimiento periódico y no periódico: (a) movimiento armónico simple; (b) movimiento periódico general; (c) movimiento transitorio de impacto; (d) movimiento transitorio de sismo. <b>Fuente:</b> (Kramer, 1996).....	50
<b>Figura 3.16.</b> Desplazamiento de las vibraciones. <b>Fuente:</b> (Kramer, 1996). ....	50
<b>Figura 3.17.</b> Sistema de un grado de libertad: (a) fuerza aplicada $p(t)$ ; (b) movimiento del terreno inducido por un sismo. <b>Fuente:</b> (Chopra, 2014). ....	51
<b>Figura 3.18.</b> Espectro suavizado de respuesta para diferentes movimientos de sismos. ....	52
<b>Figura 3.19.</b> Espectro de respuesta ( $\zeta = 0, 2, 5$ y $10\%$ ) y valores máximos de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del terreno. <b>Fuente:</b> (Chopra, 2014).....	53
<b>Figura 3.20.</b> Espectro de diseño para Nicaragua. <b>Fuente:</b> (Reglamento Nacional de Construcción, 2007). ....	55

<b>Figura 4.1.</b> Sismógrafo digital de Sara GEOBOX. <b>Fuente:</b> (SARA electronic instruments, s.f.) .....	57
<b>Figura 4.2.</b> Ubicación de los puntos levantados en el edificio. <b>Fuente:</b> Software Google Earth Pro 7.2.....	60
<b>Figura 4.3.</b> Ubicación del equipo en dirección Norte con respecto a su coordenada Y. <b>Fuente:</b> Autores (tomada 12/05/2016).....	60
<b>Figura 4.4.</b> Etapas generales del procesamiento de señales y cálculos numéricos. <b>Fuente:</b> Autores. ....	61
<b>Figura 4.5.</b> Interface gráfica del software Geopsy v2.9.0 para el procesamiento de señales. ....	62
<b>Figura 4.6.</b> Gráfica de Cociente Espectral H/V versus Frecuencia predominante para el punto IGG17. <b>Fuente:</b> Geopsy v2.9.0 .....	62
<b>Figura 4.7.</b> Procesamientos de señales HVSR en el código de MatLab. <b>Fuente:</b> MatLab R2015a...	63
<b>Figura 4.8.</b> Rutina en MatLab para el cálculo de la función de transferencia teórica. ....	64
<b>Figura 4.9.</b> Elección del método para el análisis en el software DEEPSOIL v6.0. <b>Fuente:</b> Autores. .	67
<b>Figura 4.10.</b> Asignación del modelo de velocidad ajustado. <b>Fuente:</b> Autores. ....	68
<b>Figura 4.11.</b> Asignación de las propiedades dinámicas del basamento. <b>Fuente:</b> Autores. ....	68
<b>Figura 5.1.</b> Relación H/V para los puntos IGG1 e IGG20. <b>Fuente:</b> Geopsy v.2.9.0.....	69
<b>Figura 5.2.</b> Relación H/V para el punto IGG27. <b>Fuente:</b> Geopsy v.2.9.0.....	70
<b>Figura 5.3.</b> Períodos para los puntos en el suelo. <b>Fuente:</b> Autores.....	70
<b>Figura 5.4.</b> Suelo con períodos cortos. <b>Fuente:</b> Autores. ....	71
<b>Figura 5.5.</b> Suelo con períodos largos. <b>Fuente:</b> Autores.....	72
<b>Figura 5.6.</b> Período fundamental del suelo, calculado con Geopsy 2.9.0. <b>Fuente:</b> Autores.....	73
<b>Figura 5.7.</b> Cociente espectral del punto “P ALTA” tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW. <b>Fuente:</b> MatLab R2015a. ....	74
<b>Figura 5.8.</b> Cociente espectral del punto “IGG16” tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW. <b>Fuente:</b> MatLab R2015a. ....	75
<b>Figura 5.9.</b> Frecuencias naturales de la estructura en la dirección NS, calculadas en MatLab R2015a. <b>Fuente:</b> Autores. ....	77
<b>Figura 5.10.</b> Frecuencias naturales de la estructura en la dirección EW, calculadas en MatLab R2015a. <b>Fuente:</b> Autores. ....	78
<b>Figura 5.11.</b> ISE en la componente NS/V. <b>Fuente:</b> Autores. ....	79
<b>Figura 5.12.</b> ISE en la componente EW/V. <b>Fuente:</b> Autores. ....	80
<b>Figura 5.13.</b> ISE en el área sureste del edificio. <b>Fuente:</b> Autores. ....	80
<b>Figura 5.14.</b> Ajuste de función de transferencia teórica con la curva de cociente espectral H/V del sitio. <b>Fuente:</b> MatLab R2015a. ....	81
<b>Figura 5.15.</b> Modelo representativo de velocidad de propagación de ondas de corte. <b>Fuente:</b> Autores.....	81
<b>Figura 5.16.</b> Espectro de respuesta en superficie para el sitio de estudio. <b>Fuente:</b> Autores.....	83
<b>Figura 5.17.</b> Espectro de respuesta en roca para el sitio de estudio. <b>Fuente:</b> Autores.....	83
<b>Figura 5.18.</b> Amplificación del suelo. <b>Fuente:</b> Autores.....	84
<b>Figura 5.19.</b> Función de amplificación del suelo. <b>Fuente:</b> Autores.....	84
<b>Figura 5.20.</b> Cociente espectral H/V de la estructura en la dirección NS versus el espectro de respuesta en superficie. <b>Fuente:</b> Autores.....	85
<b>Figura 5.21.</b> Cociente espectral H/V de la estructura en la dirección EW contra el espectro de respuesta en superficie. <b>Fuente:</b> Autores.....	85

**LISTADO DE TABLAS**

<b>Tabla 1.</b> Clasificación de sitio y tipo de suelo en los primeros 30 m de profundidad. <b>Fuente:</b> (NEHRP Recommended Provisions, 2003).....	56
<b>Tabla 2.</b> Características técnicas del sismógrafo Sara Geobox. <b>Fuente:</b> (SARA electronic instruments, s.f.) .....	58
<b>Tabla 3.</b> Jornada de mediciones realizadas en el edificio. <b>Fuente:</b> Autores.....	59
<b>Tabla 4.</b> Modelo de velocidad inicial para el sitio. <b>Fuente:</b> IGG-CIGEO. ....	65
<b>Tabla 5.</b> Movimientos de tierra incluidos en DEEPSOIL v.6.0. <b>Fuente:</b> Manual de usuario de DEEPSOIL v.6.0. ....	66
<b>Tabla 6.</b> Frecuencias, períodos del suelo y planta baja del edificio. <b>Fuente:</b> Autores.....	73
<b>Tabla 7.</b> Cantidad de columnas estructurales en las dos direcciones NS y EW. <b>Fuente:</b> Autores. ....	76
<b>Tabla 8.</b> Frecuencias y períodos de la planta alta, usando la componente NS/V. <b>Fuente:</b> Autores.77	
<b>Tabla 9.</b> Frecuencias y períodos de planta alta, usando la componente EW/V. <b>Fuentes:</b> Autores..	78
<b>Tabla 10.</b> Modelo de velocidad para el sitio de estudio. <b>Fuente:</b> Autores.....	82

**RESUMEN**

En esta investigación se hace un análisis de vibración ambiental, aplicando la técnica de cociente espectral horizontal/vertical (HVSR), al edificio del Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO) de la UNAN-Managua. Para el levantamiento de las señales, se usó un sismógrafo digital, recogiendo señales de manera uniforme, dentro y fuera del edificio. En este trabajo se hace uso de la Transformada Rápida de Fourier, función de transferencia, método de Nakamura, método lineal equivalente aproximado, medidas descriptivas de estadística y de varios software relacionados al estudio sísmico.

El suelo presenta variabilidad en períodos cortos y largos, se determinó que el período fundamental del suelo es de 0.48 seg; de manera aproximada, el período fundamental de la estructura en la dirección NS es de 0.21 seg, y en la dirección EW es de 0.36 seg, lo que muestra claramente que la dirección NS es más rígida, por tener una adecuada distribución de columnas. Los períodos del suelo y estructura coinciden en el área sureste del edificio, haciendo que dicha área sea vulnerable a eventos sísmicos; el tipo de suelo determinado según el RNC-07, es moderadamente blando, con una velocidad de ondas de corte de 336.44 m/s. Se consideró también la función de amplificación del suelo, obteniéndose que la aceleración espectral de la superficie es 2.54 veces mayor al basamento. También se comparó la curva de cociente espectral H/V en la dirección EW con el espectro de respuesta en superficie, mostrando coincidencia de períodos, indicándonos de esta manera que la estructura entraría en resonancia en dicha dirección, y más aún, en el área sureste.

**ABSTRACT**

In this research, environmental vibration analysis is done by applying the technique of horizontal / vertical spectral ratio (HVSR), the building of the Institute of Geology and Geophysics (IGG-CIGEO) of the UNAN-Managua. For removal of the signals, a digital seismograph picking up signals evenly inside and outside the building it was used. In this paper we use the Fast Fourier Transform, transfer function, method Nakamura, approximately equivalent linear method, descriptive statistical measures and various software related to seismic study is done.

The soil variability at low and high periods, it was determined that the fundamental period of the land is 0.48 sec; approximately, the fundamental period of the structure in the NS is 0.21 sec and the EW direction is 0.36 sec, which clearly shows that the NS direction is more rigid, by having an adequate distribution of columns. Periods coincide soil and structure in the southeast area of the building, making this area vulnerable to seismic events; the soil type determined by the RNC-07 is moderately soft, with a shear wave velocity of 336.44 m/s. It also considered the soil amplification function, obtaining the spectral acceleration of the surface is 2.54 times the base. The curve of spectral ratio H/V in the EW direction was also compared with the spectrum of response surface, showing matching periods, indicating in this way that the structure would resonate in that direction, and further, in the southeast area.

## CAPÍTULO I – ASPECTOS GENERALES

### 1.1 Introducción

Un objetivo fundamental de la ingeniería en cuanto a sismos es la minimización de desastres. La experiencia y las investigaciones realizadas han observado la aplicabilidad de la medición y del análisis de microtemblores para inferir las propiedades del suelo, y por tanto se consideran herramientas adecuadas para evaluar efectos de sitio y predecir las características de movimientos fuertes (Giraldo, Alfaro, Pujades, & Canas, 1999).

Los microtemblores sirven como sustitutos de señales del suelo por sismos y como traductores de información limitada obtenida de la observación de señales de sismos en un sitio. En los años cincuenta, en Japón, a partir del registro sistemático de microtemblores, se encontró que éstos eran útiles como diferenciadores de las condiciones del suelo y del efecto de la geología superficial en el movimiento sísmico, y por tanto podrían contribuir a las normas de diseño sismo-resistentes (Seo, y otros, 1995).

La ciudad de Managua se considera la más expuesta del país en cuanto a eventualidad sísmica y volcánica conjunta, en el distrito I, se localiza la Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), cuya entidad atiende un gran número de personas diariamente. Dentro de esta Alma Mater, se encuentra el Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO), un valioso centro de investigaciones sobre las ciencias de la tierra. Por ello, se hace necesaria la valoración del edificio ante un evento sísmico usando el método de vibración ambiental, para conocer cómo reaccionaría la edificación a un evento sísmico, conociendo su período fundamental y la amplificación relativa del suelo y la estructura.

Los propósitos de la medición de microtemblores y de las aproximaciones existentes pueden resumirse en: Obtención del período predominante del suelo, evaluación de efectos de sitio, detección de la estructura subterránea (la variación del período es consistente con el perfil geológico) y estimación de perfiles de velocidad de ondas sísmicas. Claro que cada propósito tendrá sus variaciones en cuanto a la estructura, geología y clima del sitio.

Entre la utilización de microtemblores, microsismos y movimientos sísmicos, existen diferencias tanto a nivel práctico como a nivel de información en los registros. Desde el punto de vista práctico se destaca el costo; para la obtención de registros de movimientos sísmicos se requiere una red permanente. Sin embargo, el registro de microtemblores se puede realizar con estaciones temporales y por tanto, con un único equipo se puede cubrir grandes áreas en lapsos de tiempo relativamente cortos.

Respecto a la información contenida en los registros, se pueden obtener en cualquier momento y en cualquier lugar –evitando tiempo de lluvia severa o tormenta- lo cual constituye una gran ventaja en su utilización para evaluar efectos de sitio. En cuanto a la confiabilidad de los datos y resultados, se tiene mayor certeza según el número de mediciones, basándose en la estadística; en dependencia también de los equipos usados, sea un equipo portátil (a como se hizo en esta investigación) o una estación de referencia.

Esta investigación trata primero de conocer el período fundamental del suelo y de la estructura, realizando muchas mediciones con un sismógrafo; luego se pretende inferir y en el mejor de los casos, determinar si existen sitios de anomalía en el edificio que afecten su rigidez y vibración natural, también se propondrá un modelo de velocidad de ondas de corte a una profundidad menor a treinta metros. Se usará el software Geopsy v.2.9.0 para observar la interacción suelo-estructura, el software MatLab R2015a para obtener la vibración de la planta alta y el software DEEPSOIL v.6.0 para estimar el modelo de ondas de corte.

### 1.1.1 Planteamiento del problema

El Instituto de Geología y Geofísica se inauguró en el año 2010, teniendo actualmente poco más de cinco años de construcción. La estructura cuenta con losas rígidas en el entrepiso y la parte del techo posee terrazas con pendientes de 1.5% y el resto del techo varía con pendientes de 10 y 20%. La altura del entrepiso es de 3.6 m, la altura del techo y las losas de terrazas están entre 6.40, 6.85, 7.85 y 9.90 m. La estructura es de tipo irregular (ver Figura 1.1).



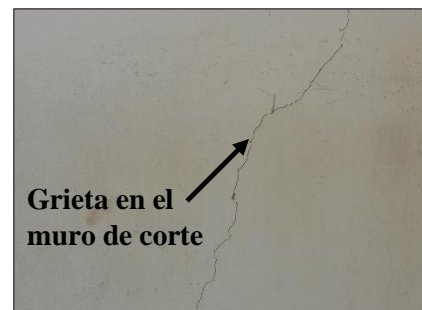
**Figura 1.1.** Vista panorámica del sitio en estudio. **Fuente:** Autores.

Cierto tiempo después de su edificación, se observaron grietas en varias paredes, en la losa de entrepiso y muro de corte ubicado en el costado Sur del edificio a como se muestra en la Figura 1.2 (a) y 1.2 (b), dicho muro actúa como empotre en una viga en voladizo, sufriendo los efectos, y cuyo voladizo serían los pasillos Este y Oeste del edificio.



**Grieta en la Losa de entrepiso**

(a)



**Grieta en el muro de corte**

(b)

**Figura 1.2.** (a) Grieta en la unión de la losa de entrepiso con la viga de entrepiso; (b) Grieta en el muro de corte ubicado en el costado Sur del edificio. **Fuente:** Autores.

Al realizar el análisis de vibración ambiental -siendo un método no destructivo, debido a que no se hará ninguna perforación en alguna columna o parte del piso- se estarán buscando sitios o elementos que presenten anomalías en el edificio e inferir sobre lo que afectó y continúa afectando la estructura; y con ello proponer si la edificación necesitaría por ejemplo, algún reforzamiento estructural, más espesor del muro o distribución de las masas del edificio.



## 1.2 Antecedentes

La vibración ambiental se popularizó gracias a la técnica de Nakamura en 1989, para estimar las capas superficiales del suelo teniendo en cuenta que el ruido de los microterremotos está compuesto por varios tipos de ondas. El uso de la vibración ambiental sobre estructuras se ha venido haciendo cada vez más rigurosa, porque se han realizado algunas variantes en la determinación de los cocientes espectrales que brindan la información necesaria sobre las características dinámicas de las estructuras y del suelo. Por lo tanto se hará mención de algunos trabajos de interés:

Se han realizado mediciones de vibración ambiental en varios países del mundo. La técnica ha sido utilizada antes y después del refuerzo estructural que se sometió el edificio H de la Universidad Autónoma Metropolitana – Azcapotzalco (Ramírez & Caamaño, 2002), sin embargo se trabajó con esta técnica para la identificación de cambios en el comportamiento estructural de un edificio con el fin de conocer detalladamente sus propiedades dinámicas: frecuencias naturales, modos naturales de oscilación, amplificación y su correspondiente valor de amortiguamiento (Ortiz, 2010), también se aplicó la técnica de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos en la Universidad Austral de Chile (Sandoval & Vera, 2013).

En el caso de nuestro país, se destacan instituciones donde se realizan estudios de efecto de sitio mediante la técnica de vibración ambiental. El Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO) de la UNAN-Managua ha realizado investigaciones semejantes a la nuestra, como es la investigación de (Romero, 2005), que realizó un estudio del efecto de sitio en el área urbana de la Ciudad de Catarina aplicando la técnica de Nakamura a los registros obtenidos en las microzonas para estimar funciones de transferencia empíricas y compararlo con el método de Haskell. También dicha institución es un edificio importante para la universidad, porque regularmente es usado para actividades como conferencias, congresos y reuniones de las autoridades de la universidad.

Posteriormente se llevó a cabo el estudio realizado por (Murillo & Membreño, 2005), el cual determinaron los períodos de vibración predominantes de las estructuras de Adobe y Taquezal en el Centro Histórico de la Ciudad de Granada. Por otra parte, (Castrillo, Eto, Yokoi, & Ulriksen, 2014), Local site effect characterization in the old downtown area of Managua city, Nicaragua based on long period microtremors. Seguidamente, (Hernández & Mercado, 2015), realizaron el diseño y la aplicación de códigos en el software MatLab para el cálculo de parámetros dinámicos en análisis sísmico de suelo y estructuras. Finalmente, (Páiz & Bendaña, 2015), trabajaron una investigación de vital importancia, como lo es; el análisis de amenaza sísmica y respuesta de sitio considerando el potencial del fallamiento superficial, para determinar modelo de velocidad de ondas de cortes ( $V_s$ ) en puntos críticos y así obtener espectros de amenaza uniforme de suelo.

### 1.3 Justificación

La Universidad Nacional Autónoma de Nicaragua (UNAN-Managua), desde hace muchos años ha venido creciendo poblacionalmente, y por ende presenta mayor demanda en infraestructuras como: oficinas, aulas, laboratorios, centros de documentación, auditorios, biblioteca y negocios particulares. De todas las construcciones antes mencionadas, se hará una investigación particular al edificio del Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO), en el cual se realizará el análisis de vibración ambiental. A su vez, esta estructura es expuesta a vibraciones provocada por el entorno, lo que podría ocasionar deformaciones tales como: daños en los muros de carga, fisuras en columnas y vigas, cortantes basales, etc.

Cuando una estructura falla, es debido a varios factores, los que más influencia tienen son los siguientes: vida útil de los elementos estructurales, magnitud del sismo, inadecuada construcción, tiempo de duración del sismo, la manera de interacción del suelo con la estructura y el fenómeno de amplificación de la onda, en el cual la intensidad del movimiento disminuye con la distancia del epicentro, es decir, que los daños provocado por los terremotos no solo están en función de la magnitud del sismo y de la distancia epicentral, porque la sacudida de un terremoto varía significativamente de un sitio a otro y depende de la conformación del subsuelo donde se encuentra cimentada la estructura y de la forma del suelo dando lugar a la posibilidad de que se presente un efecto de sitio o fenómeno de resonancia.

Es bueno tomar en cuenta la reducción del grado de vulnerabilidad sobre las edificaciones y estudiar las características dinámicas de las mismas, con el propósito de realizar estudios directos sobre el tipo de edificación a construir. El presente trabajo está orientado a conocer el período de vibración predominante del suelo donde se encuentra cimentado el edificio, parámetros dinámicos de la estructura haciendo empleo de la técnica de Cociente Espectral H/V y la estimación de modelos de velocidades de ondas de corte.

Se considera que este trabajo comprende una base importante para investigaciones futuras en la rama de ingeniería sismorresistente, como son los estudios de vulnerabilidad sísmica sobre estructuras. También se pretende dar un aporte significativo a los estudiantes y profesionales interesados en el estudio del comportamiento dinámico de las estructuras.

## **1.4 Objetivos**

### **1.4.1 Objetivo general**

Analizar los parámetros dinámicos del edificio del Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO) de la UNAN-Managua, aplicando la técnica de Cociente Espectral Horizontal/Vertical (HVSr).

### **1.4.2 Objetivos específicos**

Determinar los períodos dominantes del suelo donde se realizaron los levantamientos, aplicando la técnica de Cociente Espectral Horizontal/Vertical (HVSr).

Estimar parámetros dinámicos de la estructura en su dirección longitudinal y transversal, tomando en cuenta el período fundamental y amplificación.

Analizar la posible correlación entre el período fundamental del suelo del sitio y el período fundamental del edificio.

Estimar modelos de velocidad de ondas de corte para el sitio de estudio, considerando el parámetro  $V_{s30}$ .

Calcular espectros elásticos de respuesta de sitio para los terremotos incluidos en DEEPSOIL, considerando los parámetros dinámicos del suelo.

### 1.5 Alcances y limitaciones

Este estudio tiene como alcance determinar el período fundamental del edificio, tanto como conocer si existen sitios o elementos que se encuentren dañados y no estén aportando rigidez a la estructura; de modo que pueda servir como una referencia para reparaciones o reforzamiento estructural del edificio, también como consulta para futuras investigaciones. Cabe mencionar que como una de las limitaciones, no fue posible tomar mediciones en el centro de rigidez de la azotea, por lo que el período fundamental de la estructura se obtendrá de manera aproximada.

Asimismo se pretende que esta investigación sea considerada por las autoridades del IGG-CIGEO y la UNAN-Managua, con la finalidad de que sea una referencia para las futuras construcciones de edificios, para mitigar algún desastre o incluso para el correcto mantenimiento de los edificios.

De igual modo, la realización de este documentado ha contado con los recursos intelectuales y económicos de los autores, al igual con el recurso de consultoría por parte del tutor y de docentes pertinentes al tema de investigación. Para el procesamiento de los datos se han usado tres softwares en principal: Geopsy versión 2.9.0, MatLab versión R2015a y DEEPSOIL versión 6.0. Con el software Geopsy no hay alguna dificultad relevante; sin embargo con los otros dos softwares, puede haber incertidumbre en el procesamiento de las señales, debido al margen de condiciones durante el levantamiento de datos, pudiendo afectar que el edificio no estaba plenamente vacío o algún tipo de tráfico que haya podido afectar los registros por las calles que se encuentran cercanas al edificio.

Los levantamientos de vibración ambiental en el edificio no han sido simultáneos, es decir, solo se ha usado el sismógrafo para medir la vibración de punto en punto; no se han usado sensores para medir varios puntos a la vez, o para evaluar la vibración de alguna parte de la estructura como una viga o columna en particular.

Se determinó la dirección más rígida de la estructura, mediante los resultados que se obtuvieron en la curva de cociente espectral H/V, además haciendo una revisión en la cantidad de columnas en sus dos direcciones; sin embargo, no se realizó el análisis estructural al edificio, porque no se consideró asociado a este estudio.

## **CAPÍTULO II – DESCRIPCIÓN DE SITIO**

### **2.1 Características principales de la ciudad de Managua**

Managua es la ciudad capital de Nicaragua, siendo cabecera municipal y departamento homónimos, fue fundada con el nombre de Villa de Santiago de Managua el 28 de marzo de 1819, constituida en 1852 como capital de la República de Nicaragua. Posee una extensión territorial aproximadamente de  $244 \text{ km}^2$ , de los cuales el 52% está ocupado por la población urbana.

La ciudad de Managua se encuentra ubicada en la zona del pacifico de Nicaragua, entre las coordenadas  $12^{\circ}01'$  y  $12^{\circ}13'$  de latitud Norte, y los  $84^{\circ}45'$  y  $86^{\circ}23'$  de longitud Oeste. La ciudad limita al Norte con el Lago Xolotlán, al Sur con San Marcos y San Rafael del Sur, al Este con Tipitapa, Nindirí, Ticuantepe y La Concepción y finalmente al Oeste con Villa Carlos Fonseca y Mateare.

Según el Instituto Nacional de Información de Desarrollo (INIDE, 2005), tiene una población estimada de 1,817,096 habitantes (censo de 2005). Su clima es principalmente tropical de sabana, caracterizado por una prolongada estación seca y por temperaturas altas todo el año, que cambian desde  $27^{\circ} \text{ C}$  hasta  $32^{\circ} \text{ C}$ . La precipitación anual promedio para Managua es de 1,215 milímetros de agua.

Su relieve consta de: Lago de Managua, Sierras de Managua, el Sistema de Cerros y Lagunas al Oeste de la ciudad: Cerro San Carlos, Motastepe, Laguna de Asososca, Nejapa y el Valle de Ticomo, a lo interno de la trama urbana destaca la Laguna de Tiscapa ubicada en el Área Central.

### **2.2 Consideraciones del sitio en estudio, IGG/CIGEO**

En este recinto se encuentran construidas infraestructuras de uno a tres niveles, entre ellos: pabellones, auditorios, laboratorios de medicina, laboratorios de radiación, laboratorios de microbiología, oficinas, centros de documentación, ente otros tipos de edificaciones.

El Instituto de Geología y Geofísica (IGG-CIGEO), nace como el Centro de Investigaciones de Geofísica (CIGEO) en octubre de 1990 en la UNAN-Managua, con el apoyo de la Agencia Sueca para el Desarrollo Científico con los países en Desarrollo (SAREC). Esta iniciativa fue apoyada en su inicio por la Decanatura de la Facultad de Ciencias y posteriormente se contó con el respaldo de las autoridades superiores de la UNAN-Managua.

Está situado en el Recinto Universitario Rubén Darío de la UNAN-Managua, formando parte de Villa Fontana Norte. Las coordenadas del edificio son:  $12^{\circ}06'43.26'' N$  y  $86^{\circ}16'13.97'' O$ , limita al Este con el Colegio La Salle, al Oeste con la Universidad Iberoamericana (UNICIT), al Norte con la Mezquita de Managua y al Sur con la biblioteca central Salomón de la Selva. Se presenta a continuación la localización del sitio en estudio en la Figura 2.1.



**Figura 2.1.** Mapa de macrolocalización y microlocalización del sitio en estudio. **Fuente:** Software Google Earth Pro 7.2.

El IGG-CIGEO es un valioso centro de investigaciones, está en uso desde el año 2010, son cerca de 30 personas que trabajan ahí. La estructura está formada por paredes de concreto reforzado, mampostería reforzada y estructuras livianas de gypsum en ambas caras. Las secciones estructurales como las columnas y vigas, varían en sus dimensiones, pero con resistencia del concreto de  $3000 \text{ psi}$ , además cuentan con acero de refuerzo. La losa de entepiso, con  $0.15 \text{ m}$  de espesor, tiene la misma resistencia del concreto que funciona como diafragma rígido que transmite la carga a los elementos resistentes. La planta de techo está formada por secciones de perlínes con diferentes secciones y cuentan con cables tensores para que la estructura de techo tenga mayor rigidez (ver Figura 2.2).



**Figura 2.2.** Sitio en estudio (IGG-CIGEO/UNAN-Managua). **Fuente:** Autores.

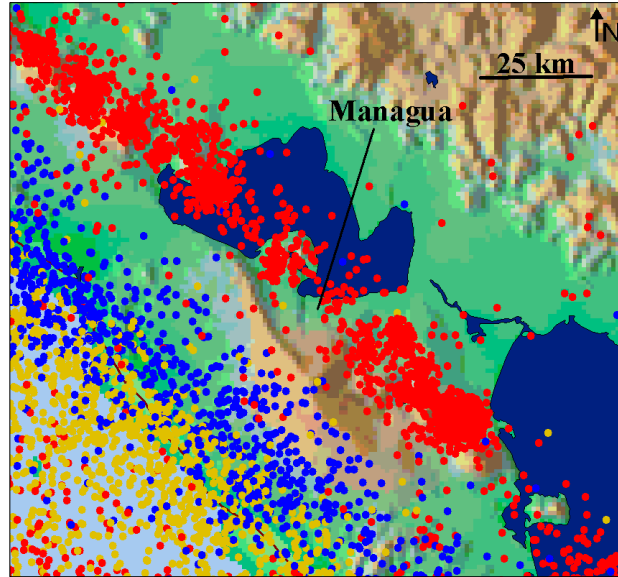
### **2.3 Sismicidad de Managua y composición geológica**

Managua se encuentra localizada dentro del área de influencia de los movimientos sísmicos producidos por el fallamiento geológico activo de origen tectónico, su posición la hace vulnerable a eventos sísmicos muy constantes y de magnitudes considerables, es por esto que es imprescindible tomar en cuenta la acción dinámica producida por estos movimientos de la corteza terrestre para el diseño de las estructuras que se construyen en la ciudad, principalmente aquellas estructuras verticales que puedan tener alturas mayores de 30 metros, ya que serán estas en las que las acciones dinámicas incurran a una mayor excitación de la estructura.

#### **2.3.1 Sismicidad de Managua 1975-1999.**

En la Figura 2.3, se aprecian los sismos registrados después de 1975 en el área de Managua y sus alrededores. Los sismos ocurridos en Managua en los últimos 25 años fueron de muy baja magnitud, y la mayoría de ellos ocurrió en los años 1970.

En los últimos años, ha habido prácticamente calma sísmica en Managua con relación a sismos con epicentro ubicado directamente en la ciudad. Lo anterior contrasta con la experiencia de los dos terremotos devastadores que destruyeron la ciudad dos veces en este siglo por movimientos de fallas en la propia ciudad. Esta extraña falta de sismos podría ser una peligrosa señal de la preparación de un nuevo evento sísmico de gran magnitud (INETER, 2005).



**Figura 2.3.** Registros de eventos sísmicos a partir de 1975. **Fuente:** (Talavera, 2005)

La Figura 2.3 muestra que los sismos superficiales (puntos rojos) se concentran en una banda muy estrecha de sólo 20 km de ancho. Managua se ubica directamente en el eje de esta banda y es la ciudad más peligrosa en Nicaragua. Los sismos muy profundos (puntos verdes y azules) son menos peligrosos porque la distancia espacial supera los 100 km (INETER, 2005).

Managua está situada en la costa sureña del Lago Xolotlán, entre dos segmentos de la cadena volcánica (ver Figura 2.4). Dentro de esa área se localiza una depresión estructural: el Graben de Managua. Es un micrograben dentro de la depresión Nicaragüense que tiene aproximadamente 15 km de ancho al sur y 26 km al norte, y una longitud de por lo menos 36 km (WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS, 1975).

El borde occidental del Graben de Managua lo forma una zona de colapso volcánico, de 8 a 10 km de ancho, cuya estructura principal es el alineamiento de Nejapa - Miraflores, una línea de conos de cenizas y calderas de colapso y de explosión que se extiende por unos 20 km en una dirección muy próxima al Norte-Sur (Hernández, Atakan, & Havskov, 1994).





**Figura 2.4.** Posición tectónica del área de Managua y flexión de la alineación volcánica cerca de esta. **Fuente:** (Martínez Bermúdez & Rodríguez Altamirano, 1995).

Dentro del Graben de Managua se encuentran numerosas fallas geológicas ligeramente curvadas, conformando un conjunto denso y complejo con orientación general NE-SO. En general las trazas de las fallas consisten en un grupo complejo de grietas, fisuras y fracturas en el terreno poco separadas y orientadas sistemáticamente, las cuales definen zonas continuas o semi continuas de fallas superficiales, la mayoría de las cuales alcanzan de 8 a 10 km de profundidad.

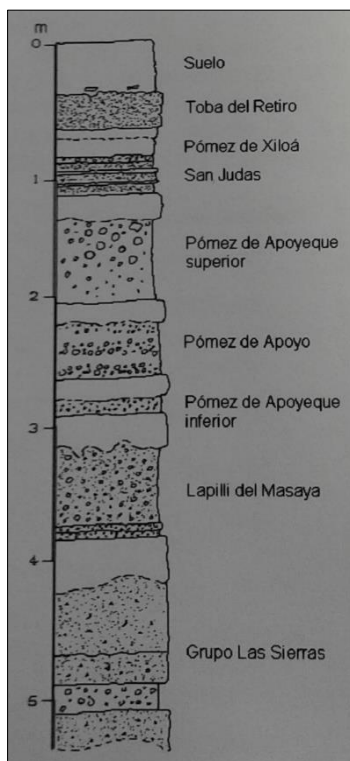
Las fallas geológicas dentro del graben de Managua han estado activas durante milenios y desencadenan movimientos sísmicos cíclicamente a profundidades focales de 5 a 12 km. A pesar de que estos eventos son de intensidad pequeña a moderada, son capaces de producir daños extensos, como en efecto sucedió durante los terremotos de 1931 y 1972 (Secretaría de Obras Públicas, 1973).

### 2.3.2 Geología del área de Managua.

La ciudad de Managua se asienta sobre una superficie relativamente plana, que se inclina suavemente hacia el Lago Xolotlán; inclinación interrumpida en varios lugares por lomas, la mayoría de origen volcánico.

El subsuelo de Managua (ver Figura 2.5), se caracteriza por la presencia de una secuencia volcano-sedimentaria donde se reconocen productos provenientes de los volcanes Masaya, Apoyeque, Apoyo, de los volcanes del lineamiento Miraflores-Nejapa, Motastepe y de otros edificios fuera de este lineamiento, como Chico Pelón y Tiscapa que quedan ahora como

remanentes de antigua actividad volcánica en el centro del área de estudio. La presencia de numerosos suelos fósiles demuestra la existencia de ciertos períodos de calma entre eventos volcánicos o tectónicos, que han permitidos el desarrollo de suelos de varios tipos. (Hradecky; INETER, 1997).



**Figura 2.5.** Columna estratigráfica generalizada. **Fuente:** (Moore Coleman, 1990).

Subyaciendo el área de Managua, se encuentra una brecha de toba volcánica (cantera) que pertenece a la parte superior del Grupo Las Sierras. Está cubierta por materiales piroclásticos del volcanismo del Holoceno; una secuencia que consiste de lapilli, pómez, cenizas, tobas, etc. Los suelos se clasifican principalmente como limos no cohesivos, arenas y gravas, de pobre a bien consolidados y con diferentes grados de cementación, presentando por lo general bajas densidades y alta porosidad (Valera, 1973).

### 2.3.3 Fallas y alineamientos principales.

Toda el área de Managua y sus alrededores está expuesta al riesgo sísmico. La zonificación del grado de la amenaza sísmica debería considerar el desarrollo tectónico-volcánico del área. Se consideran como las áreas más amenazadas, las zonas a lo largo de la falla Recreo sobre la costa Sur-Oeste del lago de Managua (alrededores de Mateare), el pie de las sierras de Mateare y Managua, el sistema de las calderas del volcán Masaya y la estructura Pull-apart de Managua, principalmente los alineamientos Miraflores-Nejapa y Cofradía. Debido a que el sistema volcánico está ubicado sobre el margen Sur-Oeste del graben de Managua,

tectónicamente muy activo, ocurren movimientos tectónicos intensos en esta zona. El pie de Las Sierras de Mateare y de Managua está formado por bloques tectónicos caóticamente arreglados (Strauch, 2000).

Los movimientos más recientes, geológicamente importantes, ocurrieron durante el terremoto de 1972, en el centro de Managua. Ha sido comprobado que las fallas del centro de Managua, activadas durante el terremoto, continúan en dirección meridional y entran en el mosaico de bloques tectónicos situados al sur de Managua. Algunas elevaciones y depresiones estructurales se pueden trazar en el territorio de la estructura Pull-apart de Managua, además en el centro de la ciudad una de las depresiones forma la depresión micrograben en las cercanías de Tiscapa; otra depresión se ubica al Este de la falla Cofradía, que es falla marginal del Pull-apart (Strauch, 2000).

### **2.3.4 Descripción de los terremotos.**

El estudio de la sismicidad local es posible a partir del conocimiento de las características y el potencial de los temblores que pueden generarse en una fuente determinada. (Barbat & Canet, 1994), afirman que las características más importantes que se deben considerar a fin de conseguir una descripción completa de los terremotos son las que se listan a continuación:

- Datos acerca de las fallas (posición, tipo, superficie de rotura).
- Datos relativos al foco (profundidad, mecanismo).
- Datos sobre los epicentros (localización).
- Datos acerca de su potencial destructivo (magnitud, intensidad).
- Características cinemáticas (registros de desplazamiento, velocidad y aceleración del movimiento del terreno o, al menos, sus valores máximos; frecuencia predominante de vibración).
- Duración del choque principal.
- Período de retorno.

### **2.4 Características geotécnicas de la ciudad de Managua**

La ciudad de Managua está situada en una depresión estructural conocida como el Graben de Managua, que es un micrograben de la “Depresión Nicaragüense” (Parrales & Picado, 2001). Debido a la existencia de edificios volcánicos y remanentes de antiguos volcanes, el subsuelo de Managua se caracteriza por la presencia de una secuencia volcano-sedimentaria, donde se ha identificado la presencia de numerosos suelos fósiles, lo que demuestra la existencia de ciertos períodos de calma entre eventos volcánicos o tectónicos y que ha permitido el desarrollo de suelos de diferentes tipologías (Hradecky; INETER, 1997).

A raíz del terremoto de 1972, (Faccioli, Santoyo, & T, 1973) elaboró un estudio de microzonificación en el área de Managua con fines de cimentación y realizó una propuesta de estratigrafía con base en valor de  $N$  de los ensayos *SPT* abordados en su estudio. Los ensayos *SPT* tuvieron en promedio una penetración de 15 metros. (Faccioli, Santoyo, & T, 1973), sugiere la siguiente clasificación de suelos:

- Suelos blandos ( $N < 10$ )
- Suelos medianamente densos ( $10 < N < 50$ )
- Suelos firmes o compactos ( $N > 50$ )

Los suelos superficiales, o suelos blandos, están compuestos por arenas limosas y pertenecen a los suelos de origen aluviales. La segunda capa está compuesta de suelos medianamente densos, y corresponde a arenas de densidad media, pómez, gravas y canteras. La tercera capa corresponde a arenas limosas muy compactadas o talpetate.

Los estudios abordados por (Faccioli, Santoyo, & T, 1973) permitieron obtener perfiles de la estratigrafía de la ciudad en la dirección Norte-Sur (NS) y Este-Oeste (EW), donde se aprecian las variaciones en los espesores de las capas del suelo propuesto.

El estudio de las características dinámicas de los suelos de Managua, por lo general, se ha basado en ensayos de estudios *SPT*, de manera que se establece una correlación entre el valor de  $N$  y la velocidad de ondas de corte de los diferentes estratos que pudieran componer el suelo.

(Faccioli, Santoyo, & T, 1973), definió modelos de velocidades en el sitio de la refinería de la ESSO, el Hotel Balmoral, Teatro Rubén Darío y la Colonia Centroamérica, mediante perforaciones VSP a 33, 26, 28 y 34 metros, respectivamente. (Faccioli, Santoyo, & T, 1973), propuso para cada sitio modelos de velocidades en tres estratos (exceptuando el sector de la refinería que contenía dos estratos). Las velocidades en basamento propuestas se encontraban en un rango de 550 a 600  $m/s$  por lo que, probablemente, se requiere de perforaciones a mayores profundidades para encontrar un basamento con características de roca (velocidades superiores a 760  $m/s$ ).

## CAPÍTULO III – REVISIÓN DE LITERATURA

### 3.1 Generalidades

#### 3.1.1 Tectónica global.

Los terremotos se producen en su mayoría como consecuencia de la actividad tectónica de la Tierra, aunque otros fenómenos pueden dar origen a un temblor, como las explosiones, el colapso de techos de cavernas y minas, etc. Sin embargo, la causa principal y la de mayor importancia desde el punto de vista de la ingeniería es el movimiento de las placas tectónicas debido a la frecuencia con que ocurren los sismos de origen tectónico, la energía que liberan y la extensión de las áreas que afectan (Newmark & Rosenblueth, 1978).

Durante la interacción de las placas tectónicas el material de la corteza de la Tierra es comprimido lentamente, incrementándose las tensiones con el tiempo, de tal modo que grandes volúmenes de rocas se deforman y se pliegan, acumulando energía potencial, hasta que la resistencia del material es excedida y este termina por romperse, liberando bruscamente la energía almacenada durante largos períodos que pueden ir desde decenas de años hasta varios siglos. Se produce entonces una perturbación que se transmite por medio de ondas elásticas que sacuden la superficie terrestre. Esto es un terremoto (Newmark & Rosenblueth, 1978).

##### 3.1.1.1 Placas tectónicas.

De acuerdo con los datos de la sismología, la Tierra se divide en tres capas concéntricas principales: la corteza, el manto y el núcleo, las cuales tienen propiedades físico-mecánicas distintas. Mientras que la corteza representa el 1% del volumen terrestre y el núcleo el 19%, el volumen del manto representa el 80% del volumen total de la Tierra (Barbat & Canet, 1994).

El manto superior de nuestro planeta se compone de una capa exterior, elástica y rígida, la cual conforma con la corteza terrestre, hasta una profundidad de 70 Km, una unidad por sus propiedades mecánicas: la litosfera. Existe otra capa, subyacente, en un intervalo de profundidades entre 70 y 250 Km, de fluidez elevada, llamada astenósfera (Zharkov, 1985).

La litósfera está fragmentada aproximadamente en 12 plataformas grandes, o placas litosféricas, que están en contacto entre sí y que se mueven como un todo cada una en direcciones diferentes, produciendo erupciones volcánicas y sismos.

El movimiento de las placas litosféricas está relacionado con el fenómeno de convección térmica del manto de la Tierra, es decir, las corrientes de magma que surgen del fondo del

manto hasta tocar la corteza y que luego se hundan en un movimiento continuo. Las placas litosféricas se distinguen por los cinturones de sismicidad que las rodean. De hecho, la distribución de los terremotos en estas zonas sísmicas estrechas, sirvió para identificar las placas, porque tales fajas de sismicidad corresponden a las fronteras de las placas que se separan, chocan o interactúan de los modos que se explican a continuación.

### ***3.1.1.2 Bordes o límites de interacción de las placas.***

La interacción de las placas tectónicas en sus bordes o límites puede ser de tres tipos (Zharkov, 1985):

1. Límites constructivos o de crecimiento de las placas (bordes divergentes).
2. Límites destructivos o de absorción de las placas (bordes convergentes).
3. Límites de deslizamiento relacionados con las fallas transformantes.

Los límites del primer tipo corresponden a zonas de dispersión de las placas, pues se separan a partir de las dorsales oceánicas, creando grandes fisuras submarinas por donde emerge el magma desde el manto, haciendo crecer las placas; son las zonas de extensión de la litosfera (Zharkov, 1985). Este tipo de contacto se conoce como extrusión (Barbat & Canet, 1994).

Los límites del segundo tipo corresponden a zonas de convergencia, donde las placas chocan entre sí en las zonas de subducción y en los del tercer tipo se deslizan unas con respecto a otras a lo largo de las fallas transformantes (Zharkov, 1985).

El modo de interacción que más interesa es el de los límites de convergencia, por ser de esta clase el de las placas litosféricas, cuya interacción influye directamente en las características geológicas de Nicaragua y condiciona la sismicidad que la afecta.

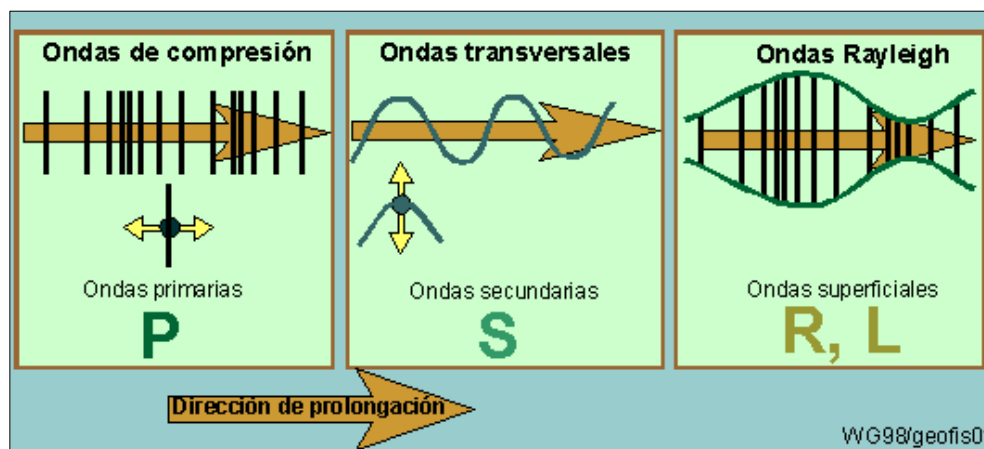
Los bordes convergentes pueden ser, a su vez, de tres tipos. Los del primero son encuadrados por fosas oceánicas luego de las cuales sigue un arco insular, muchas veces separado del continente por el mar marginal. Otro tipo de los límites de absorción está representado por la fosa oceánica, después de la cual va un sistema montañoso volcánico situado en el continente (Zharkov, 1985).

### **3.1.2 Ondas sísmicas.**

Las ondas sísmicas (u ondas elásticas), son la propagación de perturbaciones temporales del campo de esfuerzos que generan pequeños movimientos en un medio. Las ondas sísmicas pueden ser generadas por movimientos telúricos naturales, los más grandes de los cuales pueden causar daños en zonas donde hay asentamientos urbanos. Existe toda una rama de la sismología que se encarga del estudio de este tipo de fenómenos físicos. Las ondas sísmicas pueden ser generadas también artificialmente (en general por explosiones).

### 3.1.2.1 Tipos de ondas sísmicas.

Hay varios tipos de ondas sísmicas, y todas ellas se mueven de maneras diferentes. Los dos tipos de ondas principales son: las ondas de cuerpo y las ondas de superficie (ver Figura 3.1). Las ondas de cuerpo pueden viajar a través de las capas internas de la tierra, pero las ondas de superficie solo pueden moverse por la superficie del planeta como las ondas sobre el agua. La energía de los terremotos genera ondas de compresión y ondas superficiales (Rios, 2007).



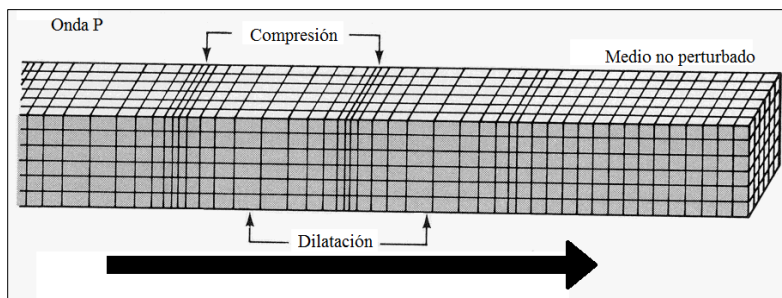
**Figura 3.1.** Tipos de ondas sísmicas. **Fuente:** (Rios, 2007)

#### 3.1.2.1.1 Ondas de cuerpo.

Las ondas de cuerpo viajan a través del interior de la Tierra. Siguen caminos curvos debido a la variada densidad y composición de la Tierra. Este efecto es similar al de refracción de ondas de luz. Las ondas de cuerpo transmiten los temblores preliminares de un terremoto, pero poseen poco poder destructivo. Las ondas de cuerpo son divididas en dos grupos: ondas primarias (*P*) y secundarias (*S*) (Rios, 2007).

##### - Ondas P.

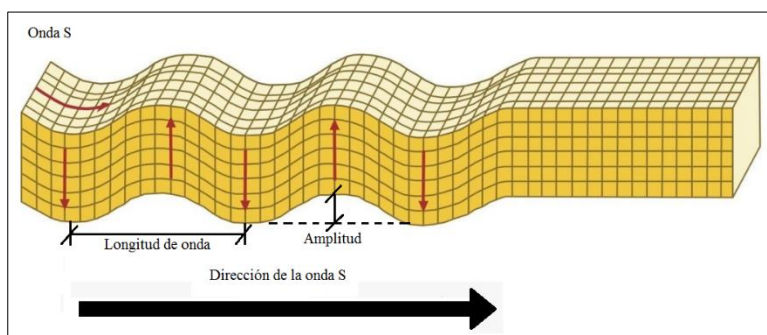
Las ondas *P* también conocidas como ondas de compresión o longitudinales, lo cual significa que el suelo es alternadamente comprimido y dilatado en la dirección de la propagación (ver Figura 3.2). Estas ondas generalmente viajan a una velocidad que es 1.73 veces mayor que las ondas *S* y pueden viajar a través de cualquier tipo de material. Velocidades típicas son 330 *m/s* en el aire, 1450 *m/s* en el agua y cerca de 5000 *m/s* en el granito (Armando, 2013).



**Figura 3.2.** Ondas P u ondas de compresión. **Fuente:** (Armando, 2013)

- Ondas S.

Las ondas *S* también conocidas como ondas de cizalla o transversales, se desplazan a través de la tierra y son más lenta que las ondas *P*, solo pueden moverse a través de roca sólida (ver Figura 3.3). Las ondas *S* mueven las partículas de roca de arriba hacia abajo o de lado a lado perpendicularmente a la dirección en que la onda está viajando (Vargas, 2015).



**Figura 3.3.** Ondas S u ondas transversales. **Fuente:** (Vargas, 2015)

3.1.2.1.2 Ondas superficiales.

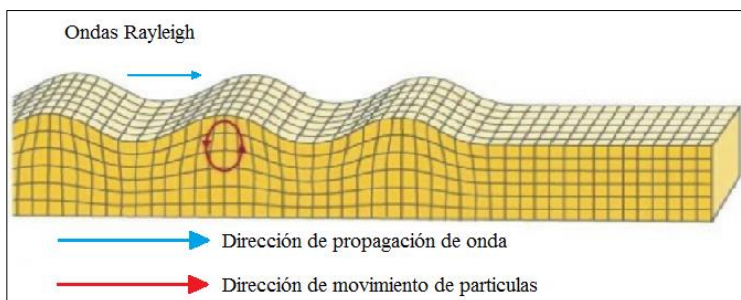
Las ondas superficiales son análogas a las ondas de agua y viajan sobre la superficie de la Tierra. Se desplazan a menor velocidad que las ondas de cuerpo. Debido a su baja frecuencia provocan resonancia en edificios con mayor facilidad que las ondas de cuerpo y son por ende las ondas sísmicas más destructivas. Existen dos tipos de ondas superficiales: Ondas Rayleigh y Ondas Love (Vargas, 2015).

- Ondas Rayleigh.

Las ondas Rayleigh, son ondas superficiales que viajan como ondulaciones similares a aquellas encontradas en la superficie del agua parecida a las ondas del mar y sus partículas se mueven en forma elipsoidal en el plano vertical, que pasa por la dirección de propagación (ver Figura 3.4). En la superficie, el movimiento de las partículas es retrógrado con respecto al avance de las ondas. La velocidad de las ondas Rayleigh es menor que la velocidad de las



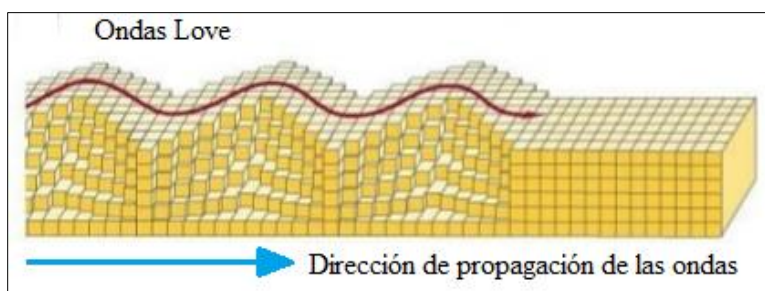
ondas  $S$  (transversales). La existencia de estas ondas fue predicha por Rayleigh (1885) quien presenció las ondas superficiales diseñando matemáticamente el movimiento de ondas planas en un espacio semi-infinito elástico.



**Figura 3.4.** Ondas Rayleigh. Fuente: (Vargas, 2015)

- Ondas Love.

Love (1911), descubrió la onda superficial que lleva su nombre, estudiando el efecto de vibraciones elásticas a una capa superficial. Las ondas Love requieren la existencia de una capa superficial de menor velocidad en comparación a las formaciones subyacentes o es decir un gradiente de velocidad positivo (la velocidad se incrementa) con la profundidad. Las ondas Love son ondas de cizalla, que oscilan solo en el plano horizontal, es decir ondas de cizalla horizontalmente polarizadas (ver Figura 3.5).



**Figura 3.5.** Ondas Love. Fuente: (Vargas, 2015)

### 3.2 Vibración ambiental (microtremores)

Se han propuesto diferentes enfoques para la determinación de los efectos superficiales de suelo, desde enfoques numérico-teóricos a experimentales. Los enfoques teóricos necesitan de un conocimiento del subsuelo que es de difícil y costosa obtención, por lo que se han realizado principalmente a un nivel científico sin generalizarse ampliamente. Entre los enfoques experimentales hay dos líneas principales de trabajo, unos basados en la medición del efecto durante terremotos y otros en la medición del ruido ambiental. Los basados en terremotos de baja intensidad tienen el inconveniente de la necesidad de tener instalados en el suelo un gran número de sensores a la espera de dichos terremotos y, cuando éstos se

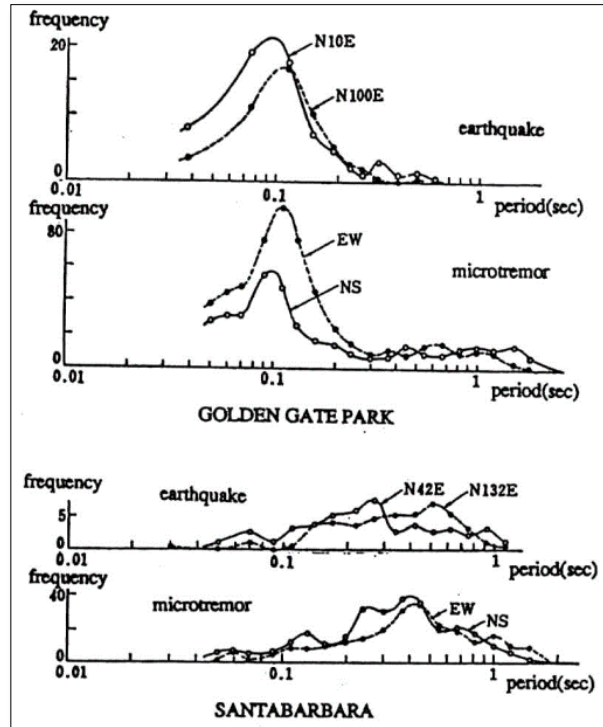
producen, sus resultados se han de extrapolar a terremotos de gran magnitud, con el posible error que se comete al no conocerse con precisión los posibles efectos no lineales del suelo. Los trabajos basados en la medida del ruido ambiental empezaron a popularizarse a partir del trabajo de Nakamura, basado en la técnica del cociente espectral (Nakamura, 1989). Esta técnica, aunque ha sido bastante refutada, se ha impuesto debido a su bajo costo, manejo de equipos y relativa facilidad de realización.

En general se define el efecto de suelo como el cociente entre el espectro de la componente horizontal de las ondas sísmicas en el sitio y este en el basamento rocoso debajo del sitio. A nivel práctico esto se realiza suponiendo que las acciones sísmicas en el basamento rocoso y en un afloramiento cercano son iguales. La técnica del cociente espectral se basa en la propiedad de que la componente vertical no es amplificada al atravesar el suelo, por lo cual se puede considerar que el cociente entre la componente horizontal y la vertical es un buen estimador del efecto de sitio. Nakamura propuso, que esto mismo se podía generalizar a lo que se conoce como ruido ambiental (Moreno & Alfaro, 2012)

El ruido ambiental o microtemores, es la superposición de las vibraciones del suelo producidas por efectos naturales (viento, tormentas, mareas, olas, etc.) o artificiales (tráfico de vehículos, paso de peatones, maquinaria, vibraciones de las estructuras civiles, ferrocarriles, etc.). Además también contienen vibraciones producidas por el viento, que son introducidas en el subsuelo por árboles, edificaciones o por su impacto con el relieve; estas vibraciones del suelo se encuentran con amplitudes entre  $1 \times 10^{-5}$  y  $1 \times 10^{-4}$  cm, con períodos de 0.05, 0.1 a 1 y 2 s, es relevante mencionar que la fuente del ruido ambiental no está asociada a terremotos (Romero, 2005).

En los últimos años se han realizado innumerables trabajos basados en esta técnica, contrastándose algunos con otras técnicas o con los efectos de los terremotos. A partir de estos, se ha llegado al consenso de que esta técnica es fiable para determinar el período predominante o fundamental del suelo, pero no así para determinar el grado de amplificación.

A pesar de este inconveniente, dado su bajo coste y su accesibilidad, se sigue utilizando profundamente ya que, aunque no se pueda conocer el factor de amplificación, como mínimo sirve para alertar de que estructuras civiles pueden presentar problemas debido a que son sensibles a las frecuencias en que el suelo muestra amplificación. Normalmente, los resultados se presentan en forma de mapas de períodos predominantes que se define como el valor para el cual el cociente espectral es máximo.



**Figura 3.6.** Comparación de la relación Frecuencia-Período entre sismos y microtemblores.

**Fuente:** (Kanai et al... 1961).

A nivel práctico, para el uso de la técnica, teóricamente es necesario que las fuentes que generan el ruido ambiental se encuentren lo suficientemente lejanas para que la vibración directa sea pequeña comparada con la vibración de la resonancia del subsuelo que ellas provocan. Esto ha llevado a suponer que es necesario medir en días con poco viento y alejado varios metros del tránsito de vehículos, peatones y presencia de edificios y árboles. Estas ideas se plantearon sin que hasta el momento no se haya empezado a realizar trabajos sobre esta situación. El trabajo que se presenta, estudia su aplicación en una zona de Managua densamente poblada, dentro de una universidad, y posiblemente se recoja información para mejorar la técnica de recolección y procesado de datos, enfocándose en esta zona (Moreno & Alfaro, 2012).

La vibración ambiental puede ser usada para determinar la importancia de los efectos de la interacción suelo-estructura, típicamente son estudiados en pruebas de vibración forzada o excitación sísmica (Moreno & Alfaro, 2012). A través de los microtemblores se pueden detectar y caracterizar efectos resonantes entre los períodos fundamentales de los edificios y los períodos dominantes del suelo sobre el cual están construidos. Esto se logra realizando mediciones con microtemblores para registrar la vibración y luego se hace una comparación entre los períodos de las estructuras y el suelo (ver Figura 3.6).

### 3.2.1 Cocientes espectrales H/V.

Nogoshi e Igarashi (1971), introdujeron por primera vez la idea de ver el cociente espectral H/V de una sola estación entre las componentes horizontal y vertical. Ellos mostraron su relación con la curva de elipticidad de la onda Rayleigh, y se aprovechó de la coincidencia entre el máximo de frecuencia más baja de la curva del cociente espectral H/V con la frecuencia de resonancia fundamental del suelo, utilizado como un indicador de la estructura subterránea. Esta técnica fue retomada más tarde por Nakamura (1989), quien afirmó que este cociente H/V es una estimación confiable de la función de transferencia del sitio de las ondas *S*. Esta técnica por su simplicidad y economía se extendió rápidamente por casi todo el mundo, e incluso a aplicaciones directas (Bard, 1999).

La interpretación de Nogoshi e Igarashi se sustenta en la suposición de que el ruido predominantemente consta de ondas superficiales. Bajo ese supuesto, muchos autores están de acuerdo en el siguiente argumento:

- Esta elipticidad depende de la frecuencia y presenta un pico agudo alrededor de la frecuencia fundamental de los sitios que exhiben un alto contraste de impedancia suficiente entre la superficie y los materiales profundos. Este pico se relaciona con una fuga de la componente vertical, correspondiente a una inversión del sentido de rotación de la fundamental onda Rayleigh.

Por otro lado, si comprobamos cuidadosamente los ejemplos dados en Nogoshi e Igarashi (1971), podemos ver claramente que, a la frecuencia máxima de H/V de la onda Rayleigh, la energía de la onda es muy pequeña, casi cero. La onda Rayleigh tiene su energía máxima en la frecuencia cercana al canal de H/V. Debido a esto, el pico del cociente H/V de microtremor no puede ser explicado por la energía de la onda Rayleigh. Como lo explica Nakamura (1989), el cociente H/V se determina en el rango de frecuencias de pico, puede ser explicado con la onda SH incidente vertical.

Esta técnica, aplicada a registros de microtremores, ofrece una estimación aproximada de la frecuencia natural de vibración del terreno, pero subestima demasiado los valores de amplificación relativa del suelo. Además, sólo nos permite obtener el período asociado al primer modo de vibrar de la estratigrafía del sitio, pero no define los períodos para modos superiores.

(Lermo, J, & Chávez-García, 1994) Compararon los resultados que obtuvieron de la técnica REHV aplicada a microtremores con los que obtuvieron de la técnica de cociente espectral estándar aplicada a registros de temblores. Concluyeron que los microtremores, cuando son analizados con la técnica REHV, permiten una estimación bastante aproximada del período dominante ( $T_0$ ) de sedimentos sujetos a amplificación dinámica, en un intervalo de

frecuencias de 0.3 a 10 Hz, junto con una estimación preliminar del nivel de amplificación relativa ( $A_r$ ).

### 3.3 Serie de Fourier

La representación de una función en la forma de una serie es una práctica común en matemáticas. Quizás las expansiones más familiares son las de la forma:

$$f(x) = \sum_{n=0}^{\infty} a_n \cdot x^n \quad (3.3.1)$$

En donde el conjunto base se compone de las funciones potencia  $1, x^2, x^3, \dots, x^n$ .

La serie de Fourier (1768 – 1830), es una expansión de una función periódica  $f(t)$  de período  $T = 2\pi/w$  en la que el conjunto base es el conjunto de funciones *seno*, obteniéndose la forma que sigue:

$$f(x) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \text{sen}(nwt + \phi_n) \quad (3.3.2)$$

La idea de expandir en una serie de este tipo fue usada por *Bernoulli, D' Alembert* y *Euler* (1750). Sin embargo fue Joseph Fourier, físico francés, quién desarrolló el método para casos generales; estando interesado en determinar el cambio en la distribución de temperatura a través del tiempo en los problemas de flujo de calor. En 1807 postuló una serie trigonométrica de la forma:

$$\sum_{n=0}^{\infty} [A_n \cos(nkx) + B_n \text{sen}(nkx)] \quad (3.3.3)$$

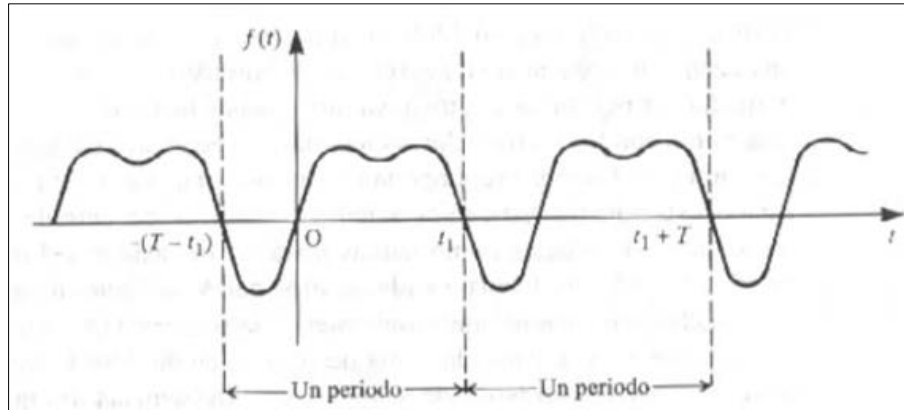
Debido a una considerable oposición de los matemáticos de la época, quienes lo cuestionaban por su falta de rigor; retrasó su texto *Théorie Analytique de la Chaleur* (Teoría analítica del calor) en 1822. Además de flujo de calor, esta clase de problemas incluye vibraciones estructurales, propagación de ondas y difusión (James, y otros, 2007).

Las series de Fourier proporcionan la herramienta ideal para analizar la respuesta en estado estacionario para señales periódicas de entrada (funciones senoidal), ya que permite representar las señales como sumas infinitas de senoides. Como la expansión en serie de Fourier consistirá de senoides con frecuencia  $nw$  -múltiplos de la señal  $w$  de entrada- la respuesta en estado estacionario también tendrá componentes con tales frecuencias.

### 3.3.1 Expansión en serie de Fourier.

#### 3.3.1.1 Funciones periódicas.

Una función  $f(t)$  se dice que es periódica si sus gráficas se repiten en intervalos regulares en su dominio. De modo que la gráfica puede repetirse en “tiras verticales” que son réplicas una de la otra, como se ilustra en la Figura 3.7.



**Figura 3.7.** Una función periódica con período  $T$ . **Fuente:** (James, y otros, 2007)

El intervalo entre dos réplicas sucesivas se llama período ( $T$ ) de la función. Por tanto, una función  $f(t)$  es periódica con período  $T$  para cualquier entero  $m$ , si para todos los valores  $t$  de su dominio (James, y otros, 2007),

$$f(t + mT) = f(t) \quad (3.3.4)$$

El número de repeticiones por unidad de  $t$ , se define como frecuencia ( $f$ ) de una función periódica, siendo el inverso del período. Así

$$f = 1/T \quad (3.3.5)$$

El término de frecuencia angular, medido en radianes por segundo, se define como

$$\text{Frecuencia angular} = 2\pi \cdot f = 2\pi/T \quad (3.3.6)$$

#### 3.3.1.2 Teorema de Fourier.

El teorema afirma que una función periódica que satisface ciertas condiciones puede expresarse como la suma de un número de funciones seno (o coseno) de diferentes amplitudes, fases y períodos (James, y otros, 2007). Si  $f(t)$  es una función periódica entonces:

$$f(t) = A_0 + A_1 \operatorname{sen}(wt + \phi_1) + A_2 \operatorname{sen}(2wt + \phi_2) + \dots + A_n \operatorname{sen}(nwt + \phi_n) + \dots \quad (3.3.7)$$

Donde las  $A$  y las  $\phi$  son constantes. El término  $A_1 \operatorname{sen}(wt + \phi_1)$  se llama modo fundamental con igual frecuencia que  $f(t)$ . El término  $A_n \operatorname{sen}(nwt + \phi_n)$  se llama la  $n$ -ésima armónica y tiene frecuencia  $nw$  que es  $n$  veces la del modo fundamental.  $A_n$  expresa la amplitud de la  $n$ -ésima armónica y  $\phi_n$  es su ángulo fase que mide el retraso o adelanto de la  $n$ -ésima armónica con referencia a una onda de seno pura de la misma frecuencia (James, y otros, 2007).

Usando identidades y sustitución se escribe la expansión en serie de Fourier

$$f(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nwt) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \operatorname{sen}(nwt) \quad (3.3.8)$$

Las variables  $a$  y  $b$  se llaman coeficientes de Fourier. En ingeniería eléctrica es una práctica común referirse a  $a_n$  y  $b_n$  respectivamente como las componentes en fase y en cuadratura de fase de la  $n$ -ésima armónica (James, y otros, 2007).

### 3.3.1.3 Los coeficientes de Fourier.

Antes de proceder a evaluar los coeficientes de Fourier, se enuncian las siguientes integrales, en las cuales  $T = 2\pi/w$ :

$$\int_d^{d+T} \cos nwt \, dt = \begin{cases} 0 & (n \neq 0) \\ T & (n = 0) \end{cases} \quad (3.3.9)$$

$$\int_d^{d+T} \operatorname{sen} nwt \, dt = 0 \quad (\text{toda } n) \quad (3.3.10)$$

$$\int_d^{d+T} \operatorname{sen} mwt \operatorname{sen} nwt \, dt = \begin{cases} 0 & (m \neq n) \\ \frac{1}{2}T & (m = n \neq 0) \end{cases} \quad (3.3.11)$$

$$\int_d^{d+T} \cos mwt \cos nwt \, dt = \begin{cases} 0 & (m \neq n) \\ \frac{1}{2}T & (m = n \neq 0) \end{cases} \quad (3.3.12)$$

$$\int_d^{d+T} \cos mwt \operatorname{sen} nwt \, dt = 0 \quad (\text{toda } m \text{ y } n) \quad (3.3.13)$$

Las integrales anteriores constituyen las relaciones de ortogonalidad para las funciones seno y coseno, y prueban que el conjunto de funciones;

$$\{1, \cos wt, \cos 2wt, \dots, \cos nwt, \text{sen } wt, \text{sen } 2wt, \dots, \text{sen } nwt\}$$

Es un conjunto ortogonal de funciones en el intervalo  $d \leq t \leq d + T$ . La elección de  $d$  es arbitraria en estos resultados y sólo es necesario integrar sobre un período de duración  $T$  (James, y otros, 2007). Si se integra la ecuación (3.3.8) con respecto a  $t$  sobre el período  $t = d$  a  $t = d + T$ , y usando las primeras dos integrales, encontramos que cada término del lado derecho es cero, excepto el término que involucra a  $a_0$ ; esto es, entonces:

$$\int_d^{d+T} f(t) dt = \frac{1}{2} a_0 \int_d^{d+T} dt + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \int_d^{d+T} \cos nwt dt + b_n \int_d^{d+T} \text{sen } nwt dt \right)$$

$$\int_d^{d+T} f(t) dt = \frac{1}{2} a_0 (T) + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n (0) + b_n (0)]$$

$$\int_d^{d+T} f(t) dt = \frac{1}{2} T a_0 \tag{3.3.14}$$

Así:

$$\frac{1}{2} a_0 = \frac{1}{T} \int_d^{d+T} f(t) dt$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) dt \tag{3.3.15}$$

Se puede ver que el término constante  $\frac{1}{2} a_0$  en la expansión en serie de Fourier representa el valor promedio de la función  $f(t)$  sobre un período (James, y otros, 2007). Ahora, para obtener el coeficiente de Fourier  $a_n$  ( $n \neq 0$ ), se multiplica la ecuación (3.3.8) término a término por  $\cos mwt$  y se integra con respecto a  $t$  sobre el período  $t = d$  a  $t = d + T$ , obteniendo:

$$\begin{aligned} \int_d^{d+T} f(t) \cos mwt dt &= \frac{1}{2} a_0 \int_d^{d+T} \cos mwt dt + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \int_d^{d+T} \cos nwt \cos mwt dt \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} b_n \int_d^{d+T} \cos mwt \text{sen } nwt dt \end{aligned}$$



Suponiendo que se puede integrar término a término y usando las integrales antes descritas, se encuentra que cuando  $m \neq 0$  la única integral distinta de cero del lado derecho es la que aparece en la primera sumatoria cuando  $n = m$  (James, y otros, 2007). Esto es, entonces:

$$\int_d^{d+T} f(t) \cos mwt dt = a_m \int_d^{d+T} \cos mwt \cos mwt dt = \frac{1}{2} T a_m$$

Obteniendo:

$$a_m = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) \cos mwt dt$$

Que, reemplazando  $m$  por  $n$ , resulta

$$a_n = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) \cos nwt dt \quad (3.3.16)$$

El valor de  $a_0$  dado en la ecuación (3.3.15), puede obtenerse tomando  $n = 0$  en la ecuación anterior, de manera que se puede escribir.

$$a_n = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) \cos nwt dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots) \quad (3.3.17)$$

Esto explica por qué el término en la expansión en serie de Fourier se toma como  $\frac{1}{2} a_0$  y no como  $a_0$ , ya que esto garantiza la compatibilidad de los resultados (James, y otros, 2007).

Posteriormente, para obtener el coeficiente de Fourier  $b_n$ , se multiplica la ecuación (3.3.8) por  $\text{sen } m\omega t$  y se integra con proporción a  $t$  sobre el período  $t = d$  a  $t = d + T$ , logrando;

$$\int_d^{d+T} f(t) \text{sen } mwt dt = \frac{1}{2} a_0 \int_d^{d+T} \text{sen } mwt dt + \sum_{n=1}^{\infty} \left( a_n \int_d^{d+T} \text{sen } mwt \cos nwt dt + b_n \int_d^{d+T} \text{sen } mwt \text{sen } nwt dt \right)$$

Haciendo una integración término a término (supuesta) y usando las integrales en las cuales  $T = 2\pi/w$ , se encuentra que la única integral distinta de cero del lado derecho es la que aparece en la segunda sumatoria cuando  $m = n$  (James, y otros, 2007). Esto es, entonces:

$$\int_d^{d+T} f(t) \operatorname{sen} mwt \, dt = b_m \int_d^{d+T} \operatorname{sen} mwt \operatorname{sen} mwt \, dt = \frac{1}{2} T b_m$$

Reemplazando  $m$  por  $n$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) \operatorname{sen} nwt \, dt \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (3.3.18)$$

Las ecuaciones (3.3.17) y (3.3.18) se conocen como las fórmulas de Euler (James, y otros, 2007). En resumen, si una función periódica  $f(t)$  de período  $T = 2\pi/\omega$  puede expresarse como una serie de Fourier, entonces dicha serie está dada por,

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(nwt) + \sum_{n=1}^{\infty} b_n \operatorname{sen}(nwt)$$

Donde los coeficientes están dados por las fórmulas de Euler

$$a_n = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) \cos nwt \, dt \quad (n = 0, 1, 2, \dots)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_d^{d+T} f(t) \operatorname{sen} nwt \, dt \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

Los límites de integración en las fórmulas de Euler pueden ser especificados sobre cualquier período, de manera que la elección de  $d$  sea arbitraria y que ayude en el cálculo de  $a_n$  y  $b_n$ .

En la práctica es común especificar  $f(t)$  sobre cualquiera de los períodos  $-\frac{1}{2}T \leq t \leq \frac{1}{2}T$  o  $0 \leq t \leq T$ , llevando a los límites de integración  $-\frac{1}{2}T$  y  $\frac{1}{2}T$  (esto es,  $d = -\frac{1}{2}T$ ) o  $0$  y  $T$  (esto es,  $d = 0$ ), respectivamente (James, y otros, 2007).

### 3.3.2 La transformada rápida de Fourier.

Se pretende desarrollar una teoría del análisis de Fourier, ahora de una forma conveniente para ejecutar en computadora. Los cálculos de una transformada de Fourier discreta aunque no se profundice en esta investigación, requieren multiplicaciones complejas, señales finitas y una función apropiada. De hecho, se necesita de una formulación del problema totalmente nueva antes de que la transformada discreta sea una herramienta práctica en ingeniería (James, y otros, 2007).

En 1965, Cooley y Tukey introdujeron la transformada rápida de Fourier (TRF) para reducir la complejidad computacional. En esta sección se introducirá brevemente este método; para una discusión completa ver E. E. Brigham. *The Fast Fourier Transform* (Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1974).

La serie de Fourier compleja de una función y la serie de Fourier de una función son en realidad la misma, es decir, dos maneras distintas de escribir lo mismo. De la definición de los coeficientes de Fourier, se tiene que, para cada número  $n > 0$ .

$$c_n = \frac{a_n - jb_n}{2}, \quad c_{-n} = \frac{a_n + jb_n}{2} \quad y \quad c_0 = \frac{a_0}{2}$$

Las series de Fourier representan funciones definidas en un intervalo de la recta o, equivalentemente, funciones periódicas en la recta. Para representar funciones definidas en toda la recta y no periódicas, se sustituye por la transformada de Fourier. Ahora es conveniente trabajar en forma compleja (James, y otros, 2007). Formalmente se puede deducir una expresión de la transformada de Fourier a partir de la serie. Suponga que  $f$  es una función periódica de período  $2p$ , entonces su serie de Fourier en forma compleja es:

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \left( \frac{1}{2p} \int_{-p}^p f(s) e^{-j\frac{n\pi}{p}s} ds \right) e^{j\frac{n\pi}{p}x}$$

Llamando  $w_n = n\pi/p$  y

$$h(w) = \int_{-p}^p f(s) e^{-jws} ds$$

La expresión anterior se escribe:

$$\frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{\infty} \int_{-p}^p (w_n - w_{n-1}) h(w_n) e^{jw_n x} \quad (3.3.19)$$

Lo cual parece una suma de *Riemann*. En el límite tendríamos.

$$\frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left( \int_{-\infty}^{\infty} f(s) e^{-jws} ds \right) e^{jw x} dx$$

Que contiene lo que se llama transformada de Fourier

$$\mathcal{F}(f)(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s)e^{-jws} ds = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \cos(-ws) ds + j \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \text{sen}(-ws) ds$$

$$\mathcal{F}(f)(w) = \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \cos(ws) ds - j \int_{-\infty}^{\infty} f(s) \text{sen}(ws) ds$$

Y por la fórmula de inversión que dará  $f$  a partir de la transformada:

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(f)(w)e^{jwx} dw$$

$$f(x) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(f)(w) \cos(wx) dw + \frac{j}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \mathcal{F}(f)(w) \text{sen}(wx) dw \quad (3.3.20)$$

La definición varía según los gustos en la aparición de ciertas constantes, por ejemplo el exponente puede ser  $-2jx\pi\xi$ ; en ese caso, la fórmula de inversión no lleva el factor  $1/2\pi$  multiplicando. Además, el exponente casi siempre lleva el signo menos ( $-$ ) (James, y otros, 2007).

### 3.4 Función de transferencia

La función de transferencia de un sistema lineal invariante en el tiempo está definida como la razón de la transformada de Laplace de la salida del sistema (o función de respuesta) a la transformada de Laplace de la entrada del sistema (o función de fuerza), bajo el supuesto de que todas las condiciones iniciales son cero (esto es, el sistema está inicialmente en un estado de reposo) (James, y otros, 2007).

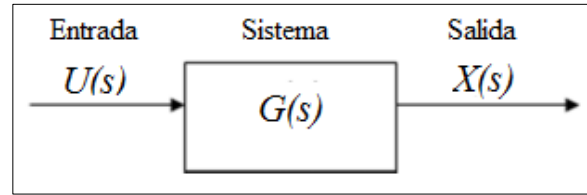
Las funciones de transferencia se usan frecuentemente en ingeniería para caracterizar las relaciones de entrada-salida de los sistemas lineales invariantes en el tiempo, y juegan un papel importante en el análisis y diseño de dichos sistemas (James, y otros, 2007).

Se considera un sistema lineal invariante en el tiempo caracterizado por la ecuación diferencial.

$$a_n \frac{d^n x}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 x = b_m \frac{d^m u}{dt^m} + \dots + b_0 u \quad (3.4.1)$$

Donde  $n \geq m$ , las  $a$  y las  $b$  son coeficientes constantes, y  $x(t)$  es la respuesta del sistema o salida correspondiente a la entrada o término de fuerza  $u(t)$  aplicado en el tiempo  $t = 0$ . Aplicando la transformada de Laplace a todo se llegará a la ecuación transformada. Como se

supone que todas las condiciones iniciales son cero, para obtener la ecuación transformada, simplemente reemplazamos  $d/dt$  por  $s$  obtenido (James, y otros, 2007).



**Figura 3.8.** Diagrama en bloque de la función de transferencia. **Fuente:** (James, y otros, 2007)

$$(a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0)X(s) - (b_m s^m + \dots + b_0)U(s) \quad (3.4.2)$$

Donde  $X(S)$  y  $U(s)$  denotan las transformadas de Laplace de  $x(t)$  y  $u(t)$  respectivamente. La función de transferencia del sistema  $G(s)$  se define como:

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{b_m s^m + \dots + b_0}{a_n s^n + \dots + a_0} \quad (3.4.3)$$

El sistema puede representarse en forma de diagrama por la operación dentro de la caja de la Figura 3.8. Esta representación se conoce como el diagrama en bloque de entrada-salida del sistema (James, y otros, 2007).

$$P(s) = b_m s^m + \dots + b_0 \quad (3.4.4)$$

$$Q(s) = a_n s^n + \dots + a_0 \quad (3.4.5)$$

La función de transferencia puede expresarse como:

$$G(s) = \frac{P(s)}{Q(s)} \quad (3.4.6)$$

Para hacer que el sistema sea físicamente realizable, los grados  $m$  y  $n$  de los polinomios  $P(s)$  y  $Q(s)$  deben ser tales que  $n \geq m$ . Esto se debe a que si  $m > n$ , la respuesta del sistema  $x(t)$  a una entrada realista  $u(t)$  involucrará impulsos (James, y otros, 2007).

La ecuación  $Q(s) = 0$  es llamada la ecuación característica del sistema, su orden determina el orden del sistema y sus raíces se conocen como los polos de la función de transferencia. De la misma manera, las raíces de  $P(s) = 0$  son los ceros de la función de transferencia.

Es importante darse cuenta de que, en general una función de transferencia solo se usa para caracterizar un sistema lineal invariante en el tiempo. Es una propiedad de propio sistema y es independiente tanto de la entrada como de la salida del sistema (James, y otros, 2007).

A pesar de que una función de transferencia caracteriza la dinámica del sistema, no proporciona información concerniente a la estructura física real del sistema, y de hecho los sistemas que son físicamente distintos pueden tener la misma función de transferencia.

$$G(s) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{1}{\alpha s^2 + \beta s + \gamma} \quad (3.4.7)$$

En el sistema masa-resorte-amortiguador,  $X(s)$  determina el desplazamiento  $x(t)$  de la masa y  $U(s)$  representa la fuerza aplicada  $F(t)$ , mientras que  $\alpha$  denota la masa,  $\beta$  el coeficiente de amortiguamiento y  $\gamma$  la constante de resorte. Por otro lado, en el circuito  $RLC$ ,  $X(s)$  determina la carga  $q(t)$  en el capacitor y  $U(s)$  representa la fem  $e(t)$  aplicada, mientras que  $\alpha$  denota la inductancia,  $\beta$  la resistencia y  $\gamma$  la capacitancia (James, y otros, 2007).

En la práctica, un sistema completo puede formarse de cierto número de componentes, cada una caracterizada por su propia función de transferencia y relacionadas con una operación en caja. Así que la función de transferencia de entrada-salida del sistema completo se obtiene por las reglas del álgebra del diagrama de bloque.

Como  $G(s)$  puede escribirse como:

$$G(s) = \frac{b_m (s - z_1)(s - z_2) \dots (s - z_m)}{a_n (s - p_1)(s - p_2) \dots (s - p_n)} \quad (3.4.8)$$

Donde  $z_i$  y  $p_i$  son los ceros y los polos de la función de transferencia respectivamente, observamos que  $G(s)$  es conocida, excepto por un factor constante, si se conocen las posiciones de todos los polos y los ceros. Por consiguiente, con frecuencia se usa un dibujo de los polos y los ceros de  $G(s)$  como una ayuda en el análisis gráfico de la función de transferencia (una convención común es marcar la posición de un cero mediante un círculo y la de un polo mediante una cruz). Como los coeficientes de los polinomios  $P(s)$  y  $Q(s)$  son reales, todas las raíces complejas suceden siempre en pares complejas conjugadas, así que el dibujo polo-cero es simétrico con respecto del eje real (James, y otros, 2007).

En el caso de ingeniería, las estructuras hacen empleo de la función de transferencia la cual consiste en tomar un sistema lineal, en donde la salida  $x(t)$  puede obtenerse por la aplicación a la entrada  $u(t)$  de un operador lineal  $G$ :

$$x(t) = G\{u(t)\} \quad (3.4.9)$$

En un sistema lineal debe cumplirse lo siguiente:

$$G\{au(t)\} = aG\{u(t)\} \quad (3.4.10)$$

$$G\{u_1(t) + u_2(t)\} = G\{u_1(t)\} + G\{u_2(t)\} \quad (3.4.11)$$

Donde una forma general de caracterizar un sistema lineal es mediante su función de respuesta  $h(t)$ . Esta representa la salida del sistema cuando la entrada es una delta de Dirac, a veces en filtrado digital se le llama impulso unitario (James, y otros, 2007). La salida  $x(t)$  puede representarse como la convolución de la entrada  $u(t)$  por  $h(t)$ , es decir:

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t)h(t - T)dT \quad (3.4.12)$$

Que se representa como:

$$x(t) = u(t) * h(t) \quad (3.4.13)$$

Si se aplica la transformada de Fourier a los dos miembros de la ecuación anterior se obtiene:

$$X(\omega) = U(\omega) * G(\omega) \quad (3.4.14)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia circular o angular ( $\omega = 2\pi F$ , siendo  $F$  la frecuencia) y  $X(\omega)$ ,  $U(\omega)$  y  $G(\omega)$  son funciones complejas de  $\omega$  transformada de  $x(t)$ ,  $u(t)$  y  $h(t)$ , respectivamente.

Mediante la transformada de Fourier se ha pasado del dominio del tiempo al dominio de la frecuencia.

La función compleja  $G(\omega)$ , la cual caracteriza el comportamiento del sistema, se denomina función de respuesta en frecuencia. De la ecuación (5.4.6):

$$G(\omega) = \frac{X(\omega)}{U(\omega)} \quad (3.4.15)$$

Es decir, la función de respuesta en frecuencia del sistema  $G(\omega)$ , se obtiene por el cociente entre dos funciones complejas  $X(\omega)$ , transformada de Fourier de la salida  $x(t)$  y  $U(\omega)$ , transformada de Fourier de la entrada  $u(t)$  (James, y otros, 2007).

El término “sistema lineal” se usa para indicar un grupo de objetos relacionados de tal modo que, cuando se aplica una entrada a un punto, se genera una salida en otro punto. Podemos pensar en un edificio como un sistema lineal (siempre y cuando la excitación sea pequeña); y en el movimiento del terreno debido a las ondas sísmicas generadas por el temblor como la excitación. Si consideramos la entrada al sistema como el espectro de la señal que corresponde al movimiento registrado en la base de la estructura, mientras que la salida al espectro que corresponde a los movimientos medidos en las partes altas de las paredes de la misma, la frecuencia fundamental de una estructura se puede obtener calculando el cociente espectral de la función de salida sobre la función de entrada (James, y otros, 2007).

### 3.5 Método de Nakamura

El método propuesto por Nakamura para estimar la respuesta empírica de las capas superficiales de suelo supone que el ruido de los microterremotos está compuesto por varios tipos de ondas, el método pretende eliminar el efecto de las ondas Rayleigh. Se considera que los microterremotos horizontal y vertical son similares en la base rocosa. Dichos microterremotos son amplificados por las capas de suelo blando que yacen sobre el substrato rocoso. Se considera, que los microterremotos horizontales se amplifican debido a multi-reflexiones de la onda  $S$ , en tanto que los microterremotos verticales lo hacen por multi-reflexiones de la onda  $P$ . La velocidad de propagación de la onda  $P$  es generalmente mayor a  $100\text{ m/s}$ , y los movimientos con frecuencias de aproximadamente  $10\text{ Hz}$  o menos, pueden no amplificarse, debido a la multi-reflexión en las capas superficiales de varias decenas de metros de espesor (Nakamura, 1989).

Por otra parte, el efecto de la onda Rayleigh aparece resaltado en el movimiento vertical. De tal forma, que la magnitud de su efecto puede ser conocida a partir de la relación entre el movimiento vertical en superficie y el movimiento vertical en el afloramiento rocoso. Normalmente, el efecto de la onda Rayleigh es cercano a cero cuando la relación es aproximadamente la unidad. En la medida en que la relación aumenta el efecto de las ondas Rayleigh puede volverse crítico. La propuesta de Nakamura pretende eliminar este efecto (Nakamura, 1989).

La interpretación de Nakamura del cociente  $H/V$  se basa en la suposición de que el efecto de las ondas superficiales puede ser “eliminado”, de modo que el resultado final, está en relación directa con las funciones de transferencia para las ondas  $SH$ . Su primera explicación (Nakamura, 1989), se basa en tres supuestos fuertes y recibió muchas críticas por varios expertos, lo que llevó a una segunda explicación, ligeramente modificada (Nakamura, 2000). En esencia se espera los microtemores en las ondas de cuerpo y las ondas superficiales, la técnica asume que:



- Los microtemores consisten en ondas Rayleigh, propagándose en una capa que está encima de un semiespacio.
- El movimiento es totalmente debido a fuentes locales y todas las fuentes profundas son despreciadas.
- Las fuentes locales no afectan el movimiento de los microtemores en la base del estrato del suelo. Matemáticamente se expresa de la siguiente manera:

$$S_T = \frac{S_{HS}}{S_{HB}} \quad (3.5.1)$$

Donde  $S_T$  es la función de respuesta en frecuencia de estratos superficiales,  $S_{HS}$  y  $S_{HB}$  son los espectros de amplitud de Fourier de las componentes horizontales del movimiento en la superficie y el incidente entre el basamento rocoso y las capas superficiales, respectivamente (Jaramillo, Piña, & Aguilar, 2012).

Sin embargo, el espectro de la componente horizontal en la superficie  $S_{HS}$ , se afecta fácilmente por ondas superficiales. Ya que en la mayoría de los casos el ruido artificial se propaga principalmente como ondas Rayleigh, probablemente  $S_{HS}$  se encuentra afectado por estas. El efecto de las ondas Rayleigh debe ser incluido en el espectro de la componente vertical del movimiento en la superficie  $S_{VS}$ , pero no en el espectro de la componente vertical del movimiento en el basamento  $S_{VB}$  (Jaramillo, Piña, & Aguilar, 2012).

Asumiendo que el movimiento vertical no se amplifica por las capas superficiales,  $E_S$  representa el efecto de la onda Rayleigh en el movimiento vertical.

$$E_S = \frac{S_{VS}}{S_{VB}} \quad (3.5.2)$$

Si no hay onda Rayleigh  $E_S = 1$ . Si se aumenta el efecto de la onda Rayleigh  $E_S$  se hace mayor que la unidad (Jaramillo, Piña, & Aguilar, 2012).

Asumiendo que el efecto de la onda Rayleigh es igual para las componentes vertical y horizontal, se considera que  $S_T/E_S$  es una función de respuesta en frecuencia  $S_{TT}$  más confiable, después de eliminar el efecto de las ondas Rayleigh.

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} \quad (3.5.3)$$

$$S_{TT} = \frac{R_S}{R_B} \quad (3.5.4)$$

Donde:

$$R_S = \frac{S_{HS}}{S_{VS}} \quad (3.5.5)$$

$$R_B = \frac{S_{HB}}{S_{VB}} \quad (3.5.6)$$

$$S_{TT} = \frac{S_T}{E_S} = \frac{\frac{S_{HS}}{S_{HB}}}{\frac{S_{VS}}{S_{VB}}} \quad (3.5.7)$$

$R_S$  y  $R_B$  fueron obtenidas dividiendo el espectro horizontal entre el espectro vertical, para los microterremotos en superficie y en el basamento.  $R_B$  está cerca a la unidad, para un rango relativamente amplio de frecuencias.

Esto implica que para el basamento, la propagación es la misma en todas las direcciones.

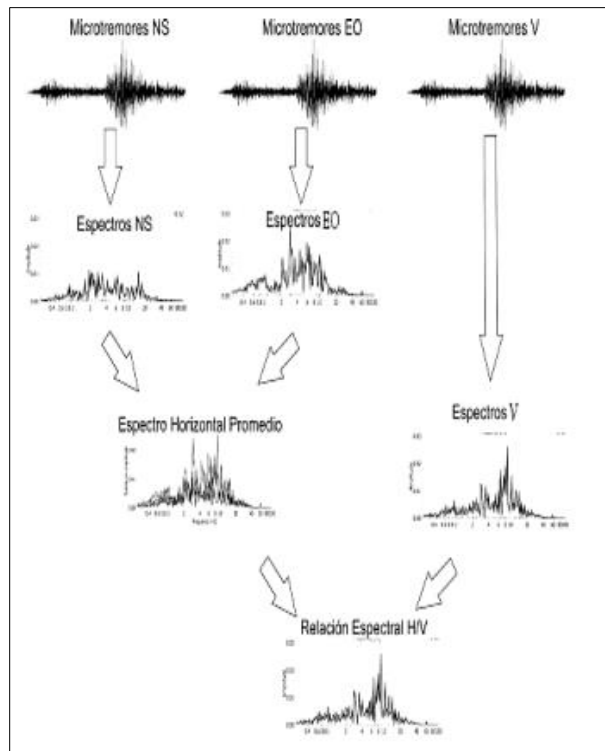
$R_B \approx 1$  y por tanto:  $S_{TT} \approx R_S$ .

Esto significa que la función de respuesta en frecuencia de las capas superficiales puede ser estimada a partir del movimiento en superficie. En otras palabras, el movimiento vertical en la superficie retiene las características del movimiento horizontal en el sub-estrato, sustituyendo el último. Pero  $R_S$  se vuelve más o menos 1 en el rango de frecuencias donde la onda Rayleigh prevalece, y esto no es notorio en la función de respuesta en frecuencia estimada. Hasta este punto se asume que  $R_S$  incluye dicho efecto con lo cual se elimina el efecto de la onda Rayleigh (Jaramillo, Piña, & Aguilar, 2012).

Sin embargo, es de nombrar, que la exactitud de la estimación decae cuando existe un ruido coincidente con la frecuencia predominante de la función de respuesta en frecuencia estimada.

$R_B$  Puede estar libre del efecto de las ondas Rayleigh y tener exclusivamente las características de un punto dado. Consecuentemente, una  $S_{TT}$  más confiable puede estimarse multiplicando por  $1/R_B$  como un término de compensación cuando se suministra la información del basamento.

(Lachet & Bard, 1994), investigaron la aplicabilidad tanto numérica como teórica de la técnica de Nakamura, considerando registros en una estación sujeta a fuentes de ruido aleatorio. Ellos concluyeron, que la técnica de Nakamura puede ser usada para determinar la frecuencia fundamental de resonancia del estrato de suelo blando, pero falla al predecir la amplificación de las ondas en superficie. Además, ellos mostraron que la frecuencia fundamental de resonancia del estrato, obtenida con la técnica de Nakamura usando simulaciones de ruido ambiental; es independiente de la fuente de excitación, dependiente de la relación de Poisson's y controlada por la curva de polarización de la onda Rayleigh. En la Figura 3.9 se muestra un diagrama de flujo que especifica como estimar  $S_{TT}$ .



**Figura 3.9.** Diagrama de flujo para el procesamiento de señales con la técnica de cocientes espectrales H/V. **Fuente:** (Jaramillo, Piña, & Aguilar, 2012).

### 3.6 Funciones utilizadas en el software MatLab

A continuación se presenta una breve descripción de algunas funciones que se usaron del software MatLab R2015a, en la cual se incluye un ejemplo típico de cada función (Little & Moler, 1984).

#### a. Función abs.

Sintaxis.

$$Y = \text{abs}(X)$$

Descripción.

La función *abs* (absoluto) devuelve el valor absoluto y la magnitud de un número.  $Y = abs(X)$  devuelve el valor absoluto de cada elemento de array  $X$ . Si  $X$  es un número complejo,  $abs(x)$  devuelve la magnitud del número complejo (Little & Moler, 1984).

Ejemplo de magnitud del número complejo.

$$y = abs(3 + 4i) = |3 + 4i| = \sqrt{3^2 + 4^2} = 5$$

Argumentos de entrada.

La matriz de entrada, especificado como un escalar, vector o matriz multidimensional  $X$  puede ser un único array (valor), matriz, matriz de entero con signo, o la matriz de duración. El tamaño y tipo de datos de la matriz de salida es la misma que la matriz de entrada (Little & Moler, 1984).

**b. Función *dim*.**Sintaxis.

$$B = flipdim(A, dim)$$

Descripción.

La función *dim* (volteo tenue) modifica la matriz en una dimensión especificada.  $B = flipdim(A, tenue)$  devuelve una dimensión o matriz con un volteado. Cuando el valor de *dim* es 1, la matriz se invierte de modo de fila hacia abajo. Cuando *dim* es 2, la matriz es volteada por columnas de izquierda a derecha.  $flipdim(A, 1)$  Es la misma que  $flipud(A)$ , y  $flipdim(A, 2)$  es el mismo que  $fliplr(A)$  (Little & Moler, 1984).

Ejemplo de  $flipdim(A, 1)$ , donde

$$A = \begin{array}{cc} 1 & 4 \\ 2 & 5 \\ 3 & 6 \end{array} \quad \begin{array}{c} genera \\ \\ \end{array} \quad \begin{array}{cc} 3 & 6 \\ 2 & 5 \\ 1 & 4 \end{array}$$

**c. Función *fftn*.**Sintaxis.

$$Y = fftn(X) \qquad Y = fftn(X, siz)$$

Descripción.

$Y = \text{fftn}(X)$  calcula la Transformada de Fourier Discreta ( $DFT$ ) de  $X$ , computada con una transformación ( $FFT$ ), algoritmo de Fourier de manera rápida y multidimensional. El resultado de  $Y$  es del mismo tamaño que  $X$  (Little & Moler, 1984).

Datos de ayuda.

$FFT$  soporta entradas de tipos de datos doble y una individual. Si llama  $FFT$  con la sintaxis  $y = \text{fftn}(X, \dots)$ , la salida  $y$  tiene el mismo tipo de datos que la entrada  $X$  (Little & Moler, 1984).

**d. Función nextpow2.**Sintaxis.

$$P = \text{nextpow2}(A)$$

Descripción.

La función  $\text{nextpow2}$  calcula exponentes con potencias mayores a 2.  $P = \text{nextpow2}(A)$  devuelve los exponentes de las potencias más pequeñas de 2 que satisfagan  $2^p \geq |A|$  para cada elemento en  $A$  (Little & Moler, 1984).

Se puede usar esta función cuando la señal se pasa a  $FFT$ . Si lo hace, puede acelerar el cálculo de la  $FFT$  cuando la longitud de la señal no es una potencia exacta de 2 (Little & Moler, 1984).

## Ejemplos.

- Potencia de 2 de los valores enteros dobles.

Definir un vector de valores enteros dobles y calcular los exponentes para la siguiente potencia de 2 mayor que esos valores.

$$a = [1 \ -2 \ 3 \ -4 \ 5 \ 9 \ 519];$$

$$p = \text{nextpow2}(a)$$

$$p = 0 \quad 1 \quad 2 \quad 2 \quad 3 \quad 4 \quad 10$$

- Calcula las siguientes potencias positivas de 2. ( $\text{np2} = 2.^p$ ).

$$\text{np2} = 1 \quad 2 \quad 4 \quad 4 \quad 8 \quad 16 \quad 1024$$

Para conservar el signo de los valores originales, úsese `[np2.* sign(a)]`.

`ans = 1 - 2 4 - 4 8 16 1024`

### e. Transformada rápida de Fourier (FFT).

#### Sintaxis.

$$Y = \text{fft}(x)$$

$$Y = \text{fft}(X, n)$$

$$Y = \text{fft}(X, [], \text{dim})$$

$$Y = \text{fft}(X, n, \text{dim})$$

#### Definiciones.

Las funciones  $Y = \text{fft}(x)$  y  $y = \text{ifft}(x)$  implementan la pareja transformarse y transformada inversa dada para los vectores de longitud N por:

$$X(k) = \sum_{j=1}^N x(j) \omega_N^{(j-1)(k-1)}$$

$$x(j) = (1/N) \sum_{k=1}^N X(k) \omega_N^{-(j-1)(k-1)}$$

Donde  $\omega_N = e^{(-2\pi i)/N}$  es una raíz n-ésima de la unidad.

#### Descripción.

$Y = \text{fft}(x)$  devuelve la transformada discreta de Fourier (*DFT*) de vector  $x$ , calculado con una transformación (*FFT*), que es un algoritmo rápido de Fourier (Little & Moler, 1984).

$Y = \text{fft}(X, n)$  devuelve la (*DFT*) de  $N$  puntos.  $\text{fft}(X)$  es equivalente a  $\text{fft}(X, n)$  donde “ $n$ ” es el tamaño de  $X$  en la primera dimensión más de un elemento. Si la longitud de  $X$  es menor que  $n$ ,  $X$ , se rellena con ceros en la longitud  $n$ . Si la longitud de  $X$  es mayor que  $n$ , la secuencia  $X$  se trunca. Cuando  $X$  es una matriz, la longitud de las columnas se ajusta del mismo modo (Little & Moler, 1984).

$Y = \text{fft}(X, [], \text{dim})$  y  $Y = \text{fft}(X, n, \text{dim})$  se aplica la operación *FFT* a través de la tenue dimensión.

#### Ejemplos.

Un uso común de transformadas de Fourier, es encontrar los componentes de frecuencia de una señal que está enterrada en una señal de dominio de tiempo ruidoso. Considere datos

muestreados a 1000 Hz, se tiene que formar una señal que contenga una senoide de 50 Hz de amplitud sinusoidal de 120 Hz y 0.7 de amplitud 1 y corrompida con un poco de ruido aleatorio de media cero:

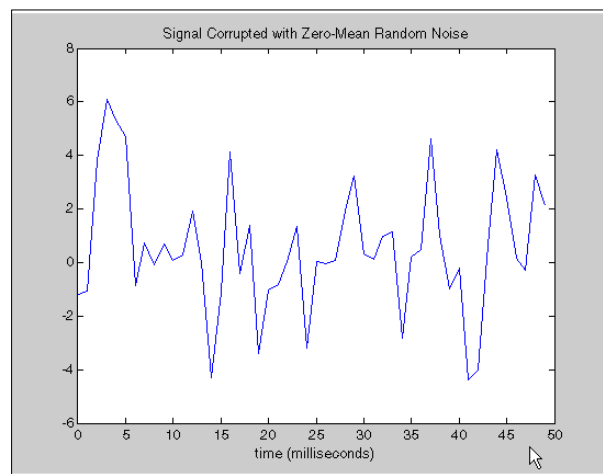
En la Figura 3.10 se observa el código en MatLab.

```

Fs = 1000;           % Sampling frequency
T = 1/Fs;           % Sample time
L = 1000;           % Length of signal
t = (0:L-1)*T;      % Time vector
% Sum of a 50 Hz sinusoid and a 120 Hz sinusoid
x = 0.7*sin(2*pi*50*t) + sin(2*pi*120*t);
y = x + 2*randn(size(t)); % Sinusoids plus noise
plot(Fs*t(1:50),y(1:50))
title('Signal Corrupted with Zero-Mean Random Noise')
xlabel('time (milliseconds)')

```

**Figura 3.10.** Ejemplo de un código en MatLab para encontrar las componentes de frecuencia de una señal. **Fuente:** Opción de ayuda en MatLab.



**Figura 3.11.** Gráfica de señal dañada con ruido aleatorio de media cero. **Fuente:** Opción de ayuda en MatLab.

Es difícil identificar los componentes de frecuencia al ver la señal original (ver Figura 3.11). La conversión de dominio de frecuencia por medio de la transformada de Fourier discreta de la señal con ruido, en el siguiente código (ver Figura 3.12), se encuentra tomando la transformada rápida de Fourier (*FFT*):

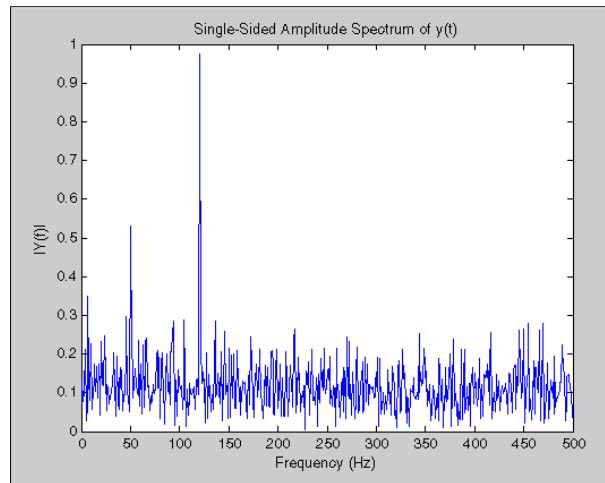
```

NFFT = 2^nextpow2(L); % Next power of 2 from length of y
Y = fft(y,NFFT)/L;
f = Fs/2*linspace(0,1,NFFT/2+1);

% Plot single-sided amplitude spectrum.
plot(f,2*abs(Y(1:NFFT/2+1)))
title('Single-Sided Amplitude Spectrum of y(t)')
xlabel('Frequency (Hz)')
ylabel('|Y(f)|')

```

**Figura 3.12.** Ejemplo de un código en MatLab donde especifica la transformada rápida de Fourier.  
**Fuente:** Opción de ayuda en MatLab.



**Figura 3.13.** Gráfica de amplitud del espectro. **Fuente:** Opción de ayuda en MatLab.

La razón principal de las amplitudes no es exactamente en el 0.7 y el 1, sino es a causa del ruido. Varias ejecuciones de este código (incluyendo recálculo de “y”) producen diferentes aproximaciones a 0.7 y 1 (ver Figura 3.13). La otra razón es que se tiene una señal de longitud finita. El aumento de L de 1000 a 10000 producirá mucho mejores aproximaciones (Little & Moler, 1984).

#### Datos de ayuda.

fft soporta entradas de tipos de datos doble y una individual. Si llama fft con la sintaxis `y = fft(X, ...)`, la salida y tiene el mismo tipo de datos que la entrada X.

#### **f. Función clear all.**

##### Sintaxis.

`clear all`



Descripción.

Borra todos los objetos en el espacio de trabajo de MatLab y cierra el motor MuPAD asociado con el espacio de trabajo de MatLab y restablecer todos sus supuestos (Little & Moler, 1984).

**g. Añadir comentarios a los programas.**

Al escribir un código, es una buena práctica añadir comentarios que describan el código. Comentar permite que otros entiendan el código, y puede refrescar la memoria cuando regrese al software más tarde. Se añade un comentario usando el símbolo de porcentaje (%) (Little & Moler, 1984).

Ejemplo.

% Sume todos los elementos del vector.

```
y = sum(x) % Utilice la función suma.
```

Para comentar varias líneas de código, se pueden utilizar los operadores bloque de comentario, % {y%}. Para comentar parte de una declaración que abarca varias líneas, utilice puntos suspensivos (...) en lugar de un signo de porcentaje.

**h. Función length.**

Sintaxis.

*Length(obj)*

Descripción.

Longitud (*obj*) devuelve la longitud de *obj*. Es equivalente al comando *max* (tamaño (*obj*)).

**i. Función linspace.**

Sintaxis.

$y = \text{linspace}(x_1, x_2)$  y  $y = \text{linspace}(x_1, x_2, n)$

Descripción.

La función *linspace* genera vectores linealmente espaciados.  $y = \text{linspace}(x_1, x_2, n)$  genera *n* puntos. La separación entre los puntos es  $(x_2 - x_1)/(n - 1)$ .

*Linspace* es similar al operador de colon, ":", pero da un control directo sobre el número de puntos y siempre incluye los puntos finales. Otra función similar es *logspace* (función de hermanos), que genera valores logarítmicamente espaciados (Little & Moler, 1984).

Ejemplo.

Vector con un número especificado de valores.

Crear un vector de 7 puntos uniformemente espaciados en el intervalo  $[-5,5]$ .

$y_1 = -5.0000 \quad -3.3333 \quad -1.6667 \quad 0 \quad 1.6667 \quad 3.3333 \quad 5.0000$

Estas y otras funciones se usaron para poder escribir el código; para conocer sobre otras funciones puede pulsar el botón de ayuda de MatLab, donde se encuentra una librería extensa y detallada de las funciones, además de documentación sobre aplicaciones y tutoriales (Little & Moler, 1984).

### 3.7 Medidas descriptivas de estadística

La estadística facilita analizar datos de una manera breve y clara, por ejemplo, a través de tablas o gráficas, y transmitir las características principales de la información representada en la muestra; de modo que no sea necesario el examen de todos los datos (Carrasco & Zuñiga, 2007).

En este estudio se usaron medidas descriptivas de posición, como es la media aritmética; y medidas de dispersión, siendo a su vez, el rango, la varianza y la desviación estándar.

En estadística, las medidas de posición indican un valor alrededor del cual los datos parecen agruparse de cierta manera, como si fuese “centro de gravedad de los datos”, dejando valores por debajo y por encima de él. A su vez, las medidas de dispersión, cuantifican la separación de los datos entre sí, respecto de un punto de referencia central como la media aritmética; cuanto menor es la dispersión, tanto mayor será la precisión del sistema de medición (Carrasco & Zuñiga, 2007).

#### 3.7.1 Media aritmética.

Es el valor medio ponderado de la serie de datos (Carrasco & Zuñiga, 2007). Se pueden calcular diversos tipos de media, aquí se usará la media aritmética y/o promedio, ya que es el promedio de las mediciones individuales que se tienen en la muestra, se determina con la fórmula siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (3.7.1)$$

Donde:

$\bar{x}$  = Media muestral.

$x_i$  = Valor i-ésimo de la muestra.

$n$  = Número de datos de la muestra.

### 3.7.2 Rango.

El rango es la diferencia entre el valor mayor y el valor menor encontrado en el conjunto de elementos, también se le denomina recorrido, ya que indica entre que valores hace su recorrido la variable de interés (Carrasco & Zuñiga, 2007); se establece de la siguiente manera:

$$R = V_M - V_m \quad (3.7.2)$$

Donde:

$R$  = Rango o recorrido.

$V_M$  = Valor mayor en la muestra.

$V_m$  = Valor menor en la muestra.

### 3.7.3 Varianza.

La varianza mide la distancia existente entre los valores de la serie y la media. Se calcula como sumatoria de las diferencias al cuadrado entre cada valor y la media, multiplicadas por el número de veces que se ha repetido cada valor (Carrasco & Zuñiga, 2007). La sumatoria obtenida se divide por el tamaño del conjunto. Se simboliza por  $s$  y se calcula a como sigue:

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (3.7.3)$$

### 3.7.4 Desviación estándar.

Es conveniente contar con otro estadígrafo que, basado en el valor de la varianza, sirva para dar una medida de la dispersión en la misma dimensión en que están los datos. Esta medida es la desviación estándar; que mide la diferencia promedio que existe entre cada dato la media aritmética. Se simboliza por  $S$  y se obtiene a partir de la varianza (Carrasco & Zuñiga, 2007).

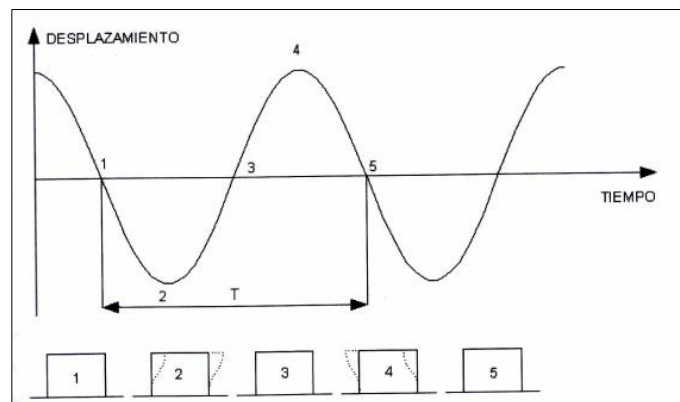
$$S = \sqrt{s^2} \quad (3.7.4)$$

La desviación estándar, al igual que la media y la varianza, es un índice muy sensible a las puntuaciones extremas, lo que significa que un valor muy disperso o inalterado, afectará drásticamente los resultados y por ende, la relación entre ellos. En los casos donde no se pueda encontrar la media aritmética, tampoco será posible hallar la desviación estándar. Cuanto más pequeña sea la desviación estándar, mayor será la concentración de datos alrededor de la media (Carrasco & Zuñiga, 2007).

### 3.8 Suelo y estructura

#### 3.8.1 Período fundamental de las estructuras.

El período fundamental de una estructura es el tiempo que la estructura toma para completar un ciclo de vibración.



**Figura 3.14.** Período de vibración de un sistema de un grado de libertad. **Fuente:** (Giraldo, Alfaro, Pujades, & Canas, 1999).

Si se sigue el ciclo de vibración de una estructura usando la Figura 3.14, se muestra en la posición 1 que la masa está en su posición de equilibrio (el desplazamiento es nulo), de ahí se mueve hacia la derecha hasta llegar al máximo desplazamiento en la posición 2. A partir de este punto el desplazamiento disminuye y regresa a su posición de equilibrio en la posición 3, continua moviéndose hacia la izquierda hasta alcanzar el máximo desplazamiento de ese lado en la posición 4. Después de este punto la masa comienza de nuevo a desplazarse hacia la derecha hasta alcanzar nuevamente la posición de equilibrio. Así un ciclo completo de movimiento está dado por las posiciones 1 – 2 – 3 – 4 – 5. En la posición 5 el estado del sistema (desplazamiento y velocidad) son los mismos a la posición 1, en la cual la estructura está lista para iniciar un nuevo ciclo (Giraldo, Alfaro, Pujades, & Canas, 1999).

Matemáticamente el período natural de vibración ( $T$ ) de un sistema no amortiguado está dado por:

$$T = \frac{2\pi}{\omega} \quad (3.8.1)$$

Donde  $\omega$  es la frecuencia circular de vibración que está dada por:

$$\omega = (K/M)^{1/2} \quad (3.8.2)$$

En la que:

$m = \text{masa del peso } P \text{ en } Kg \cdot \text{seg}^2/cm$

$K = \text{constante elástica del sistema en } Kg/cm$

Asimismo, la frecuencia natural de vibración ( $F$ ) es el número de ciclos por unidad de tiempo. Matemáticamente está dado por:

$$F = \frac{1}{T} = \frac{\omega}{2\pi} \quad (3.8.3)$$

Para la determinación de los períodos fundamentales de los edificios los métodos más empleados son:

### **1. Métodos Exactos.**

Sistemas con un solo grado de libertad, Sistemas con  $n$  grados de libertad y sistemas con infinitos grados de libertad.

### **2. Métodos Aproximados.**

Método Rayleigh, Método Dunkerley, Método Vianello – Stodola, Método H. Holzer, Método M. P. White, Método M. G. Salvadori, Método R. G. Merritt – G. W. Housner, Método R. Husid, Método M. Ifrim, entre otros.

### **3. Formulas directas para el cálculo de los períodos naturales.**

Fórmulas T. Taniguchi, Fórmula F. P. Ulrich – D. S. Carder, Fórmula Rosenblueth, Fórmula K. Nakagawa, Fórmula de Ifrim, entre otras.

### **3.8.2 Efecto de sitio y fenómeno de resonancia.**

A través de los años se ha conocido la influencia de las características geotécnicas, geológicas y topográficas de los estratos superficiales, en la intensidad de los sismos y daños locales producto de los terremotos. Estos efectos son frecuentemente dependientes, y esta reacción de las características locales de los suelos a la energía sísmica liberada es conocida como efecto de sitio (Fernández & Brandt, 2000).

Takewaki definió en 1998 que el acoplamiento del período natural de un edificio con el suelo causa una amplificación de la respuesta del edificio y a este fenómeno se le conoce con el nombre de resonancia.

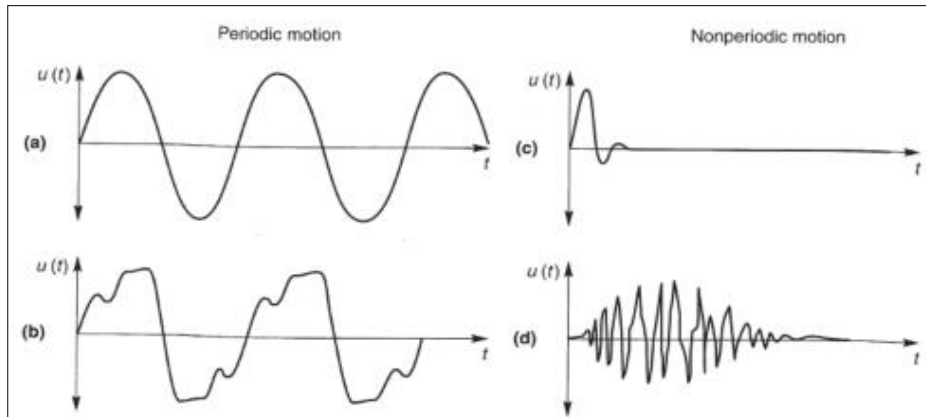
Las condiciones locales de sitio pueden influenciar en importantes aspectos de los sismos fuertes, como la amplitud, contenido de frecuencia y duración. Todo esto depende de la geometría y propiedades de los materiales en los estratos superficiales de los suelos y de la topografía del lugar (Páiz & Bendaña, 2015).

#### ***3.8.2.1 Período y frecuencia natural de vibración del suelo.***

El suelo se encuentra constantemente inducido a vibraciones externas, como por ejemplo, el movimiento de los vehículos y trenes, explosiones, rompimiento de olas en diques o sismos que generan ondas a través de los estratos superficiales del suelo.

Las vibraciones del suelo se pueden dividir en dos categorías: movimientos periódicos y movimientos no periódicos.

Un movimiento periódico es el tipo de evolución temporal que presenta un sistema cuyo estado se repite exactamente a intervalos regulares de tiempo. El tiempo mínimo  $T$  necesario para que el estado del sistema se repita (Figura 3.15a y Figura 3.15b). Los movimientos no periódicos: son los que no se repiten y pueden resultar de cargas impulsivas como explosiones o impactos, y de cargas transitorias de larga duración como sismos (Figura 3.15c y Figura 3.15d) (Kramer, 1996).

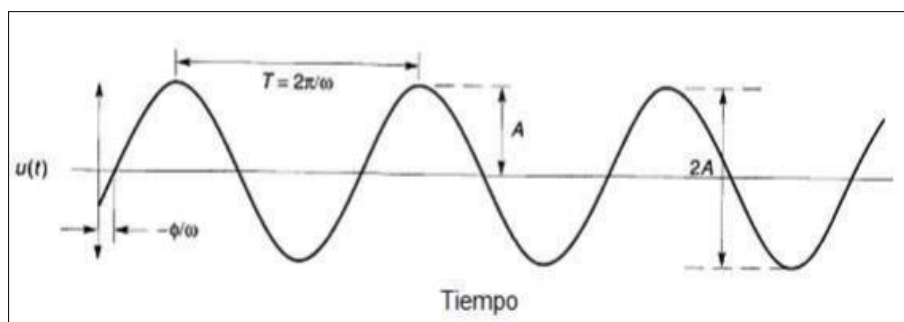


**Figura 3.15.** Movimiento periódico y no periódico: (a) movimiento armónico simple; (b) movimiento periódico general; (c) movimiento transitorio de impacto; (d) movimiento transitorio de sismo. **Fuente:** (Kramer, 1996).

Las características principales de las vibraciones del suelo son la amplitud, la frecuencia y la fase del ángulo. Esto puede ser expresado en términos del desplazamiento usando una notación trigonométrica ecuación (3.8.4):

$$u(t) = A \sin(\omega t + \varphi) \quad (3.8.4)$$

Donde  $A$  representa la amplitud,  $\omega$  la frecuencia circular y  $\varphi$  la fase del ángulo. En la Figura 3.16 se muestra la amplitud ( $A$ ) que es la variación máxima de la onda. La frecuencia circular describe el radio de oscilación en términos de radianes por unidad de tiempo, en donde  $2\pi$  corresponde a un ciclo de movimiento. La fase de ángulo describe la cantidad de tiempo en que cada pico se desplaza de la función senoidal (Kramer, 1996).

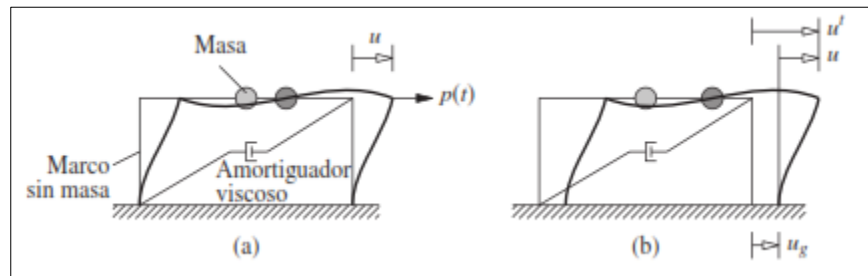


**Figura 3.16.** Desplazamiento de las vibraciones. **Fuente:** (Kramer, 1996).

El tiempo requerido para que la onda realice una revolución completa es el tiempo requerido para un ciclo de movimiento. Este tiempo se conoce como “Período de vibración  $T$ ” y está relacionado a la frecuencia circular.

### 3.8.2.2 Espectros de respuestas.

G. W. Housner jugó un papel decisivo en la gran aceptación del concepto del espectro de respuesta del sismo (iniciado por M. A. Biot en 1932) como un medio práctico para caracterizar los movimientos del terreno y sus efectos sobre las estructuras. El espectro de respuesta proporciona un medio conveniente para resumir la respuesta máxima de todos los posibles sistemas lineales de 1GDL a un componente particular del movimiento del terreno (Figura 3.17). También proporciona un enfoque práctico para la aplicación del conocimiento de la dinámica estructural al diseño de estructuras y al desarrollo de los requisitos de fuerza lateral en los códigos de construcción (Chopra, 2014).

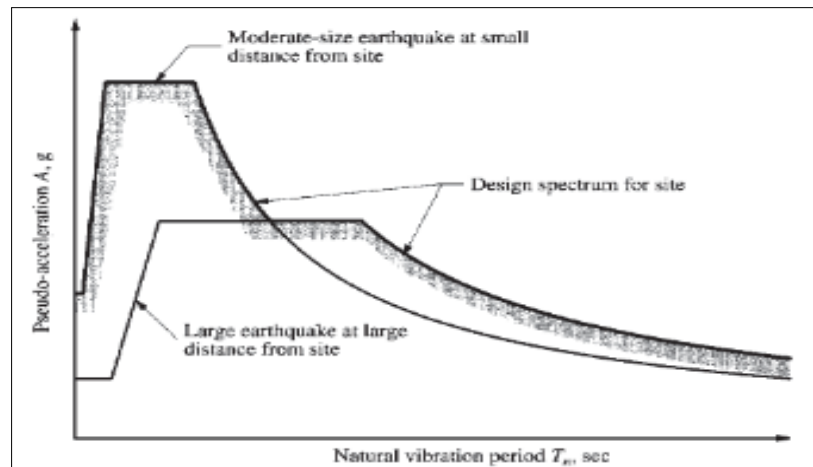


**Figura 3.17.** Sistema de un grado de libertad: (a) fuerza aplicada  $p(t)$ ; (b) movimiento del terreno inducido por un sismo. **Fuente:** (Chopra, 2014).

El valor máximo de una cantidad de respuesta como una función del período de vibración natural  $T_n$  del sistema, o de un parámetro relacionado, como la frecuencia circular  $\omega_n$  o la frecuencia cíclica  $f_n$  se denomina *espectro de respuesta* para dicha cantidad (Chopra, 2014).

Gráficamente el espectro de respuesta de los terremotos es altamente irregular, su forma expresa los detalles de cada contenido de frecuencia. Por otro lado, los espectros de diseño son generalmente gráficas suavizadas con promedios y envolventes de los diferentes movimientos del espectro de respuesta (Figura 3.18). Sin embargo, el uso de espectros de diseño, implícitamente tiene incertidumbre al evitar las fluctuaciones de las aceleraciones espectrales y tener pequeños cambios en el período de vibración (Kramer, 1996).





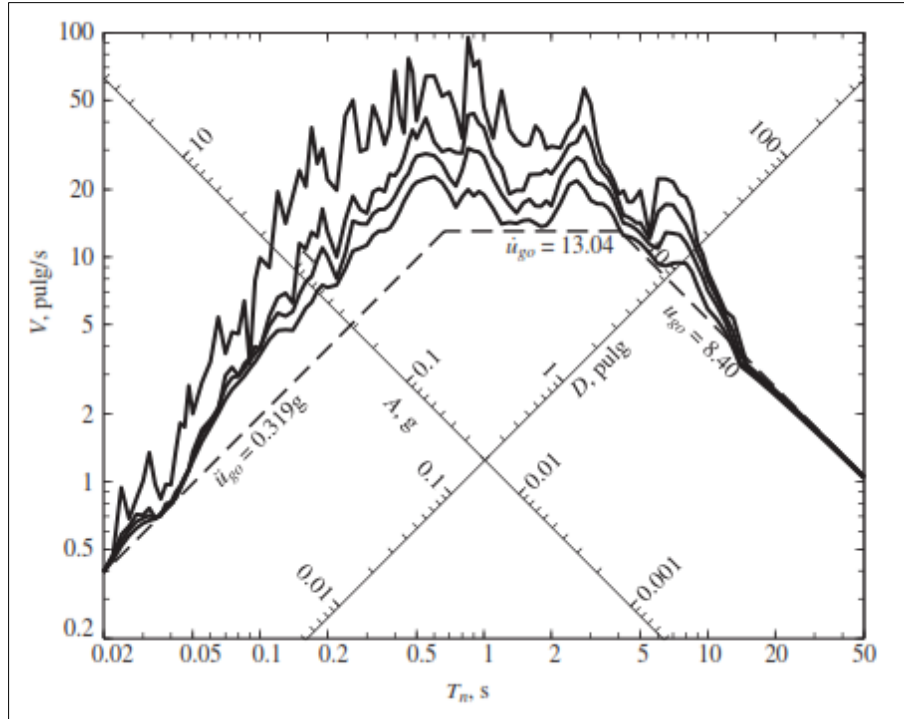
**Figura 3.18.** Espectro suavizado de respuesta para diferentes movimientos de sismos.

**Fuente:** (Chopra, 2014).

#### 3.8.2.2.1 Características del espectro de respuesta.

Las propiedades importantes de los espectros de respuesta de los sismos se muestran en la figura 3.19, junto con los valores máximos de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del terreno ( $\ddot{u}_{go}$ ,  $\dot{u}_{go}$  y  $u_{go}$ ). Para los sistemas con un período muy corto, por ejemplo  $T_n < 0.035 \text{ seg}$ , la pseudo-aceleración máxima  $A$ , se aproxima a  $\ddot{u}_{go}$  y el desplazamiento es muy pequeño. Para una masa fija, un sistema con un período muy corto es extremado o esencialmente rígido. Es de esperar que tal sistema experimente una deformación muy pequeña y que su masa se mueva de manera rígida con el suelo; su aceleración máxima debe ser aproximadamente igual a  $\ddot{u}_{go}$  (Chopra, 2014).

La forma de representación de este espectro, se hace por medio de diagramas de distribución de amplitudes en función de la frecuencia, dando lugar entonces a los espectros de respuesta de velocidad, desplazamiento y aceleración, los cuales son independientes entre sí. Pero la forma más común de representación en ingeniería sísmica, es por medio de diagramas trilogarítmicos, donde se indican simultáneamente los valores del desplazamiento, junto con valores aproximados de los otros dos parámetros, pseudo-velocidad espectral y pseudo-aceleración espectral (ver Figura 3.19). Se construyen así pseudo-espectros que constituyen una aproximación aceptable a los espectros de respuesta reales.



**Figura 3.19.** Espectro de respuesta ( $\zeta = 0, 2, 5$  y  $10\%$ ) y valores máximos de la aceleración, la velocidad y el desplazamiento del terreno. **Fuente:** (Chopra, 2014).

Para los sistemas con un período muy largo, por ejemplo  $T_n > 15$  seg, el desplazamiento se aproxima a  $u_{go}$  para todos los valores de amortiguamiento y  $A$  es muy pequeña, por lo que las fuerzas en la estructura, que se relacionan con  $mA$ , serían muy pequeñas. Para una masa fija, un sistema de muy largo período es demasiado flexible. Se espera que la masa permanezca estacionaria mientras que el suelo se mueve debajo de ella (Chopra, 2014).

Estas características del movimiento del terreno dependerán de la magnitud del sismo, la distancia al sitio de falla, la geología desde la falla hasta el sitio y las condiciones del terreno en el sitio. Los movimientos del terreno registrados en la región próxima a la falla de un sismo, en las estaciones ubicadas en la dirección de la ruptura de la falla, son cualitativamente muy diferentes de los movimientos sísmicos que en general se registran lejos de ella (Chopra, 2014).

Cuando la base de un edificio entra en vibración, ésta se trasmite a su estructura, que también comienza a vibrar. En un sistema completamente rígido, la vibración del edificio sería exactamente la misma de la de su base. Sin embargo, como las estructuras tienen siempre cierta elasticidad, la vibración no es la misma y tanto el período de vibración como las aceleraciones de base y estructura son diferentes. El espectro muestra la aceleración máxima de la vibración de la estructura; tiene, por lo tanto, unidades de aceleración. Diversos estudios

han mostrado que el espectro depende esencialmente de dos factores: La aceleración de la vibración a la que se somete la base y el período de oscilación de la estructura (Chopra, 2014).

### 3.8.2.3 Espectros de diseño.

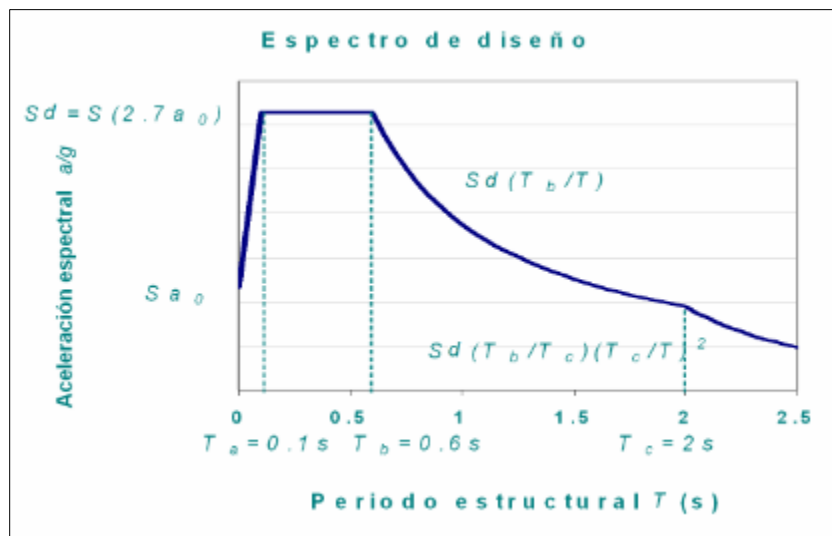
Las construcciones no pueden diseñarse para resistir un terremoto en particular en una zona dada, puesto que el próximo terremoto probablemente presentará características diferentes. Por lo tanto, los espectros de respuesta elástica o inelástica, no pueden utilizarse para el diseño sismorresistente. Por esta razón, el diseño o verificación de las construcciones sismorresistentes se realiza a partir de espectros que son suavizados (no tienen variaciones bruscas) y que consideran el efecto de varios terremotos, es decir que representan una envolvente de los espectros de respuesta de los terremotos típicos de una zona. Los espectros de diseño se obtienen generalmente mediante procedimientos estadísticos (Páiz & Bendaña, 2015).

Es muy importante que distingamos entre espectros de respuesta, que se obtienen para un terremoto dado, y espectros de diseño, los cuales se aplican al cálculo y verificación de estructuras y representan la sismicidad probable del lugar.

Según el Reglamento Nacional de Construcción (RNC-07), en el artículo 27, ítem II; menciona sobre el espectro de diseño (ver Figura 3.20) que se utiliza en todo el territorio del país y está estipulado como se muestra a continuación:

$$a = \begin{cases} S \left[ a_0 + (d - a_0) \frac{T}{T_a} \right] & \text{si } T < T_a \\ Sd & \text{si } T_a \leq T \leq T_b \\ Sd \left( \frac{T_b}{T} \right) & \text{si } T_b \leq T \leq T_c \\ Sd \left( \frac{T_b}{T_c} \right) \left( \frac{T_c}{T} \right)^2 & \text{si } T > T_c \end{cases} \quad (3.8.5)$$

Tratándose de estructuras del Grupo B,  $a_0$  se selecciona del mapa de isoaceleraciones del anexo C del reglamento, mientras que  $d = 2.7a_0$ ,  $T_a = 0.1 \text{ seg}$ ,  $T_b = 0.6 \text{ seg}$ ,  $T_c = 2 \text{ seg}$  y  $S$  es el factor de amplificación por tipo de suelo definido en el artículo 23. Para estructuras del Grupo A, las aceleraciones de diseño se multiplicarán por 1.5 y para el Grupo C se tomarán igual al Grupo B (Reglamento Nacional de Construcción, 2007).



**Figura 3.20.** Espectro de diseño para Nicaragua. **Fuente:** (Reglamento Nacional de Construcción, 2007).

De acuerdo a los factores de amplificación, la aceleración y períodos naturales del suelo, se construye el espectro de diseño que cubre los picos más altos de los espectros de respuesta de los sitios de esa zona que se utiliza en el diseño de las estructuras.

Por otro parte existen los espectros de respuesta elásticos que expresan la respuesta máxima de la aceleración, velocidad y de deformación para un movimiento sísmico con diferentes amortiguamientos. A diferencia de estos, están los espectros de respuesta inelástico. En este tipo de espectro se experimenta un comportamiento no lineal, es decir que la estructura puede experimentar deformaciones en rango plástico producto del sismo.

### 3.9 Interacción suelo-estructura

Las condiciones naturales del terreno y los posibles efectos de la interacción suelo-estructura (ISE) son los factores que mayor influencia pueden tener en la respuesta estructural (Saéz, 2001). Cuando una estructura se asienta sobre un terreno rígido, un afloramiento rocoso por ejemplo, los fenómenos de ISE son bajos; esto debido a que el período de la estructura no se altera con la interacción, además la presencia de la estructura no afecta las ondas sísmicas. Por tanto los períodos cortos suelen ser dañinos mayormente para estructuras rígidas que las flexibles (Saéz, 2001).

En cambio, si la estructura se asienta en terreno blando o moderadamente blando, los efectos de ISE cobran importancia. Las ondas sísmicas sufren modificaciones apreciables debido a la presencia de la estructura, incursionando en períodos largos filtrados por el terremoto. En este caso las estructuras más propensas son las flexibles (Saéz, 2001).

### 3.9.1 Velocidad de ondas de corte.

La velocidad de ondas de corte es una de las principales provisiones sísmicas en la construcción, debido a que las propiedades elásticas de los suelos en la superficie toman un papel fundamental en la respuesta sísmica de sitio. Las normas internacionales National Earthquakes Hazard Reduction Programs (NEHRP) y el Eurocode 8 (EC8), consideran fundamental este parámetro en sitios con alta actividad sísmica (ver Tabla 1). Para la clasificación de sitio se consideran los primeros 30 m de la superficie, parámetro conocido como  $V_{s30}$ , la ecuación (3.9.1) muestra el cálculo (Obando, 2011).

**Tabla 1.** Clasificación de sitio y tipo de suelo en los primeros 30 m de profundidad. **Fuente:** (NEHRP Recommended Provisions, 2003)

Clase de sitio	Descripción	$V_s$ (m/s)
A	Roca dura	> 1500
B	Roca	760 – 1500
C	Suelo muy denso / Roca suave	360 – 760
D	Suelo suave	180 – 360
E	Perfil del suelo	< 180
F	Suelos que requieren evaluación específica	

Tomando en cuenta el artículo 25 del Reglamento Nacional de la Construcción de Nicaragua (RNC - 07), donde menciona que para tomar en cuenta los efectos de amplificación sísmica debidos a las características del terreno, los suelos se dividirán en cuatro tipos, de acuerdo con las siguientes características (Reglamento Nacional de Construcción, 2007).

Tipo I: Afloramiento rocoso con  $V_s > 750$  m/s,

Tipo II: Suelo firme con  $360 < V_s \leq 750$  m/s,

Tipo III: Suelo moderadamente blando, con  $180 \leq V_s \leq 360$  m/s,

Tipo IV: Suelo muy blando, con  $V_s < 180$  m/s.

Siendo  $V_s$  la velocidad promedio de ondas de corte calculada a una profundidad no menor de 10 m, y representando  $N$  el número de estratos, se determina como:

$$V_s = \frac{\sum_{n=1}^N h_n}{\sum_{n=1}^N \frac{h_n}{V_n}} \quad (3.9.1)$$

Donde:

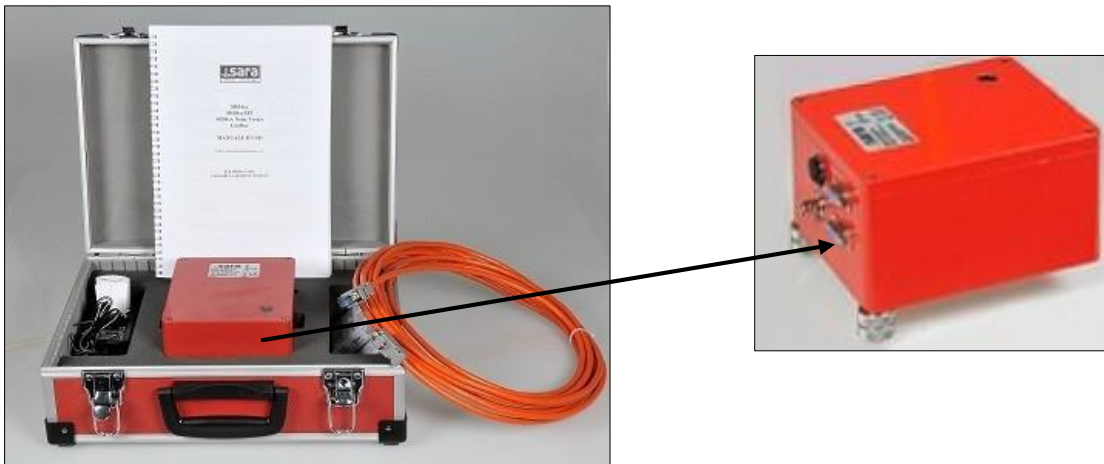
$h_n$  = Espesor del n-ésimo estrato.  $V_n$  = Velocidad de ondas de corte del n-ésimo estrato

## CAPÍTULO IV – TRABAJO DE CAMPO Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES

### 4.1 Equipo de medición

Al realizar las mediciones de vibración ambiental en el sitio de estudio, se utilizó un sismógrafo digital de Sara GEOBOX 24 bit triaxial (ver Figura 4.1). El sismógrafo digital es un instrumento de alto rendimiento especialmente adecuado para la adquisición de señales para los estudios sismológicos y geofísicos tales como el Cociente Espectral Horizontal/Vertical (HVSr).

El sismógrafo Geobox es gestionado por un módulo de software del paquete de software SEISMOWIN: LOG-MT. Gracias a LOG-MT, una computadora estándar se convierte en una estación sísmica de gran alcance que permite al usuario ejecutar los análisis de vibración, así los estudios sísmicos o geofísicos.



**Figura 4.1.** Sismógrafo digital de Sara GEOBOX. **Fuente:** (SARA electronic instruments, s.f.)

La técnica HVSr se puede ejecutar en tiempo real, por lo que es posible monitorear la más amplia gama de situaciones con la máxima eficacia en términos de tiempo y la fiabilidad de la medición. Se pueden obtener resultados HVSr en cuestión de segundos.

Los datos se pueden guardar en formatos estándar (por ejemplo, SAF, H-V, GSE), haciendo que el Geobox sea compatible con cualquier software. El sismógrafo de Sara Geobox está diseñado especialmente para grabación de ruido sísmico, pero puede también registrar los sismos y las vibraciones artificiales.

Posee una batería en su interior lo que hace que el sismógrafo este adecuado para trabajar en el campo sin ninguna fuente de alimentación externa. La batería proporciona hasta 20 horas de tiempo de trabajo. Véase la Tabla 2 para más características.

Al igual que todos los instrumentos, el sismógrafo está equipado con una unidad de GPS para la sincronización UTC fiable y precisa.

**Tabla 2.** Características técnicas del sismógrafo Sara Geobox. **Fuente:** (SARA electronic instruments, s.f.)

<b>Fuente de alimentación</b>	10-15 Vdc (con un consumo de energía inferior a 1 W)
<b>Número de canales</b>	3 con convertidor de 24 bits A/D ( $\Sigma\Delta$ )
<b>Rango dinámico</b>	124 dB (144 dB, 24 bits de ENOB, entre 0,1 y 10 Hz)
<b>Muestreo</b>	Simultánea en todos los tres canales (1 a/d por canal)
<b>Índices de muestreo</b>	de 10 a 600 Hz
<b>Tiempo real</b>	+/- 10 ppm (-20/+50 °C)
<b>Sincronización de tiempo real</b>	Basado en GPS a través de PPS
<b>Precisión de la hora UTC</b>	<50 $\mu$ s
<b>Interfaz de datos</b>	RS232, cable USB suministrado
<b>Formato de datos</b>	SADC20HS protocolo binario
<b>Velocidad de transmisión</b>	115200 baud
<b>Interfaz de datos GPS</b>	RS232, MEA; 4800 baud, n, 8, 1
<b>Caso</b>	Bloque sólido de aluminio con grado de protección IP66
<b>Temperatura de funcionamiento</b>	-20/+60 °C
<b>Dimensiones</b>	15.5 cm x 14 cm x 11 cm
<b>Peso</b>	3.1 kg con sensor de 4.5 Hz, 4.4 kg con sensores 2 Hz
<b>Declaración de conformidad</b>	CE

Para realizar las mediciones en el campo se utilizó un cuaderno para tomar apuntes, cámara fotográfica digital y cinta métrica.

#### 4.2 Colección de registros de ruido ambiental

Las mediciones de señales se realizaron en tres lugares distintos, los cuales son: en la planta baja para obtener las señales de interacción suelo-estructura, en la planta alta para obtener el período natural de la estructura y afuera del edificio en sus alrededores para registrar las señales del suelo y adquirir el período predominante (ver Tabla 3).

**Tabla 3.** Jornada de mediciones realizadas en el edificio. **Fuente:** Autores.

Nº de visitas	Actividad	Desarrollo
3	Mediciones en la planta baja del edificio.	Se realizó la toma de 9 mediciones en la planta baja, lo que corresponde a 4 mediciones en la ala Oeste, 4 mediciones en la ala Este y por último se hizo la medición en la parte central del edificio.
4	Mediciones en la planta alta del edificio.	Al igual que en la planta baja, también se realizaron 9 mediciones en la planta alta, llevando a cabo 4 mediciones en la ala Oeste, 4 mediciones en la ala Este y por último una medición en el centro del edificio.
3	Mediciones alrededor del edificio.	Se llevaron a cabo 12 mediciones, para referenciar la distancia del punto donde se hizo la medición con respecto al edificio.

#### 4.2.1 Descripción de la recolección de datos.

Se empezaron a realizar las mediciones de señales en la planta baja del edificio (ver Figura 4.2), con el fin de obtener la interacción de señales tanto en el suelo como en la estructura, los registros de cada punto fueron proporcionados por un sismógrafo de Sara Geobox.

Se ubica el equipo en dirección Norte con respecto a su coordenada Y (ver Figura 4.3), después se procede a nivelar el sismógrafo hasta quedar horizontal, luego se conecta un cable a la computadora y por último se ejecuta el software SEISMO-LOG. El total de puntos para el levantamiento de las señales fue de 30, donde 9 de ellos son de la planta alta (4 en cada ala del edificio y 1 en el centro). La nomenclatura usada fue “IGG1” hasta “IGG30”, lo que significa claramente que IGG1 corresponde a la primera señal tomada. Los puntos del centro del edificio se nombraron como “P BAJA” y “P ALTA”, respectivamente para cada planta. Cada registro de señales tiene un tiempo de duración de 20 minutos, calculándose el cociente espectral en tiempo real.





**Figura 4.2.** Ubicación de los puntos levantados en el edificio. **Fuente:** Software Google Earth Pro 7.2

Este mismo procedimiento se realizó en cada levantamiento, tanto en la planta baja del edificio como en la planta alta, también se hicieron mediciones alrededor del edificio y luego se lleva a cabo en el procesamiento de señales.



**Figura 4.3.** Ubicación del equipo en dirección Norte con respecto a su coordenada Y. **Fuente:** Autores (tomada 12/05/2016).

### 4.3 Procesamiento de las señales

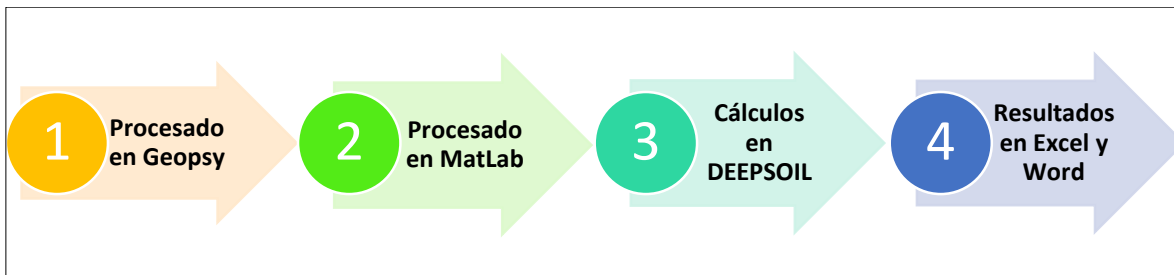
El procesamiento de señales se realizó empleando los siguientes softwares:

- Geopsy v2.9.0
- MatLab R2015a

En cambio, para el cálculo numérico se usó los siguientes softwares:

- DEEPSOIL v6.0
- Microsoft Office Excel 2013

Posteriormente se procesaron los datos que se obtuvieron en las mediciones (Figura 4.4), y como se emplearon los softwares anteriormente mencionados.



**Figura 4.4.** Etapas generales del procesamiento de señales y cálculos numéricos. **Fuente:** Autores.

Para comenzar el procesamiento de las señales recogidas por el sismógrafo, es necesario convertir dichas señales a extensión de archivos de texto (.txt). Esto se hace con el fin de que posteriormente el trabajo sea más fácil y el archivo sea reconocido por otros softwares.

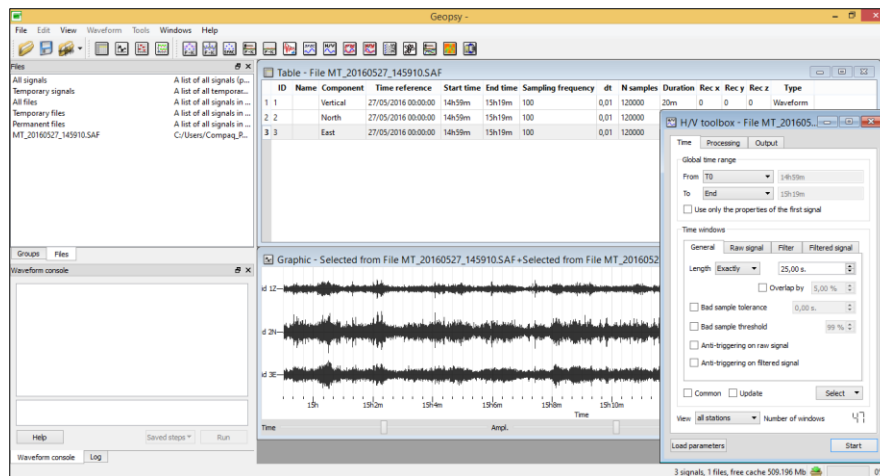
Originalmente el archivo entregado por el sismógrafo SARA GEOBOX, se encuentra con la extensión nativa (.SAF), donde vienen incluidas las tres componentes de la señal (V, NS, EW); lo que se hace es copiar todo el contenido del archivo y pegarlo en una hoja de cálculo de Microsoft Excel 2013, luego usar el asistente para importar texto, seguir las opciones del software de manera que se importe el texto delimitado por espacio, para que cada componente quede en una columna; por último copiar cada componente en un archivo de texto y guardarlo, de modo que saldrán tres archivos de texto por cada archivo original.

#### 4.3.1 Software de análisis: Geopsy v2.9.0.

Geopsy es un potente software de licencia libre, producido dentro del proyecto SESAME que permite realizar MASW, ReMi, Refracción H/V, la interpretación SPAC. Es una interfaz gráfica de usuario para la organización, visualización y procesamiento de señales geofísicas. Es también una base de datos utilizada para reunir toda la información acerca de las señales registradas. Este ha sido diseñado principalmente para la simbología y la prospección sísmica. Está disponible en todas las plataformas comunes (Linux, Mac, OSX y Windows).

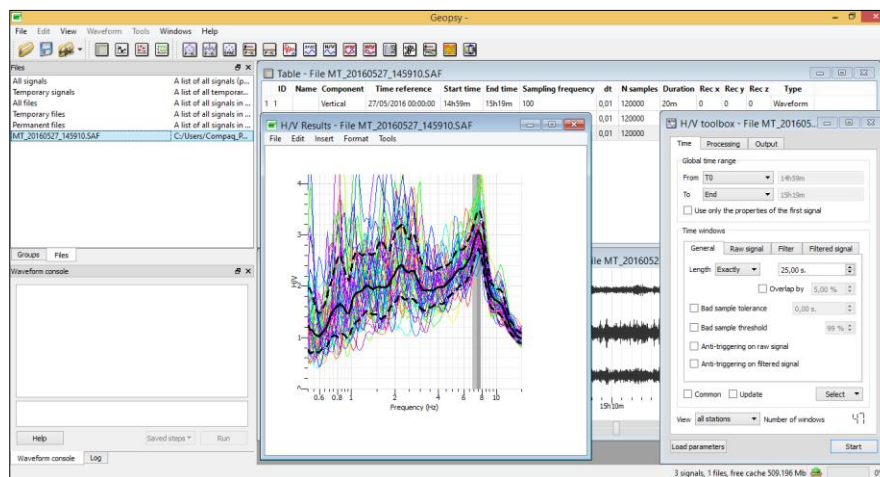
#### 4.3.1.1 Procesamiento de las señales en Geopsy.

Como segundo paso del procesamiento de las señales se trabaja en el software Geopsy v2.9.0, se clicla en la opción *import signals*, lo que hace es importar las señales que se extrajeron del sismógrafo, todos los archivos importados tienen que tener la extensión (.SAF) para poder ser leído. Luego se clicla en la opción *Table y Graphic*, en el cual se abrirá dos ventanas; se arrastran los archivos antes mencionados y se dejan en la ventana *Table*, inmediatamente se reconocerán las señales, posteriormente se arrastran las tres componentes (V, NS, EW) y se dejan en la ventana *Graphic*, después se selecciona la opción *H/V toolbox* y esta abrirá otra ventana en la cual se debe cliclar en la opción *Start* (Figura 4.5) y automáticamente se genera la gráfica de la relación H/V versus frecuencia; se recomienda guardar el resultado en formato de imagen (Figura 4.6).



**Figura 4.5.** Interface gráfica del software Geopsy v2.9.0 para el procesamiento de señales.

**Fuente:** Geopsy v2.9.0



**Figura 4.6.** Gráfica de Cociente Espectral H/V versus Frecuencia predominante para el punto IGG17.

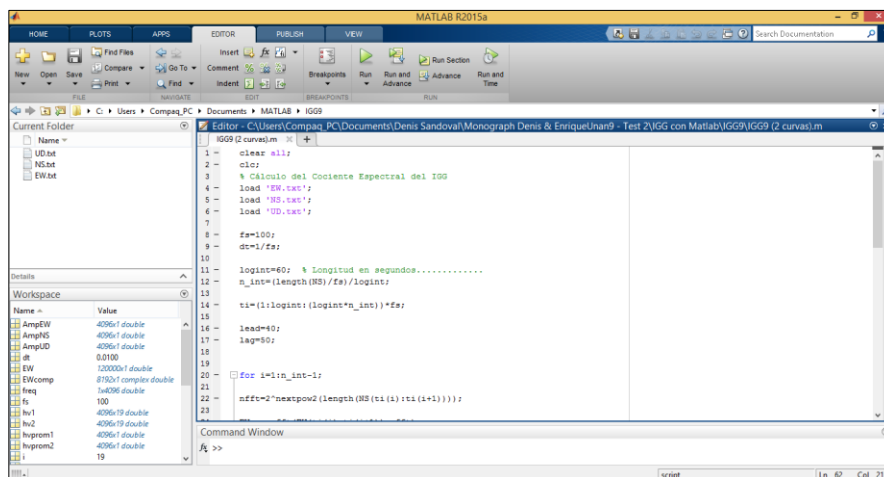
**Fuente:** Geopsy v2.9.0

### 4.3.2 Software de análisis: MatLab R2015a.

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, “laboratorio de matrices”) es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Fue creado por el matemático y programador de computadoras Cleve Moler en 1984, surgiendo la primera versión con la idea de emplear paquetes de subrutinas escritas en Fortran en los cursos de álgebra lineal y análisis numérico. El software se puede adquirir con licencias de tipo estándar, educativa, casa y estudiante, a diferentes precios y productos adicionales.

#### 4.3.2.1 Procesamiento de las señales en MatLab.

El tercer paso de orden se realiza en MatLab, se crea una rutina para cargar todos los archivos anteriores que son las tres componentes de la señal (V, NS, EW), se muestra una sección del código en la Figura 4.7.



```
IGG9 (2 curvas).m
1 - clear all;
2 - clc;
3 % Cálculo del Cociente Espectral del IGG
4 - load 'EW.txt';
5 - load 'NS.txt';
6 - load 'UD.txt';
7
8 - fs=100;
9 - dt=1/fs;
10
11 - logint=60; % Longitud en segundos.....
12 - n_int=(length(RS)/fs)/logint;
13
14 - ti=(1:logint:(logint*n_int))*fs;
15
16 - lead=40;
17 - lag=80;
18
19
20 - for i=1:n_int-1;
21
22 - nfft=2*nextpow2(length(RS(ti(i):ti(i+1))));
23
```

**Figura 4.7.** Procesamientos de señales HVSR en el código de MatLab. **Fuente:** MatLab R2015a.

Luego se procede a subdividir la longitud de la señal en intervalos de 60 seg, posteriormente se utilizó el bucle *For*, en el cual se introdujo la Transformada Rápida de Fourier (FFT) para convertir las señales de dominio de tiempo a dominio de frecuencia y se pudiese calcular las señales en intervalos de 60 seg, en el cual se obtuvieron 20 curvas y de ellas sacar el promedio y así crear las gráficas de amplitud versus frecuencia, esto se realiza para darse cuenta en que rango anda el período fundamental de la estructura y compararlo con el período predominante del suelo con el fin de determinar si la estructura se encuentra en resonancia. Finalmente se guardan los resultados principales en tablas de Microsoft Excel, para luego usar el software Microsoft Word para la preparación del informe.

#### 4.4 Estimación de modelo de velocidad de ondas de corte

Para la construcción del modelo de velocidad de ondas cortante en el sitio, fue necesario combinar la información obtenida a través de los registros de cociente espectral H/V. Este modelo servirá para establecer las velocidades cortantes en el sitio donde no existe un modelo específico disponible. El nuevo modelo  $V_s$  será obtenido a partir de un proceso de ajuste, de un modelo de suelo tentativo y de la curva de cociente espectral H/V del sitio de interés. El mejor modelo se obtendrá cuando la respuesta fundamental de la función de transferencia teórica se ajuste con el mismo pico de la curva de cociente espectral H/V.

El arreglo para la obtención del modelo  $V_s$  se hizo usando una rutina basada en la teoría de propagación de ondas en una dimensión; originalmente codificada en el software MatLab R2015a. La cual fue codificada y proporcionada por el PhD. Edwin A. Obando (ver Figura 4.8). Para la determinación del modelo de velocidad en el sitio se llevó a cabo una serie de pasos:

1. Se importaron los datos (amplitud y frecuencia) de las curvas de cociente espectral H/V, previamente guardadas en ficheros con extensión *.txt*.

```

1 % Calculate the theoretical HVSR based on the work by herak...
2
3 clear all;
4 clc;
5
6 % PARAMETROS INICIALES.....
7
8 load Shake.mat;
9 Va=[200,350,570,1300]; % Velocidad de Ondas S
10 B=[5,19,26,999]; % Espesor de estratos
11 Poi=[0.3,0.3,0.3,0.3]; % Relacion de Poisson
12 Vp=Va.*sqrt((2-2.*Poi)/(1-2.*Poi)); % Velocidad de ondas P
13 dens=[1.713,1.734,1.734,1.815]; % Densidad (Ton/m^3)
14 Qp=[7,25,30,999]; % Factor de calidad de corte
15 Qs=[13,46,58,999]; % Factor de calidad de compresion
16 SampleRate=0.01; % Intervalo de muestreo
17
18
19 % CALCULO DE FUNCION DE TRANSFERENCIA A PARTIR DE ONDA DE CUERPO.....
20
21 TF_s=HVSR_INV(Shake,SampleRate,B,Va,dens,Qs); % Funcion de transferencia de Ondas S
22 TF_p=HVSR_INV(Shake,SampleRate,B,Vp,dens,Qp); % Funcion de transferencia de Ondas P
23
Command Window
f0 >>

```

**Figura 4.8.** Rutina en MatLab para el cálculo de la función de transferencia teórica.

**Fuente:** MatLab R2015a.

2. Se empezó a trabajar con un modelo de velocidad inicial para el sitio de estudio (ver Tabla 4), cuyas velocidades se obtuvieron de un modelo de velocidad facilitado por el IGG-CIGEO, estableciendo así un modelo inicial de velocidad cortante con sus espesores correspondientes. Luego se calculó la respuesta teórica de este modelo de velocidad inicial, la cual se comparó con la curva de cociente espectral H/V del sitio.

**Tabla 4.** Modelo de velocidad inicial para el sitio. **Fuente:** IGG-CIGEO.

H (m)	Vs(m/s)	$\rho$ (KN/m <sup>2</sup> )	Tipo de suelo
5	200	16.8	Arcilloso ( $I_p = 3\%$ )
17	350	17	Arena media
26	570	17	Arena gruesa
$\infty$	1000	17.8	Arena gruesa

3. Posteriormente, si el modo fundamental de la función de transferencia teórica del modelo inicial no coincidía con el modo fundamental del espectro H/V del sitio, se hace un ajuste de los espesores de los estratos y también se ve obligado a modificar o ajustar la velocidad de propagación, dejando inalterada la densidad del suelo.
4. Luego el procedimiento se realiza las veces que sean necesarias hasta que la frecuencia del modo fundamental de la curva teórica y la curva de cociente espectral H/V coincidan.
5. Finalmente teniendo el modelo de velocidad de ondas de corte definido y ajustado, se procede a crear el perfil de velocidad de ondas cortante en Microsoft Excel.

#### 4.5 Espectro de respuesta de sitio

##### 4.5.1 Magnitud de los terremotos incluidos en DEEPSOIL v.6.0.

Todos los movimientos de tierra que se incluyen en DEEPSOIL se han obtenido a partir de la base de datos del Centro de Investigaciones del Pacífico e Ingeniería de Terremotos basada en la web (PEER). La base de datos está disponible en <http://peer.berkeley.edu/smcat/>. En total son 13 terremotos incluidos en DEEPSOIL (ver Tabla 5), de los cuales Kobe se excluirá del estudio, por tener registros atípicos y poco fiables.

Uno de los terremotos incluidos en DEEPSOIL es Nahanni, el cual fue una secuencia de terremotos ocurridos en Canadá en el año 1985, el mayor sismo se registró de 6.8 en la escala de magnitud de momento, éste es uno de los terremotos más significativos en Canadá durante el siglo XX. El terremoto de Northridge de 1994, ocurrió en Los Ángeles, Estados Unidos, la aceleración terrestre fue la mayor jamás captada en un área urbana estadounidense, los edificios se derrumbaron y es clasificado como el más caro en la historia de Estados Unidos. Kocaeli fue un sismo que en el año 1999 sacudió Turquía, duró 37 segundos y causó la muerte alrededor de 17,000 personas, 12 países se unieron a labores de rescate.

**Tabla 5.** Movimientos de tierra incluidos en DEEPSOIL v.6.0. **Fuente:** Manual de usuario de DEEPSOIL v.6.0.

Nombre del movimiento	Número de registros	Fecha	Magnitud	Distancia a la ruptura de falla (km)	Clasificación USGS	PGA (g)
ChiChi	P1116	20/09/1999	7.6	15.29	B	0.183
Coyote	P0154	06/08/1979	5.7	17.2	B	0.124
Imperial Valley	P0165	15/10/1979	6.5	26.5	B	0.169
Kobe	P1043	16/01/1995	6.9	0.6	B	0.821
Kocaeli	P1087	17/08/1999	7.4	17	B	0.218
LomaGilroy	P0738	18/10/1989	6.9	19.9	B	0.17
LomaGilroy2	P0764	18/10/1989	6.9	11.6	B	0.357
MammothLake	P0232	25/05/1980	6.3	15.5*	A**	0.43
Nahnni	P0498	23/12/1985	6.8	16	A**	0.148
Northridge	P0885	17/01/1994	6.7	26.8	A	0.217
Northridge2	P1014	17/10/1994	6.7	43.4	A	0.098
Parkfield	P0034	28/06/1966	6.1	9.9	B	0.357
WhittierNarrows	P0666	01/10/1987	6	21.2	A	0.186

\* Distancia hipocentrales.

\*\* Clasificación de sitio.

#### 4.5.2 Software de análisis: DEEPSOIL v6.0

DEEPSOIL es un software desarrollado en Visual Basic, el cual fue creado por la universidad de Illinois en Estados Unidos, que permite el estudio de efectos de sitio mediante un modelo unidimensional. En este programa el comportamiento no lineal del suelo puede ser modelado mediante un análisis lineal equivalente o un análisis no lineal (modelo no lineal hiperbólico) paso a paso; el software es capaz de calcular, por ejemplo, modelos de velocidad de ondas de corte, espectros de respuesta en la superficie y espectros de respuesta en roca.

Si el análisis de propagación de onda unidimensional realizado es de tipo no lineal, el amortiguamiento del suelo se introduce en el modelo a través de una nueva formulación con la cual es posible tener en cuenta modos de vibración superiores al primer modo de vibración del depósito. Esta nueva formulación representa de una forma más cercana el amortiguamiento que se presenta en procesos de propagación de onda para depósitos con profundidades superiores a 50 m (Hashash & Park, s.f.).

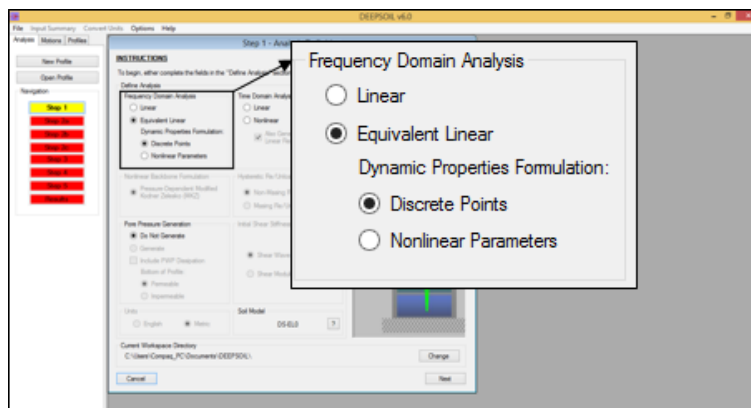
### 4.5.3 Determinación del espectro de respuesta de sitio.

Este análisis está relacionado con el comportamiento del suelo cuando este es sometido a excitaciones causadas por un evento sísmico, a como son, varios de los terremotos de Estados Unidos, tales como Mammoth Lake y Nahanni. Para poder analizar este comportamiento fue necesaria la profundidad de la estratigrafía del suelo, la profundidad de cada estrato del suelo, además de las velocidades de corte, pesos específicos de cada estrato y su factor de amortiguamiento.

La importancia de realizar este análisis radica en poder tener una respuesta del suelo ante los sismos, bajo condiciones específicas de cada área de suelo, de este modo se pueden conocer los puntos críticos de cada suelo y en qué aspectos se puede mejorar las condiciones del mismo, proporcionando información valiosa como las aceleraciones, las frecuencias, amplitudes y espectros de respuesta.

Obtenido el modelo de velocidad de ondas de corte para el sitio de estudio, se procedió a evaluar la respuesta de sitio, a través del software DEEPSOIL v6.0, el cual permite realizar el análisis no lineal en dominio de tiempo y el análisis lineal equivalente en dominio de frecuencia.

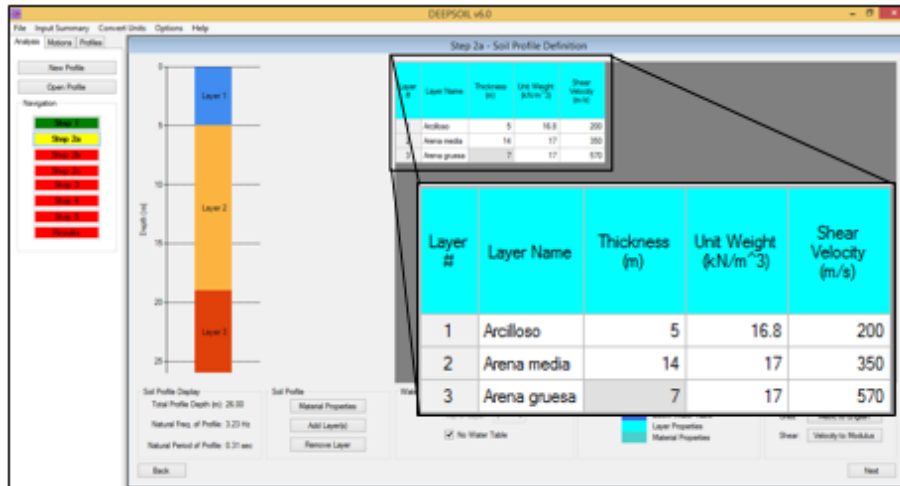
Se empezó a ejecutar el software DEEPSOIL v6.0, se clicó en la opción *New Profile* y esta abrirá una ventana donde define dos tipos de análisis; uno en dominio de frecuencia y el otro en dominio de tiempo. En esta investigación se trabajará con el análisis en dominio de frecuencia usando el método lineal equivalente aproximado (ver Figura 4.9).



**Figura 4.9.** Elección del método para el análisis en el software DEEPSOIL v6.0. **Fuente:** Autores.

Luego se procede a introducir los números de estratos con sus respectivos espesores, también se les asigna la densidad a cada estrato, posteriormente se introduce la velocidad de corte (ver Figura 4.10).

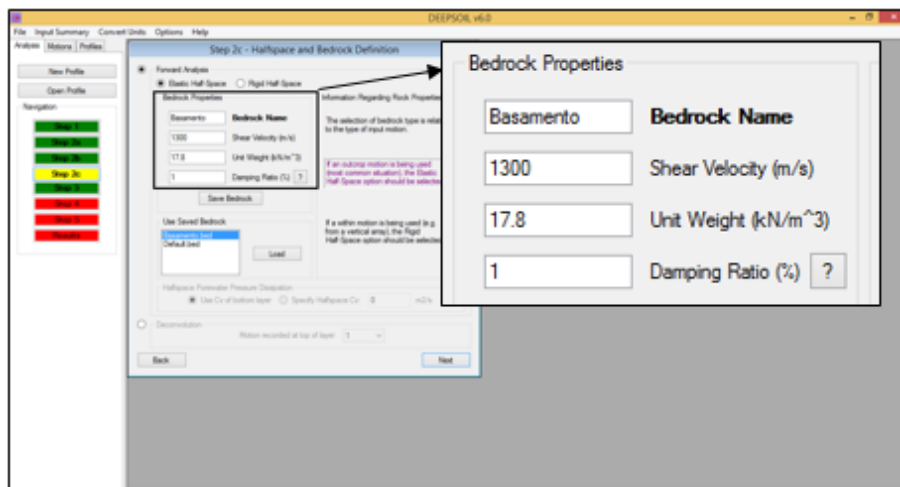




**Figura 4.10.** Asignación del modelo de velocidad ajustado. **Fuente:** Autores.

Después de haber completado el cuadro de las especificaciones de cada estrato, se clic en la opción *Material Properties*, esta abrirá una ventana en la cual se debe asignar el tipo de suelo que le corresponde a cada estrato. Seguidamente se clic en la opción *Apply*, para que las configuraciones se apliquen e inmediatamente se clic en el botón *Next*.

A continuación se deben establecer las propiedades dinámicas del basamento, las cuales son: velocidad de ondas de corte, factor de amortiguamiento y peso específico (ver Figura 4.11). Consecutivamente se debe de clic en la opción *Next* para continuar con el siguiente paso.



**Figura 4.11.** Asignación de las propiedades dinámicas del basamento. **Fuente:** Autores.

Finalmente se definieron como registro de entrada, 12 acelerogramas de los terremotos que el software presenta por defecto, se ejecutó el software para generar 12 espectros de respuesta y luego sacar el promedio entre ellos, con fin de obtener un solo espectro de respuesta en la superficie para el sitio.

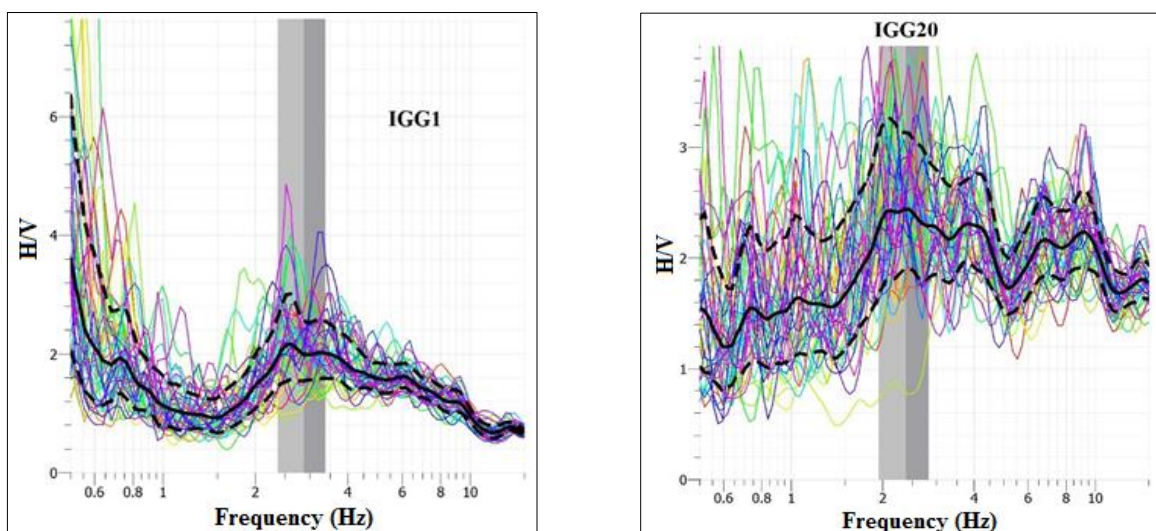
## CAPÍTULO V – ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos del procesamiento de las señales, realizados en el capítulo anterior. Inicialmente se muestran los resultados de las señales obtenidas con el software Geopsy, para determinar los parámetros dinámicos del suelo, posteriormente se muestran los resultados para algunos parámetros dinámicos de la estructura, programados en MatLab, en el cual se presentan períodos fundamentales, amplitudes máximas y frecuencias naturales; luego se analiza la interacción suelo-estructura, modelo de velocidad de ondas de corte y espectro de respuesta de sitio con DEEPSOIL.

### 5.1 Obtención del período fundamental del suelo

A continuación se presentan los resultados finales con respecto a los parámetros dinámicos del suelo, los valores de cociente espectral corresponden a la media más dispersión estándar. En primer lugar se presentarán las figuras de ciertos puntos estudiados con su propio análisis (en anexos se expondrán las gráficas de todos los puntos), luego se mostrará una tabla que contiene las 21 señales tomadas sobre el suelo y analizadas con el software Geopsy v.2.9.0.

#### 5.1.1 Cociente espectral H/V.

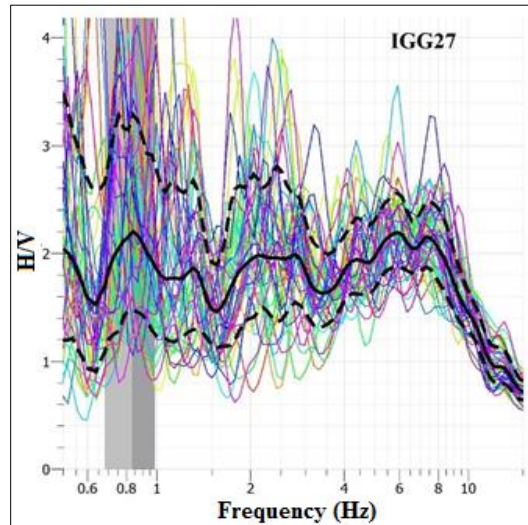


**Figura 5.1.** Relación H/V para los puntos IGG1 e IGG20. **Fuente:** Geopsy v.2.9.0.

Las gráficas de cociente espectral son de suma importancia, debido a que los valores de la relación H/V permiten identificar y por lo tanto estimar la frecuencia natural, y a su vez, el período en que vibra el sitio de estudio (ver Figura 5.1).

Las curvas anteriores, son curvas representativas de todos los registros obtenidos del suelo. El punto IGG1 tiene una relación H/V de 2.96, frecuencia de 2.58 Hz y período de 0.39 seg;

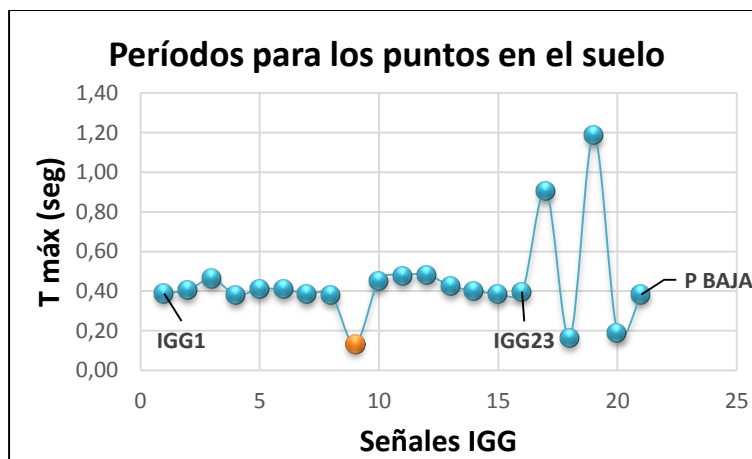
de igual modo, el punto IGG20 tiene una relación H/V de 3.26, frecuencia de 2.07 Hz y período de 0.48 seg; asimismo el punto IGG27 (ver Figura 5.2), situado al Norte del edificio, tiene una relación H/V de 3.28, una baja frecuencia de 0.84 Hz, y haciendo este punto el más distintivo de todos, con un período de 1.19 seg.



**Figura 5.2.** Relación H/V para el punto IGG27. Fuente: Geopsy v.2.9.0.

### 5.1.2 Variabilidad de los períodos de suelo.

En la Figura 5.3 se muestra la distribución total de los períodos en el suelo, se representan dos comportamientos, esto es, desde el punto IGG1 (con período de 0.39 *seg*) hasta el IGG23 (con período de 0.38 *seg*), luego desde el punto IGG23 hasta el punto P BAJA (con período de 0.38 *seg*), siendo IGG23, el punto de inflexión.



**Figura 5.3.** Períodos para los puntos en el suelo. Fuente: Autores.

Se observa en la misma Figura 5.3, un valor alterado de color naranja, siendo el punto IGG17, el cual se omitirá del análisis por ser un dato atípico, con período de 0.13 *seg*; esta alteración se debe a que en el momento de recoger la señal, había circulación de personas y vehículos poco más de lo normal.

#### 5.1.2.1 Cálculo del período natural del suelo con períodos cortos.

En la Figura 5.4 se observa que desde el punto IGG1 hasta el punto IGG23, existe una semejanza entre los datos, es decir, el suelo se comporta de manera homogénea, con períodos sumamente similares; se observa poca dispersión de los datos. Por consiguiente, estos puntos pertenecen al mismo suelo.

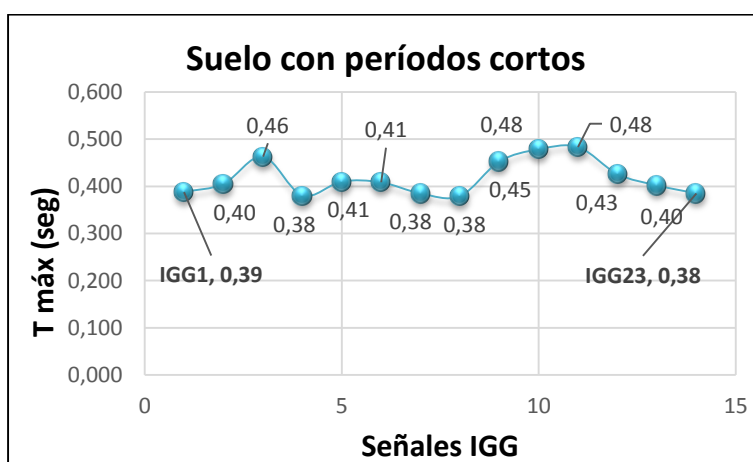


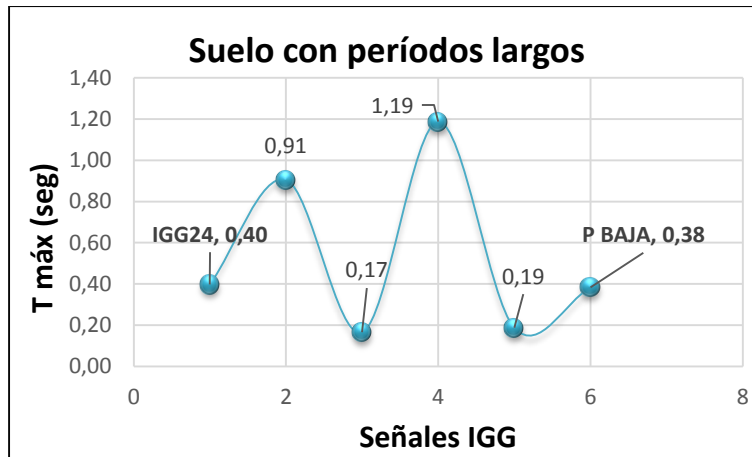
Figura 5.4. Suelo con períodos cortos. Fuente: Autores.

Media aritmética	Rango	Varianza	Desviación estándar
0.42	0.10	$1.38 \times 10^{-3}$	$3.71 \times 10^{-2}$

Para este suelo con períodos cortos, la desviación estándar es un valor cercano a cero, esto es,  $3.71 \times 10^{-2}$ , aunque exista una diferencia notable respecto a la media aritmética, cuyo valor es 0.42, indica de esta manera la semejanza que existe entre los datos, y de cómo se concentran estos con respecto a la media; por tanto, estos puntos pertenecen al mismo suelo, siendo 0.42 *seg*, el período natural.

#### 5.1.2.2 Cálculo del período natural del suelo con períodos largos.

En la Figura 5.5 se observa que desde el punto IGG24 hasta el punto P BAJA, se establece una variación de los datos, estando bastante separados, aunque guardan cierta relación sinusoidal, el rango de períodos es de 1.02 *seg*; aun así este suelo se considera homogéneo, con períodos relativamente largos.



**Figura 5.5.** Suelo con períodos largos. **Fuente:** Autores.

Media aritmética	Rango	Varianza	Desviación estándar
0.54	1.02	0.17	0.42

Para este suelo con períodos largos, la desviación estándar es 0.42, y la media aritmética, que también se toma como el período natural, es 0.54 *seg*, notándose que la separación entre la media y la desviación estándar es pequeña, existiendo semejanza. Por tanto, se considera que este suelo también es homogéneo, no habiendo una diferencia notable en sus características.

### 5.1.2.3 Cálculo del período fundamental del suelo.

De lo anterior, para calcular el período fundamental del suelo ( $T_f$ ), se deducirá del promedio de los dos tipos de suelo encontrados, y se reflejará en la Figura 5.6. La diferencia en sus períodos, es determinada por una pequeña variación de 0.12 *seg*, lo que significa que la estimación del período dominante del suelo es bastante confiable.

$$T_f = \frac{0.42 \text{ s} + 0.54 \text{ s}}{2} = 0.48 \text{ seg}$$



**Figura 5.6.** Período fundamental del suelo, calculado con Geopsy 2.9.0. **Fuente:** Autores.

Se muestra ahora en la Tabla 6, un resumen de los resultados principales, a como son; la relación H/V, frecuencia máxima y períodos naturales del suelo; se presentan también las coordenadas geográficas de cada punto con su respectiva fecha de levantamiento.

**Tabla 6.** Frecuencias, períodos del suelo y planta baja del edificio. **Fuente:** Autores.

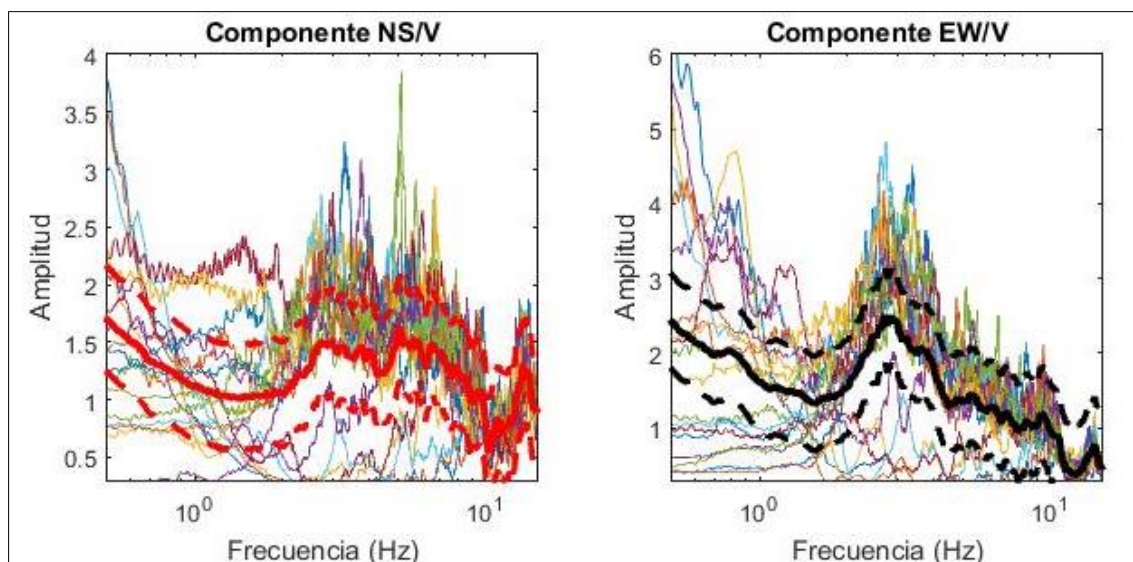
No.	ID	Coordenada X	Coordenada Y	Referencia	H/V	F máx (Hz)	T máx (seg)
1	IGG1	12°06'42.52"N	86°16'12.67"O	08/05/2016	2.96	2.58	0.39
2	IGG2	12°06'42.80"N	86°16'12.56"O	08/05/2016	3.61	2.47	0.40
3	IGG3	12°06'43.07"N	86°16'12.45"O	10/05/2016	3.72	2.16	0.46
4	IGG4	12°06'43.32"N	86°16'12.38"O	10/05/2016	3.54	2.63	0.38
5	IGG5	12°06'43.06"N	86°16'11.65"O	11/05/2016	3.84	2.44	0.41
6	IGG6	12°06'42.84"N	86°16'11.72"O	11/05/2016	3.94	2.45	0.41
7	IGG7	12°06'42.58"N	86°16'11.83"O	11/05/2016	3.59	2.60	0.38
8	IGG8	12°06'42.30"N	86°16'11.96"O	18/05/2016	3.29	2.64	0.38
9	IGG17	12°06'44.54"N	86°16'12.55"O	23/05/2016	3.47	7.59	0.13
10	IGG18	12°06'43.50"N	86°16'12.86"O	23/05/2016	3.17	2.21	0.45
11	IGG19	12°06'42.86"N	86°16'13.07"O	23/05/2016	2.99	2.09	0.48
12	IGG20	12°06'42.29"N	86°16'13.40"O	25/05/2016	3.26	2.07	0.48
13	IGG21	12°06'42.03"N	86°16'12.69"O	25/05/2016	3.98	2.35	0.43
14	IGG22	12°06'41.88"N	86°16'12.27"O	25/05/2016	3.08	2.49	0.40
15	IGG23	12°06'41.68"N	86°16'11.72"O	25/05/2016	3.75	2.60	0.38
16	IGG24	12°06'42.35"N	86°16'11.61"O	25/05/2016	3.32	2.52	0.40
17	IGG25	12°06'42.97"N	86°16'11.35"O	25/05/2016	4.32	1.10	0.91
18	IGG26	12°06'43.99"N	86°16'10.95"O	25/05/2016	2.58	6.05	0.17
19	IGG27	12°06'44.16"N	86°16'11.48"O	25/05/2016	3.28	0.84	1.19
20	IGG28	12°06'44.33"N	86°16'11.96"O	27/05/2016	2.92	5.35	0.19
21	P BAJA	12°06'42.96"N	86°16'12.14"O	27/05/2016	3.31	2.61	0.38

## 5.2 Parámetros dinámicos de la estructura

El procesamiento de las señales de vibración ambiental en el código de MatLab, permitió que la obtención de las gráficas amplitud versus frecuencia se generaran en sus dos componentes, NS/V y EW/V, de modo que se hizo el mismo cálculo para los otros puntos levantados en el sitio.

En la Figura 5.7 se muestra la curva de la amplitud versus frecuencia obtenida en el punto “P ALTA” según el número de mediciones realizadas, este es el punto más representativo, porque esta medición se hizo en el centro del edificio. Dada la gran cantidad de registros existentes por cada punto levantado, el tiempo de duración que fue de 20 minutos, la longitud de la señal, de 120,000 datos; se estimó la longitud de la señal en intervalos de 60 segundos, llegando a obtener 20 curvas. Se calculó el promedio de las curvas con el fin de establecer curvas representativas para cada levantamiento. Las otras curvas que no se presentan en los resultados, serán mostradas en el Anexo C.

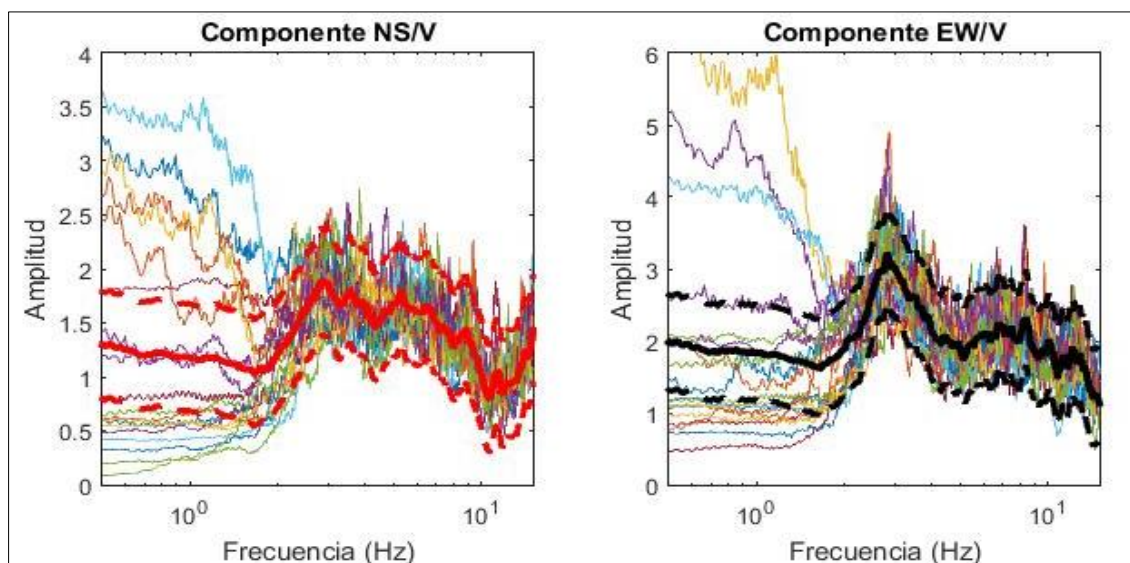
Se puede observar que las frecuencias correspondientes al primer modo de vibrar o modo fundamental (amplitud o pico máximo), varían en un rango aproximado de 2.78 Hz hasta 6.83 Hz.



**Figura 5.7.** Cociente espectral del punto “P ALTA” tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.  
**Fuente:** MatLab R2015a.

La curva gruesa en rojo en la Figura 5.7 representa el promedio del registro en la dirección Norte-Sur y su frecuencia natural es de 5.04 Hz, con una amplitud máxima de 1.63, se obtiene una desviación estándar de 0.45, tomando en cuenta que la curva discontinua de color rojo muestra la dispersión de los datos con respecto al promedio. La curva gruesa en negra

representa el promedio del registro en la dirección Este-Oeste y su frecuencia natural es de 2.71 Hz, con una amplitud máxima de 2.58, se obtiene una desviación estándar de 0.63, tomando en cuenta que la curva discontinua de color negro muestra la dispersión de los datos con respecto al promedio. Cabe mencionar que en el eje de las abscisas se trabajó a escala logarítmica, para presentar mejor la curva de cociente espectral, esto indica que la curva no será alterada.



**Figura 5.8.** Cociente espectral del punto “IGG16” tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.  
**Fuente:** MatLab R2015a.

En la Figura 5.8 se muestra la amplitud vs la frecuencia, para el punto “IGG16”. Obteniendo una frecuencia natural de 2.78 Hz en la dirección Norte-Sur y una amplitud máxima de 2, lo que significa que se amplificará 2 veces el movimiento horizontal con respecto al vertical, obteniendo una desviación estándar de 0.49. En la dirección Este-Oeste se obtuvo una frecuencia natural de 2.76 Hz, con una amplitud máxima de 3.23, obteniendo una desviación estándar de 0.66. La estructura posee una mayor rigidez en su dirección Norte-Sur, porque su frecuencia natural de vibrar es mayor y la amplitud es menor con respecto a la dirección Este-Oeste.

Para estimar la dirección más rígida del edificio, se procedió a revisar los planos estructurales, observando que en la dirección Norte-Sur se encuentra la mayor cantidad de columnas alineadas en la misma dirección, mostrándose también muros de corte, lo que hace que la estructura posea una mayor rigidez, mientras que en la dirección Este-Oeste, se encuentran muchos más ejes y pocas columnas alineadas en la misma dirección, lo que nos lleva a constatar por medio del análisis de vibración ambiental, que el edificio posee mayor rigidez en su dirección Norte-Sur, por tanto todos los períodos obtenidos en esta dirección



son menores con respecto a la dirección Este-Oeste, se puede apreciar en la Tabla 7, la distribución de las columnas estructurales con respecto a sus ejes.

**Tabla 7.** Cantidad de columnas estructurales en las dos direcciones NS y EW. **Fuente:** Autores.

Dirección Norte-Sur		Dirección Este-Oeste	
Ejes	Nº de columnas	Ejes	Nº de columnas
1	1	A	4
2	16	B	4
3	3	B'	4
3a	2	C	2
3b	0	C'	2
3c	2	D	3
4	9	E	6
5	7	F	7
6	3	G	4
7	3	H	4
8	5	I	4
9	4	J	4
10	2	K	4
11	3	L	8
12	4	M	4
13	5	N	5
14	9	O	5
15	1	P	7
16	10	Q	4
		R	0
		S	7
		T	3
<b>Total</b>	89		95

### 5.2.1 Estimación del período fundamental de la estructura en la dirección NS.

A continuación se presenta un breve resumen de los resultados obtenidos en las siguientes mediciones (ver Figura 5.9), mostrándose las coordenadas geográficas de cada levantamiento, frecuencia natural de vibrar, período fundamental de la estructura y la amplitud máxima (ver Tabla 8).



**Figura 5.9.** Frecuencias naturales de la estructura en la dirección NS, calculadas en MatLab R2015a.

**Fuente:** Autores.

**Tabla 8.** Frecuencias y períodos de la planta alta, usando la componente NS/V. **Fuente:** Autores.

No.	ID	Coordenada X	Coordenada Y	Referencia	Amplitud	F máx (Hz)	T máx (seg)
1	IGG9	12°06'42.52"N	86°16'12.67"O	13/05/2016	2.13	5.19	0.19
2	IGG10	12°06'42.80"N	86°16'12.56"O	13/05/2016	2.42	6.51	0.15
3	IGG11	12°06'43.07"N	86°16'12.45"O	13/05/2016	2.61	6.39	0.16
4	IGG12	12°06'43.32"N	86°16'12.38"O	13/05/2016	2.44	6.83	0.15
5	IGG13	12°06'43.06"N	86°16'11.65"O	17/05/2016	2.03	5.63	0.18
6	IGG14	12°06'42.84"N	86°16'11.72"O	17/05/2016	2.42	5.40	0.19
7	IGG15	12°06'42.58"N	86°16'11.83"O	17/05/2016	2.45	2.83	0.35
8	IGG16	12°06'42.30"N	86°16'11.96"O	17/05/2016	2.00	2.78	0.36
9	P ALTA	12°06'42.96"N	86°16'12.14"O	27/05/2016	1.63	5.04	0.20

Media aritmética	Rango	Varianza	Desviación estándar
0.21	0.21	$6.84 \times 10^{-3}$	$8.27 \times 10^{-2}$

Se realizó el cálculo de la desviación estándar para determinar la dispersión de los datos, obteniendo un valor de  $8.27 \times 10^{-2}$ , mostrando de esta manera que el período fundamental de la estructura en la dirección **Norte-Sur**, es la media aritmética, con un valor de 0.21 s.

### 5.2.2 Estimación del período fundamental de la estructura en la dirección EW.

Se presenta en la Figura 5.10, un breve resumen de los resultados obtenidos, reflejándose las coordenadas geográficas de cada levantamiento, frecuencia natural de vibrar, período fundamental de la estructura y la amplitud máxima (ver Tabla 9).



**Figura 5.10.** Frecuencias naturales de la estructura en la dirección EW, calculadas en MatLab R2015a. **Fuente:** Autores.

**Tabla 9.** Frecuencias y períodos de planta alta, usando la componente EW/V. **Fuentes:** Autores.

No.	ID	Coordenada X	Coordenada Y	Referencia	Amplitud	F máx (Hz)	T máx (seg)
1	IGG9	12°06'42.52"N	86°16'12.67"O	13/05/2016	3.61	2.92	0.34
2	IGG10	12°06'42.80"N	86°16'12.56"O	13/05/2016	2.79	2.92	0.34
3	IGG11	12°06'43.07"N	86°16'12.45"O	13/05/2016	3.29	2.65	0.38
4	IGG12	12°06'43.32"N	86°16'12.38"O	13/05/2016	3.08	2.88	0.35
5	IGG13	12°06'43.06"N	86°16'11.65"O	17/05/2016	3.06	2.77	0.36
6	IGG14	12°06'42.84"N	86°16'11.72"O	17/05/2016	3.47	2.76	0.36
7	IGG15	12°06'42.58"N	86°16'11.83"O	17/05/2016	3.64	2.82	0.35
8	IGG16	12°06'42.30"N	86°16'11.96"O	17/05/2016	3.23	2.76	0.36
9	P ALTA	12°06'42.96"N	86°16'12.14"O	27/05/2016	2.58	2.71	0.37

Media aritmética	Rango	Varianza	Desviación estándar
0.36	$3.40 \times 10^{-2}$	$1.43 \times 10^{-4}$	$1.20 \times 10^{-2}$

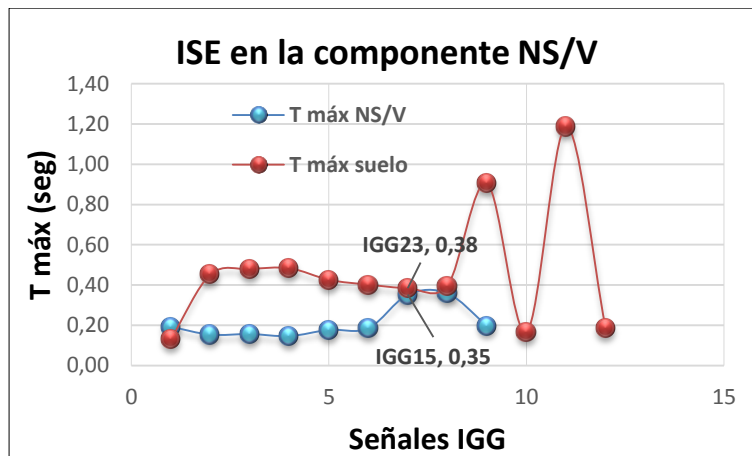
Se realizó el cálculo de la desviación estándar para determinar la dispersión de los datos, obteniendo un valor de  $1.20 \times 10^{-2}$ , indicando de esta manera que el período fundamental de la estructura en la dirección **Este-Oeste**, es la media aritmética, con un valor de 0.36 s.

El período fundamental de la estructura está determinado en sus dos direcciones, en la dirección Norte-Sur es de 0.21 *seg* y en la dirección Este-Oeste es de 0.36 *seg*.

### 5.3 Interacción suelo-estructura

#### 5.3.1 Interacción suelo-estructura en la componente NS/V.

Para estudiar la Interacción Suelo-Estructura (ISE), se graficaron en Microsoft Excel los períodos máximos para los puntos en el suelo (12 registros), con los períodos máximos de la estructura en la componente NS/V (9 registros), resultando:



**Figura 5.11.** ISE en la componente NS/V. Fuente: Autores.

Al analizar la ISE en la componente NS/V, se encuentran dos pares de puntos que coinciden, el punto IGG15 coincide con el IGG23, y el punto IGG16 coincide con el IGG24 (ver Figura 5.11). En esta componente, los períodos coinciden en la esquina sureste del edificio, siendo muy cercanos, con valores de 90% y 92% de similitud.

#### 5.3.2 Interacción suelo-estructura en la componente EW/V.

Asimismo, para conocer la ISE, se graficó en Microsoft Excel los períodos máximos para los puntos en el suelo (12 registros), con los períodos máximos de la estructura en la componente EW/V (9 registros), ver resultado en la Figura 5.12.

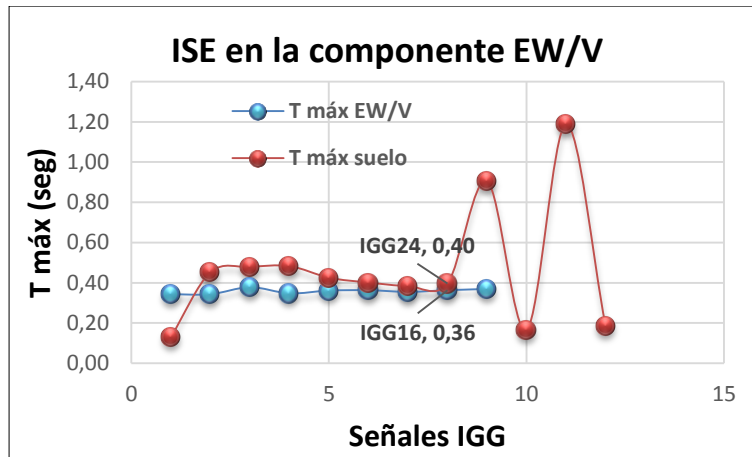


Figura 5.12. ISE en la componente EW/V. Fuente: Autores.

En la componente EW/V también coinciden los mismos pares de puntos. La similitud entre estos períodos es del 91% y 92%, por lo que en un sismo de gran magnitud, puede que la estructura se comporte en el rango inelástico y llegue a tener el mismo período del suelo, siendo el edificio más propenso en el área sureste (ver Figura 5.13).

El IGG-CIGEO es una estructura rígida, puesto que su período en ambas direcciones es menor a 0.4 s (Chopra, 2014), tomando en cuenta que el suelo es moderadamente blando, se estima que los terremotos incluidos en DEEPSOIL, produzcan deformaciones considerables y daños leves, pero que no lleguen a causar el colapso de la estructura.

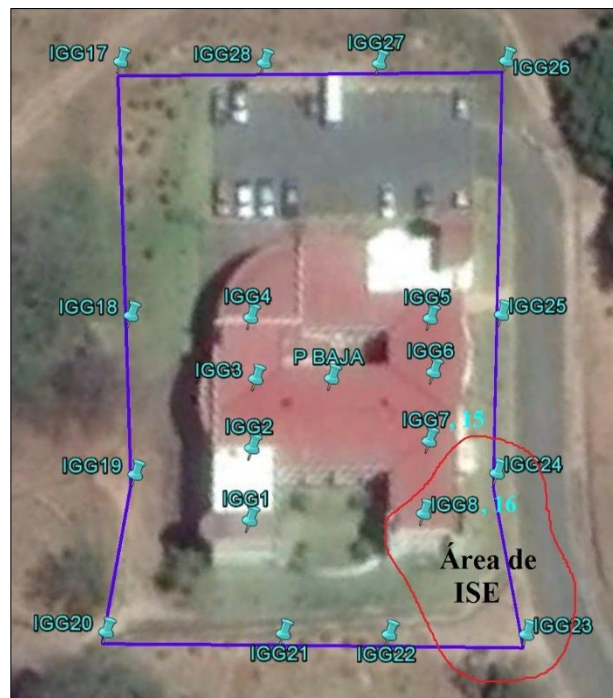
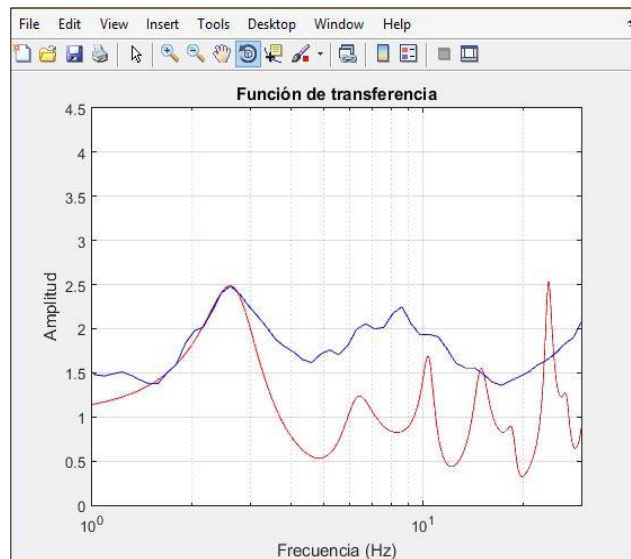


Figura 5.13. ISE en el área sureste del edificio. Fuente: Autores.

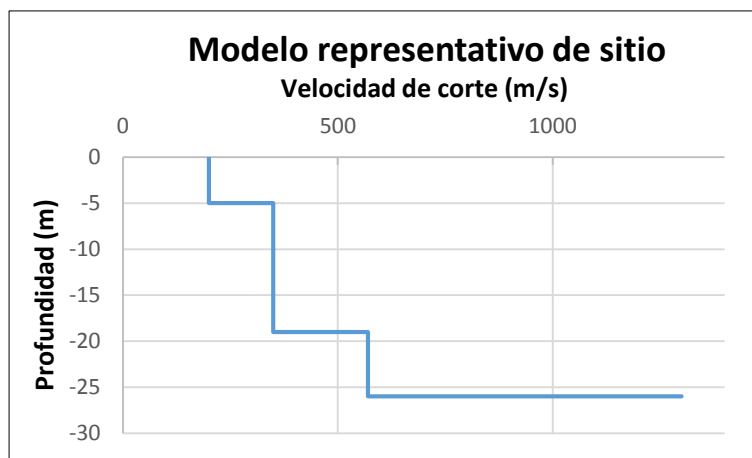
### 5.4 Estimación de los modelos de velocidades de ondas de corte

En este subcapítulo se obtiene el modelo de velocidad de ondas de corte para el sitio, producto de un modelo de velocidad inicial ( $V_s$ ) ajustado a la curva de cociente espectral H/V. Se puede apreciar en la Figura 5.14 que la curva en rojo es la función de transferencia teórica y la curva en azul es el cociente espectral H/V del sitio.



**Figura 5.14.** Ajuste de función de transferencia teórica con la curva de cociente espectral H/V del sitio. **Fuente:** MatLab R2015a.

Se muestra en la Figura 5.15 el modelo representativo del sitio en estudio, en el cual la velocidad promedio de ondas de corte fue calculada mediante la ecuación (3.9.1). Logrando una velocidad de  $336.44 \text{ m/s}$ , lo que se clasifica como suelo Tipo III, moderadamente blando.



**Figura 5.15.** Modelo representativo de velocidad de propagación de ondas de corte. **Fuente:** Autores.

También se observa en la misma Figura 5.15, que el modelo de velocidad alcanza una profundidad de 26 m aproximadamente, encontrándose a esa profundidad la roca elástica o basamento rocoso; indicando que el suelo de la zona es bastante firme y somero. Se presentan en la Tabla 10, los posibles estratos de suelo en que se encuentra cimentado el edificio, asimismo se muestran las velocidades de propagación de las ondas de corte.

**Tabla 10.** Modelo de velocidad para el sitio de estudio. **Fuente:** Autores.

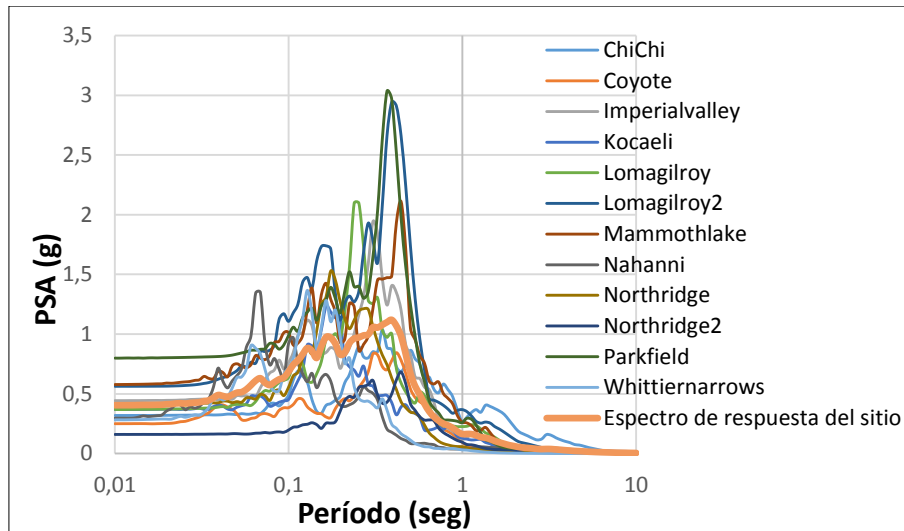
H (m)	Vs(m/s)	$\rho$ (KN/m <sup>2</sup> )	Tipo de suelo
5	200	16.8	Arcilloso ( $I_p = 3\%$ )
19	350	17	Arena media
26	570	17	Arena gruesa
$\infty$	1300	17.8	Arena gruesa

### 5.5 Espectros elásticos de respuesta de sitio

Teniendo en cuenta el modelo de velocidad, se procede a trabajar los espectros de respuesta elástico para cada terremoto, en el cual son 12 registros de entrada extraído del software DEEPSOIL v.6.0 (ver Anexo E), considerando el factor de amortiguamiento de 5%. Para determinar el espectro de respuesta en superficie se calcula el promedio de las pseudo-aceleraciones de los 12 registros de entrada (PSA), llegando a obtener las pseudo-aceleraciones de sitio, para crear el espectro de respuesta en superficie.

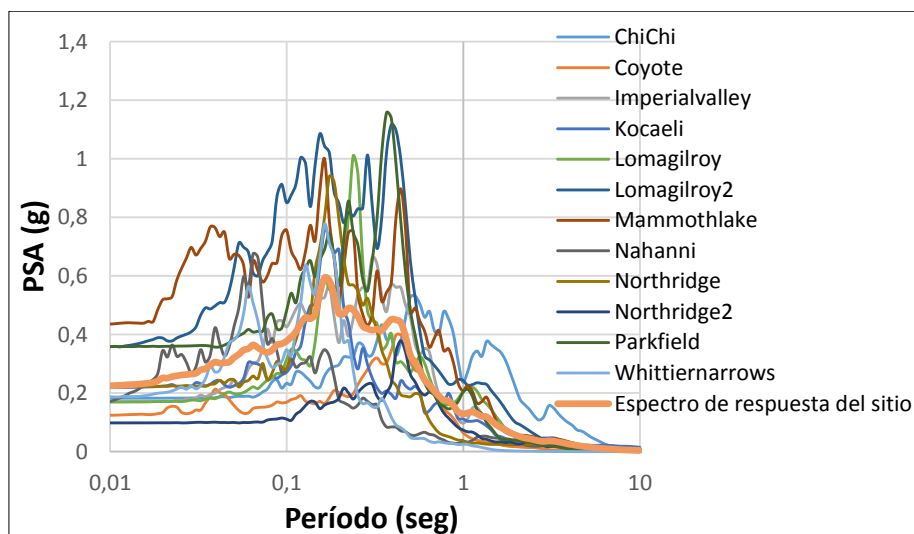
A continuación se presentan los resultados obtenidos del análisis lineal equivalente aproximado, en término de espectro elástico de respuesta, con el objetivo de determinar la respuesta del suelo ante un evento sísmico.

En la Figura 5.16 se presentan los diferentes espectros elásticos de respuesta para el mismo sitio de estudio, sin embargo el resultado que se tomó como respuesta del suelo es la curva gruesa de color anaranjado, obteniendo aceleraciones espectrales de 1.07 g con un período dominante de 0.42 seg.



**Figura 5.16.** Espectro de respuesta en superficie para el sitio de estudio. **Fuente:** Autores.

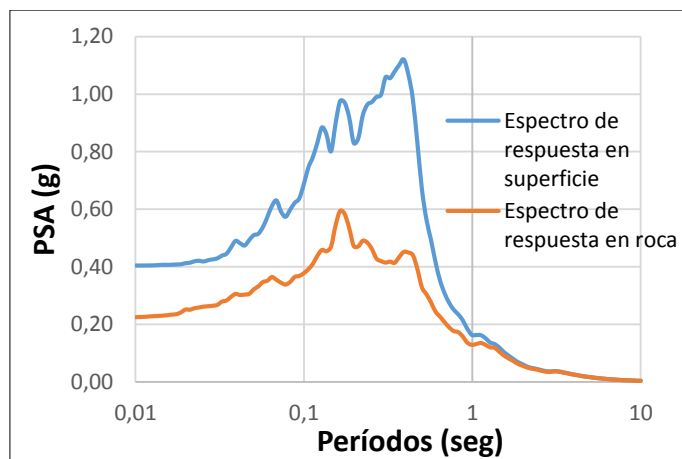
Asimismo se trabajó los espectros elásticos de respuesta en roca, calculando primeramente los espectros de respuesta para los 12 registros de entrada para obtener las pseudo-aceleraciones de cada registro. Posteriormente se trabaja en los espectros de respuesta en roca como se muestra en la Figura 5.17, observándose que la curva gruesa de color anaranjado representa el espectro elástico de respuesta en roca, obteniendo una aceleración espectral de 0.58 g con un período dominante de 0.17 seg.



**Figura 5.17.** Espectro de respuesta en roca para el sitio de estudio. **Fuente:** Autores.

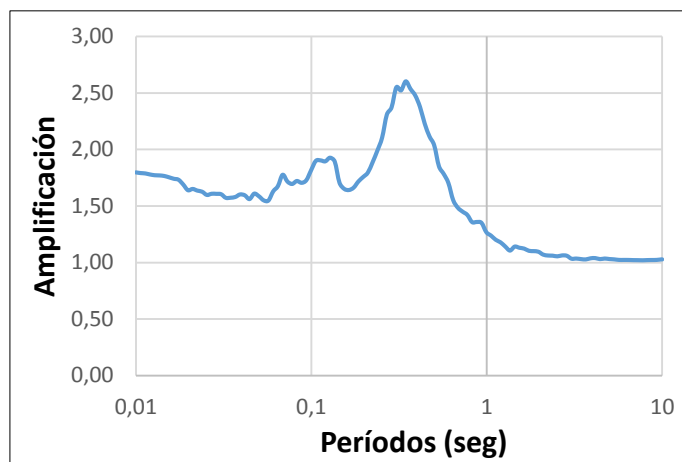
En la Figura 5.18 se observa el espectro de respuesta en superficie y la amplificación del suelo con respecto al espectro de respuesta en roca. El objetivo de realizar este estudio es para conocer la respuesta del suelo ante un fenómeno sísmico y determinar las condiciones del subsuelo.





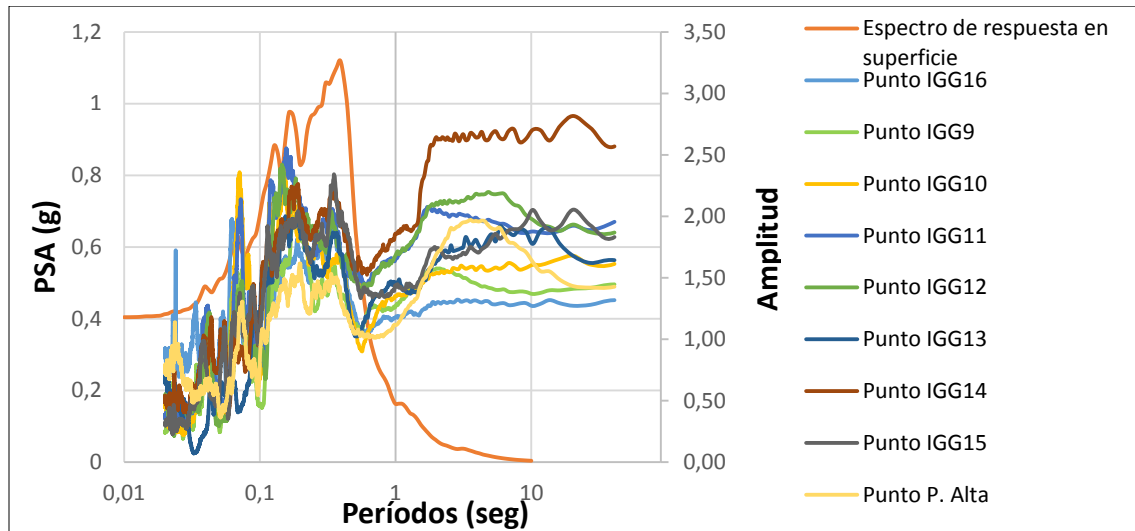
**Figura 5.18.** Amplificación del suelo. **Fuente:** Autores.

En la Figura 5.19 se muestra la función de amplificación del suelo, se realizó el cálculo haciendo una división entre el PSA en superficie con el PSA en roca para cada período correspondiente (ver Anexo F) y se obtuvo un factor de amplificación de 2.54, es decir, que la aceleración espectral de la superficie se amplificará 2.54 veces con respecto a la aceleración espectral del basamento.



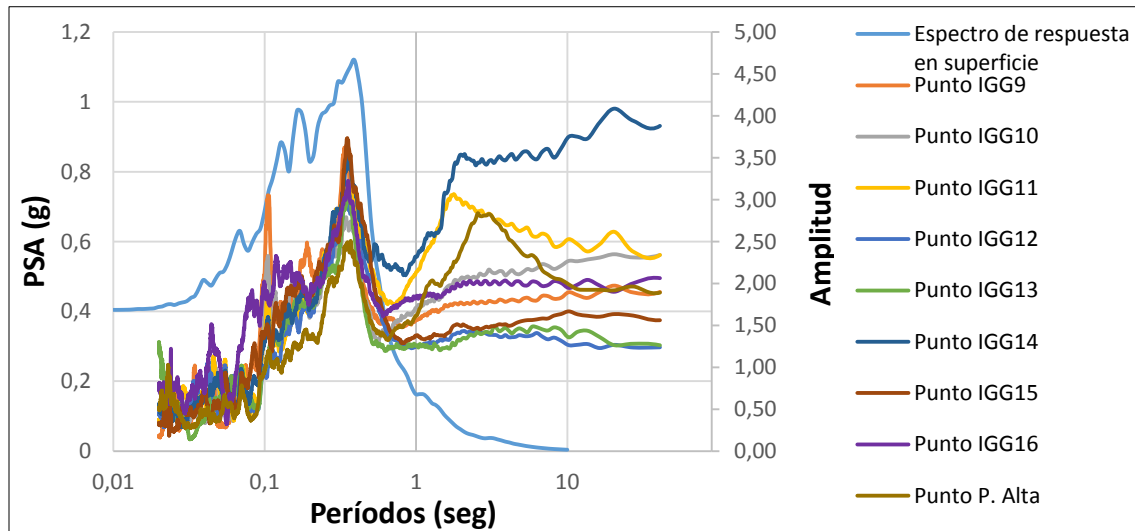
**Figura 5.19.** Función de amplificación del suelo. **Fuente:** Autores.

Para definir si la estructura sufre el fenómeno de resonancia, se procedió a realizar un análisis comparativo, incluyendo el cociente espectral H/V de la estructura en sus dos direcciones (NS y EW), versus el espectro de respuesta en superficie. En la Figura 5.20 se muestran las curvas de cociente espectral H/V en la dirección NS y se observa claramente que los períodos no coinciden con el período dominante del espectro de respuesta, sin embargo, el pico secundario del espectro de respuesta coincide con los períodos máximos de las curvas de cociente espectral, indicando cierto nivel de resonancia en la dirección NS.



**Figura 5.20.** Cociente espectral H/V de la estructura en la dirección NS versus el espectro de respuesta en superficie. **Fuente:** Autores.

Finalmente se continuó con el análisis comparativo, como se muestra en la Figura 5.21, observándose que los períodos de las curvas de cociente espectral H/V en la dirección EW coinciden con el período dominante del espectro de respuesta, diciéndonos de esta manera, que la estructura podría entrar en resonancia cuando ocurra un movimiento sísmico.



**Figura 5.21.** Cociente espectral H/V de la estructura en la dirección EW contra el espectro de respuesta en superficie. **Fuente:** Autores.

## CAPÍTULO VI – CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### 6.1 Conclusiones

En este capítulo se presentan los argumentos finales descrito en este trabajo. De acuerdo con los objetivos planteados es posible sintetizar las siguientes conclusiones:

El suelo en que se encuentra cimentado el edificio presenta variabilidad de períodos cortos y períodos largos, según la adquisición de señales obtenidas. De este modo, el período fundamental es de  $0.48 \text{ seg}$ ; considerando el punto IGG27 como el más representativo, con amplificaciones de 3.28 veces el movimiento horizontal con respecto al vertical, permitiendo identificar y estimar el período fundamental en que vibra el terreno en estudio.

Para determinar el período fundamental de la estructura se trabajó con un código en MatLab, siendo el período de  $0.21 \text{ seg}$  en la dirección NS y de  $0.36 \text{ seg}$  en la dirección EW, mostrándose de esta manera que el período del suelo es mayor al de la estructura. También se procedió a enumerar la cantidad de columnas en sus dos direcciones, encontrándose mayor cantidad de columnas en la dirección NS, lo que hace que la estructura tenga mayor rigidez en esa dirección.

Al analizar la interacción del suelo con la estructura, se encuentra que en la dirección NS hay dos pares de puntos que coinciden, con valores de 90% y 92% de similitud. Asimismo, en la dirección EW se encuentran dos pares de puntos que coinciden, con valores de 91% y 92% de similitud. En ambas direcciones, los períodos coinciden en el área sureste del edificio, lo que puede significar que en un movimiento sísmico se produzcan deformaciones considerables y daños moderados, producto de la resonancia.

Al realizar el modelo representativo de sitio, se trabajó con un modelo inicial, el cual se ajustó a la curva de cociente espectral H/V, obteniéndose el suelo firme a una profundidad de  $26 \text{ m}$ . Se calculó la velocidad de ondas de corte, siendo de  $336.44 \text{ m/s}$ , lo que se clasifica como suelo Tipo III, es decir, suelo moderadamente blando.

Basándose en el modelo de velocidad de ondas de corte y aplicando el método lineal equivalente aproximado, se crea un espectro de respuesta en superficie y un espectro de respuesta en roca, obteniendo aceleraciones espectrales de  $1.07 \text{ g}$  y  $0.58 \text{ g}$ , con períodos dominantes de  $0.42 \text{ seg}$  y  $0.17 \text{ seg}$ , respectivamente. También se definió la función de amplificación del suelo, con un factor de 2.54 veces la aceleración espectral de la superficie con respecto al basamento. Finalmente se comparó la curva de cociente espectral H/V en la dirección NS y EW con el espectro de respuesta en superficie, verificándose las coincidencias de los períodos, es decir, que la estructura podría entrar en resonancia.

## 6.2 Recomendaciones

A partir de la metodología propuesta y los resultados obtenidos en este trabajo monográfico, surgen algunas recomendaciones, las cuales son:

Al realizar la recolección de datos, se recomienda el uso de varios equipos para la adquisición de señales (sismógrafo digital, acelerógrafo digital y geófonos), con el fin de obtener registros simultáneos en los diferentes puntos del sitio en estudio.

Se recomienda realizar el análisis estructural al edificio, considerando un análisis bidimensional o tridimensional, obteniendo así deformaciones, fuerzas internas y períodos de vibración, los cuales se pueden comparar con los períodos adquiridos en el método de cociente espectral H/V.

Se deben de trabajar los registros de ruido ambiental con otros métodos basados en la teoría de ondas superficiales, tales como: F-K, SPAC, MASW u otros métodos, con el fin de validar las mediciones y obtener resultados más aproximados.

Finalmente, se espera que esta investigación sirva de referencia para estudiantes, docentes y toda clase de investigadores que se mantengan en pro de la ingeniería sísmica, en particular a los interesados en el método de vibración ambiental y modelos de velocidad de ondas de corte; buscando de esta manera mejores diseños para futuras edificaciones, a través del conocimiento de métodos, técnicas, equipos y otros recursos valiosos en el ámbito sísmico.

**CAPÍTULO VII – BIBLIOGRAFÍA**

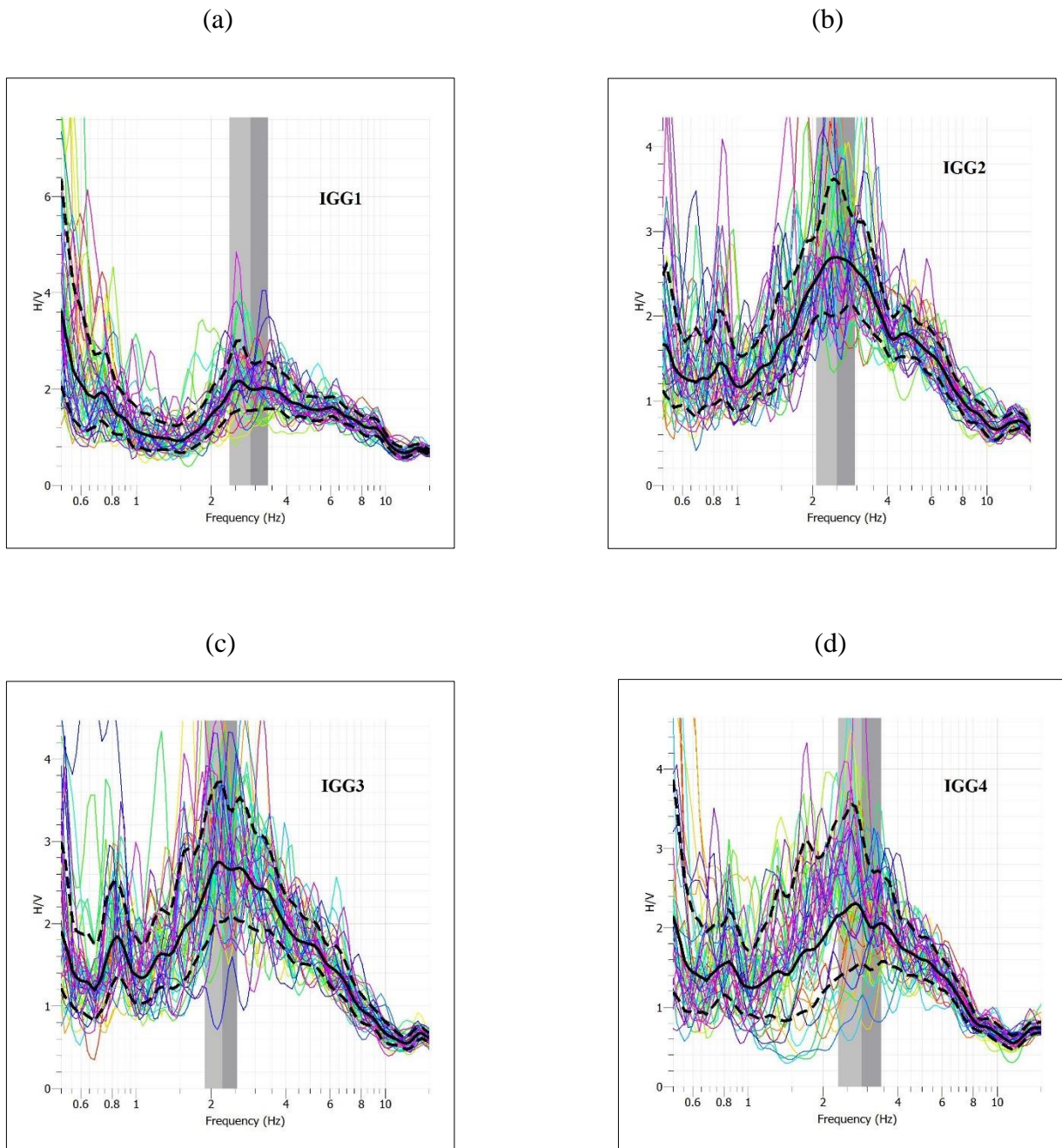
- Armando. (25 de Mayo de 2013). *Actividades de matemáticas y física*. Recuperado el 31 de Mayo de 2016, de <http://wallgmat.blogspot.com/2013/05/ondas-sismicas.html>
- Barbat, A. H., & Canet, J. M. (1994). *Estructuras sometidas a acciones sísmicas. Cálculo por ordenador*. Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona.
- Bard, P. (1999). *Microtremor measurements: A tool for site effect estimation. The Effects of Surface Geology on Seismic Motion*.
- Borge, G., & Castro, K. (2016). *Análisis de riesgo sísmico en el recinto universitario "Rubén Darío" de la UNAN-Managua, utilizando la herramienta de estimación de pérdidas S.E.L.E.N.A.* Tesis monográfica, Managua.
- Carrasco, P., & Zuñiga, M. (2007). *Material de apoyo de la enseñanza y aprendizaje de la asignatura de "probabilidad y estadística (civ-271)" (texto alumno)*. Cochabamba, Bolivia.
- Castrillo, E. N., Eto, K., Yokoi, T., & Ulriksen, P. (2014). Local site effect characterization in the old downtown area of Managua city, Nicaragua based on long period microtremors. *The 5th Asia Conference on Earthquake Engineering*.
- Chopra, A. K. (2014). *Dinámica de estructuras* (Cuarta ed.). México: Pearson Educación.
- Desarrollo Urbano del Ministerio de Transporte e infraestructura. (2007). *Reglamento Nacional de Construcción*. Managua.
- Faccioli, E., Santoyo, E., & T, L. J. (1973). Microzonation criteria and seismic response studies for the city of Managua. *Proceedings of the Conference on the Managua, Nicaragua Earthquake of December 23, 1972, Vol. II*.
- Fernández, L., & Brandt, M. (2000). The reference spectral noise ratio method to evaluate the seismic response of a site.
- Giraldo, V., Alfaro, A., Pujades, L., & Canas, J. (1999). *Estimación de efecto locales con movimientos sísmicos y microtemblores*. Monografías de Ingeniería Sísmica, Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería, Barcelona.
- Hashash, Y., & Park, D. (s.f.). *Deepsoil cee Illinois*. Recuperado el 15 de Agosto de 2016, de <http://deepsoil.cee.illinois.edu/Support.aspx?v=6.0.6.1>
- Hernández, M., & Mercado, O. (2015). *Diseño y aplicación de códigos en Matlab para el cálculo de parámetros dinámicos en análisis sísmicos de suelos y estructuras*. Managua.
- Hernández, Z., Atakan, K., & Havskov, J. (1994). *Seismicity and tectonics near Managua, Nicaragua*. Universidad de Bergen, Instituto de Física de Sólidos Terrestres, Bergen.
- Hradecky; INETER. (1997). *Geología y Peligro Geológico en Managua, Nicaragua*. Prague-Managua.
- INETER. (2005). *Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales*. Obtenido de <http://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/sis/proyectos/micromana/2-sismicidad-res.htm>
- INIDE. (2005). *Ficha técnica del municipio de Managua*. Ficha técnica, Instituto Nacional de Información de Desarrollo, Managua. Recuperado el 25 de Mayo de 2016

- James, G., Burley, D., Clements, D., Dyke, P., Searl, J., Steele, N., & Wright, J. (2007). *Matemáticas avanzadas para Ingeniería* (Segunda ed.). Pearson Educación.
- Jaramillo, A., Piña, J., & Aguilar, R. (2012). *Aplicación del método de cocientes espectrales para la reconfiguración detallada del mapa de Isoperiodos en la cuenca del valle de México*. Sociedad Mexicana de Ingeniería Geotécnica, A.C. , Cancún. Recuperado el 5 de Abril de 2016
- Kramer, S. L. (1996). *Geotechnical Earthquake Engineering*. New Jersey: Prentice Hall.
- Lachet, C., & Bard, P. (1994). "Numerical and Theoretical Investigations on the Possibilities and Limitations of Nakamura's Technique".
- Lermo, J., & Chávez-García. (1994). *Site effect e evaluation at Mexico City: dominant period and relative amplification from strong motion and microtremor records*. *Soil Dynami*.
- Little, J., & Moler, C. (1984). *MathWorks*. Recuperado el Mayo de 2016, de MathWorks: <https://www.mathworks.com/products/matlab/>
- Martínez Bermúdez, W., & Rodríguez Altamirano, D. (Enero de 1995). *¿Por qué ocurren los terremotos?* Revista Tierra Nº 1, Centro de Investigaciones Geocientíficas, Managua.
- Moore Coleman, F. A. (1990). *Análisis del comportamiento dinámico de los suelos durante sismos en el área de Managua, Nicaragua*. Tesis de grado, Universidad de Costa Rica, San José.
- Moreno, L., & Alfaro, A. (2012). *De los microsismos a los microtemblores*. Instituto Geofísico Universidad Javeriana, Santafé de Bogotá.
- Murillo, G., & Membreño, D. (2005). *Períodos de Vibración Predominantes de las Estructuras de Adobe y Taquezal en el Centro Histórico de la Ciudad de Granada, Nicaragua*. Monografía, Managua.
- Nakamura, Y. (1989). *A method for dynamic characteristics estimation of subsurface using microtremor on the ground surface*.
- Nakamura, Y. (2000). *Clear Identification Of Fundamental Idea Of Nakamura's Technique And Its Applications*.
- NEHRP Recommended Provisions. (2003). *For Seismic Regulations for New Buildings and other Structures*. National Earthquake Hazards Reduction Program.
- Newmark, N. M., & Rosenblueth, E. (1978). *Fundamentos de ingeniería sísmica* (Primera ed.). México: DIANA.
- Obando, E. A. (2011). *On the Application of Surface Wave Surveys for Seismic Site Response Evaluation*. Tesis doctoral, Lund University, Suecia.
- Ortiz, L. (2010). *Identificación de cambios en el comportamiento estructural de un edificio experimental, mediante el análisis de vibración ambiental y vibración forzada, empleando técnicas de identificación de sistemas*. Tesis maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California.

- Páiz, E., & Bendaña, R. (2015). *Análisis de amenaza sísmica y respuesta de sitio considerando el potencial del fallamiento superficial en el Campus del Recinto Universitario "Rubén Darío" (RURD) de la UNAN-Managua*. Investigación monográfica, Managua.
- Parrales, R., & Picado, M. (Abril de 2001). *Análisis de espectros de respuesta en el área de la ciudad de Managua*. Monografía, Managua.
- Pino, Riviera, Ejmeza, Triku, Jynus, & Elwikipedista. (s.f.). *Wikipedia, la enciclopedia libre*. Recuperado el 02 de Septiembre de 2016, de <https://es.wikipedia.org/wiki/MATLAB?oldid=92409722>
- Ramírez, M., & Caamaño, J. (2002). *Análisis de vibración sísmica y ambiental de un edificio antes y después de su refuerzo mediante dos cuerpos anexos*. Puebla.
- Rios, R. (2 de Mayo de 2007). *Carpeta pedagógica*. Recuperado el 24 de Mayo de 2016, de <http://carpetapedagogica.com/conocenos.php>
- Ritta, R., Suárez, L., & Pando, M. (2012). *Determinación del período fundamental del suelo usando vibración ambiental y cociente espectral horizontal/vertical*. Mayagüez.
- Romero, C. (2005). *Estudio del efecto de sitio en área urbana de la Ciudad de Catarina*. Investigación, Centro de Investigaciones Geocientíficas, Managua.
- Saéz, A. (2001). *Estructuras III. E.T.S. Arquitectura de Sevilla*. Sevilla.
- Sandoval, V., & Vera, M. (2013). *Estudio de la Robustez de la estimación espectral de la técnica H/V de Nakamura para estudios de caracterización dinámica de suelos*. Valdivia.
- SARA electronic instruments. (s.f.). Recuperado el 29 de Abril de 2016, de [http://www.sara.pg.it/documents/commercial/SR04\\_GEOBOX\\_DATASHEET\\_ITA.pdf](http://www.sara.pg.it/documents/commercial/SR04_GEOBOX_DATASHEET_ITA.pdf)
- Secretaría de Obras Públicas. (1973). *Managua. Estudios tectónicos*. México.
- Seo, K., Yamanaka, H., Kurita, K., Motoki, K., Eto, K., Terasaka, M., & Kobayashi, H. (1995). *A joint research on microtremors in Fukui Basin, Japan - For site effects evaluation during the 1948 Fukui (Japan) earthquake*. International Conference Seismic Zonation, Hokkaido.
- Strauch, W. (2000). *Microzonificación sísmica de Managua*. Managua.
- Talavera, E. (2005). *Instituto Nicaraguense de Estudios Territoriales*. Obtenido de <http://webserver2.ineter.gob.ni/geofisica/sis/proyectos/micromana/2-sismicidad-res.htm>
- Valera, J. E. (1973). Soil conditions and local soil effects during the Managua earthquake of December 23, 1972. *Conference Proceeding. Vol I*. San Francisco.
- Vargas, C. (20 de Junio de 2015). *blogpot*. Recuperado el 31 de Mayo de 2016, de <http://antisismos.blogspot.com/2015/06/antecedentes-generales-chile-se.html>
- WOODWARD-CLYDE CONSULTANTS. (1975). *Investigation of active faulting in Managua, Nicaragua & vicinity*. Oakland.
- Zharkov, V. N. (1985). *Estructura interior de la tierra y de los planetas*. Moscú.

## CAPÍTULO VIII - ANEXOS

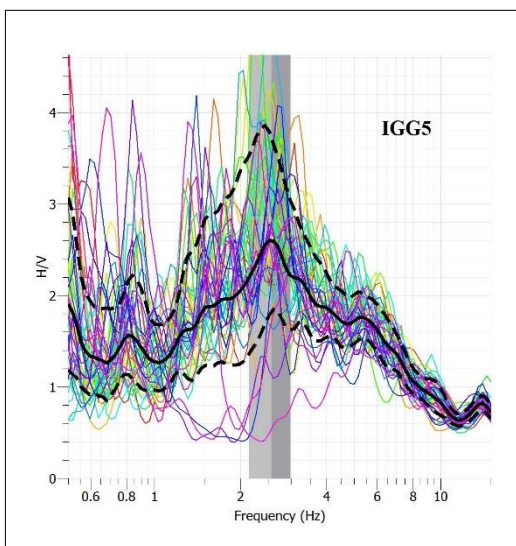
## 8.1 Anexo A. Curvas de cociente espectral H/V del suelo.



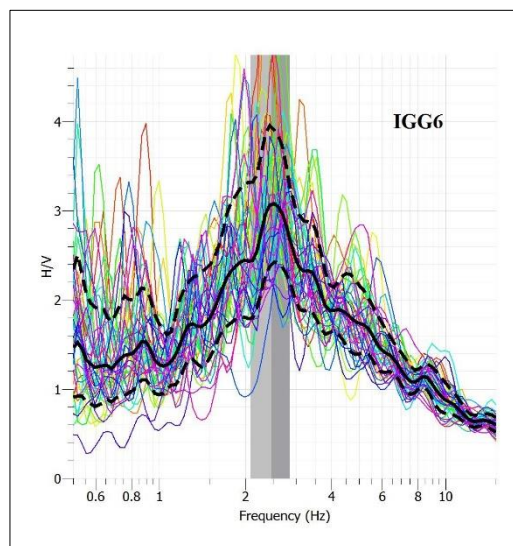
**Anexo 1.** Curvas de cociente espectral H/V para (a) punto IGG1, (b) punto IGG2, (c) punto IGG3, y (d) punto IGG4. **Fuente:** Geopsy v2.9.0.



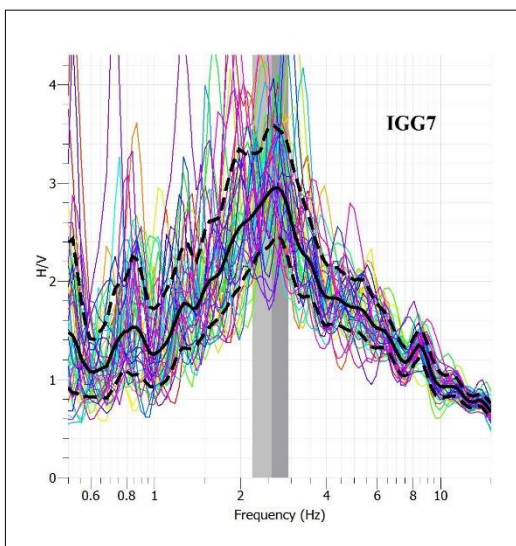
(e)



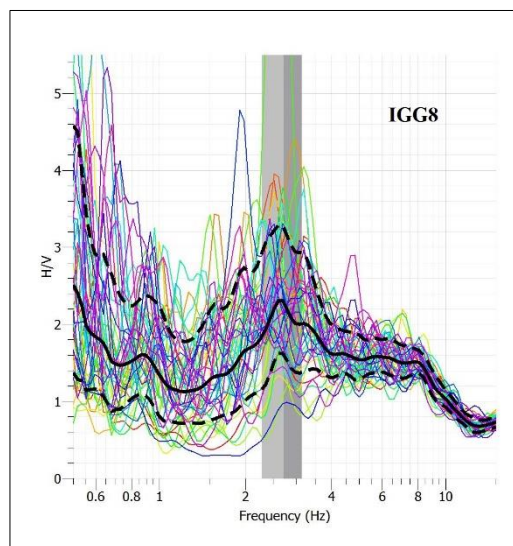
(f)



(g)

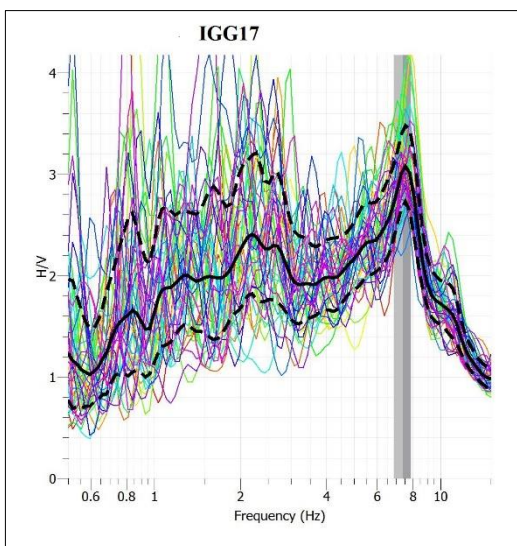


(h)

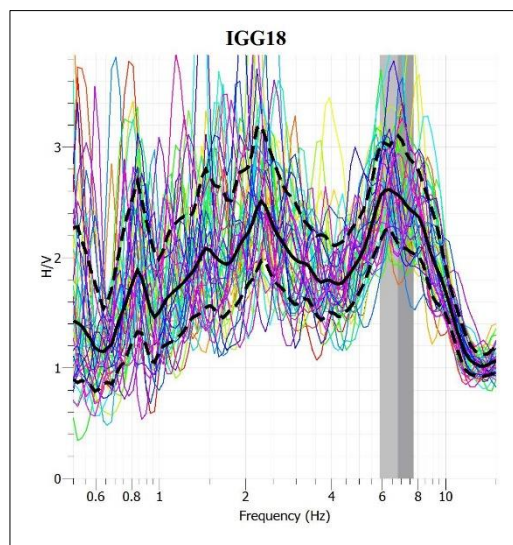


**Anexo 2.** Curvas de cociente espectral  $H/V$  para (e) punto IGG5, (f) punto IGG6, (g) punto IGG7, y (h) punto IGG8. **Fuente:** Geopsy v2.9.0.

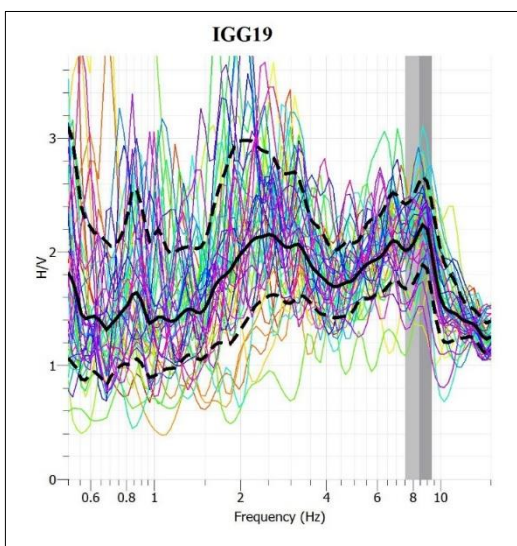
(i)



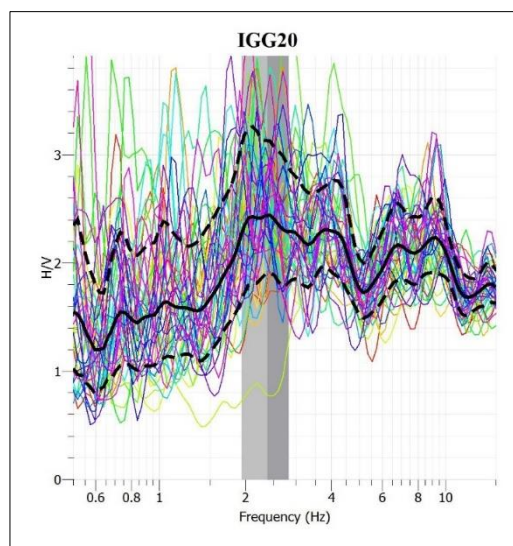
(j)



(k)

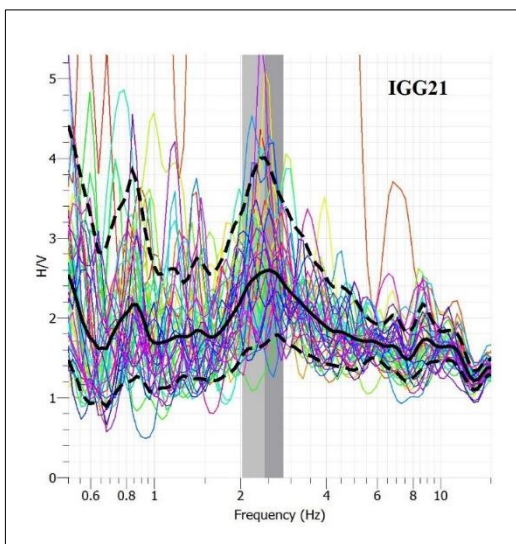


(l)

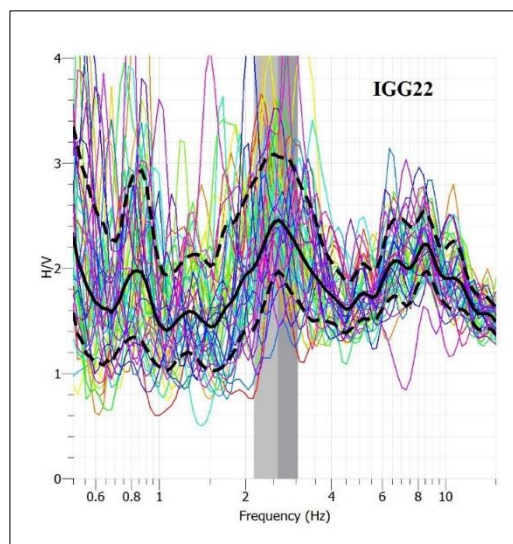


**Anexo 3.** Curvas de cociente espectral  $H/V$  para (i) punto IGG17, (j) punto IGG18, (k) punto IGG19, y (l) punto IGG20. **Fuente:** Geopsy v.2.9.0.

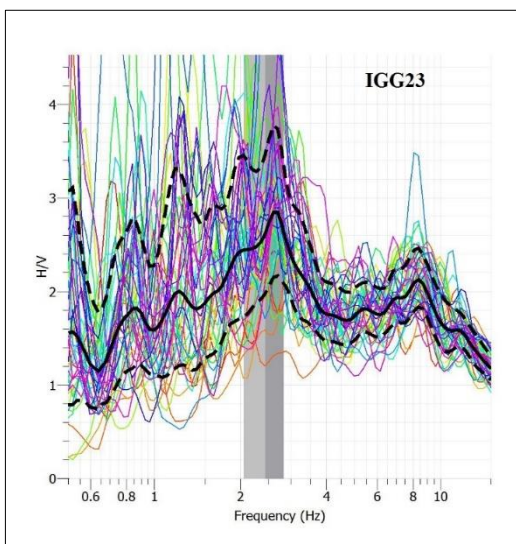
(m)



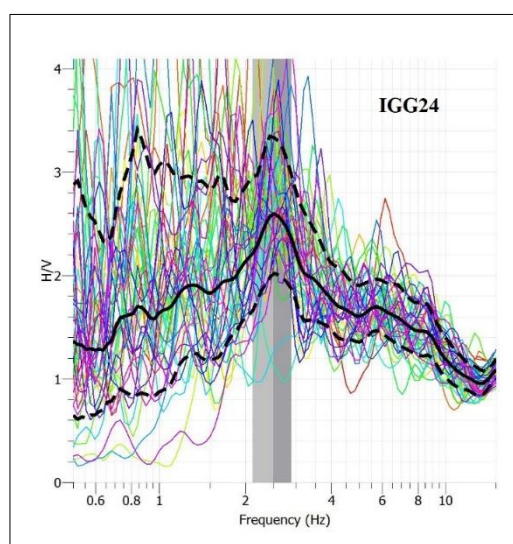
(n)



(o)

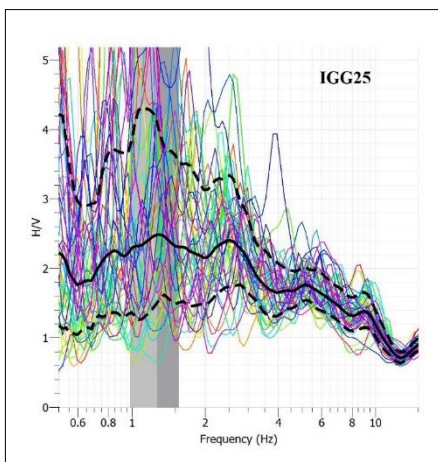


(p)

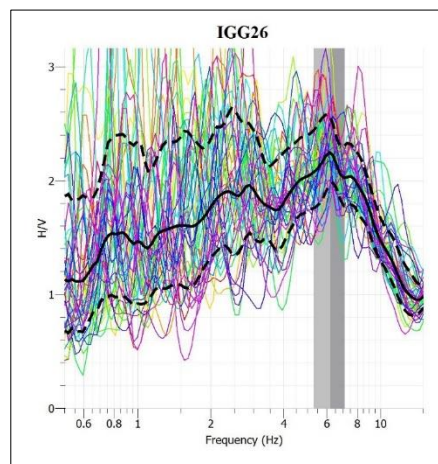


**Anexo 4.** Curvas de cociente espectral H/V para (m) punto IGG21, (n) punto IGG22, (o) punto IGG23, y (p) punto IGG24. **Fuente:** Geopsy v2.9.0.

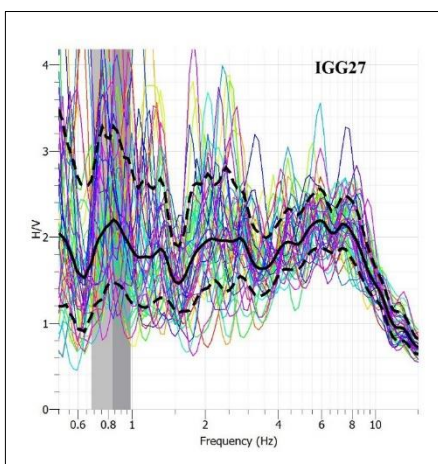
(q)



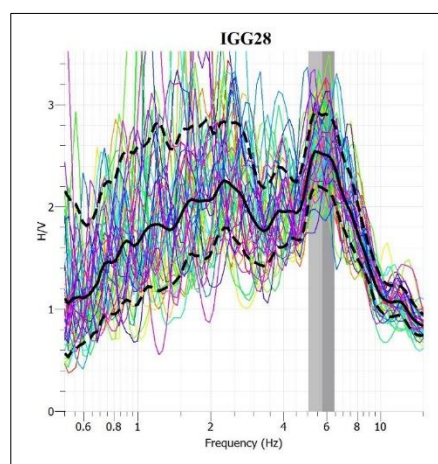
(r)



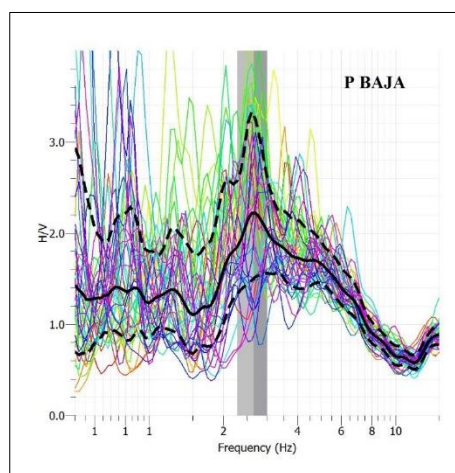
(s)



(t)



(u)



**Anexo 5.** Curvas de cociente espectral H/V para (q) punto IGG25, (r) punto IGG26, (s) punto IGG27, (t) punto IGG28 y (u) punto P BAJA. **Fuente:** Geopsy v2.9.0.

## 8.2 Anexo B. Estructura del código utilizado en MatLab para obtener las curvas de cociente espectral H/V de la estructura

```

clear all;
clc;

% Cálculo del Cociente Espectral H/V del IGG-CIGEO.....

load 'EW.txt';
load 'NS.txt';
load 'UD.txt';

fs=100;
dt=1/fs;

% Longitud de la señal en segundos.....

logint=60;
n_int=(length(NS)/fs)/logint;

ti=(1:logint:(logint*n_int))*fs;

lead=40;
lag=50;

% Aplicando el bucle For a las componentes.....

for i=1:n_int-1;

nfft=2^nextpow2(length(NS(ti(i):ti(i+1))));

EWcomp=fft(EW(ti(i):ti(i+1)),nfft);
NScomp=fft(NS(ti(i):ti(i+1)),nfft);
UDcomp=fft(UD(ti(i):ti(i+1)),nfft);

AmpEW=abs(EWcomp(1:nfft/2));
AmpNS=abs(NScomp(1:nfft/2));
AmpUD=abs(UDcomp(1:nfft/2));

[S1(:,i),L1(:,i)]=movavg(AmpNS,lead,lag,1);
[S2(:,i),L2(:,i)]=movavg(AmpEW,lead,lag,1);
[S3(:,i),L3(:,i)]=movavg(AmpUD,lead,lag,1);

end

freq=linspace(0,1,nfft/2).*fs/2;

% Suavizado del espectro de frecuencia del IGG-CIGEO usando la función
movavg.....

hv1=S1./S3;
hv2=S2./S3;

```

```

hvprom1=mean (hv1, 2);
hvprom2=mean (hv2, 2);

Desv1=std (hv1);
Desv2=std (hv2);

Desv1prom=mean (Desv1, 2);
Desv2prom=mean (Desv2, 2);

MinDisp1=hvprom1-Desv1prom;
MaxDisp1=hvprom1+Desv1prom;

MinDisp2=hvprom2-Desv2prom;
MaxDisp2=hvprom2+Desv2prom;

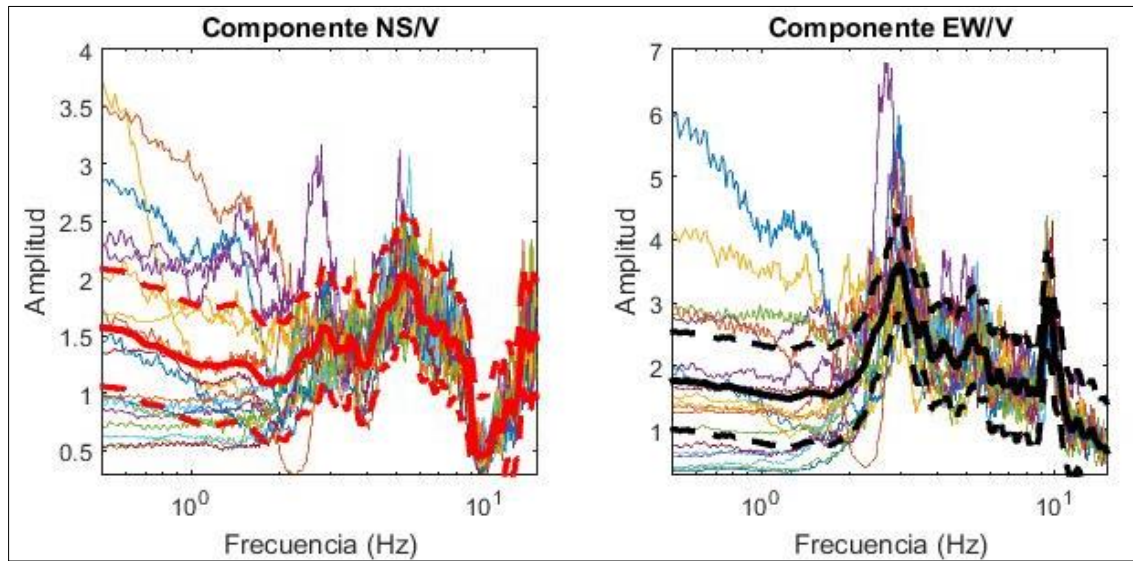
subplot (1,2,1)
semilogx (freq,hv1); hold on;
semilogx (freq,hvprom1, 'red', 'LineWidth', 3); hold on;
semilogx (freq,MinDisp1, 'red--', 'LineWidth', 2.5);hold on;
semilogx (freq,MaxDisp1, 'red--', 'LineWidth', 2.5);hold on;
title ('Componente NS/V')
xlabel ('Frecuencia (Hz)')
ylabel ('Amplitud')
axis ([0.5 15 0.3 5])

subplot (1,2,2)
semilogx (freq,hv2); hold on;
semilogx (freq,hvprom2, 'black', 'LineWidth', 3); hold on;
semilogx (freq,MinDisp2, 'black--', 'LineWidth', 2.5);hold on;
semilogx (freq,MaxDisp2, 'black--', 'LineWidth', 2.5);hold on;
title ('Componente EW/V')
xlabel ('Frecuencia (Hz)')
ylabel ('Amplitud')
axis ([0.5 15 0.3 5])

```

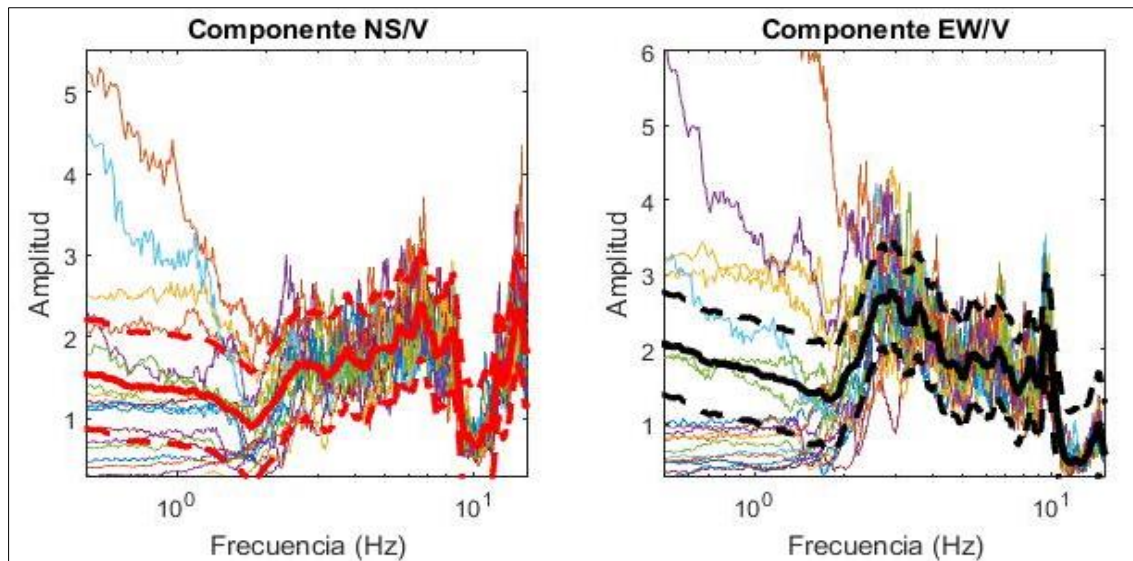
**Anexo 6.** Diseño del código para determinar la frecuencia natural de la estructura, realizado en MatLab. **Fuente:** Autores.

### 8.3 Anexo C. Curvas de cociente espectral H/V de la estructura.



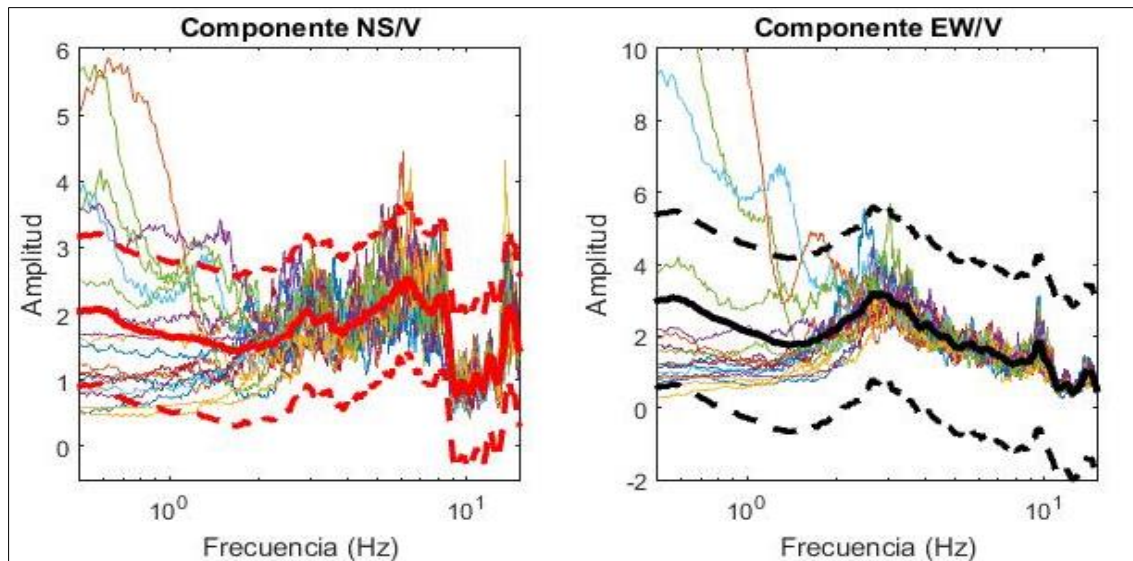
**Anexo 7.** Cociente espectral del punto "IGG9" tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.

**Fuente:** MatLab R2015a.

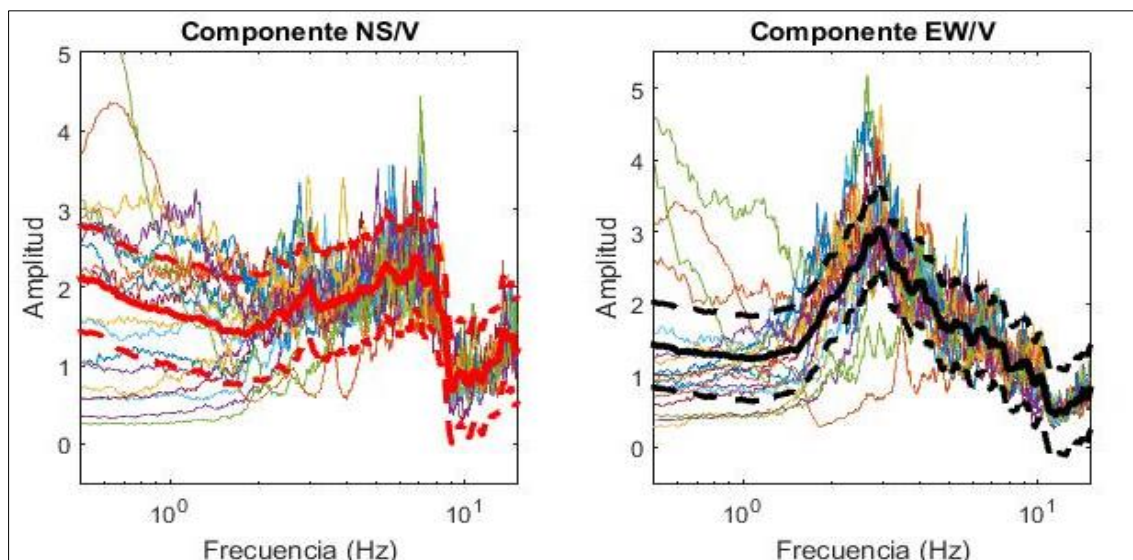


**Anexo 8.** Cociente espectral del punto "IGG10" tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.

**Fuente:** MatLab R2015a.

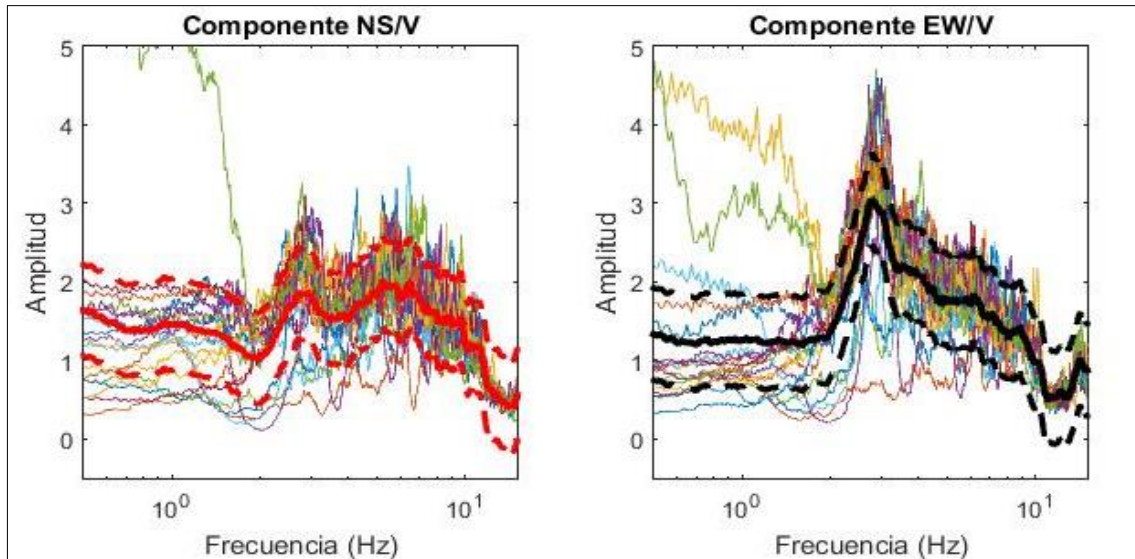


**Anexo 9.** Cociente espectral del punto "IGG11" tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.  
**Fuente:** MatLab R2015a.

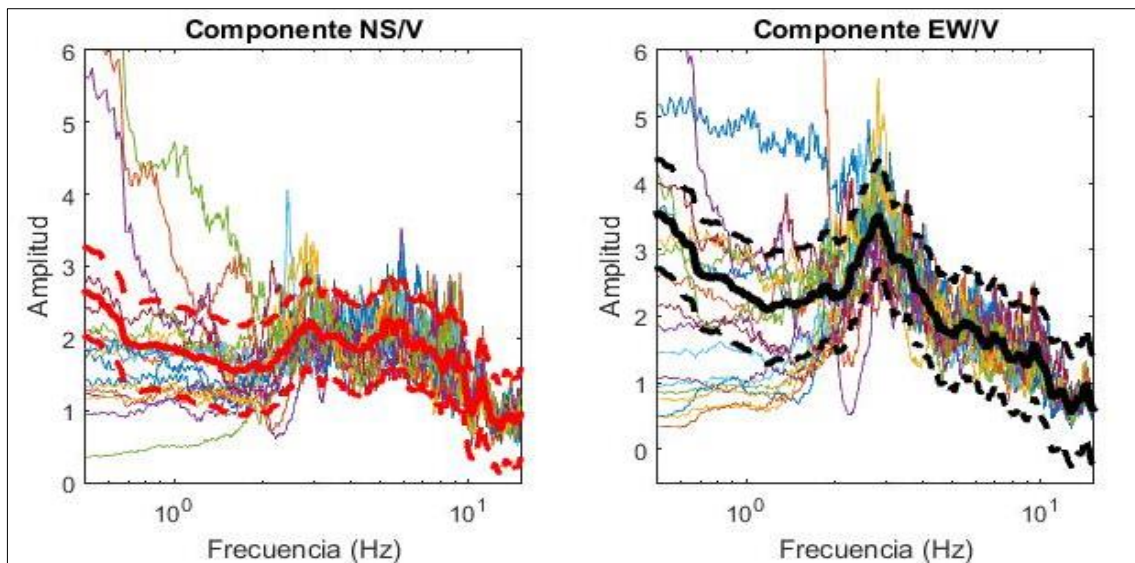


**Anexo 10.** Cociente espectral del punto "IGG12" tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.  
**Fuente:** MatLab R2015a.

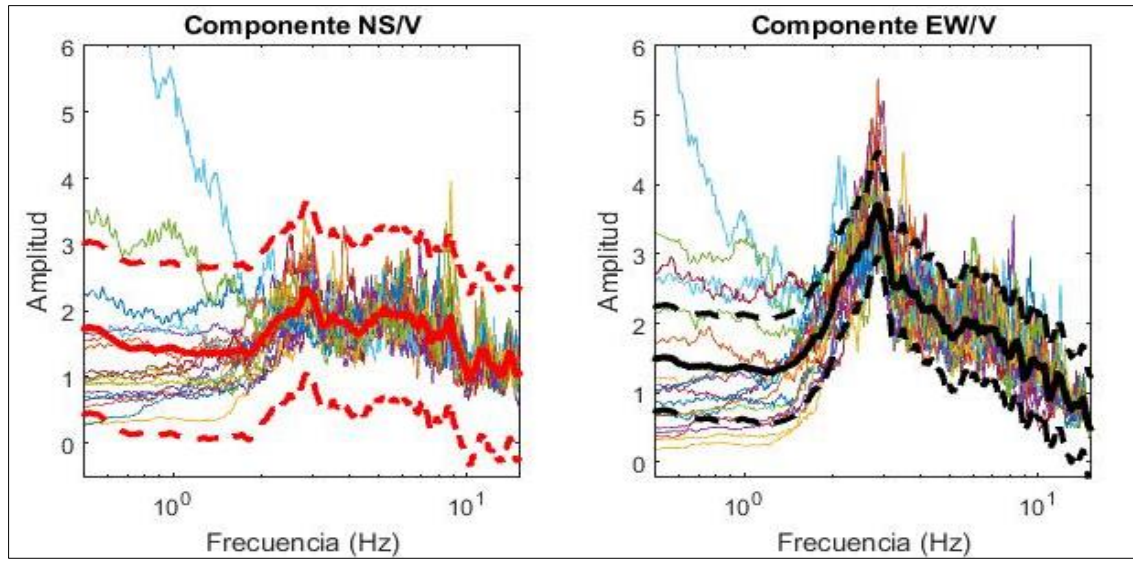




**Anexo 11.** Cociente espectral del punto "IGG13" tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.  
**Fuente:** MatLab R2015a.



**Anexo 12.** Cociente espectral del punto "IGG14" tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.  
**Fuente:** MatLab R2015a.



**Anexo 13.** Cociente espectral del punto "IGG15" tomando en cuenta sus dos componentes NS y EW.  
**Fuente:** MatLab R2015a.

#### 8.4 Anexo D. Estructura del código en MatLab para crear la función de transferencia teórica

```

% Calculate the theoretical HVSR based on the work by herak.....

clear all;
clc;

% Parámetros Iniciales.....

load Shake.mat;
Vs=[200,350,570,1300];           % Velocidad de Ondas S
H=[5,19,26,999];                % Espesor de estratos
Pois=[0.3,0.3,0.3,0.3];         % Relación de Poisson
Vp=Vs.*sqrt((2-2.*Pois)./(1-2.*Pois)); % Velocidad de ondas P
dens=[1.713,1.734,1.734,1.815]; % Densidad (Ton/m^3)
Qs=[7,25,30,999];              % Factor de calidad de corte
Qp=[13,46,58,999];             % Factor de calidad de compresión
SampleRate=0.01;               % Intervalo de muestreo

% Cálculo de función de transferencia a partir de ondas de cuerpo.....

TF_s=HVSR_INV(Shake,SampleRate,H,Vs,dens,Qs); % Función de transferencia de Ondas S
TF_p=HVSR_INV(Shake,SampleRate,H,Vp,dens,Qp); % Función de transferencia de Ondas P

freq=linspace(0,1,length(TF_s)/2)*(1/SampleRate)/2; % Frecuencia de muestro
AsbHVSR=TF_s(1:length(freq))./TF_p(1:length(freq)); % Amplitud de HVSR

load IGG22.txt;
freq1=IGG22(:,1);
Ampl=IGG22(:,2);
semilogx(freq,AsbHVSR,'red'); hold on;
semilogx(freq1,Ampl,'blue'); hold on;
axis([1 30 0 4.5]);grid on;

```

**Anexo 14.** Diseño del código en MatLab para crear la función de transferencia teórica.

**Fuente:** Autores.

## 8.5 Anexo E. Pseudo-aceleraciones de los terremotos extraídos de DEEPSOIL v.6.0

### 8.5.1 Pseudo-aceleraciones para espectros de respuesta en superficie.

*Anexo 15. Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Chichi. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.*

Terremoto ChiChi		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.318851	0.099683	0.488966	1.057370	0.303323
0.010641	0.318872	0.106074	0.614567	1.125170	0.343661
0.011324	0.318890	0.112875	0.690368	1.197310	0.367948
0.012050	0.318950	0.120112	0.648476	1.274080	0.345872
0.012822	0.319150	0.127814	0.599625	1.355770	0.404818
0.013644	0.319313	0.136009	0.451473	1.442700	0.394822
0.014519	0.319471	0.144730	0.354759	1.535200	0.376392
0.015450	0.319250	0.154009	0.337405	1.633640	0.355823
0.016441	0.319425	0.163884	0.403458	1.738380	0.327981
0.017495	0.319947	0.174392	0.418856	1.849840	0.280745
0.018617	0.319973	0.185573	0.448101	1.968450	0.231058
0.019810	0.320225	0.197472	0.477257	2.094660	0.186454
0.021080	0.320517	0.210134	0.593744	2.228970	0.165337
0.022432	0.320844	0.223607	0.663241	2.371880	0.147999
0.023870	0.321155	0.237944	0.795032	2.523960	0.128450
0.025401	0.321515	0.253200	0.894034	2.685800	0.114018
0.027029	0.321898	0.269435	0.811442	2.858000	0.122032
0.028762	0.322350	0.286711	0.802428	3.041250	0.158827
0.030607	0.323239	0.305094	0.853844	3.236250	0.153227
0.032569	0.323850	0.324656	0.853927	3.443750	0.132289
0.034657	0.324568	0.345472	1.036930	3.664560	0.115597
0.036879	0.323217	0.367623	0.888566	3.899520	0.102079
0.039244	0.323785	0.391194	0.872021	4.149550	0.091614
0.041760	0.326078	0.416277	0.727706	4.415610	0.075148
0.044438	0.330531	0.442967	0.687387	4.698730	0.071002
0.047287	0.329097	0.471369	0.748179	5	0.061213
0.050319	0.326453	0.501593	0.865303	5.320590	0.050046
0.053545	0.334341	0.533754	0.793708	5.661730	0.041775
0.056979	0.329650	0.567977	0.750907	6.024750	0.033357
0.060632	0.330964	0.604394	0.620074	6.411040	0.025580
0.064520	0.339268	0.643146	0.640521	6.822110	0.020828
0.068656	0.335852	0.684384	0.538642	7.259520	0.017789
0.073058	0.370063	0.728265	0.509309	7.724990	0.014972
0.077743	0.415951	0.774959	0.582382	8.220300	0.012581
0.082728	0.421144	0.824648	0.535610	8.747370	0.010496
0.088032	0.399267	0.877523	0.477252	9.308230	0.008705
0.093676	0.437247	0.933788	0.363675	9.905050	0.007215
		0.993660	0.268427	10	0.007020

**Anexo 16.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Coyote. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Coyote		Período (s)	PSA (g)		Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)					
0.010	0.251333	0.099683	0.385373		1.057370	0.072563
0.010641	0.251414	0.106074	0.411918		1.125170	0.059209
0.011324	0.251540	0.112875	0.458782		1.197310	0.048973
0.012050	0.251630	0.120112	0.453905		1.274080	0.042220
0.012822	0.251975	0.127814	0.393117		1.355770	0.037752
0.013644	0.252076	0.136009	0.360846		1.442700	0.032373
0.014519	0.252103	0.144730	0.338190		1.535200	0.031989
0.015450	0.251478	0.154009	0.334033		1.633640	0.025902
0.016441	0.250370	0.163884	0.307942		1.738380	0.022339
0.017495	0.251561	0.174392	0.302300		1.849840	0.021204
0.018617	0.252507	0.185573	0.378344		1.968450	0.020422
0.019810	0.253738	0.197472	0.433075		2.094660	0.018508
0.021080	0.254918	0.210134	0.460245		2.228970	0.015526
0.022432	0.260115	0.223607	0.442981		2.371880	0.014580
0.023870	0.268061	0.237944	0.484206		2.523960	0.014379
0.025401	0.271183	0.253200	0.555158		2.685800	0.011683
0.027029	0.283181	0.269435	0.609372		2.858000	0.009532
0.028762	0.294654	0.286711	0.686191		3.041250	0.007920
0.030607	0.307112	0.305094	0.835291		3.236250	0.006871
0.032569	0.327999	0.324656	0.827012		3.443750	0.005929
0.034657	0.342972	0.345472	0.730061		3.664560	0.005103
0.036879	0.378644	0.367623	0.703379		3.899520	0.004391
0.039244	0.402986	0.391194	0.779020		4.149550	0.003783
0.041760	0.409197	0.416277	0.846223		4.415610	0.003265
0.044438	0.390456	0.442967	0.782187		4.698730	0.002825
0.047287	0.371186	0.471369	0.672872		5	0.002451
0.050319	0.335288	0.501593	0.542074		5.320590	0.002132
0.053545	0.284768	0.533754	0.471152		5.661730	0.001859
0.056979	0.280730	0.567977	0.434896		6.024750	0.001624
0.060632	0.295233	0.604394	0.406427		6.411040	0.001421
0.064520	0.302532	0.643146	0.348532		6.822110	0.001246
0.068656	0.328999	0.684384	0.276733		7.259520	0.001093
0.073058	0.336550	0.728265	0.236978		7.724990	0.000961
0.077743	0.325667	0.774959	0.205968		8.220300	0.000845
0.082728	0.311931	0.824648	0.186078		8.747370	0.000743
0.088032	0.363252	0.877523	0.161636		9.308230	0.000654
0.093676	0.384392	0.933788	0.127996		9.905050	0.000576
		0.993660	0.095181		10	0.000565

**Anexo 17.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Imperial Valley. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Imperial Valley		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.443725	0.099683	0.761988	1.057370	0.130438
0.010641	0.443748	0.106074	0.845578	1.125170	0.171043
0.011324	0.443878	0.112875	0.990897	1.197310	0.171173
0.012050	0.444147	0.120112	1.015000	1.274080	0.148109
0.012822	0.444211	0.127814	1.117830	1.355770	0.123551
0.013644	0.444288	0.136009	1.071500	1.442700	0.107160
0.014519	0.444635	0.144730	0.861509	1.535200	0.094131
0.015450	0.445051	0.154009	0.835961	1.633640	0.084576
0.016441	0.445347	0.163884	0.846812	1.738380	0.079568
0.017495	0.445583	0.174392	0.887917	1.849840	0.065967
0.018617	0.445099	0.185573	0.861818	1.968450	0.066498
0.019810	0.446305	0.197472	0.714046	2.094660	0.056066
0.021080	0.446563	0.210134	0.812524	2.228970	0.048708
0.022432	0.447177	0.223607	0.885525	2.371880	0.045678
0.023870	0.448823	0.237944	1.005460	2.523960	0.041432
0.025401	0.449686	0.253200	1.164400	2.685800	0.039230
0.027029	0.453393	0.269435	1.316220	2.858000	0.035914
0.028762	0.454265	0.286711	1.588700	3.041250	0.031597
0.030607	0.455883	0.305094	1.943410	3.236250	0.034017
0.032569	0.456117	0.324656	1.844160	3.443750	0.035850
0.034657	0.452834	0.345472	1.467570	3.664560	0.039182
0.036879	0.460037	0.367623	1.243790	3.899520	0.030672
0.039244	0.449590	0.391194	1.406080	4.149550	0.031097
0.041760	0.466465	0.416277	1.347960	4.415610	0.024281
0.044438	0.469793	0.442967	1.200370	4.698730	0.020089
0.047287	0.455000	0.471369	0.909614	5	0.018970
0.050319	0.485326	0.501593	0.829973	5.320590	0.016581
0.053545	0.482819	0.533754	0.643001	5.661730	0.015893
0.056979	0.484211	0.567977	0.629431	6.024750	0.015282
0.060632	0.465342	0.604394	0.556602	6.411040	0.012382
0.064520	0.474662	0.643146	0.536025	6.822110	0.010529
0.068656	0.551297	0.684384	0.431026	7.259520	0.007798
0.073058	0.619638	0.728265	0.285612	7.724990	0.006836
0.077743	0.675184	0.774959	0.241912	8.220300	0.005793
0.082728	0.701978	0.824648	0.210722	8.747370	0.004768
0.088032	0.783277	0.877523	0.186907	9.308230	0.003830
0.093676	0.708587	0.933788	0.150507	9.905050	0.003017
		0.993660	0.122079	10	0.002934

**Anexo 18.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Kocaeli. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Kocaeli		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.368384	0.099683	0.452114	1.057370	0.121314
0.010641	0.368516	0.106074	0.530887	1.125170	0.113941
0.011324	0.368666	0.112875	0.609207	1.197310	0.116623
0.012050	0.368835	0.120112	0.700861	1.274080	0.118123
0.012822	0.369028	0.127814	0.909327	1.355770	0.093150
0.013644	0.369254	0.136009	0.901377	1.442700	0.081838
0.014519	0.369529	0.144730	0.869240	1.535200	0.059553
0.015450	0.369840	0.154009	1.036200	1.633640	0.054183
0.016441	0.370145	0.163884	1.230440	1.738380	0.047783
0.017495	0.370458	0.174392	1.183980	1.849840	0.039377
0.018617	0.371034	0.185573	1.134820	1.968450	0.045495
0.019810	0.371316	0.197472	1.123510	2.094660	0.042278
0.021080	0.371043	0.210134	0.790337	2.228970	0.036266
0.022432	0.370291	0.223607	0.726306	2.371880	0.035085
0.023870	0.369015	0.237944	0.698210	2.523960	0.039713
0.025401	0.372133	0.253200	0.646966	2.685800	0.045880
0.027029	0.371760	0.269435	0.732356	2.858000	0.048505
0.028762	0.375595	0.286711	0.581989	3.041250	0.048258
0.030607	0.379247	0.305094	0.564000	3.236250	0.049278
0.032569	0.369780	0.324656	0.490497	3.443750	0.044442
0.034657	0.369783	0.345472	0.486264	3.664560	0.037936
0.036879	0.393074	0.367623	0.486298	3.899520	0.031529
0.039244	0.404831	0.391194	0.427612	4.149550	0.026181
0.041760	0.397903	0.416277	0.324418	4.415610	0.023360
0.044438	0.372949	0.442967	0.390418	4.698730	0.022609
0.047287	0.366664	0.471369	0.408097	5	0.022886
0.050319	0.387794	0.501593	0.350984	5.320590	0.022377
0.053545	0.400437	0.533754	0.335539	5.661730	0.022437
0.056979	0.416800	0.567977	0.300035	6.024750	0.022677
0.060632	0.480808	0.604394	0.197168	6.411040	0.022765
0.064520	0.480933	0.643146	0.197010	6.822110	0.021653
0.068656	0.481496	0.684384	0.206429	7.259520	0.020607
0.073058	0.452068	0.728265	0.223001	7.724990	0.019180
0.077743	0.396710	0.774959	0.202894	8.220300	0.018986
0.082728	0.408884	0.824648	0.232125	8.747370	0.018581
0.088032	0.429734	0.877523	0.201721	9.308230	0.017260
0.093676	0.440947	0.933788	0.144086	9.905050	0.015902
		0.993660	0.129427	10	0.015676

**Anexo 19.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto LomaGilroy. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto LomaGilroy		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.369698	0.099683	0.636841	1.057370	0.228410
0.010641	0.368973	0.106074	0.737474	1.125170	0.241550
0.011324	0.369116	0.112875	0.768198	1.197310	0.235000
0.012050	0.370216	0.120112	0.750156	1.274080	0.207275
0.012822	0.370323	0.127814	0.618778	1.355770	0.173886
0.013644	0.370551	0.136009	0.597759	1.442700	0.158735
0.014519	0.370818	0.144730	0.668921	1.535200	0.136546
0.015450	0.371156	0.154009	0.770803	1.633640	0.110714
0.016441	0.371516	0.163884	0.955532	1.738380	0.084063
0.017495	0.371947	0.174392	0.962649	1.849840	0.071215
0.018617	0.372396	0.185573	1.004870	1.968450	0.064300
0.019810	0.372882	0.197472	0.964545	2.094660	0.057504
0.021080	0.373372	0.210134	1.187570	2.228970	0.046788
0.022432	0.373849	0.223607	1.563770	2.371880	0.046408
0.023870	0.374397	0.237944	2.097760	2.523960	0.041810
0.025401	0.375438	0.253200	2.098130	2.685800	0.041909
0.027029	0.376318	0.269435	1.734900	2.858000	0.037457
0.028762	0.377511	0.286711	1.284690	3.041250	0.031329
0.030607	0.378664	0.305094	1.255390	3.236250	0.027296
0.032569	0.380633	0.324656	1.304220	3.443750	0.023536
0.034657	0.381624	0.345472	1.033920	3.664560	0.020066
0.036879	0.383004	0.367623	0.973502	3.899520	0.017358
0.039244	0.389089	0.391194	1.003840	4.149550	0.015174
0.041760	0.393728	0.416277	0.711188	4.415610	0.015212
0.044438	0.387166	0.442967	0.591730	4.698730	0.014314
0.047287	0.406510	0.471369	0.515836	5	0.012935
0.050319	0.411998	0.501593	0.456694	5.320590	0.013889
0.053545	0.412190	0.533754	0.423977	5.661730	0.011959
0.056979	0.408550	0.567977	0.513145	6.024750	0.008764
0.060632	0.403110	0.604394	0.485769	6.411040	0.007959
0.064520	0.436778	0.643146	0.399242	6.822110	0.006503
0.068656	0.492923	0.684384	0.295565	7.259520	0.005115
0.073058	0.527676	0.728265	0.256808	7.724990	0.004161
0.077743	0.522930	0.774959	0.233135	8.220300	0.003597
0.082728	0.559519	0.824648	0.227180	8.747370	0.003209
0.088032	0.595061	0.877523	0.231337	9.308230	0.002830
0.093676	0.612848	0.933788	0.225261	9.905050	0.002386
		0.993660	0.226791	10	0.002313



**Anexo 20.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto LomaGilroy2. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto LomaGilroy2		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.564313	0.099683	1.107860	1.057370	0.353341
0.010641	0.564337	0.106074	1.178120	1.125170	0.316877
0.011324	0.564381	0.112875	1.250500	1.197310	0.271118
0.012050	0.564240	0.120112	1.433950	1.274080	0.256208
0.012822	0.564474	0.127814	1.474510	1.355770	0.265018
0.013644	0.564537	0.136009	1.387440	1.442700	0.256421
0.014519	0.564610	0.144730	1.612420	1.535200	0.226490
0.015450	0.564696	0.154009	1.733040	1.633640	0.205699
0.016441	0.564851	0.163884	1.739310	1.738380	0.179893
0.017495	0.565033	0.174392	1.713400	1.849840	0.152484
0.018617	0.565303	0.185573	1.339540	1.968450	0.126065
0.019810	0.565509	0.197472	1.119360	2.094660	0.102242
0.021080	0.566631	0.210134	1.261950	2.228970	0.091144
0.022432	0.567724	0.223607	1.318710	2.371880	0.082305
0.023870	0.569163	0.237944	1.270260	2.523960	0.072369
0.025401	0.571319	0.253200	1.359030	2.685800	0.062144
0.027029	0.573879	0.269435	1.685730	2.858000	0.052182
0.028762	0.577001	0.286711	1.929240	3.041250	0.044686
0.030607	0.581725	0.305094	1.786710	3.236250	0.040524
0.032569	0.588611	0.324656	1.598110	3.443750	0.035325
0.034657	0.595372	0.345472	2.076870	3.664560	0.030849
0.036879	0.609146	0.367623	2.660060	3.899520	0.027752
0.039244	0.623688	0.391194	2.940580	4.149550	0.025054
0.041760	0.637146	0.416277	2.909140	4.415610	0.022168
0.044438	0.648206	0.442967	2.660060	4.698730	0.020731
0.047287	0.670593	0.471369	2.234970	5	0.018632
0.050319	0.695248	0.501593	1.737130	5.320590	0.016216
0.053545	0.735925	0.533754	1.298110	5.661730	0.013743
0.056979	0.727673	0.567977	0.959627	6.024750	0.011399
0.060632	0.765963	0.604394	0.701457	6.411040	0.009661
0.064520	0.757596	0.643146	0.462364	6.822110	0.008448
0.068656	0.854954	0.684384	0.448346	7.259520	0.007562
0.073058	0.854762	0.728265	0.429945	7.724990	0.006685
0.077743	0.866699	0.774959	0.405588	8.220300	0.006069
0.082728	0.908876	0.824648	0.373943	8.747370	0.005220
0.088032	1.124910	0.877523	0.338646	9.308230	0.004230
0.093676	1.171270	0.933788	0.362496	9.905050	0.003644
		0.99366	0.369338	10	0.003539

**Anexo 21.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto MammothLake. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto MammothLake		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)	0.099683	1.012270	1.057370	0.256728
0.010	0.577299	0.106074	0.908762	1.125170	0.233362
0.010641	0.577599	0.112875	0.924016	1.197310	0.192161
0.011324	0.577936	0.120112	0.986749	1.274080	0.194486
0.012050	0.578328	0.127814	1.198020	1.355770	0.218566
0.012822	0.578817	0.136009	1.385130	1.442700	0.173830
0.013644	0.579408	0.144730	1.092180	1.535200	0.124490
0.014519	0.580071	0.154009	1.329130	1.633640	0.090537
0.015450	0.580894	0.163884	1.425210	1.738380	0.073127
0.016441	0.582091	0.174392	1.291140	1.849840	0.066622
0.017495	0.583412	0.185573	1.179530	1.968450	0.064422
0.018617	0.583791	0.197472	0.931784	2.094660	0.062533
0.019810	0.589518	0.210134	0.957992	2.228970	0.060925
0.021080	0.587922	0.223607	1.256190	2.371880	0.057035
0.022432	0.591512	0.237944	1.227970	2.523960	0.049966
0.023870	0.596265	0.253200	0.862474	2.685800	0.046412
0.025401	0.599628	0.269435	0.913514	2.858000	0.044092
0.027029	0.603042	0.286711	0.984485	3.041250	0.042438
0.028762	0.612009	0.305094	1.214880	3.236250	0.046089
0.030607	0.616751	0.324656	1.453710	3.443750	0.045034
0.032569	0.645418	0.345472	1.459660	3.664560	0.041136
0.034657	0.628970	0.367623	1.472690	3.899520	0.036739
0.036879	0.627091	0.391194	1.485320	4.149550	0.031636
0.039244	0.687797	0.416277	1.931990	4.415610	0.026675
0.041760	0.678599	0.442967	2.109530	4.698730	0.023554
0.044438	0.641462	0.471369	1.705090	5	0.020800
0.047287	0.732471	0.501593	1.050390	5.320590	0.017810
0.050319	0.751026	0.533754	0.952073	5.661730	0.014750
0.053545	0.730757	0.567977	0.818911	6.024750	0.011808
0.056979	0.718177	0.604394	0.755295	6.411040	0.009919
0.060632	0.743901	0.643146	0.606722	6.822110	0.008725
0.064520	0.820124	0.684384	0.582145	7.259520	0.008011
0.068656	0.797472	0.728265	0.598854	7.724990	0.007201
0.073058	0.786663	0.774959	0.502865	8.220300	0.006386
0.077743	0.821522	0.824648	0.461851	8.747370	0.005597
0.082728	0.928678	0.877523	0.415537	9.308230	0.004866
0.088032	0.938699	0.933788	0.318453	9.905050	0.004212
0.093676	1.011160	0.993660	0.263703	10	0.004117

**Anexo 22.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Nahanni. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Nahanni		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.296352	0.099683	0.918994	1.057370	0.039471
0.010641	0.296357	0.106074	0.969713	1.125170	0.043280
0.011324	0.296092	0.112875	0.765111	1.197310	0.055070
0.012050	0.295924	0.120112	0.669900	1.274080	0.056842
0.012822	0.297398	0.127814	0.601346	1.355770	0.054797
0.013644	0.304712	0.136009	0.671408	1.442700	0.052006
0.014519	0.315190	0.144730	0.551224	1.535200	0.049223
0.015450	0.309977	0.154009	0.630902	1.633640	0.047704
0.016441	0.312758	0.163884	0.661907	1.738380	0.041277
0.017495	0.316707	0.174392	0.605294	1.849840	0.033703
0.018617	0.322896	0.185573	0.465237	1.968450	0.028524
0.019810	0.356690	0.197472	0.405956	2.094660	0.028592
0.021080	0.375765	0.210134	0.393180	2.228970	0.024419
0.022432	0.411943	0.223607	0.408381	2.371880	0.021411
0.023870	0.405061	0.237944	0.429901	2.523960	0.019685
0.025401	0.366707	0.253200	0.478135	2.685800	0.019809
0.027029	0.391107	0.269435	0.558182	2.858000	0.021277
0.028762	0.380242	0.286711	0.526224	3.041250	0.023489
0.030607	0.394193	0.305094	0.503639	3.236250	0.024419
0.032569	0.432647	0.324656	0.447018	3.443750	0.023048
0.034657	0.460802	0.345472	0.308578	3.664560	0.022003
0.036879	0.557050	0.367623	0.205156	3.899520	0.021604
0.039244	0.714764	0.391194	0.178604	4.149550	0.019737
0.041760	0.605684	0.416277	0.153562	4.415610	0.017086
0.044438	0.549626	0.442967	0.125231	4.698730	0.013223
0.047287	0.608131	0.471369	0.109973	5	0.009686
0.050319	0.652392	0.501593	0.084298	5.320590	0.006949
0.053545	0.711580	0.533754	0.082942	5.661730	0.005602
0.056979	0.888680	0.567977	0.083669	6.024750	0.004692
0.060632	0.985717	0.604394	0.086214	6.411040	0.004544
0.064520	1.343270	0.643146	0.078605	6.822110	0.004499
0.068656	1.347840	0.684384	0.074378	7.259520	0.004301
0.073058	0.914660	0.728265	0.054032	7.724990	0.003841
0.077743	0.742611	0.774959	0.049996	8.220300	0.003436
0.082728	0.795231	0.824648	0.040445	8.747370	0.003010
0.088032	0.707042	0.877523	0.038327	9.308230	0.002571
0.093676	0.633353	0.933788	0.038385	9.905050	0.002247
		0.993660	0.038215	10	0.002201

**Anexo 23.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Northridge. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Northridge		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.418293	0.099683	0.554003	1.057370	0.049762
0.010641	0.418349	0.106074	0.650140	1.125170	0.037356
0.011324	0.418606	0.112875	0.681004	1.197310	0.036756
0.012050	0.418597	0.120112	0.797026	1.274080	0.033204
0.012822	0.418807	0.127814	0.894344	1.355770	0.030500
0.013644	0.418632	0.136009	0.838710	1.442700	0.028953
0.014519	0.418561	0.144730	1.027230	1.535200	0.026546
0.015450	0.419091	0.154009	1.251230	1.633640	0.026298
0.016441	0.418577	0.163884	1.310610	1.738380	0.026080
0.017495	0.419205	0.174392	1.528040	1.849840	0.024148
0.018617	0.418427	0.185573	1.450550	1.968450	0.025734
0.019810	0.419343	0.197472	1.274850	2.094660	0.027299
0.021080	0.419120	0.210134	1.132170	2.228970	0.026162
0.022432	0.418612	0.223607	1.045540	2.371880	0.025590
0.023870	0.418559	0.237944	1.117460	2.523960	0.028200
0.025401	0.420210	0.253200	1.193590	2.685800	0.023577
0.027029	0.419105	0.269435	1.212640	2.858000	0.020509
0.028762	0.420818	0.286711	1.206790	3.041250	0.020754
0.030607	0.421518	0.305094	1.064300	3.236250	0.020042
0.032569	0.421744	0.324656	0.931789	3.443750	0.018806
0.034657	0.421783	0.345472	0.825431	3.664560	0.017379
0.036879	0.424678	0.367623	0.743924	3.899520	0.015426
0.039244	0.424429	0.391194	0.632431	4.149550	0.015840
0.041760	0.438794	0.416277	0.536274	4.415610	0.015908
0.044438	0.438082	0.442967	0.432982	4.698730	0.013998
0.047287	0.426270	0.471369	0.384037	5	0.011816
0.050319	0.434338	0.501593	0.346773	5.320590	0.010331
0.053545	0.429608	0.533754	0.338428	5.661730	0.009488
0.056979	0.465329	0.567977	0.304624	6.024750	0.008149
0.060632	0.465746	0.604394	0.238554	6.411040	0.006739
0.064520	0.456201	0.643146	0.172127	6.822110	0.005432
0.068656	0.495171	0.684384	0.136901	7.259520	0.004204
0.073058	0.483237	0.728265	0.103608	7.724990	0.003138
0.077743	0.444178	0.774959	0.083220	8.220300	0.002641
0.082728	0.518120	0.824648	0.072015	8.747370	0.002266
0.088032	0.531065	0.877523	0.062558	9.308230	0.001955
0.093676	0.485091	0.933788	0.058329	9.905050	0.001665
		0.993660	0.057502	10	0.001624

**Anexo 24.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Northridge2. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

<b>Terremoto Northridge2</b>		<b>Período (s)</b>	<b>PSA (g)</b>	<b>Período (s)</b>	<b>PSA (g)</b>
<b>Período (s)</b>	<b>PSA (g)</b>	0.099683	0.197692	1.057370	0.077383
0.010	0.161409	0.106074	0.221580	1.125170	0.074549
0.010641	0.161420	0.112875	0.225409	1.197310	0.066936
0.011324	0.161476	0.120112	0.241720	1.274080	0.054303
0.012050	0.161379	0.127814	0.246077	1.355770	0.044745
0.012822	0.161606	0.136009	0.259068	1.442700	0.039609
0.013644	0.161521	0.144730	0.244079	1.535200	0.035049
0.014519	0.161713	0.154009	0.211776	1.633640	0.035687
0.015450	0.161639	0.163884	0.255379	1.738380	0.032708
0.016441	0.161634	0.174392	0.256238	1.849840	0.034041
0.017495	0.161539	0.185573	0.267688	1.968450	0.029107
0.018617	0.161486	0.197472	0.354522	2.094660	0.026660
0.019810	0.162141	0.210134	0.445025	2.228970	0.032464
0.021080	0.161650	0.223607	0.479651	2.371880	0.040951
0.022432	0.162202	0.237944	0.472759	2.523960	0.036665
0.023870	0.161648	0.253200	0.553711	2.685800	0.028984
0.025401	0.161924	0.269435	0.564700	2.858000	0.020549
0.027029	0.162541	0.286711	0.578242	3.041250	0.017625
0.028762	0.163126	0.305094	0.612788	3.236250	0.019807
0.030607	0.163243	0.324656	0.488880	3.443750	0.020946
0.032569	0.163473	0.345472	0.422449	3.664560	0.021545
0.034657	0.164073	0.367623	0.431475	3.899520	0.021200
0.036879	0.164360	0.391194	0.499982	4.149550	0.019510
0.039244	0.165071	0.416277	0.617374	4.415610	0.016487
0.041760	0.165024	0.442967	0.683127	4.698730	0.013866
0.044438	0.164853	0.471369	0.584527	5	0.011837
0.047287	0.167939	0.501593	0.418424	5.320590	0.010338
0.050319	0.167764	0.533754	0.362253	5.661730	0.009778
0.053545	0.165380	0.567977	0.309106	6.024750	0.009971
0.056979	0.164245	0.604394	0.281536	6.411040	0.010176
0.060632	0.166479	0.643146	0.282731	6.822110	0.010050
0.064520	0.171717	0.684384	0.277659	7.259520	0.009185
0.068656	0.172409	0.728265	0.214590	7.724990	0.007155
0.073058	0.177875	0.774959	0.177338	8.220300	0.005605
0.077743	0.173095	0.824648	0.153908	8.747370	0.004884
0.082728	0.179654	0.877523	0.131372	9.308230	0.004255
0.088032	0.182113	0.933788	0.110556	9.905050	0.003546
0.093676	0.179286	0.993660	0.097721	10	0.003460

**Anexo 25.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Parkfield. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Parkfield		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.799496	0.099683	0.988492	1.057370	0.295096
0.010641	0.799198	0.106074	1.058200	1.125170	0.287748
0.011324	0.800274	0.112875	1.024950	1.197310	0.239825
0.012050	0.800589	0.120112	1.138420	1.274080	0.172477
0.012822	0.799745	0.127814	1.184760	1.355770	0.115845
0.013644	0.800849	0.136009	1.216630	1.442700	0.103070
0.014519	0.799406	0.144730	1.117100	1.535200	0.082540
0.015450	0.801276	0.154009	1.235820	1.633640	0.063607
0.016441	0.801949	0.163884	1.284460	1.738380	0.051103
0.017495	0.801001	0.174392	1.392220	1.849840	0.046364
0.018617	0.802429	0.185573	1.297790	1.968450	0.043095
0.019810	0.802897	0.197472	1.177440	2.094660	0.041688
0.021080	0.803423	0.210134	1.358820	2.228970	0.038921
0.022432	0.804014	0.223607	1.522270	2.371880	0.034902
0.023870	0.804675	0.237944	1.398320	2.523960	0.030985
0.025401	0.805420	0.253200	1.398900	2.685800	0.025127
0.027029	0.806261	0.269435	1.300270	2.858000	0.024114
0.028762	0.807198	0.286711	1.353380	3.041250	0.022374
0.030607	0.808205	0.305094	1.650030	3.236250	0.020129
0.032569	0.809239	0.324656	2.035870	3.443750	0.017616
0.034657	0.810262	0.345472	2.631250	3.664560	0.015074
0.036879	0.811364	0.367623	3.035070	3.899520	0.014723
0.039244	0.812844	0.391194	2.969280	4.149550	0.014004
0.041760	0.815097	0.416277	2.515780	4.415610	0.012895
0.044438	0.819137	0.442967	1.974950	4.698730	0.011571
0.047287	0.824813	0.471369	1.561770	5	0.010172
0.050319	0.833453	0.501593	1.247940	5.320590	0.008799
0.053545	0.842855	0.533754	0.981758	5.661730	0.007517
0.056979	0.851968	0.567977	0.749517	6.024750	0.007842
0.060632	0.865695	0.604394	0.602506	6.411040	0.007577
0.064520	0.865738	0.643146	0.442489	6.822110	0.006587
0.068656	0.873327	0.684384	0.379620	7.259520	0.005373
0.073058	0.879037	0.728265	0.340595	7.724990	0.004270
0.077743	0.922784	0.774959	0.285832	8.220300	0.003735
0.082728	0.914706	0.824648	0.281224	8.747370	0.003123
0.088032	0.874739	0.877523	0.277640	9.308230	0.002735
0.093676	0.909867	0.933788	0.270756	9.905050	0.002402
		0.993660	0.258812	10	0.002351

**Anexo 26.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto WittierNarrows. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto WittierNarrows		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)	0.099683	0.717806	1.057370	0.029640
0.010	0.283194	0.106074	0.796900	1.125170	0.024514
0.010641	0.283403	0.112875	0.977119	1.197310	0.020581
0.011324	0.283218	0.120112	1.130390	1.274080	0.016627
0.012050	0.283796	0.127814	1.367290	1.355770	0.013385
0.012822	0.284401	0.136009	1.177620	1.442700	0.010800
0.013644	0.284898	0.144730	0.873442	1.535200	0.008574
0.014519	0.285581	0.154009	1.058160	1.633640	0.007112
0.015450	0.286958	0.163884	1.282860	1.738380	0.006118
0.016441	0.287511	0.174392	1.105350	1.849840	0.005253
0.017495	0.289289	0.185573	1.202640	1.968450	0.004512
0.018617	0.289953	0.197472	0.984214	2.094660	0.003884
0.019810	0.289496	0.210134	0.755939	2.228970	0.003354
0.021080	0.289213	0.223607	0.801222	2.371880	0.002907
0.022432	0.301623	0.237944	0.562603	2.523960	0.002529
0.023870	0.312746	0.253200	0.463621	2.685800	0.002208
0.025401	0.304720	0.269435	0.438660	2.858000	0.001932
0.027029	0.313863	0.286711	0.439755	3.041250	0.001694
0.028762	0.325279	0.305094	0.412709	3.236250	0.001488
0.030607	0.321545	0.324656	0.383863	3.443750	0.001308
0.032569	0.345983	0.345472	0.459324	3.664560	0.001151
0.034657	0.387109	0.367623	0.365307	3.899520	0.001014
0.036879	0.473407	0.391194	0.247092	4.149550	0.000893
0.039244	0.480212	0.416277	0.212044	4.415610	0.000787
0.041760	0.449101	0.442967	0.166005	4.698730	0.000694
0.044438	0.473833	0.471369	0.141630	5	0.000612
0.047287	0.550335	0.501593	0.113197	5.320590	0.000539
0.050319	0.636459	0.533754	0.084729	5.661730	0.000476
0.053545	0.643059	0.567977	0.069957	6.024750	0.000420
0.056979	0.710175	0.604394	0.058123	6.411040	0.000370
0.060632	0.904559	0.643146	0.056588	6.822110	0.000327
0.064520	0.882216	0.684384	0.045439	7.259520	0.000288
0.068656	0.834093	0.728265	0.043574	7.724990	0.000254
0.073058	0.703826	0.774959	0.039657	8.220300	0.000224
0.077743	0.575158	0.824648	0.042131	8.747370	0.000198
0.082728	0.523474	0.877523	0.043101	9.308230	0.000175
0.088032	0.530519	0.933788	0.038351	9.905050	0.000154
0.093676	0.666098	0.993660	0.031710	10	0.000151

## 8.5.2 Pseudo-aceleraciones para espectros de respuesta en roca.

Anexo 27. Tabla de pseudo-aceleración del terremoto ChiChi. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto ChiChi		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.183006	0.099683	0.233768	1.057370	0.272338
0.010641	0.183015	0.106074	0.230870	1.125170	0.326004
0.011324	0.183021	0.112875	0.272745	1.197310	0.344112
0.012050	0.183033	0.120112	0.271443	1.274080	0.325880
0.012822	0.183068	0.127814	0.256620	1.355770	0.377270
0.013644	0.183089	0.136009	0.241238	1.442700	0.365227
0.014519	0.183110	0.144730	0.221764	1.535200	0.352540
0.015450	0.183093	0.154009	0.220624	1.633640	0.339233
0.016441	0.183092	0.163884	0.259917	1.738380	0.311165
0.017495	0.183118	0.174392	0.282477	1.849840	0.268612
0.018617	0.183133	0.185573	0.290879	1.968450	0.223299
0.019810	0.183185	0.197472	0.297471	2.094660	0.179629
0.021080	0.183289	0.210134	0.323591	2.228970	0.160823
0.022432	0.183415	0.223607	0.323507	2.371880	0.144716
0.023870	0.183375	0.237944	0.324383	2.523960	0.123073
0.025401	0.183324	0.253200	0.369204	2.685800	0.108582
0.027029	0.183534	0.269435	0.364676	2.858000	0.119515
0.028762	0.183790	0.286711	0.329238	3.041250	0.156651
0.030607	0.183852	0.305094	0.332205	3.236250	0.150919
0.032569	0.183993	0.324656	0.379283	3.443750	0.131321
0.034657	0.184328	0.345472	0.433939	3.664560	0.114571
0.036879	0.183527	0.367623	0.383636	3.899520	0.101050
0.039244	0.184779	0.391194	0.390418	4.149550	0.090331
0.041760	0.187131	0.416277	0.329530	4.415610	0.074688
0.044438	0.188130	0.442967	0.377957	4.698730	0.070381
0.047287	0.185101	0.471369	0.459352	5	0.060395
0.050319	0.188334	0.501593	0.528195	5.320590	0.049247
0.053545	0.189735	0.533754	0.532169	5.661730	0.041449
0.056979	0.189238	0.567977	0.504581	6.024750	0.033120
0.060632	0.190175	0.604394	0.459817	6.411040	0.025276
0.064520	0.186871	0.643146	0.479379	6.822110	0.020664
0.068656	0.193120	0.684384	0.415300	7.259520	0.017642
0.073058	0.204330	0.728265	0.402762	7.724990	0.014901
0.077743	0.214868	0.774959	0.478902	8.220300	0.012537
0.082728	0.239338	0.824648	0.454626	8.747370	0.010419
0.088032	0.245911	0.877523	0.405770	9.308230	0.008618
0.093676	0.217626	0.933788	0.312357	9.905050	0.007129
		0.993660	0.238237	10	0.006934



**Anexo 28.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Coyote. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Coyote		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.124052	0.099683	0.168413	1.057370	0.052456
0.010641	0.124476	0.106074	0.177829	1.125170	0.043429
0.011324	0.124875	0.112875	0.182111	1.197310	0.038552
0.012050	0.125708	0.120112	0.191137	1.274080	0.035216
0.012822	0.126454	0.127814	0.171920	1.355770	0.031249
0.013644	0.126718	0.136009	0.166956	1.442700	0.029625
0.014519	0.127412	0.144730	0.163319	1.535200	0.028331
0.015450	0.127384	0.154009	0.171613	1.633640	0.022632
0.016441	0.126300	0.163884	0.163800	1.738380	0.019644
0.017495	0.126899	0.174392	0.184788	1.849840	0.017306
0.018617	0.129743	0.185573	0.208828	1.968450	0.016810
0.019810	0.133281	0.197472	0.201654	2.094660	0.015300
0.021080	0.149508	0.210134	0.192978	2.228970	0.014266
0.022432	0.154532	0.223607	0.187563	2.371880	0.013551
0.023870	0.151738	0.237944	0.198152	2.523960	0.013307
0.025401	0.133714	0.253200	0.229594	2.685800	0.011021
0.027029	0.129592	0.269435	0.256205	2.858000	0.009104
0.028762	0.132619	0.286711	0.280681	3.041250	0.006577
0.030607	0.141976	0.305094	0.308560	3.236250	0.005671
0.032569	0.142096	0.324656	0.319866	3.443750	0.004862
0.034657	0.166870	0.345472	0.300700	3.664560	0.004158
0.036879	0.187784	0.367623	0.304020	3.899520	0.003555
0.039244	0.213174	0.391194	0.345668	4.149550	0.003045
0.041760	0.201694	0.416277	0.398656	4.415610	0.002614
0.044438	0.195307	0.442967	0.398665	4.698730	0.002252
0.047287	0.176815	0.471369	0.377514	5	0.001946
0.050319	0.157240	0.501593	0.307855	5.320590	0.001687
0.053545	0.140529	0.533754	0.278444	5.661730	0.001466
0.056979	0.130844	0.567977	0.272150	6.024750	0.001278
0.060632	0.132158	0.604394	0.256787	6.411040	0.001117
0.064520	0.147383	0.643146	0.222676	6.822110	0.000977
0.068656	0.150733	0.684384	0.194937	7.259520	0.000856
0.073058	0.151607	0.728265	0.165083	7.724990	0.000752
0.077743	0.153303	0.774959	0.144003	8.220300	0.000661
0.082728	0.158691	0.824648	0.131152	8.747370	0.000581
0.088032	0.169349	0.877523	0.114176	9.308230	0.000511
0.093676	0.166578	0.933788	0.089719	9.905050	0.000450
		0.993660	0.065279	10	0.000441

**Anexo 29.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Imperial Valley. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Imperial Valley		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.169511	0.099683	0.426139	1.057370	0.111115
0.010641	0.169511	0.106074	0.453207	1.125170	0.148173
0.011324	0.169517	0.112875	0.487344	1.197310	0.150526
0.012050	0.169639	0.120112	0.505463	1.274080	0.129196
0.012822	0.169678	0.127814	0.470880	1.355770	0.118854
0.013644	0.169881	0.136009	0.448158	1.442700	0.097715
0.014519	0.169678	0.144730	0.471060	1.535200	0.085928
0.015450	0.170257	0.154009	0.519983	1.633640	0.076591
0.016441	0.170383	0.163884	0.527123	1.738380	0.074665
0.017495	0.170827	0.174392	0.564501	1.849840	0.060050
0.018617	0.171293	0.185573	0.460776	1.968450	0.061318
0.019810	0.171343	0.197472	0.372135	2.094660	0.054466
0.021080	0.171209	0.210134	0.447950	2.228970	0.044955
0.022432	0.171201	0.223607	0.394582	2.371880	0.043666
0.023870	0.175744	0.237944	0.452925	2.523960	0.040914
0.025401	0.174224	0.253200	0.538276	2.685800	0.037704
0.027029	0.179573	0.269435	0.561250	2.858000	0.034163
0.028762	0.178655	0.286711	0.563571	3.041250	0.030553
0.030607	0.183621	0.305094	0.665164	3.236250	0.032793
0.032569	0.192934	0.324656	0.640865	3.443750	0.035067
0.034657	0.187422	0.345472	0.532200	3.664560	0.038682
0.036879	0.195367	0.367623	0.478486	3.899520	0.030236
0.039244	0.199444	0.391194	0.570535	4.149550	0.030829
0.041760	0.211761	0.416277	0.561184	4.415610	0.024068
0.044438	0.219311	0.442967	0.560707	4.698730	0.019950
0.047287	0.224901	0.471369	0.499375	5	0.018717
0.050319	0.245379	0.501593	0.459411	5.320590	0.016428
0.053545	0.225941	0.533754	0.366384	5.661730	0.015665
0.056979	0.241959	0.567977	0.333099	6.024750	0.015051
0.060632	0.282438	0.604394	0.352673	6.411040	0.012097
0.064520	0.302886	0.643146	0.340291	6.822110	0.010112
0.068656	0.309138	0.684384	0.254741	7.259520	0.007468
0.073058	0.351979	0.728265	0.195804	7.724990	0.006516
0.077743	0.418608	0.774959	0.158639	8.220300	0.005500
0.082728	0.372976	0.824648	0.172785	8.747370	0.004506
0.088032	0.442830	0.877523	0.149006	9.308230	0.003600
0.093676	0.447190	0.933788	0.111577	9.905050	0.002814
		0.993660	0.097071	10	0.002734

**Anexo 30.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Kocaeli. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Kocaeli		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.219599	0.099683	0.271562	1.057370	0.104788
0.010641	0.219703	0.106074	0.295001	1.125170	0.104391
0.011324	0.219836	0.112875	0.340093	1.197310	0.106891
0.012050	0.219990	0.120112	0.361731	1.274080	0.099370
0.012822	0.220135	0.127814	0.445691	1.355770	0.088456
0.013644	0.220300	0.136009	0.498316	1.442700	0.073797
0.014519	0.220605	0.144730	0.506446	1.535200	0.055910
0.015450	0.221085	0.154009	0.635947	1.633640	0.051911
0.016441	0.221651	0.163884	0.761943	1.738380	0.044793
0.017495	0.221967	0.174392	0.720391	1.849840	0.036500
0.018617	0.223122	0.185573	0.677207	1.968450	0.042198
0.019810	0.224009	0.197472	0.690399	2.094660	0.040349
0.021080	0.226176	0.210134	0.495168	2.228970	0.035053
0.022432	0.229484	0.223607	0.439984	2.371880	0.033857
0.023870	0.222361	0.237944	0.337812	2.523960	0.038583
0.025401	0.220010	0.253200	0.282844	2.685800	0.044804
0.027029	0.224446	0.269435	0.353197	2.858000	0.047127
0.028762	0.222330	0.286711	0.298570	3.041250	0.047167
0.030607	0.236321	0.305094	0.251654	3.236250	0.047987
0.032569	0.232435	0.324656	0.218272	3.443750	0.043816
0.034657	0.225059	0.345472	0.199675	3.664560	0.037501
0.036879	0.230758	0.367623	0.207618	3.899520	0.030763
0.039244	0.241490	0.391194	0.195996	4.149550	0.025597
0.041760	0.243466	0.416277	0.183558	4.415610	0.023145
0.044438	0.228678	0.442967	0.242277	4.698730	0.022170
0.047287	0.220408	0.471369	0.224874	5	0.022769
0.050319	0.225650	0.501593	0.213924	5.320590	0.022109
0.053545	0.232941	0.533754	0.223625	5.661730	0.022325
0.056979	0.250970	0.567977	0.202041	6.024750	0.022523
0.060632	0.304977	0.604394	0.133608	6.411040	0.022502
0.064520	0.302749	0.643146	0.140907	6.822110	0.021600
0.068656	0.299154	0.684384	0.160644	7.259520	0.020549
0.073058	0.287342	0.728265	0.169288	7.724990	0.019135
0.077743	0.245850	0.774959	0.162328	8.220300	0.018955
0.082728	0.256355	0.824648	0.199996	8.747370	0.018553
0.088032	0.251704	0.877523	0.162278	9.308230	0.017233
0.093676	0.262280	0.933788	0.114568	9.905050	0.015889
		0.993660	0.112721	10	0.015663

**Anexo 31.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto LomaGilroy. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto LomaGilroy		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.170573	0.099683	0.314296	1.057370	0.218085
0.010641	0.170590	0.106074	0.349373	1.125170	0.219934
0.011324	0.170633	0.112875	0.342729	1.197310	0.206639
0.012050	0.170682	0.120112	0.318275	1.274080	0.178753
0.012822	0.170797	0.127814	0.312256	1.355770	0.163039
0.013644	0.170850	0.136009	0.294408	1.442700	0.143637
0.014519	0.170810	0.144730	0.373308	1.535200	0.120587
0.015450	0.170744	0.154009	0.509570	1.633640	0.099433
0.016441	0.170725	0.163884	0.593716	1.738380	0.078235
0.017495	0.171066	0.174392	0.554526	1.849840	0.069607
0.018617	0.171376	0.185573	0.564025	1.968450	0.062869
0.019810	0.171347	0.197472	0.487931	2.094660	0.054893
0.021080	0.171384	0.210134	0.634049	2.228970	0.045732
0.022432	0.171729	0.223607	0.805181	2.371880	0.044528
0.023870	0.171772	0.237944	1.010220	2.523960	0.040584
0.025401	0.171431	0.253200	0.947309	2.685800	0.040987
0.027029	0.173033	0.269435	0.652052	2.858000	0.036472
0.028762	0.176183	0.286711	0.480447	3.041250	0.030485
0.030607	0.176017	0.305094	0.447998	3.236250	0.027109
0.032569	0.174165	0.324656	0.437387	3.443750	0.023017
0.034657	0.179499	0.345472	0.352055	3.664560	0.019418
0.036879	0.183330	0.367623	0.364076	3.899520	0.016671
0.039244	0.181337	0.391194	0.403741	4.149550	0.014512
0.041760	0.188512	0.416277	0.305264	4.415610	0.014930
0.044438	0.198617	0.442967	0.307902	4.698730	0.014147
0.047287	0.203847	0.471369	0.290066	5	0.012849
0.050319	0.198386	0.501593	0.270878	5.320590	0.013800
0.053545	0.197909	0.533754	0.298506	5.661730	0.011869
0.056979	0.202098	0.567977	0.325483	6.024750	0.008696
0.060632	0.211697	0.604394	0.301837	6.411040	0.007880
0.064520	0.221736	0.643146	0.253403	6.822110	0.006429
0.068656	0.215607	0.684384	0.211838	7.259520	0.005037
0.073058	0.230238	0.728265	0.180943	7.724990	0.004089
0.077743	0.244619	0.774959	0.163088	8.220300	0.003531
0.082728	0.252898	0.824648	0.160532	8.747370	0.003147
0.088032	0.267266	0.877523	0.165082	9.308230	0.002771
0.093676	0.269780	0.933788	0.180762	9.905050	0.002330
		0.993660	0.203363	10	0.002258

**Anexo 32.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto LomaGilroy2. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto LomaGilroy2		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.358440	0.099683	0.851325	1.057370	0.227692
0.010641	0.360053	0.106074	0.877095	1.125170	0.229208
0.011324	0.358043	0.112875	0.914864	1.197310	0.235578
0.012050	0.361188	0.120112	1.004947	1.274080	0.232886
0.012822	0.363347	0.127814	0.984332	1.355770	0.229678
0.013644	0.366159	0.136009	0.837067	1.442700	0.208192
0.014519	0.369753	0.144730	0.978311	1.535200	0.188758
0.015450	0.374040	0.154009	1.085575	1.633640	0.167534
0.016441	0.379039	0.163884	1.043290	1.738380	0.143760
0.017495	0.383409	0.174392	1.021005	1.849840	0.119876
0.018617	0.389483	0.185573	0.886414	1.968450	0.100826
0.019810	0.388310	0.197472	0.849069	2.094660	0.092461
0.021080	0.378649	0.210134	0.781934	2.228970	0.082224
0.022432	0.378604	0.223607	0.818671	2.371880	0.071386
0.023870	0.388699	0.237944	0.804800	2.523960	0.060701
0.025401	0.395527	0.253200	0.830425	2.685800	0.050607
0.027029	0.401437	0.269435	0.832456	2.858000	0.041301
0.028762	0.409659	0.286711	1.013489	3.041250	0.043506
0.030607	0.426382	0.305094	0.839572	3.236250	0.039507
0.032569	0.466814	0.324656	0.694204	3.443750	0.034075
0.034657	0.491414	0.345472	0.802088	3.664560	0.030207
0.036879	0.487625	0.367623	1.021774	3.899520	0.027174
0.039244	0.497941	0.391194	1.116978	4.149550	0.024441
0.041760	0.509511	0.416277	1.096964	4.415610	0.022243
0.044438	0.510475	0.442967	0.997360	4.698730	0.020389
0.047287	0.551413	0.471369	0.834493	5	0.018047
0.050319	0.627615	0.501593	0.651325	5.320590	0.015536
0.053545	0.712633	0.533754	0.527169	5.661730	0.013051
0.056979	0.698475	0.567977	0.411413	6.024750	0.010792
0.060632	0.681989	0.604394	0.327461	6.411040	0.009198
0.064520	0.610741	0.643146	0.313844	6.822110	0.008116
0.068656	0.601341	0.684384	0.295043	7.259520	0.007432
0.073058	0.652703	0.728265	0.275183	7.724990	0.006665
0.077743	0.681845	0.774959	0.252377	8.220300	0.006016
0.082728	0.718359	0.824648	0.231637	8.747370	0.005170
0.088032	0.872278	0.877523	0.231985	9.308230	0.004195
0.093676	0.913521	0.933788	0.246306	9.905050	0.003476
		0.993660	0.244317	10	0.003376

**Anexo 33.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto MammothLake. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto MammothLake		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)	0.099683	0.756819	1.057370	0.225271
0.010	0.435401	0.106074	0.684851	1.125170	0.206169
0.010641	0.436557	0.112875	0.654077	1.197310	0.165145
0.011324	0.438219	0.120112	0.621768	1.274080	0.170665
0.012050	0.439409	0.127814	0.684417	1.355770	0.185768
0.012822	0.439963	0.136009	0.772753	1.442700	0.146688
0.013644	0.439199	0.144730	0.719859	1.535200	0.105465
0.014519	0.438767	0.154009	0.890915	1.633640	0.078333
0.015450	0.438420	0.163884	0.999745	1.738380	0.065470
0.016441	0.444520	0.174392	0.787255	1.849840	0.058859
0.017495	0.443586	0.185573	0.659621	1.968450	0.056761
0.018617	0.485174	0.197472	0.521666	2.094660	0.055627
0.019810	0.518031	0.210134	0.631480	2.228970	0.055215
0.021080	0.521696	0.223607	0.748198	2.371880	0.052878
0.022432	0.529055	0.237944	0.751570	2.523960	0.049888
0.023870	0.586610	0.253200	0.538681	2.685800	0.044865
0.025401	0.626232	0.269435	0.468896	2.858000	0.041772
0.027029	0.660603	0.286711	0.430006	3.041250	0.040202
0.028762	0.697318	0.305094	0.467606	3.236250	0.043373
0.030607	0.671075	0.324656	0.616776	3.443750	0.042328
0.032569	0.693878	0.345472	0.512881	3.664560	0.038975
0.034657	0.718443	0.367623	0.544047	3.899520	0.034650
0.036879	0.767137	0.391194	0.577466	4.149550	0.029930
0.039244	0.764774	0.416277	0.801879	4.415610	0.026074
0.041760	0.733678	0.442967	0.897176	4.698730	0.022416
0.044438	0.749385	0.471369	0.755170	5	0.019677
0.047287	0.659022	0.501593	0.474471	5.320590	0.016779
0.050319	0.673796	0.533754	0.491154	5.661730	0.013830
0.053545	0.669323	0.567977	0.444990	6.024750	0.011021
0.056979	0.636815	0.604394	0.410881	6.411040	0.009412
0.060632	0.526907	0.643146	0.355947	6.822110	0.008205
0.064520	0.649302	0.684384	0.386237	7.259520	0.007507
0.068656	0.616683	0.728265	0.413529	7.724990	0.006724
0.073058	0.579211	0.774959	0.344531	8.220300	0.005944
0.077743	0.600898	0.824648	0.351359	8.747370	0.005193
0.082728	0.642589	0.877523	0.305856	9.308230	0.004500
0.088032	0.645067	0.933788	0.233958	9.905050	0.003883
0.093676	0.737519	0.993660	0.207690	10	0.003793

**Anexo 34.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Nahanni. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Nahanni		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.171641	0.099683	0.283405	1.057370	0.033014
0.010641	0.177216	0.106074	0.315676	1.125170	0.038442
0.011324	0.183619	0.112875	0.288394	1.197310	0.049641
0.012050	0.190800	0.120112	0.300331	1.274080	0.052752
0.012822	0.200011	0.127814	0.305184	1.355770	0.052855
0.013644	0.205442	0.136009	0.324209	1.442700	0.048247
0.014519	0.214419	0.144730	0.269178	1.535200	0.046647
0.015450	0.225711	0.154009	0.321975	1.633640	0.044557
0.016441	0.236261	0.163884	0.348827	1.738380	0.039870
0.017495	0.246414	0.174392	0.325511	1.849840	0.031989
0.018617	0.267728	0.185573	0.256123	1.968450	0.026955
0.019810	0.345328	0.197472	0.178268	2.094660	0.027665
0.021080	0.323578	0.210134	0.168038	2.228970	0.023019
0.022432	0.364667	0.223607	0.159417	2.371880	0.020141
0.023870	0.326080	0.237944	0.149013	2.523960	0.018603
0.025401	0.332113	0.253200	0.159814	2.685800	0.019069
0.027029	0.304948	0.269435	0.182949	2.858000	0.020863
0.028762	0.268022	0.286711	0.172196	3.041250	0.022704
0.030607	0.289853	0.305094	0.160863	3.236250	0.023287
0.032569	0.348714	0.324656	0.159986	3.443750	0.022387
0.034657	0.306080	0.345472	0.109396	3.664560	0.021919
0.036879	0.330020	0.367623	0.084626	3.899520	0.021239
0.039244	0.423528	0.391194	0.084634	4.149550	0.019611
0.041760	0.369660	0.416277	0.083540	4.415610	0.016891
0.044438	0.327858	0.442967	0.071309	4.698730	0.013155
0.047287	0.360002	0.471369	0.067782	5	0.009664
0.050319	0.428272	0.501593	0.057790	5.320590	0.006884
0.053545	0.492013	0.533754	0.055679	5.661730	0.005538
0.056979	0.598302	0.567977	0.061940	6.024750	0.004671
0.060632	0.563094	0.604394	0.066350	6.411040	0.004526
0.064520	0.676547	0.643146	0.059380	6.822110	0.004460
0.068656	0.663429	0.684384	0.056340	7.259520	0.004244
0.073058	0.501016	0.728265	0.046342	7.724990	0.003808
0.077743	0.369121	0.774959	0.040094	8.220300	0.003421
0.082728	0.386655	0.824648	0.031795	8.747370	0.002996
0.088032	0.342071	0.877523	0.029535	9.308230	0.002560
0.093676	0.270790	0.933788	0.028573	9.905050	0.002216
		0.993660	0.035309	10	0.002182

**Anexo 35.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Northridge. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Northridge		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.221743	0.099683	0.281722	1.057370	0.030294
0.010641	0.221736	0.106074	0.335713	1.125170	0.028016
0.011324	0.221687	0.112875	0.381587	1.197310	0.029453
0.012050	0.222142	0.120112	0.439350	1.274080	0.027136
0.012822	0.222057	0.127814	0.450181	1.355770	0.025403
0.013644	0.221803	0.136009	0.464838	1.442700	0.024545
0.014519	0.222140	0.144730	0.619534	1.535200	0.024566
0.015450	0.222359	0.154009	0.697662	1.633640	0.024811
0.016441	0.222874	0.163884	0.801983	1.738380	0.024658
0.017495	0.222195	0.174392	0.939626	1.849840	0.023060
0.018617	0.222088	0.185573	0.920573	1.968450	0.023751
0.019810	0.223358	0.197472	0.793051	2.094660	0.025296
0.021080	0.222425	0.210134	0.663511	2.228970	0.026008
0.022432	0.224379	0.223607	0.572808	2.371880	0.024633
0.023870	0.223470	0.237944	0.569460	2.523960	0.027298
0.025401	0.223963	0.253200	0.547937	2.685800	0.023197
0.027029	0.225492	0.269435	0.500123	2.858000	0.019851
0.028762	0.223884	0.286711	0.523963	3.041250	0.020424
0.030607	0.223730	0.305094	0.465136	3.236250	0.019541
0.032569	0.224009	0.324656	0.411709	3.443750	0.018569
0.034657	0.223051	0.345472	0.345325	3.664560	0.016986
0.036879	0.229421	0.367623	0.303053	3.899520	0.015281
0.039244	0.231705	0.391194	0.246512	4.149550	0.015714
0.041760	0.243196	0.416277	0.225487	4.415610	0.015636
0.044438	0.234502	0.442967	0.194178	4.698730	0.013916
0.047287	0.245567	0.471369	0.188988	5	0.011675
0.050319	0.244423	0.501593	0.187155	5.320590	0.010274
0.053545	0.220602	0.533754	0.198237	5.661730	0.009307
0.056979	0.236952	0.567977	0.192812	6.024750	0.008079
0.060632	0.242931	0.604394	0.143298	6.411040	0.006714
0.064520	0.257966	0.643146	0.106242	6.822110	0.005392
0.068656	0.249338	0.684384	0.082361	7.259520	0.004147
0.073058	0.300789	0.728265	0.064101	7.724990	0.003101
0.077743	0.245044	0.774959	0.055806	8.220300	0.002589
0.082728	0.269283	0.824648	0.051276	8.747370	0.002253
0.088032	0.308201	0.877523	0.045157	9.308230	0.001933
0.093676	0.289299	0.933788	0.039195	9.905050	0.001639
		0.993660	0.037917	10	0.001598



**Anexo 36.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Northridge2. Fuente: DEEPSOIL v.6.0.

<b>Terremoto Northridge2</b>		<b>Período (s)</b>	<b>PSA (g)</b>	<b>Período (s)</b>	<b>PSA (g)</b>
<b>Período (s)</b>	<b>PSA (g)</b>				
0.010	0.098511	0.099683	0.111497	1.057370	0.068112
0.010641	0.098529	0.106074	0.107151	1.125170	0.067050
0.011324	0.098517	0.112875	0.128106	1.197310	0.058062
0.012050	0.098501	0.120112	0.139663	1.274080	0.045494
0.012822	0.098533	0.127814	0.157834	1.355770	0.042437
0.013644	0.098609	0.136009	0.172057	1.442700	0.036488
0.014519	0.098627	0.144730	0.169148	1.535200	0.033449
0.015450	0.098650	0.154009	0.147171	1.633640	0.034263
0.016441	0.098619	0.163884	0.159185	1.738380	0.031306
0.017495	0.098716	0.174392	0.166257	1.849840	0.033420
0.018617	0.098774	0.185573	0.170326	1.968450	0.028274
0.019810	0.098902	0.197472	0.182515	2.094660	0.025924
0.021080	0.098790	0.210134	0.217241	2.228970	0.031917
0.022432	0.098885	0.223607	0.200841	2.371880	0.040047
0.023870	0.099199	0.237944	0.179889	2.523960	0.036121
0.025401	0.098526	0.253200	0.202232	2.685800	0.028533
0.027029	0.098589	0.269435	0.219516	2.858000	0.020272
0.028762	0.099447	0.286711	0.231023	3.041250	0.017161
0.030607	0.100359	0.305094	0.230462	3.236250	0.019458
0.032569	0.100595	0.324656	0.189685	3.443750	0.020769
0.034657	0.099718	0.345472	0.175494	3.664560	0.021292
0.036879	0.100357	0.367623	0.202626	3.899520	0.021078
0.039244	0.100930	0.391194	0.233638	4.149550	0.019343
0.041760	0.099900	0.416277	0.340405	4.415610	0.016347
0.044438	0.099913	0.442967	0.378833	4.698730	0.013748
0.047287	0.099467	0.471369	0.338836	5	0.011725
0.050319	0.100113	0.501593	0.264609	5.320590	0.010337
0.053545	0.098449	0.533754	0.238144	5.661730	0.009716
0.056979	0.099970	0.567977	0.207346	6.024750	0.009883
0.060632	0.099504	0.604394	0.193625	6.411040	0.010142
0.064520	0.100880	0.643146	0.204482	6.822110	0.010002
0.068656	0.101628	0.684384	0.204341	7.259520	0.009140
0.073058	0.100946	0.728265	0.161846	7.724990	0.007154
0.077743	0.108253	0.774959	0.132789	8.220300	0.005583
0.082728	0.110753	0.824648	0.115371	8.747370	0.004864
0.088032	0.111714	0.877523	0.098503	9.308230	0.004231
0.093676	0.115099	0.933788	0.083167	9.905050	0.003522
		0.993660	0.074563	10	0.003437

**Anexo 37.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto Parkfield. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto Parkfield		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)				
0.010	0.358797	0.099683	0.480398	1.057370	0.213175
0.010641	0.359506	0.106074	0.541192	1.125170	0.190142
0.011324	0.358926	0.112875	0.508916	1.197310	0.143722
0.012050	0.359105	0.120112	0.592965	1.274080	0.129553
0.012822	0.358992	0.127814	0.624377	1.355770	0.099641
0.013644	0.358999	0.136009	0.652691	1.442700	0.080086
0.014519	0.359936	0.144730	0.597891	1.535200	0.059102
0.015450	0.359434	0.154009	0.654709	1.633640	0.042758
0.016441	0.359435	0.163884	0.690935	1.738380	0.043715
0.017495	0.360168	0.174392	0.744368	1.849840	0.041944
0.018617	0.359371	0.185573	0.666031	1.968450	0.038492
0.019810	0.359615	0.197472	0.566624	2.094660	0.037221
0.021080	0.359902	0.210134	0.719421	2.228970	0.034510
0.022432	0.360235	0.223607	0.855964	2.371880	0.032078
0.023870	0.360568	0.237944	0.749730	2.523960	0.029456
0.025401	0.360831	0.253200	0.704739	2.685800	0.023168
0.027029	0.361086	0.269435	0.589283	2.858000	0.021990
0.028762	0.361498	0.286711	0.549286	3.041250	0.020158
0.030607	0.362112	0.305094	0.654154	3.236250	0.017910
0.032569	0.362726	0.324656	0.795917	3.443750	0.015472
0.034657	0.362512	0.345472	1.021552	3.664560	0.013052
0.036879	0.360737	0.367623	1.157679	3.899520	0.010764
0.039244	0.357264	0.391194	1.138232	4.149550	0.009668
0.041760	0.358057	0.416277	0.979526	4.415610	0.008883
0.044438	0.364437	0.442967	0.785325	4.698730	0.007900
0.047287	0.372544	0.471369	0.608380	5	0.008266
0.050319	0.384990	0.501593	0.481944	5.320590	0.007916
0.053545	0.396192	0.533754	0.398621	5.661730	0.007348
0.056979	0.404487	0.567977	0.316501	6.024750	0.007641
0.060632	0.417507	0.604394	0.237826	6.411040	0.007433
0.064520	0.408562	0.643146	0.206450	6.822110	0.006539
0.068656	0.411258	0.684384	0.193831	7.259520	0.005319
0.073058	0.411715	0.728265	0.164860	7.724990	0.004159
0.077743	0.458429	0.774959	0.155325	8.220300	0.003595
0.082728	0.470004	0.824648	0.146262	8.747370	0.002978
0.088032	0.419400	0.877523	0.153333	9.308230	0.002614
0.093676	0.422252	0.933788	0.170873	9.905050	0.002290
		0.993660	0.201916	10	0.002241

**Anexo 38.** Tabla de pseudo-aceleración del terremoto WittierNarrows. **Fuente:** DEEPSOIL v.6.0.

Terremoto WittierNarrows		Período (s)	PSA (g)	Período (s)	PSA (g)
Período (s)	PSA (g)	0.099683	0.348292	1.057370	0.025007
0.010	0.187631	0.106074	0.329252	1.125170	0.020401
0.010641	0.186934	0.112875	0.417568	1.197310	0.018100
0.011324	0.187054	0.120112	0.510415	1.274080	0.014714
0.012050	0.189445	0.127814	0.637493	1.355770	0.011111
0.012822	0.188535	0.136009	0.576477	1.442700	0.007958
0.013644	0.188662	0.144730	0.539902	1.535200	0.005943
0.014519	0.189007	0.154009	0.659997	1.633640	0.004647
0.015450	0.191026	0.163884	0.778596	1.738380	0.003767
0.016441	0.192953	0.174392	0.712355	1.849840	0.003075
0.017495	0.196756	0.185573	0.661309	1.968450	0.002544
0.018617	0.199838	0.197472	0.528088	2.094660	0.002192
0.019810	0.201568	0.210134	0.374452	2.228970	0.002024
0.021080	0.203391	0.223607	0.379934	2.371880	0.001798
0.022432	0.207772	0.237944	0.279626	2.523960	0.001550
0.023870	0.214461	0.253200	0.191068	2.685800	0.001311
0.025401	0.221198	0.269435	0.164458	2.858000	0.001102
0.027029	0.213746	0.286711	0.167335	3.041250	0.000928
0.028762	0.224756	0.305094	0.154245	3.236250	0.000794
0.030607	0.215001	0.324656	0.152495	3.443750	0.000695
0.032569	0.225977	0.345472	0.182415	3.664560	0.000614
0.034657	0.249587	0.367623	0.155790	3.899520	0.000543
0.036879	0.291584	0.391194	0.118106	4.149550	0.000480
0.039244	0.272529	0.416277	0.091499	4.415610	0.000424
0.041760	0.279043	0.442967	0.082357	4.698730	0.000375
0.044438	0.325518	0.471369	0.068409	5	0.000331
0.047287	0.371756	0.501593	0.048765	5.320590	0.000292
0.050319	0.382973	0.533754	0.044781	5.661730	0.000258
0.053545	0.406189	0.567977	0.045754	6.024750	0.000228
0.056979	0.471846	0.604394	0.044487	6.411040	0.000201
0.060632	0.564878	0.643146	0.035664	6.822110	0.000177
0.064520	0.507448	0.684384	0.031720	7.259520	0.000157
0.068656	0.446844	0.728265	0.033816	7.724990	0.000138
0.073058	0.366635	0.774959	0.030835	8.220300	0.000122
0.077743	0.318558	0.824648	0.028641	8.747370	0.000108
0.082728	0.288026	0.877523	0.028015	9.308230	0.000095
0.088032	0.297994	0.933788	0.024463	9.905050	0.000084
0.093676	0.308047	0.993660	0.025790	10	0.000082

## 8.6 Anexo F. Amplificación del suelo

Anexo 39. Tabla de función de amplificación. Fuente: Autores.

Nº	Período (seg)	PSA en Superficie (g)	PSA en Roca (g)	Amplificación del suelo
1	0.01	0.404362	0.224909	1.797894
2	0.010641	0.404349	0.225652	1.791913
3	0.011324	0.404506	0.226162	1.788566
4	0.012050	0.404719	0.227470	1.779219
5	0.012822	0.404995	0.228464	1.772682
6	0.013644	0.405837	0.229143	1.771108
7	0.014519	0.406807	0.230355	1.765999
8	0.015450	0.406776	0.231850	1.754475
9	0.016441	0.407181	0.233821	1.741423
10	0.017495	0.407974	0.235427	1.732911
11	0.018617	0.408775	0.241760	1.690826
12	0.019810	0.412505	0.251523	1.640028
13	0.021080	0.414178	0.250833	1.651210
14	0.022432	0.419159	0.256163	1.636297
15	0.023870	0.420797	0.258673	1.626753
16	0.025401	0.418324	0.261758	1.598133
17	0.027029	0.423029	0.263007	1.608434
18	0.028762	0.425837	0.264847	1.607864
19	0.030607	0.429277	0.267525	1.604624
20	0.032569	0.438791	0.279028	1.572570
21	0.034657	0.445013	0.282832	1.573417
22	0.036879	0.467089	0.295637	1.579942
23	0.039244	0.489924	0.305741	1.602413
24	0.041760	0.481901	0.302134	1.594992
25	0.044438	0.473841	0.303511	1.561200
26	0.047287	0.492417	0.305904	1.609714
27	0.050319	0.509795	0.321431	1.586017
28	0.053545	0.514477	0.331871	1.550229
29	0.056979	0.537182	0.346830	1.548836
30	0.060632	0.572793	0.351521	1.629470
31	0.064520	0.610920	0.364423	1.676404
32	0.068656	0.630486	0.354856	1.776737
33	0.073058	0.592171	0.344876	1.717056
34	0.077743	0.573541	0.338283	1.695446
35	0.082728	0.597683	0.347161	1.721632
36	0.088032	0.621640	0.364482	1.705543
37	0.093676	0.636679	0.368332	1.728548
38	0.099683	0.685200	0.377303	1.816046
39	0.106074	0.74365325	0.39143429	1.89981630

N°	Período (seg)	PSA en Superficie (g)	PSA en Roca (g)	Amplificación del suelo
40	0.112875	0.780463	0.409878	1.904136
41	0.120112	0.830546	0.438124	1.895687
42	0.127814	0.883752	0.458432	1.927770
43	0.136009	0.859913	0.454097	1.893677
44	0.144730	0.800858	0.469143	1.707064
45	0.154009	0.897038	0.542979	1.652070
46	0.163884	0.975327	0.594088	1.641720
47	0.174392	0.970615	0.583588	1.663185
48	0.185573	0.919244	0.535176	1.717648
49	0.197472	0.830047	0.472406	1.757062
50	0.210134	0.845791	0.470818	1.796431
51	0.223607	0.926149	0.490554	1.887965
52	0.237944	0.963328	0.483965	1.990492
53	0.253200	0.972346	0.461843	2.105358
54	0.269435	0.989832	0.428755	2.308618
55	0.286711	0.996843	0.419984	2.373527
56	0.305094	1.058083	0.414802	2.550816
57	0.324656	1.054921	0.418037	2.523511
58	0.345472	1.078192	0.413977	2.604475
59	0.367623	1.100768	0.433953	2.536609
60	0.391194	1.120155	0.451827	2.479168
61	0.416277	1.069472	0.449791	2.377708
62	0.442967	0.983665	0.441171	2.229670
63	0.471369	0.831383	0.392770	2.116717
64	0.501593	0.670265	0.328860	2.038146
65	0.533754	0.563972	0.304409	1.852677
66	0.567977	0.493652	0.276509	1.785300
67	0.604394	0.415810	0.244054	1.703763
68	0.643146	0.351913	0.226555	1.553319
69	0.684384	0.307740	0.207278	1.484677
70	0.728265	0.274742	0.189463	1.450109
71	0.774959	0.250899	0.176560	1.421041
72	0.824648	0.234769	0.172953	1.357419
73	0.877523	0.213836	0.157391	1.358627
74	0.933788	0.184071	0.136293	1.350552
75	0.993660	0.163242	0.128681	1.268580
76	1.057370	0.163122	0.131779	1.237849
77	1.125170	0.162257	0.135113	1.200899
78	1.197310	0.151847	0.128868	1.178310

N°	Período (seg)	PSA en Superficie (g)	PSA en Roca (g)	Amplificación del suelo
79	1.274080	0.137145	0.120134	1.141599
80	1.355770	0.131334	0.118813	1.105384
81	1.442700	0.119968	0.105184	1.140556
82	1.535200	0.104293	0.092269	1.130322
83	1.633640	0.092320	0.082225	1.122771
84	1.738380	0.081003	0.073421	1.103279
85	1.849840	0.070094	0.063692	1.100516
86	1.968450	0.062436	0.057008	1.095211
87	2.094660	0.054476	0.050918	1.069860
88	2.228970	0.049168	0.046312	1.061662
89	2.371880	0.046238	0.043607	1.060336
90	2.523960	0.042182	0.040006	1.054377
91	2.685800	0.038415	0.036154	1.062538
92	2.858000	0.036508	0.034461	1.059395
93	3.041250	0.037582	0.036376	1.033155
94	3.236250	0.036932	0.035696	1.034641
95	3.443750	0.033677	0.032698	1.029943
96	3.664560	0.030585	0.029781	1.027000
97	3.899520	0.027041	0.026084	1.036683
98	4.149550	0.024544	0.023625	1.038885
99	4.415610	0.021106	0.020495	1.029800
100	4.698730	0.019040	0.018400	1.034762
101	5	0.016834	0.016338	1.030348
102	5.320590	0.014667	0.014274	1.027542
103	5.661730	0.012940	0.012652	1.022747
104	6.024750	0.011332	0.011082	1.022555
105	6.411040	0.009924	0.009708	1.022267
106	6.822110	0.008736	0.008556	1.020970
107	7.259520	0.007610	0.007458	1.020440
108	7.724990	0.006554	0.006429	1.019574
109	8.220300	0.005825	0.005704	1.021117
110	8.747370	0.005175	0.005064	1.021847
111	9.308230	0.004506	0.004405	1.022792
112	9.905050	0.003914	0.003810	1.027237
113	10	0.003829	0.003728	1.027104

**8.7 Anexo G. Fotografías referente a la investigación**

(a)



(b)



(c)



(d)



**Anexo 40.** Fotografías tomada en la recolección de señales, (a) equipo de adquisición de señales, (b) nivelación del sismógrafo y ubicación en la dirección Norte, (c) recolección de señales en el punto IGG25, y (d) recolección de señales en el punto IGG26. **Fuente:** Autores.